

Resum

Aquest projecte s'ha d'entendre com una guia que transporta al lector per diversos camps d'estudi de la física i del seu entorn, com ara l'electrònica analògica i la fluidodinàmica, amb l'objectiu de dissenyar, construir i controlar un sistema que ha sigut proposat pel professorat.

El sistema constarà d'un PLC (Autòmat programable), que tindrà la tasca de controlar la tensió d'entrada d'un ventilador, que desplaçarà un flux d'aire capaç de moure una placa de metacrilat vertical per una guia graduada fins als graus establerts per consigna. Tots els elements utilitzats hauran sigut prèviament dissenyats i dimensionats.

El projecte té la intenció d'explicar de la forma més senzilla possible, el funcionament de totes les parts del sistema i la teoria de control necessària per al seu control. Així, pot ser agafat com a pauta per a qualsevol sistema que es vulgui controlar, ja que els punts principals es poden generalitzar a altres treballs.

Els punts principals que es tractaran al llarg d'aquestes línies seran:

- El hardware emprat, on s'analitzarà la funció i el funcionament de cada element.
- El software, entès com el calibrat de cada element i la programació de l'element que controlarà el sistema.
- El control del sistema, que s'implementarà seguint les premisses del control amb computador.

Finalment el lector interessat pot consultar la informació dels annexos, la qual complimenta la memòria a través d'esquemes, fitxes i documents que per motius d'extensió no s'han introduït a la memòria principal. Aquesta informació extra s'ha indexat apropiadament amb la part del projecte a la que fa referència.

Índex

RESUM	1
ÍNDIX	3
1. INTRODUCCIÓ	7
1.1. Objectius del projecte.....	7
1.2. Abast del projecte.....	8
1.3. Motivació	8
2. DESCRIPCIÓ DEL CONJUNT	9
2.1. Placa de metacrilat.....	9
2.2. Servomotor	10
2.3. Font d'alimentació 48V.....	11
2.4. Ventilador	12
2.5. Potenciòmetre	13
2.6. Adaptador de nivells. Amplificador.....	14
2.7. Adaptador de nivells. Reductor	15
2.8. Modulador PWM	16
2.9. Convertidor Freqüència – Tensió.....	18
2.10. Font d'alimentació +24V / +5V / +12V / -12V	19
3. ELECCIÓ DE COMPONENTS. PROVES DE FUNCIONAMENT	20
3.1. Placa de metacrilat.....	20
3.2. Servomotor (Maxon Motor Control ADS 50/5 Servoamplificador 4-Q-DC)...	20
3.3. Font d'alimentació (MW MeanWell SP-240-48)	20
3.4. Ventilador (ebm-papst 4114N/2H4)	20
3.5. Potenciòmetre (Novotechnik P2201 A502)	24
3.6. Adaptador de nivells. Amplificador.....	25
3.7. Esquema de connexió preliminar	28
3.8. Canvi general dels components del sistema	31
3.9. Ventilador (ebm-papst 4114N/2H7P).....	33
3.10. Adaptador de nivells. Reductor	35
3.11. Modulador PWM (Texas Instruments LM3524D).....	36
3.12. Convertidor Freqüència – Tensió.....	39
3.13. Font d'alimentació +24V / +5V / +12V / -12V (Emerson LPQ200-M)	42

4. HARDWARE DE CONTROL	43
4.1. Cablejat del hardware	45
4.2. Configuració i explotació del software	46
5. CONNEXIONAT	47
6. MODELAT TEÒRIC	49
6.1. Adaptador de nivells. Reductor.....	49
6.2. Modulador PWM	49
6.3. Velocitat Angular	50
6.4. Convertidor Freqüència – Tensió	53
6.5. Adaptador de nivells. Amplificador.	54
6.6. Cabal d'aire	55
6.7. Angle girat de la placa.....	61
6.7.1. Estàtica	61
6.7.2. Dinàmica.....	65
6.8. Model teòric del sistema	74
7. MODEL DE CONTROL	76
7.1. Velocitat Angular	76
7.1.1. Corba estàtica	78
7.1.2. Funció de transferència.....	80
7.2. Cabal d'aire	82
7.3. Angle girat de la placa.....	85
7.3.1. Corba estàtica	85
7.3.2. Corba Input_Angle - Angle.....	87
7.3.3. Funció de transferència.....	88
7.4. Model experimental del sistema	91
8. CONTROL	93
8.1. Validació del llaç de control de velocitat del ventilador	93
8.2. Validació del llaç de control de posició de la placa de metacrilat.....	95
8.2.1. Validació teòrica	95
8.2.2. Validació experimental	97
8.3. Controlador de velocitat	99
8.4. Controlador de posició	104
8.5. Resultats	108

ESTUDI ECONÒMIC	110
Costos laborals	110
Costos de producció i materials.	111
Costos indirectes	111
Altres costos	112
Pressupost	113
Cost de la substitució dels sistemes.....	114
ESTUDI D'IMPACTE AMBIENTAL	116
Disseny	116
Fabricació.....	116
Explotació.....	117
Fi de vida.....	118
CONCLUSIONS	119
AGRAÏMENTS	121
BIBLIOGRAFIA	122
Referències bibliogràfiques	122
Bibliografia complementària	124

1. Introducció

Abans d'entrar en matèria, es farà un breu incís dels objectius, motivacions i altres mencions prèvies del projecte.

1.1. Objectius del projecte

Com es veurà durant l'extensió del treball, l'objectiu principal s'estableix en modelar i controlar una planta des de zero, és a dir, dissenyar, construir, dimensionar, provar i controlar una planta al laboratori de control, amb tota la problemàtica que això comporta.

La realització del sistema està pensat per a què quan es finalitzi el prototip, el sistema pugui ser replicat entre 5 i 10 vegades per a substituir els actuals sistemes d'aprenentatge que existeixen al laboratori. La substitució és deguda a què els sistemes ja han superat la seva vida útil.

Seràn necessàries diverses etapes d'estudi, cadascuna dels quals pot considerar-ne una extensió de l'objectiu principal:

- Identificació, i compra dels elements necessaris del sistema.
- Etapa de dimensionament i proves dels diferents subsistemes.
- Connexió i validació dels elements definitius.
- Modelització teòrica i experimental dels elements.
- Disseny del controlador digital.
- Programació del software de control.

Com a objectiu secundari, es pretén seguir una pauta ordenada dels punts anteriors amb la intenció d'ajudar al lector a comprendre l'ordre de realització d'un projecte de similars característiques.

1.2. Abast del projecte

L'extensió del projecte està programat per abastar el desenvolupament de la planta i del seu control. Quan sigui oportú, s'informarà al lector de les possibles millores o modificacions que poden ser implementades, tant en l'etapa de hardware com en el software del controlador. Aquestes millores no s'han implementat, ja que hauria augmentat en gran mesura la duració del projecte.

S'arribarà a un prototip, que serà capaç de controlar-se mitjançant la programació d'un autòmat o PLC en el llenguatge propi d'aquest.

1.3. Motivació

La motivació que m'ha impulsat a realitzar aquest projecte és la de fer una síntesi de tots els coneixements apresos a la carrera, i més concretament als que intervenen en el control d'automatismes.

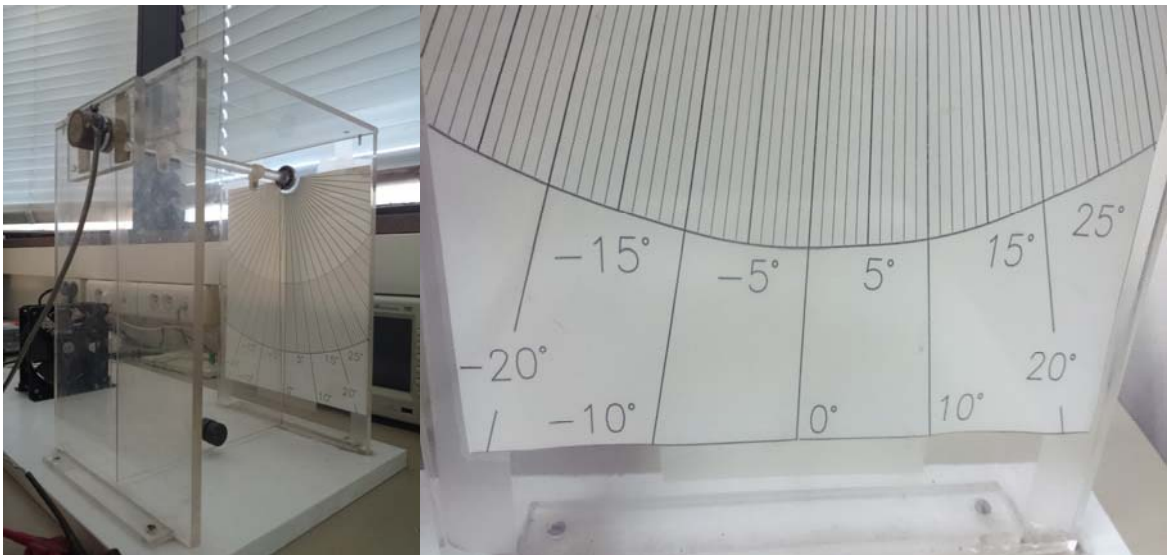
Al llarg de la carrera s'han presentat diverses problemàtiques, les quals hem après a resoldre mitjançant diverses eines i procediments de càlcul, físics, simulacions o d'altres naturaleses. Poso de manifest que han hagut assignatures centrades en les diferents etapes de l'automàtica, però mai una assignatura de la construcció i control d'una planta des de zero. És per aquesta raó que vull que aquest projecte quedi com la síntesi de tots aquests coneixements permetent-me la comprensió d'un sistema des del seu disseny fins al seu control.

2. Descripció del conjunt

En aquest punt, es farà referència a totes aquelles parts que compondran el sistema. Es descriurà la funció que cada component de manera independent i la funció que aquest adopta al muntatge del sistema. La interacció que existeix entre els diversos components serà tractada en els punts següents.

2.1. Placa de metacrilat

Funció: Aquesta construcció està feta de metacrilat, amb una barra central d'on penja una placa mòbil, també de metacrilat. La barra gira entorn el seu propi eix gràcies a dos coixinets instal·lats als seus extrems.



Il·lustració 1 - Estructura de metacrilat (esquerra) i escala de graus (dreta)

Funció al sistema: Aquest muntatge servirà per reconèixer el nombre de graus que es capaç d'empènyer el ventilador i, en el projecte, observar l'error entre la consigna i el valor real.

2.2. Servomotor

Funció: Aquest servomotor és un aparell de control i monitoratge de petits motors com el que s'utilitzarà al muntatge. Permet regular algunes de les magnituds característiques dels motors mitjançant diferents mètodes de control:

- *Voltatge:* Mètode de control en anell obert basat en la introducció d'un voltatge (consigna) al servomotor.
- *IxR:* Mètode de control basat en la monitorització del voltatge aplicat, que a més compensa possibles canvis bruscos de la càrrega, en aquest cas, el motor. Aquest mode treballa en anell tancat.
- *Tacho:* Mètode de control basat en la monitorització en anell tancat de la velocitat del motor.
- *Encoder:* Mètode de control basat en la monitorització en anell tancat de la velocitat del motor, fent ús de la capacitat de l'encoder de mesurar la posició.
- *Current:* Mètode de control basat en la monitorització en anell tancat del corrent del motor.



Il·lustració 2 - Servomotor

Més informació en l'ANNEX 01.

Funció al sistema: Al sistema, el servomotor estarà configurat en mode IxR sense la compensació de corrent, fent purament un control de voltatge en anell obert. Això és possible gràcies a la configuració dels microinterruptors del servomotor, concretament activant el numero tres. Aquest mode s'utilitzarà en aquesta primera fase per dimensionar el sistema, es a dir, establir quin dels motors és més òptim per al muntatge. Així s'escollirà un motor (al nostre cas, ventilador) que escombri un rang raonable de graus de la placa de metacrilat.

2.3. Font d'alimentació 48V

Funció: Actua com un transformador rebent corrent altern a 230V i 50Hz de la xarxa elèctrica i transformant-la en corrent continu a 48V. La tensió de sortida pot ser ajustada de 41 a 56V mitjançant un potenciòmetre integrat a la circuiteria. També, esta dotat d'un ventilador per la dissipació de la calor del circuit que s'activa quan l'interior arriba a cert límit de temperatura.



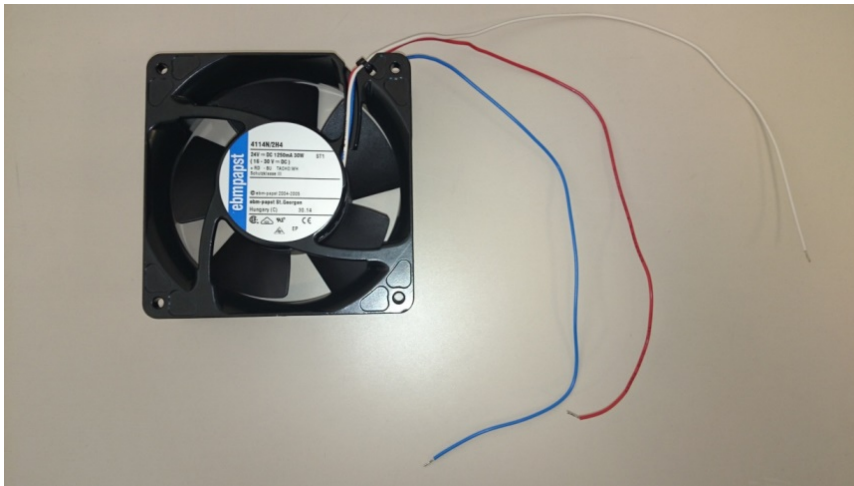
Il·lustració 3 - Font d'alimentació 48V

Més informació en l'ANNEX 02.

Funció al sistema: La seva funció al sistema es la de proporcionar-li l'energia necessària per funcionar.

2.4. Ventilador

Funció: El ventilador és un motor de corrent continu amb unes aspes acoblades al rotor. Com qualsevol motor, transforma el corrent continu introduït pels seus borns Vermell (+) i Blau (-) en moviment rotatori, però com que té aspes, el gir del rotor forma un flux d'aire, transformant l'energia cinètica del rotor en energia eòlica.

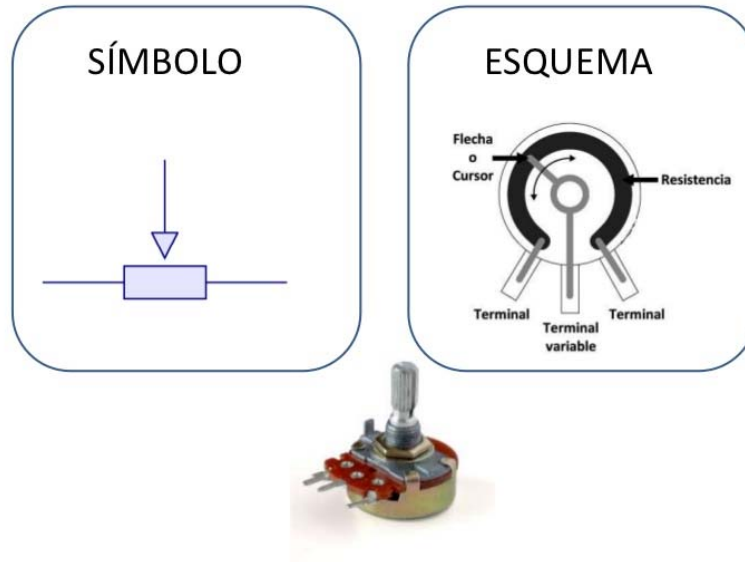


Il·lustració 4 - Ventilador

Funció al sistema: El ventilador escollit a les proves de dimensionament d'entre els models disponibles, s'encarregarà d'aplicar la força necessària a la placa de metacrilat per moure-la un rang raonable de graus. Aquest element farà la funció d'actuador al sistema.

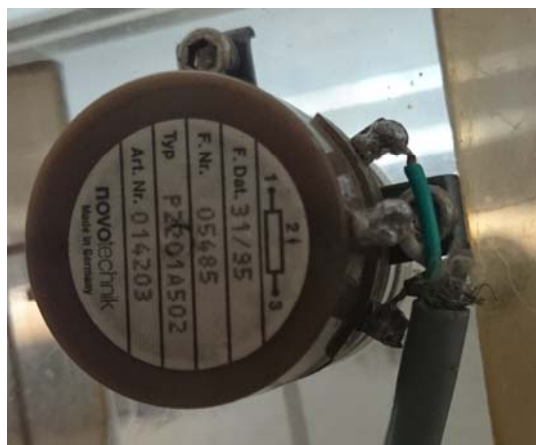
2.5. Potenciòmetre

Funció: Un potenciòmetre és una resistència variable, molt útil en sistemes de control per poder llegir la diferència de potencial d'aquest element i actuar en conseqüència.



Il·lustració 5 – Esquema potenciòmetre

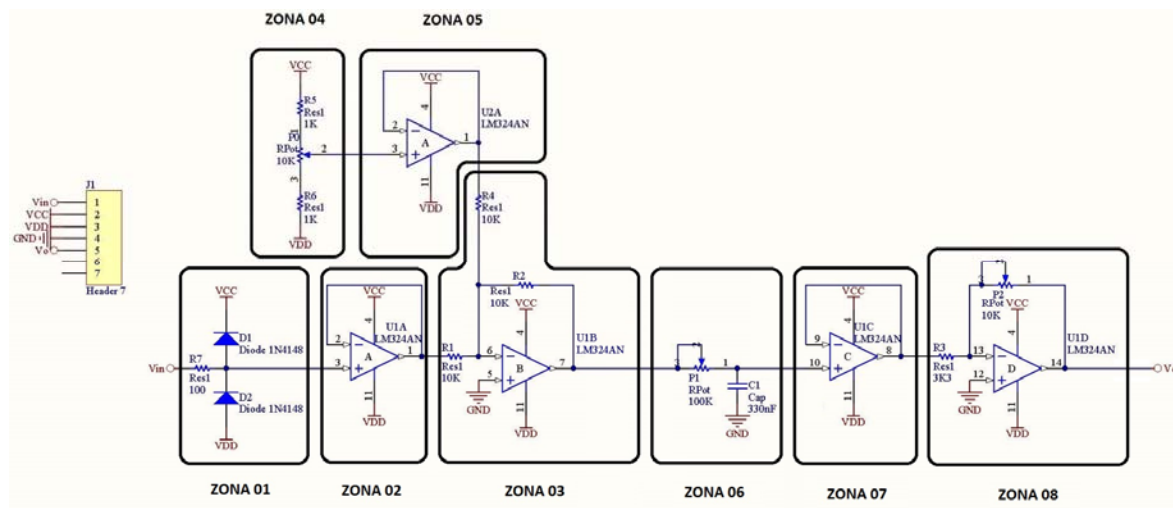
Funció al sistema: El potenciòmetre escollit farà la funció de sensor, es a dir, llegir l'angle de la placa de metacrilat. Aquesta mesura serà en forma d'una tensió que llegirà l'ordinador i el transformarà a angle segons uns paràmetres que s'establiran. Per aquest cas, és idoni, l'ús d'un potenciòmetre circular. Més informació en l'ANNEX 03.



Il·lustració 6 - Potenciòmetre real del sistema

2.6. Adaptador de nivells. Amplificador

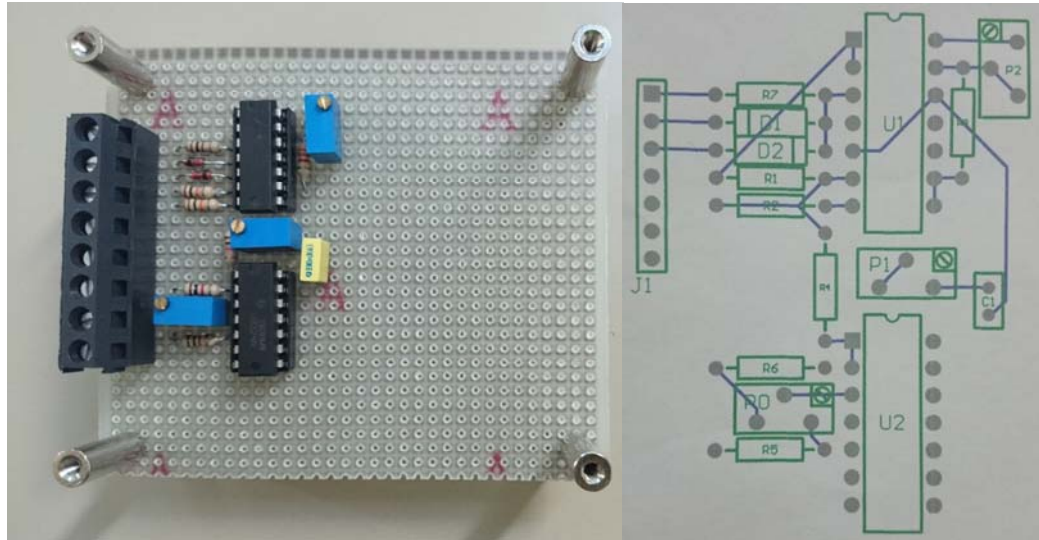
Funció: L'adaptador de nivells és un petit circuit, en el que s'han disposat diverses resistències i amplificadors operacionals amb la fi d'adaptar uns nivells de tensió d'entrada en uns altres de sortida. El seu esquemàtic és el següent:



Il·lustració 7 - Esquemàtic de l'amplificador de nivells

Es poden veure diversos esquemes de l'amplificador més àmpliament a l'ANNEX 04.

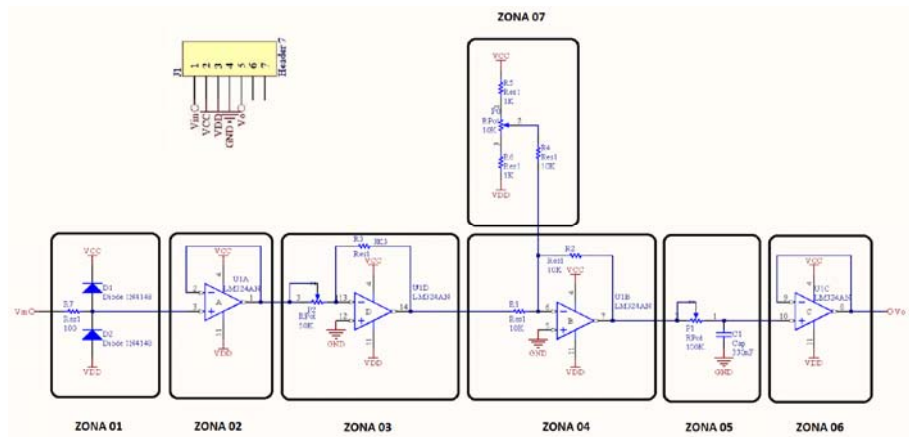
Funció al sistema: Com ja es veurà més endavant, aquest component adaptarà els nivells de tensió que ens donarà el potenciòmetre en uns altres mas grans i adaptats als nivells de tensió de l'entrada del PLC. La finalitat d'introduir aquest element és la d'amplificar tot el possible els rangs de tensió per a què l'autòmat pugui fer una bona quantificació del valor del potenciòmetre.



Il·lustració 8 - Placa prototip de l'amplificador (esquerra) i esquema de connexió (dreta)

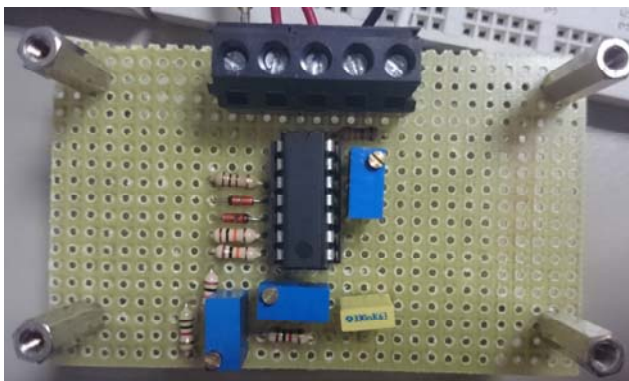
2.7. Adaptador de nivells. Reductor

Funció: La funció d'aquest adaptador és la mateixa que la de l'adaptador vist anteriorment, és a dir, la d'adaptar uns nivells de tensió d'entrada en uns altres de sortida, però la finalitat aquest cop no és la d'amplificar, sinó la de reduir el nivell de tensió.



Il·lustració 9 - Esquemàtic del reductor de nivells

Es poden veure diversos esquemes del reductor de tensió més àmpliament a l'ANNEX 05.

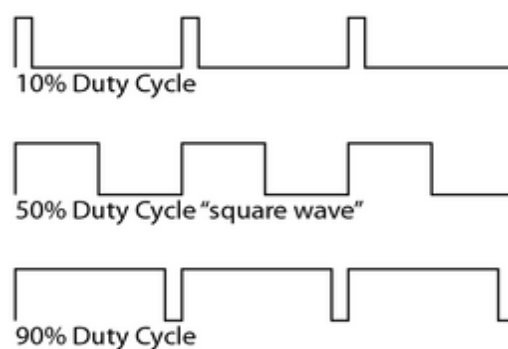


Il·lustració 10 – Circuit prototip del reductor de nivells

Funció al sistema: Aquest component adaptarà els nivells de tensió que injectarà l'autòmat en uns altres mas petits i adaptats als nivells permesos de tensió de l'entrada del modulador PWM. La finalitat d'introduir aquest element és la d'aprofitar tot el possible el rang de tensió de sortida de l'ordinador.

2.8. Modulador PWM

Funció: Un modulador PWM és un circuit electrònic que forma, a partir d'un senyal constant d'entrada, un senyal quadrat de període constant i amb un determinat "duty cycle" o cicle de treball. A continuació es mostra gràficament el funcionament del modulador:



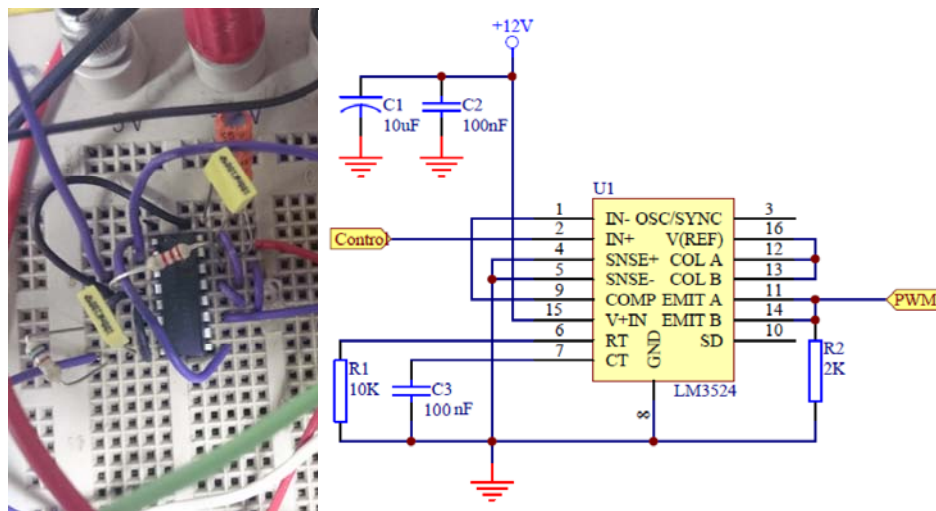
Il·lustració 11 - Progrés del cicle de treball ("*Duty Cycle*")

On la imatge superior correspon a un 10% de cicle de treball, la central al 50% i la inferior al 90%. L'augment d'aquest cicle de treball serà degut a l'augment del senyal constant d'entrada. Com a particularitat, el senyal amb un 50% de cicle de treball correspon a un senyal quadrat.

Teòricament el cycle de treball D s'expressa com:
$$D = \frac{\tau}{T} \quad (2.8.1)$$

On τ és el temps que el senyal es manté al nivell alt en un mateix període i T el període del senyal. D'aquí que sigui un valor entre 0 i 1.

A continuació es mostra el circuit real junt a l'esquemàtic:



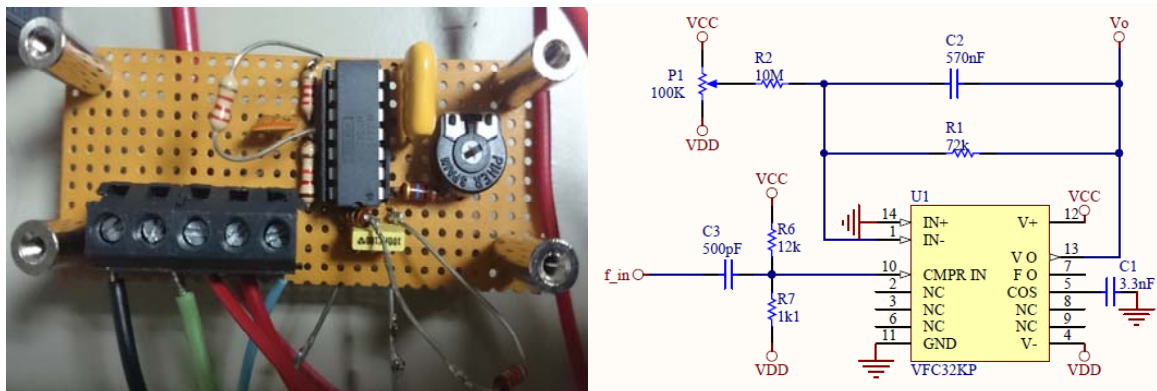
Il·lustració 12 - Modulador PWM

Es pot trobar més informació a l'ANNEX 06

Funció al sistema: Un modulador de PWM extern serà necessari per al comandament de ventiladors que no tinguin l'etapa de commutació integrada.

2.9. Convertidor Freqüència – Tensió

Funció: Com el nom indica, el convertidor freqüència – tensió transforma un senyal periòdic en un altre continu. A continuació es mostra una foto real del circuit resultant, així com el seu esquemàtic:



Il·lustració 13 - Convertidor Freqüència - Tensió

Més informació a l'ANNEX 07.

Funció al sistema: Serà especialment útil aquest circuit, connectat a la sortida del tacòmetre del ventilador. Proporcionant una tensió que pot ser llegida i quantificada pel PLC.

2.10. Font d'alimentació +24V / +5V / +12V / -12V

Funció: Així com la font de tensió del punt 2.3, actua com un transformador rebent corrent altern a 230V i 50Hz de la xarxa elèctrica i transformant-la en corrent continua. Aquest cop, la font està preparada per donar diverses sortides de tensió al mateix temps, es a dir, +24V, +5V, +12V, -12V i massa.



Il·lustració 14 - Font d'alimentació +24V / +5V / +12V / -12V

Més informació en l'ANNEX 08.

Funció al sistema: La seva funció al sistema és la de proporcionar-li l'energia necessària per funcionar. Als seus ports amb diferents tensions s'alimentaran tots els elements del sistema, fent innecessària la utilització d'altres fonts externes, com era el cas amb la font del punt 2.3.

3. Elecció de components. Proves de funcionament

En aquesta secció, estan descrites totes aquelles proves prèvies al muntatge final amb l'objectiu d'analitzar la compatibilitat real de tots els elements que conformen el sistema.

3.1. Placa de metacrilat

La placa anteriorment exposada, ha sigut reutilitzada d'un projecte final de carrera anterior, però com es veurà més endavant, es repararà de nou seguint la mateixa mecànica.

3.2. Servomotor (Maxon Motor Control ADS 50/5 Servoamplificador 4-Q-DC)

El ADS 50/5 és un potent servoamplificador per al control de motors de corrent contínua fins a 250W el qual té diversos mètodes de control i sortides de monitorització. Més que suficient per a l'ús que se li donarà. Ha estat proposat pel professorat i tots els altres components seran triats per a què siguin compatibles amb aquest. *ANNEX 01.*

3.3. Font d'alimentació (MW MeanWell SP-240-48)

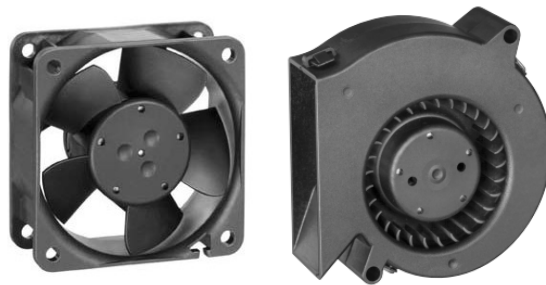
Dintre de la llista de productes de MW MeanWell, una coneguda marca de fonts d'alimentació, s'ha triat la més adient pel sistema. Oferint 48V de tensió i una sortida màxima de 5A, és a dir uns 240W, aproximadament la potència màxima dels motors compatibles amb el servomotor. *ANNEX 02.*

3.4. Ventilador (ebm-papst 4114N/2H4)

En la recerca d'un actuator ideal pel sistema s'ha trobat una gama de ventiladors axials de la marca ebm-papst, important empresa en l'indústria de la ventilació.

Així, per triar aquest element se li han donat una sèrie d'especificacions al ventilador per tal de dimensionar-lo al sistema que tenim fins ara. Són les següents:

- Ha de ser un ventilador que funcioni a corrent continu, degut a que el servomotor li donarà un senyal de forma contínua.
- Els rangs de voltatge, intensitat i en definitiva la potència consumida pel ventilador a plena càrrega, ha d'estar en nivells inferiors a la que pot injectar el servomotor.
- Les dimensions no són un gran problema, ja que les mides de la placa de metacrilat ja donen suficient marge per provar molts tipus de ventiladors. Però no hauria de ser més gran de 230x280mm, espai màxim reservat pel flux d'aire.
- En quant el tipus de ventilador, existeixen generalment al mercat dos tipus, els axials i els centrífugs.



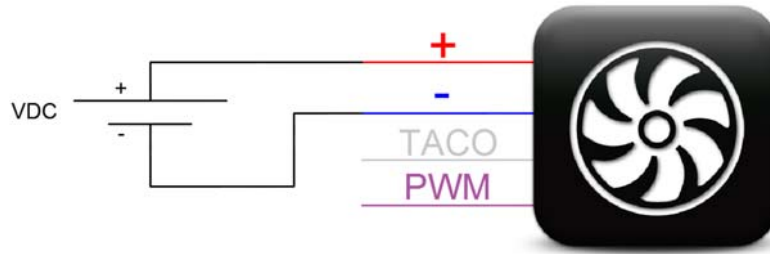
Il·lustració 15 - Ventilador axial (esquerra) i centrífug (dreta)

S'ha observat que obstaculitzar l'entrada d'aire del ventilador pot fer distorsionar mesures o el propi comportament del ventilador variant el flux d'aire o formant turbulències innecessàries. Per aquesta raó, s'ha triat un tipus de ventilador amb el qual fos més còmode fer el muntatge i no dificultés les proves, l'axial.

Finalment s'han triat un parell de ventiladors que compleixen aquestes característiques, a més d'incorporar altres entrades i sortides d'interès pel projecte:

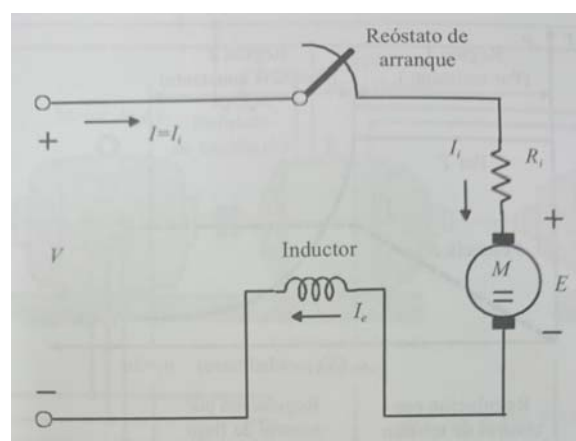
- Ventilador Gran 5314/2TDHP amb control de PWM d'entrada (cable Lila) i senyal de tacòmetre de sortida (Blanc). Fitxa a l'ANNEX 09.
- Ventilador Petit 4114N/2H4 i senyal de tacòmetre de sortida (Blanc). Fitxa a l'ANNEX 10.

Per tal de triar un dels dos ventiladors pel sistema, s'han posat en marxa mitjançant una font externa del laboratori. Tant el gran com el petit, són perfectament capaços d'empènyer la placa de metacrilat disposada al laboratori un rang vàlid de graus, per aquesta raó els dos passen la primera prova.



Il·lustració 16 – Esquema de connexió de la primera prova

L'últim pas per decantar-se per un ventilador o l'altre, es provar-lo essent alimentat pel servomotor, per aquesta raó, s'ha muntat el connexionat descrit al llibre d'instruccions del servomotor, sempre amb el mode IxR sense compensació de la intensitat per un control exclusivament de voltatge. ANNEX 01. Per aquest connexionat, ha fet falta una resistència variable, o potenciòmetre extra de 10kΩ, segons fitxa tècnica, per a regular l'entrada del "Set Value". Aquesta entrada, és la responsable d'injectar més o menys tensió als borns del ventilador, i per tant, la velocitat. Es recorda que en el funcionament bàsic dels motors de corrent continu, en aquest cas del ventilador, en termes de l'estat estacionari la tensió d'alimentació és proporcional a la velocitat. Altrament, la intensitat de l'induit és proporcional al parell que es capaç de donar el ventilador.



Il·lustració 17 - Esquema modelització motor de corrent continu d'excitació en sèrie

Prenent les fórmules desenvolupades de l'estudi d'una màquina de corrent continua [1]:

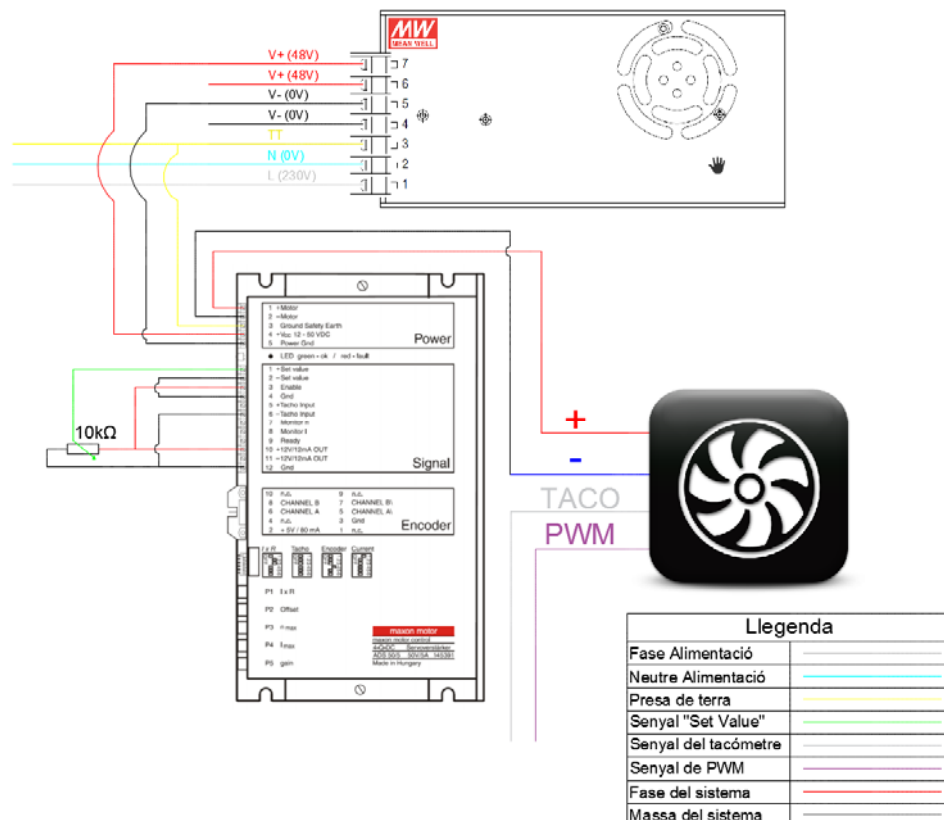
$$V = E + R_i I_i \quad E = \frac{n}{60} Z \Phi \frac{p}{c} \quad T = \frac{1}{2\pi} \frac{p}{c} Z \Phi I_i \quad (3.4.1)$$

On $K_E = \frac{Z p}{60 c}$ i $K_T = \frac{Z p}{2\pi c}$ són constants determinades per a cada motor. I considerant constant el flux magnètic per pol Φ , es troben les següents expressions:

$$n = \frac{V - R_i I_i}{K_E \Phi} \quad T = K_T I_i \Phi \quad (3.4.2)$$

Demostrant les proporcionalitats abans comentades.

El resultat llavors, serà un sistema de control de velocitat en llaç obert on la consigna se li dona amb el potenciòmetre, que varia el valor de la resistència i per tant, la tensió d'alimentació. A continuació es presenta l'esquema de connexionat a seguir per poder recrear aquesta prova:



II·lustració 18 – Esquema de cablejat per a les proves dels ventiladors

Per més detall es recomana anar a l'*ANNEX 11*.

A la prova, s'han presentat els següents resultats:

- Ventilador Gran 5314/2TDHP. Aquest ventilador ha estat descartat, ja que en introduir-ho al muntatge no s'encén. La raó és perquè el ventilador té un port d'entrada per pwm, i no es pot connectar al servomotor. A més, el ventilador opera en commutació d'uns transistors, els quals estan integrats dins l'electrònica del ventilador. Altrament, el servomotor també disposa d'aquesta electrònica, cosa que fa que estigui per duplicat. Així que es connecta el circuit, una protecció del servomotor s'activa, aturant-lo i deixant-lo en estat d'error.
- Ventilador Petit 4114N/2H4. El segon candidat és l'idoni pel treball, ja que no té l'electrònica que tenia el ventilador gran i el servomotor l'accepta per tot el rang de treball. Així doncs, aquest ventilador és el que s'ha triat per continuar amb el projecte.

L'últim pas per a començar a utilitzar el ventilador és la de calibrar-lo mitjançant el mètode explicat en la fitxa del servomotor (*ANNEX 01*), en l'apartat ajust dels potenciòmetres. On es pot ajustar paràmetres com la velocitat màxima i mínima per un determinat valor de consigna, limitadors de corrent, etc.

3.5. Potenciòmetre (Novotechnik P2201 A502)

Es molt important que el sensor del projecte sigui capaç de donar una bona lectura. Per aquest motiu, s'ha optat per utilitzar un tipus de potenciòmetre amb un baix coeficient de fricció que permet una dinàmica més fluida. *ANNEX 03*.

Al mercat ens trobem que no hi ha masses marques que treballin amb aquest tipus especials de potenciòmetres, uns exemples son marques com ara Novotechnik o Altmann.

Així s'ha aprofitat un potenciòmetre que es tenia al laboratori i que resulta ser una opció de Novotechnik de 5k Ω de resistència nominal. Així, s'adaptarà el que sigui necessari per tal de fer-ho compatible amb el sistema.

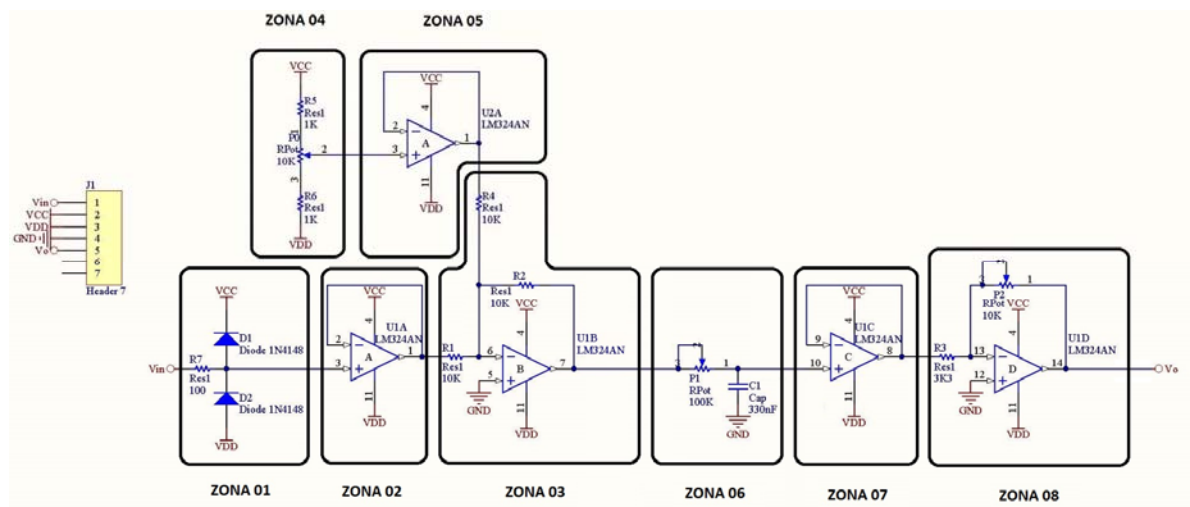
Seria convenient unificar totes les fonts de tensió en només una, la que alimenta el servomotor, d'aquesta manera s'evita l'ús d'altres fonts de tensió externes. Per aquesta raó, s'utilitzaran els ports de +12V i -12V del servomotor per alimentar el potenciòmetre.

3.6. Adaptador de nivells. Amplificador.

L'adaptador de nivells ha estat dissenyat pensant en les següents especificacions:

- Per a l'alimentació, es farà servir les sortides +12 i -12 del servomotor amb la intenció d'unificar totes les fonts del sistema
- El senyal d'entrada de l'adaptador, que vindrà del potenciòmetre, estarà compresa en un rang d'entre +12 i -12 volts, ja que l'alimentarem del mateix lloc que l'adaptador.
- A més, l'adaptador tindrà dos potenciòmetres com a mínim, que faran les funcions d'amplificació i "offset". Així, es podrà calibrar la sortida de l'adaptador centrant-lo en un rang determinat.
- La sortida estarà limitada per la tensió d'entrada al PLC, on totes les seves entrades i sortides analògiques tindran un rang de -10V a +10V. Això seran doncs, uns 20 volts.

Entrant més en detall, el circuit està dissenyat a partir dels següents components:



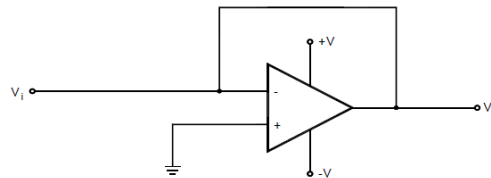
Il·lustració 19 - Esquemàtic de l'amplificador de nivells

- Protecció contra inversions de polaritat. Zona 01 de l'esquema.

Serveix per protegir el circuit contra la connexió invertida dels pols. Aquest circuit treballa amb tensions d'entrada positives, negatives i massa, per lo que invertir la polaritat podria fer malbé els amplificadors operacionals. A més actua com a protecció contra sobretensions per al cas de què s'introduís una tensió d'entrada més gran que +12V o més petita que -12V, ja que en aquest cas el circuit deixaria de conduir.

- Seguidor de tensió. Zona 02, 05 i 07.

El seguidor de tensió manté constant el valor de la tensió que el travessa, és a dir, la seva sortida és sempre igual a la tensió d'entrada independentment de la càrrega que se li connecti després.

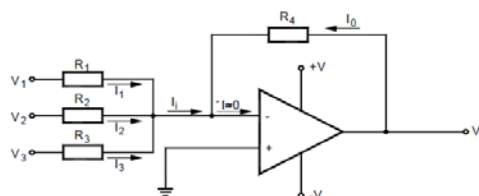


Il·lustració 20 - Seguidor de tensió

$$V_o = V_i \quad (3.6.1)$$

- Sumador inversor. Zona 03.

Aquest circuit suma els diferents valors de tensió de les entrades, amb una desviació regida per les resistències. Si totes les resistències són iguals, és un sumador inversor pur.



Il·lustració 21 - Sumador inversor

On la funció de sortida és:
$$V_o = -R_4 \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} \right) \quad (3.6.2)$$

i expressant
$$\Delta_{v1} = -\frac{R_4}{R_1} \quad \Delta_{v2} = -\frac{R_4}{R_2} \quad \Delta_{v3} = -\frac{R_4}{R_3} \quad (3.6.3)$$

Resulta:
$$V_o = \Delta_{v1} \cdot V_1 + \Delta_{v2} \cdot V_2 + \Delta_{v3} \cdot V_3 \quad (3.6.4)$$

- Potenciòmetre encarregat de variar l'offset. Zona 04.

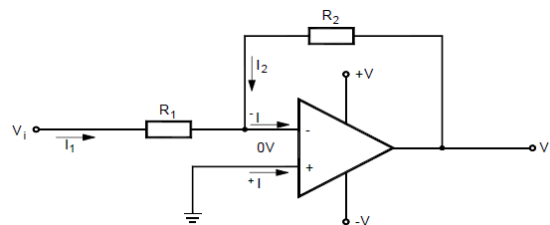
Aquest potenciòmetre fa variar la tensió que rep el sumador inversor, fent variar l'offset del senyal d'entrada. L'objectiu cara el calibratge de l'adaptador és el de centrar el senyal fixant el que serà el punt mig de tensió.

- Filtre passa-baixos. Zona 06.

Aquest filtre deixa passar les freqüències baixes i anul·la en certa mesura les freqüències altes, es a dir, el soroll que hi pugui haver al senyal.

- Amplificador inversor. Zona 08.

Aquesta etapa s'encarrega d'amplificar el rang del senyal, el qual ja està centrat al punt mig desitjat. A més, torna a invertir el senyal expressant-lo correctament a la sortida de l'adaptador.



Il·lustració 22 - Amplificador inversor

On la funció de sortida és:
$$V_o = -\frac{V_i}{R_1} \cdot R_2 \quad (3.6.5)$$

I el guany de l'amplificador:
$$\Delta V = \frac{V_o}{V_i} = \frac{-\frac{V_i}{R_1} \cdot R_2}{V_i} = -\frac{R_2}{R_1} \quad (3.6.6)$$

Una particularitat de l'adaptador és la de poder variar el guany d'amplificació modificant el quocient $-\frac{P_2}{R_3}$, (il·lustració 19). Doncs bé, per la primera versió de l'adaptador, es va instal·lar un potenciòmetre de $10k\Omega$ com a P_2 i una R_3 de $3.3k\Omega$ que correspon a un guany absolut de $|\Delta V| = \frac{P_2}{R_3} = \frac{10}{3.3} = 3.03$. Això significa que el senyal d'entrada es veurà amplificat

3,03 vegades com a màxim, sempre i quan, els amplificadors operacionals no saturin. A més, el guany es pot reduir manualment si disminuïm el valor del potenciòmetre.

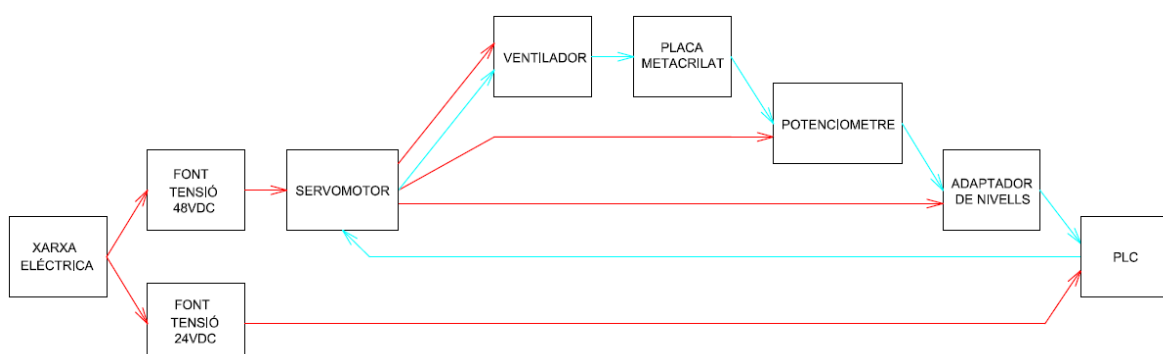
En una segona versió de l'adaptador, la resistència R_3 passa a tenir un valor de $1.8k\Omega$, que correspon a una amplificació de 5.56 vegades el valor d'entrada.

D'aquesta manera, s'ha dissenyat l'adaptador de forma que està centrat en el rang de tensions que van des dels 0° fins als 30° aproximadament, on la diferència de potencial entre aquests dos angles sense l'actuació de la placa adaptadora no supera els 2 volts. Així, es pot utilitzar l'adaptador per ampliar aquests 2 volts a un valor on el PLC aprofiti tot el seu rang de valors d'entrada que li sigui possible, en aquest cas uns 20V.

3.7. Esquema de connexionat preliminar

En aquest punt, es pretén donar una idea més clara de com estan interconnectats tots els elements que s'han tractat fins ara així com altres consideracions a tenir en compte a partir d'ara.

A continuació es mostra un diagrama de blocs on es veu l'estat en què es pretén connectar tots els elements. S'observa la inclusió del PLC com a controlador del sistema (ANNEX 12), element el qual es tractarà amb més detall en el punt 4.

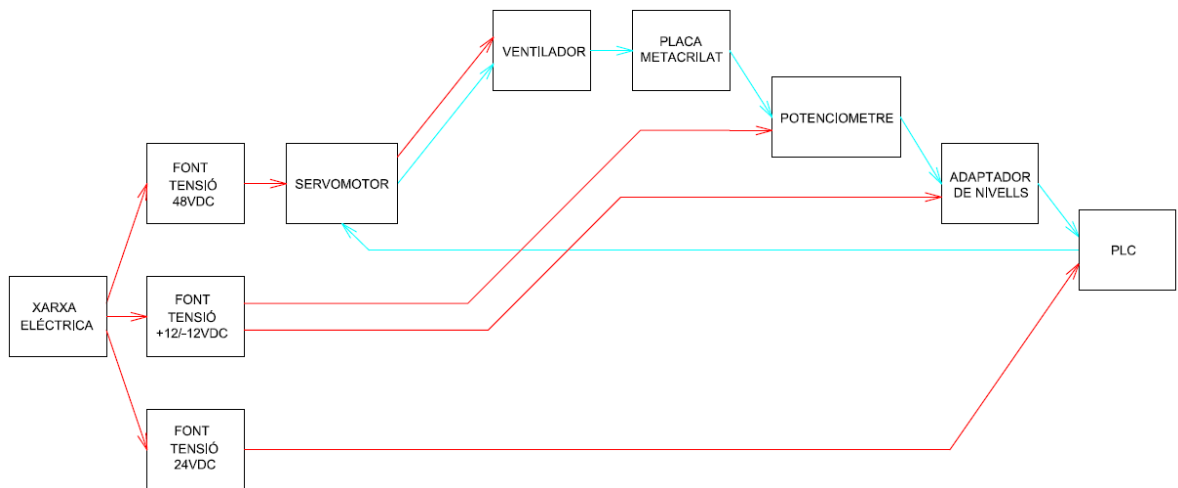


Il·lustració 23 – Diagrama de blocs objectiu. Alimentació (vermell). Senyal (blau)

Malauradament després de connectar l'alimentació de l'adaptador i el potenciòmetre directament del servomotor als seus ports de +12V i -12V, el sistema passa a treballar en un estat perjudicial per sí mateix. La tensió dels ports del servomotor es redueixen a +5V / -5V. Aquesta situació anòmla es produeix quan una font no és capaç de donar tot el corrent que la càrrega demana.

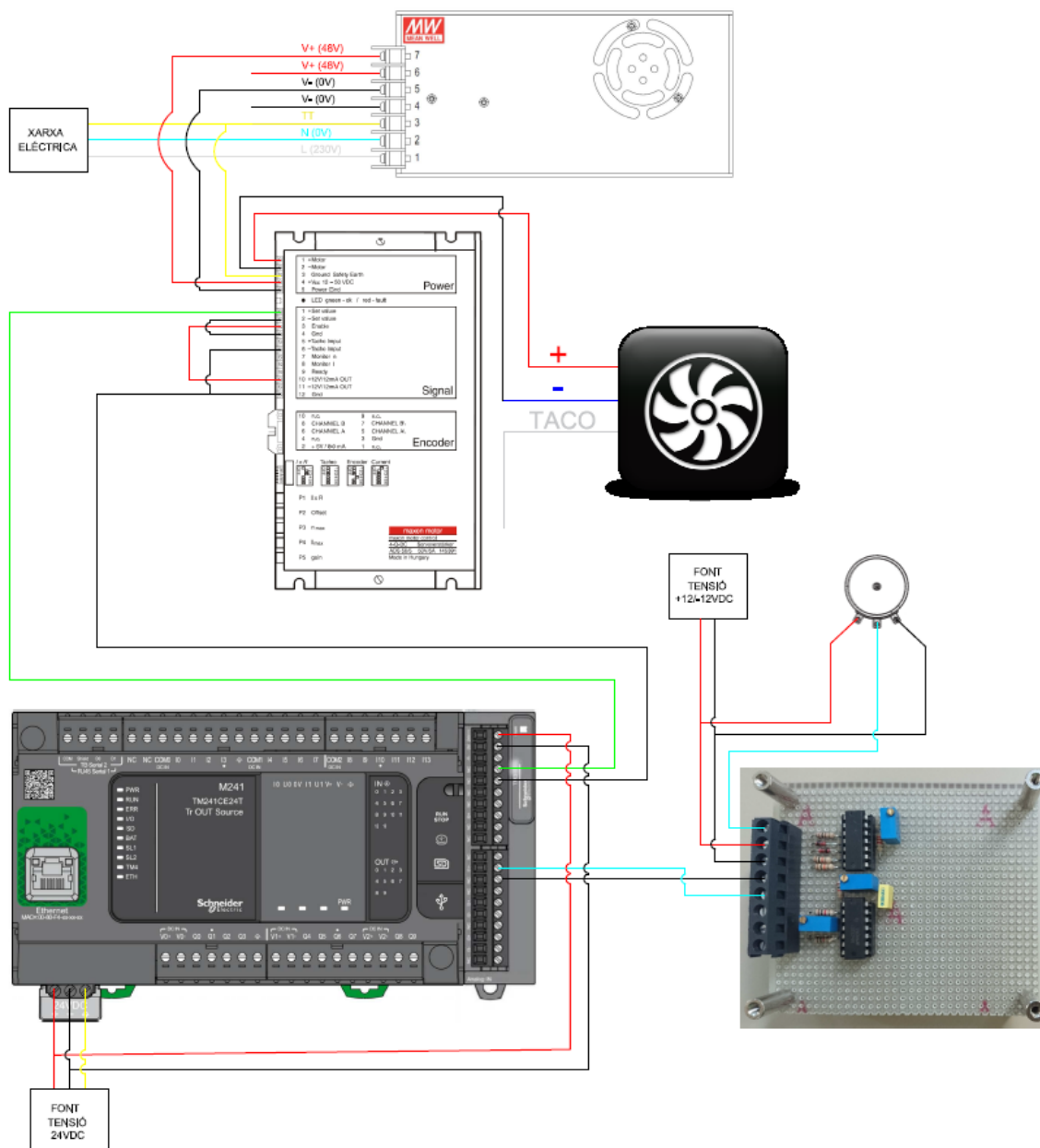
Després de considerar la inclusió de resistències que disminueixin aquest corrent i en diverses configuracions sense èxit, s'ha optat per utilitzar una font externa només per l'adaptador i el potenciòmetre.

Així, modificant el diagrama de blocs introduint una font més, s'arriba a l'esquema de blocs d'un sistema el qual ja pot ser sotmès a les proves pertinents de control. ANNEX 13.



Il·lustració 24 - Diagrama de blocs corregit. Alimentació (vermell). Senyal (blau)

On, a continuació queda representat tot l'esquema de connexionat dels elements del sistema. Per més detall es recomana anar a l'ANNEX 14.



Il·lustració 25 - Esquema de connexionat

3.8. Canvi general dels components del sistema

En aquests moments, el sistema es considera funcional i llest per a començar amb les proves de control, però en començar aquestes proves es planteja un problema amb el senyal del tacòmetre del ventilador.

Per a controlar els graus de la placa de metacrilat, només és necessari recollir les dades de la tensió del sensor, que seran tractades pel PLC, però seria molt útil i interessant aprofitar la senyal de la velocitat del tacòmetre per introduir-la a l'estudi de control com un altre llaç tancat de manera que serveixi com a primera i més ràpida aproximació al valor de consigna.

Doncs bé, s'ha trobat un impediment per a l'obtenció del senyal de la velocitat. Per alguna raó desconeguda, el senyal no surt com hauria de sortir, ja que acumula molt de soroll.

El senyal del tacòmetre hauria de veure's com a la figura de l'esquerra, però el senyal actual forma una distorsió com la que s'observa a la figura de la dreta:



Il·lustració 26 - Senyal tacòmetre (esquerra) i senyal distorsionat (dreta)

Es pensa que això és a causa del senyal d'alimentació que li arriba del servomotor. Com s'ha explicat anteriorment, el ventilador funciona a través d'un mecanisme electrònic de commutació de diversos transistors, aquest mecanisme està inclòs al servomotor.

Recordant el ventilador que va estar descartat, el ventilador gran 5314/2TDHP, aquest ventilador disposava d'una entrada de PWM a més de l'entrada d'alimentació. Aquest ventilador funciona amb una entrada d'alimentació constant, i es controla la seva velocitat variant el cicle de treball de l'entrada PWM, és a dir, el mecanisme de commutació ja existeix dintre del ventilador, per lo que el ventilador disposa del senyal d'alimentació (Potència), i la

de PWM (Senyal). D'aquest senyal de PWM deriva, després de ser tractada, el senyal del tacòmetre.

Així doncs, tornant al ventilador instal·lat al muntatge, aquest no té entrada de PWM per el que la seva entrada és un senyal de PWM de potència, no de senyal com abans era el cas, per aquesta raó, el senyal del tacòmetre deriva d'un senyal de potència tractada i d'on resulta el senyal distorsionat de la figura anterior (il·lustració 26).

Llavors, el senyal de la velocitat no està disponible per poder ser llegida correctament pel PLC, i a més, l'objectiu de fer funcionar tot el muntatge amb una sola font de tensió tampoc s'ha complert, ja que són necessàries finalment, tres fonts de tensió, per al PLC, pel conjunt servomotor ventilador i la font de l'adaptador i el potenciòmetre.

Aquestes dues raons, són motius de pes per pensar en millorar el sistema. Per aquest motiu, seran necessaris diversos canvis al muntatge, enumerats a continuació:

- El ventilador serà substituït per un altre model amb entrada de PWM perquè no es repeteixi la problemàtica del tacòmetre.
- A causa del canvi de ventilador, el servomotor no serà compatible, per tant serà també substituït per un circuit que genera un senyal de PWM, anomenat modulador de PWM.
- Ja que ara el senyal de tacòmetre serà generat correctament, serà necessari una circuit analògic que transformi la freqüència del senyal en un senyal constant que pugui llegir el PLC.

Als punts següents es tractaran amb més detall aquests circuits i altres etapes d'adaptació necessàries que ja han estat presentades al punt 2.

3.9. Ventilador (ebm-papst 4114N/2H7P)

Com a primera modificació important esta el canvi del ventilador ebm-papst 4114N/2H4 per un ventilador amb control de PWM. Una opció és el ventilador gran amb PWM de les proves preliminars. Una altra opció és la de substituir-lo per un altre que és igual que l'actual en dimensions, que té control de PWM i que, per altra banda es van fer proves paral·lelament amb el nou sistema de control.

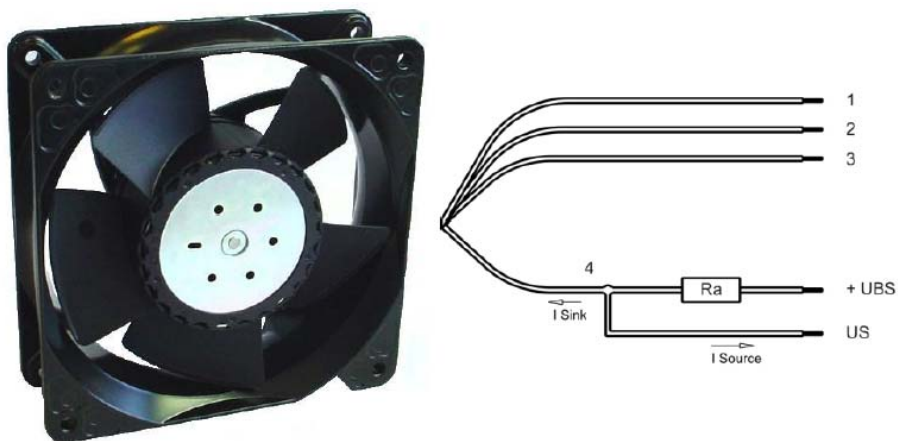
Ja que a aquestes proves els nous components són compatibles, el ventilador definitiu serà el ebm-papst 4114N/2H7P. ANNEX 15.



Il·lustració 27 - Ventilador definitiu ebm-papst 4114N/2H7P

Doncs bé, ja que en aquest ventilador s'utilitzarà el senyal del tacòmetre, és necessària la connexió d'una resistència pull-up per a generar el senyal típic d'un tacòmetre (Il·lustració 28). Aquesta resistència ha sigut definida de la següent manera:

L'esquemàtic de la connexió és el següent, on el senyal del tacòmetre definitiu és US, i UBS és l'alimentació del tacòmetre.



	Colour	Operation
Wire 1	red	+ UB
Wire 2	blue	- GND
Wire 3	violet	PWM
Wire 4	white	Tacho

Il·lustració 28 - Esquemàtic del tacòmetre del ventilador

Per a recomanació del fabricant, present en diverses fitxes de ventiladors d'aquest tipus, l'alimentació UBS del tacòmetre està fixada de 5 a 30V i la $I_{SINK} = 2mA$. Així, el valor alt del tacòmetre (alimentació UBS) s'ha fixat en 5V, que s'aprofiten de la sortida que ja té integrada la pròpia font. Finalment el valor baix del tacòmetre o US_{LOW} és fixa en 0V, tenint d'aquesta forma, un senyal periòdic positiu d'amplitud 5V.

Resolent la fórmula que dona el fabricant:

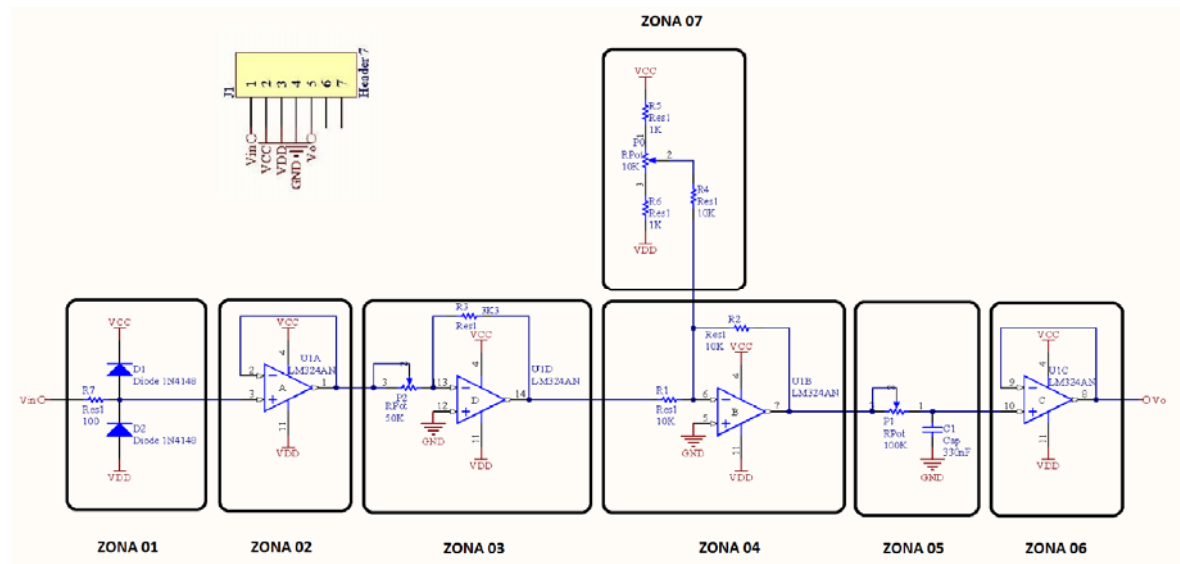
$$R_a = \frac{UBS - US_{LOW}}{I_{SINK}} = \frac{5V - 0V}{0.002A} = 2.5k\Omega \tag{3.9.1}$$

Com no existeix una resistència de $2.5k\Omega$, s'ha connectat una de $2.2k\Omega$ comprovant que es comporta correctament i dona el senyal esperat (Il·lustració 26).

3.10. Adaptador de nivells. Reductor

Com a primera etapa del sistema, el reductor de nivells, procurarà transformar analògicament la tensió produïda pel PLC als seus borns de sortida, per uns nivells compatibles en el modulador PWM. Aquesta adaptació permetrà al sistema utilitzar tot el rang dinàmic del PLC.

Mirant les fitxes tècniques, és possible establir aquesta transformació. Pel que fa l'entrada, el senyal està definit des de -10V fins a +10V pel PLC. A més, com s'observa a la fitxa del modulador PWM el senyal d'entrada està fixat, per una temperatura de 25°C, a un voltatge d'entrada de 1V a 3.4V aproximadament. Aquest, per tant, serà el rang de sortida (il·lustració 33).



Il·lustració 29 - Reductor de nivells

Entrant més en detall, el circuit està dissenyat a partir dels mateixos components que formen l'amplificador de nivells anteriorment tractat, però amb un important canvi:

S'ha canviat de lloc l'amplificador inversor (Zona 03) i el sumador inversor (Zona 04 i 07), de manera que l'etapa d'amplificació actua abans de definir l'offset del circuit. Aquest canvi ha estat forçat ja a que en les proves de funcionament el circuit quedava saturat abans de temps i la tensió d'entrada no podia ser reduïda de la forma demandada.

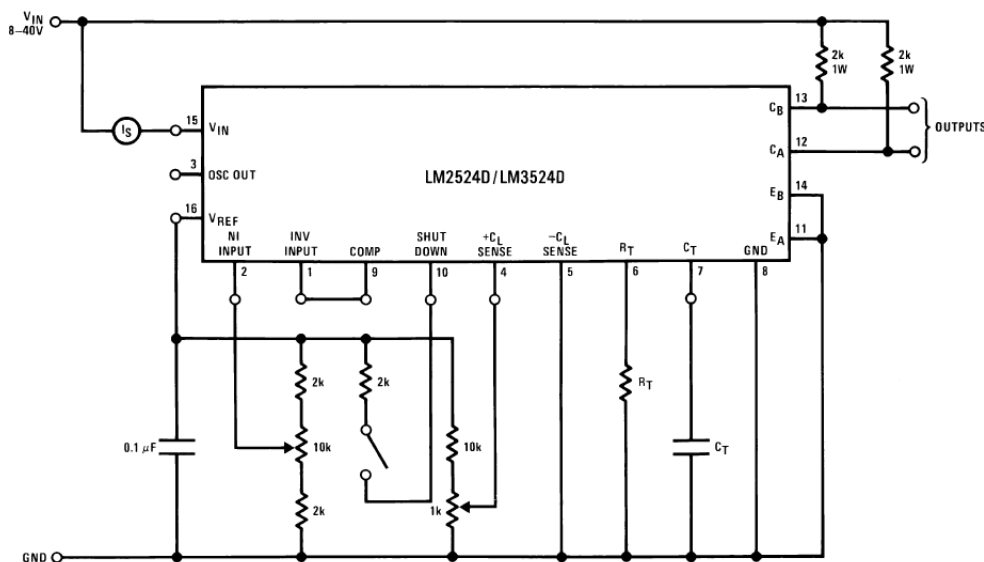
Bàsicament, el circuit és el mateix, però ara els valors del potenciòmetre i de la resistència són $3.3k\Omega$ i $50k\Omega$ respectivament, proporcionant una zona de treball amb un guany $-\frac{R_3}{P_2}$ majoritàriament menor a un, permetent una reducció de la tensió en l'amplificador inversor (Zona 03).

3.11. Modulador PWM (Texas Instruments LM3524D)

En l'elecció del modulador PWM, només ha calgut saber en quin rang de freqüència treballa el senyal PWM que haurà de controlar el ventilador. Aquesta dada es pot comprovar directament de la fixa tècnica del nou ventilador i pot tindre un valor d'entre 1 i 20kHz.

Així, es poden trobar al mercat diversos xips que ja integren la major part del circuit que es necessita. S'ha aconseguit el xip model LM3524D de la coneguda empresa Texas Instruments.

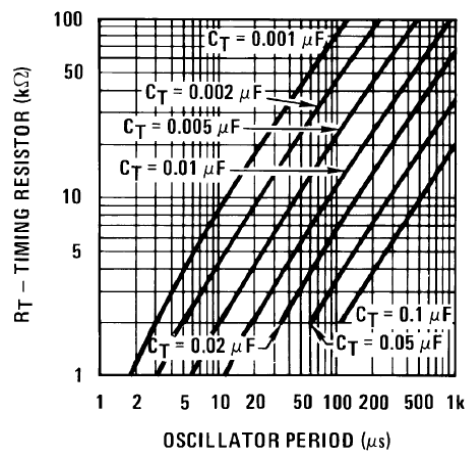
Pel disseny del circuit s'ha partit del circuit test mostrat a continuació, amb l'objectiu de formar un oscil·lador.



Il·lustració 30 - Esquema del circuit test del modulador

Aquest circuit ha estat modificat per adaptar-lo al seu propòsit, el de generar un cicle de treball compatible amb el ventilador del sistema.

- La modificació més rellevant és la de substituir el potenciòmetre com a mecanisme de variar el senyal d'entrada per la tensió que li ve del reductor de nivells.
- L'alimentació s'ha connectat a uns condensadors de desacoblament que actuen com a protecció del circuit quan aquest disminueix la seva tensió en borns, és a dir, fan la funció d'una bateria que estabilitza la tensió. Aquesta falla de tensió pot ser causada quan el circuit demana un pic de corrent, en aquest moment la tensió en borns pot caure i proporcionar una mala lectura.
- L'ús dels col·lectors o emissors dels transistors en aquest cas és idèntic. S'ha optat per utilitzar els emissors com a sortida del modulador, connectant així els col·lectors entre si. Aquesta connexió en paral·lel dels col·lectors és necessària deguda a què cada transistor és la meitat del cicle de treball, és a dir, si es connecta només un, el cicle només arribaria al 50%. Els col·lectors, a més, estan alimentats per la tensió que el propi xip dona de 5 volts. Aquesta amplitud s'ha comprovat experimentalment que és compatible amb el ventilador.
- S'ha introduït una resistència pull-down a la sortida per a generar els estats alt i baix dependent de si els transistors condueixen o no, en aquest cas, 5V i 0V.
- Finalment és necessària la determinació de la resistència R_T i el condensador C_T , elements que poden ser definits gràcies al següent gràfic de la fitxa del xip:



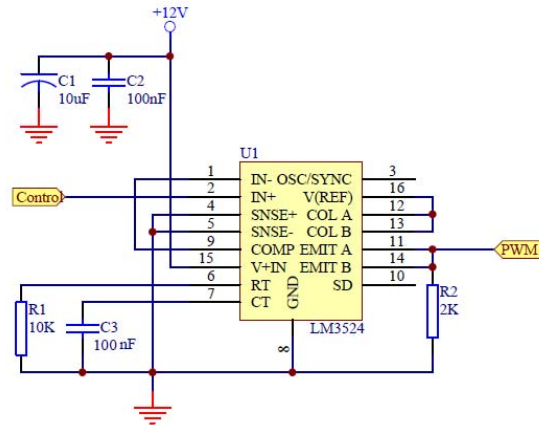
Il·lustració 31 - Determinació de R_T i C_T

Per una banda s'ha de fixar el període d'oscil·lació que es pretén aconseguir.

El ventilador pot ser controlat amb un senyal que va des d' $1kHz$ fins a $20kHz$, així que en aquest cas s'ha triat una freqüència de $f = 2kHz$ com a punt de partida dels

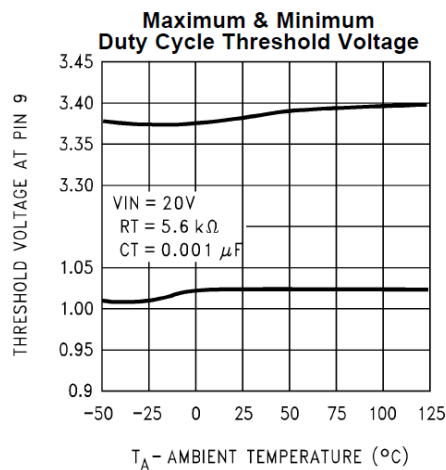
experiments. El període serà llavors de $T = \frac{1}{2kHz} = 500\mu s$. També es fixarà la resistència del circuit i serà qualsevol valor que estigui dintre del rang de valors recomanats pel fabricant, en aquest cas, una resistència de $R_T = 10k\Omega$ ja funciona bé. D'aquesta manera el valor de del condensador queda fixat i val $C_T = 100nF$.

Així és com s'arriba al circuit modulador de PWM el qual s'utilitzarà en el muntatge del sistema.



Il·lustració 32 – Esquemàtic del modulador de PWM

On els seus rangs d'entrada s'estableixen en 1 a 3.4V aproximadament segons la il·lustració 33.



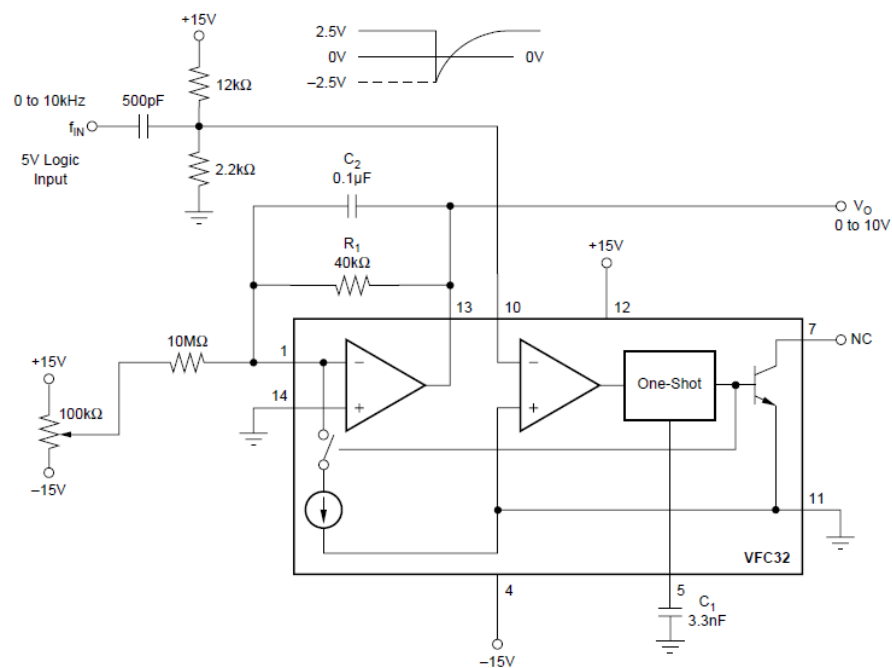
Il·lustració 33 – Rang d'entrada del modulador PWM

3.12. Convertidor Freqüència – Tensió

Com ja s'ha vist anteriorment, pot ser interessant incloure el senyal del tacòmetre dins l'estudi de control però no pot ser tractat directament, ja que la seva forma no és compatible amb les entrades del PLC.

Doncs bé, s'ha d'implementar un circuit que permeti convertir un senyal de freqüència variable i amb un cicle de treball del 50% en un senyal constant que sigui correctament interpretat pel PLC. Aquest senyal d'entrada que li arribarà a l'autòmat serà doncs, proporcional a la velocitat angular del ventilador, tal com ho era el senyal de freqüència variable.

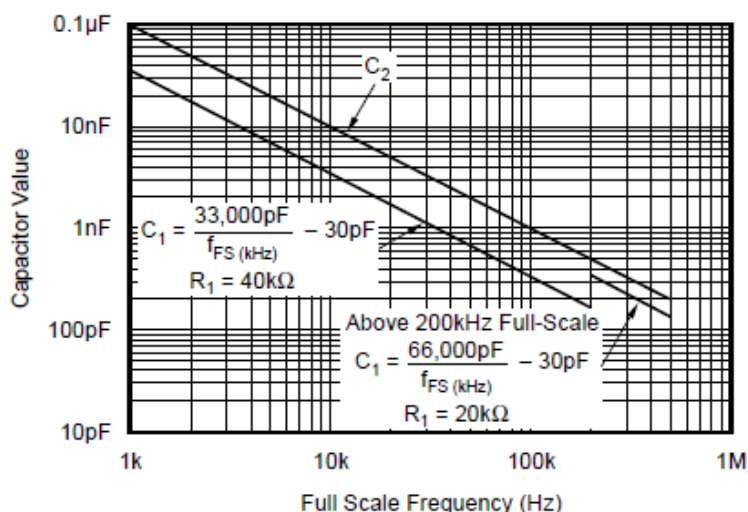
Aquests tipus de dispositius estan bastant estesos dintre del mercat de l'electrònica, per lo que s'ha adquirit una unitat de convertidor freqüència tensió model VFC32 de la marca BURR-BROWN, esquemàtic del qual és el que es presenta a continuació.



Il·lustració 34 - Convertidor freqüència tensió

Per a la configuració i adaptació al muntatge d'aquest component s'han tingut en compte les següents premisses:

- Ja que l'alimentació al muntatge és de +12V/-12V, els borns amb +15V s'han connectat a +12V i les masses a -12V.
- Per a la determinació de R_6 i R_7 (Il·lustració 36), s'han modificat els valors per a que la tensió al punt en comú de les resistències i el condensador 3 sigui equivalent a la que hi havia en el circuit del fabricant amb l'alimentació de 15V, és a dir, $R_6 = 12k\Omega$ i $R_7 = 1.1k\Omega$. La finalitat d'aquestes resistències és controlar el rang en el qual el circuit detecta un flanc de baixada del senyal d'entrada. Aquest canvi ha sigut suficient perquè el senyal entri dins aquest rang.
- L'última diferència amb respecte el circuit del fabricant és la resistència R_1 i els condensadors C_1 i C_2 , que han de ser definits respectant el fons d'escala que tingui el senyal d'entrada. Aquest paràmetre, pot ser observat fàcilment al laboratori, ja que correspon a la freqüència màxima que pot donar el tacòmetre, i que correspon a uns 480Hz. Així, amb aquesta dada i el següent gràfic donat pel fabricant, queden definits R_1 , C_1 i C_2 :

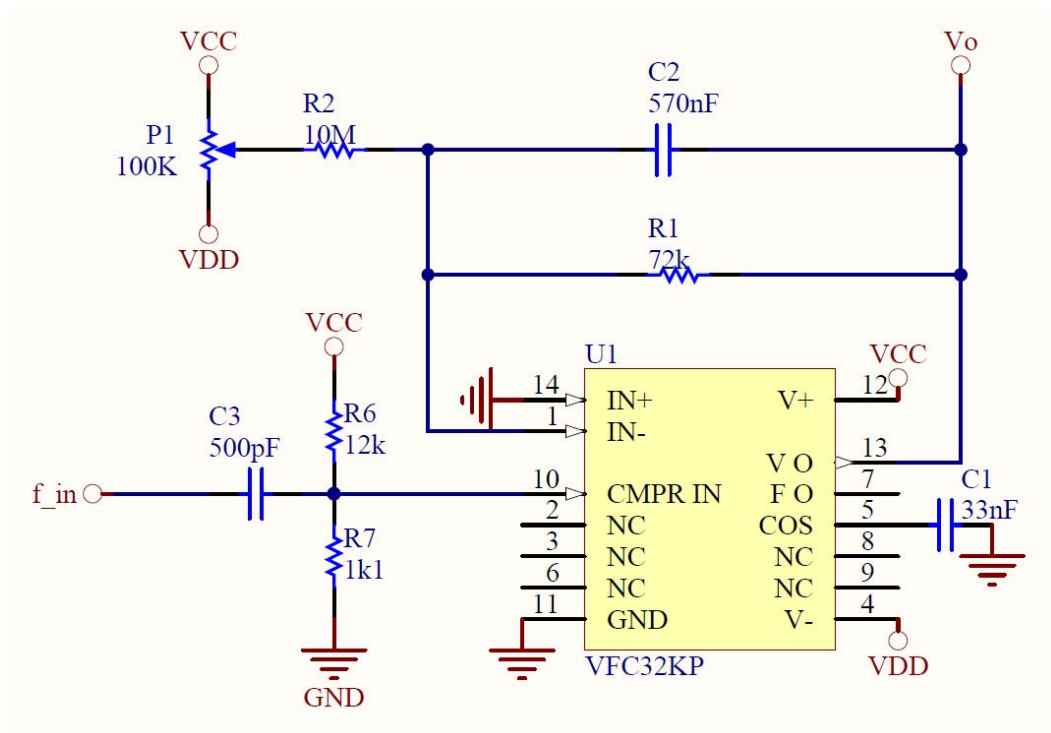


Il·lustració 35 – Gràfic per definir R_1 , C_1 i C_2

El fons d'escala mínim és el de 1kHz, per tant els paràmetres de partida són $R_1 = 40k\Omega$, $C_1 = 33nF$ i $C_2 = 0.1\mu F$. Ara bé, s'han realitzat diversos canvis amb la finalitat d'ajustar el senyal de sortida:

- La resistència R_1 s'encarrega d'ajustar altres paràmetres de forma de l'ona, i es variarà fins a tenir una forma adequada. Finalment s'estableix una resistència de $R_1 = 72k\Omega$.
- El condensador C_2 és l'encarregat de regular l'arissat del senyal de sortida, i es veu reduït en augmentar la capacitat del condensador. S'ha establert un valor de $C_2 = 570nF$

D'aquesta manera s'arriba a l'esquema que s'ha connectat al muntatge, mostrat a continuació:



Il·lustració 36 - Convertidor freqüència tensió experimental

Finalment s'ajustarà el senyal constant resultant amb un altre amplificador de nivells de tensió a la sortida del convertidor per adaptar-lo al PLC, igual que el que s'ha connectat a la sortida del sensor.

3.13. Font d'alimentació +24V / +5V / +12V / -12V (Emerson LPQ200-M)

Ja s'han manifestat les intencions de què tot el sistema pugui ser alimentat per una sola font de tensió, doncs bé gràcies a Emerson i el seu model LPQ200-M serà possible.

Amb aquesta font de tensió alimentarem alhora:

- El PLC. +24V / 0V.
- Les etapes de reducció i amplificació de nivells de tensió. +12V / 0V / -12V.
- El ventilador. +24V / 5V / 0V.
- El modulador de PWM. +12V / 0V.
- El convertidor Freqüència Tensió. +12V / 0V / -12V.
- El potenciòmetre. +12V / -12V.



Il·lustració 37 – Font d'alimentació -12V / +24V / 0V / +12V / +5V

4. Hardware de control

El hardware de control proposat pel professorat ha sigut un PLC ("Programmable Logic Controller", o Controlador lògic programable en català) encarregat de monitorar y controlar el comportament del sistema. Aquest aparell farà les tasques que sol fer el Matlab i el Simulink a l'ordinador en les sessions de pràctiques realitzades al llarg de la carrera i serà el cervell del sistema.

El requisit fonamental del PLC és que ha d'incloure entrades i sortides analògiques, ja que tots els elements utilitzats en el muntatge del sistema són d'aquest tipus i no seria compatible l'ús de ports digitals, que només tenen dos nivells de tensió (0 o 1).

Així mateix, seran necessaris dos ports d'entrada i un de sortida com a mínim. Als ports d'entrada a l'autòmat li entraran el senyal generat pel sensor del sistema i pel tacòmetre, mentre que al port de sortida serà generada el senyal corresponent de control en cada instant.

S'ha triat un PLC de la marca Schneider, model TM241CE24T. Aquest PLC té només ports d'entrada i sortida digitals, pel que es necessitarà un mòdul analògic d'expansió. D'entre els diferents mòduls, tenim dos:

- TM3AM6, amb 4 entrades i 2 sortides analògiques.
- TM3TM3, amb 2 entrades i 1 sortida analògiques.



Il·lustració 38 – PLC TM241CE24T (esquerra), TM3AM6 (centre) i TM3TM3 (dreta)

Un dels principals avantatges d'aquest PLC es la versatilitat del seu software de programació, la seva senzilla interfície i la possibilitat de monitoritzar numèricament i gràficament tota la informació dels seus ports. Aquesta última propietat, serà molt útil per confeccionar els gràfics pertinents en fer una entrada tipus graó en la determinació dels paràmetres de la planta, per exemple. A més es pot programar mitjançant 6 llenguatges diferents, característics en la programació d'automatismes [2]:

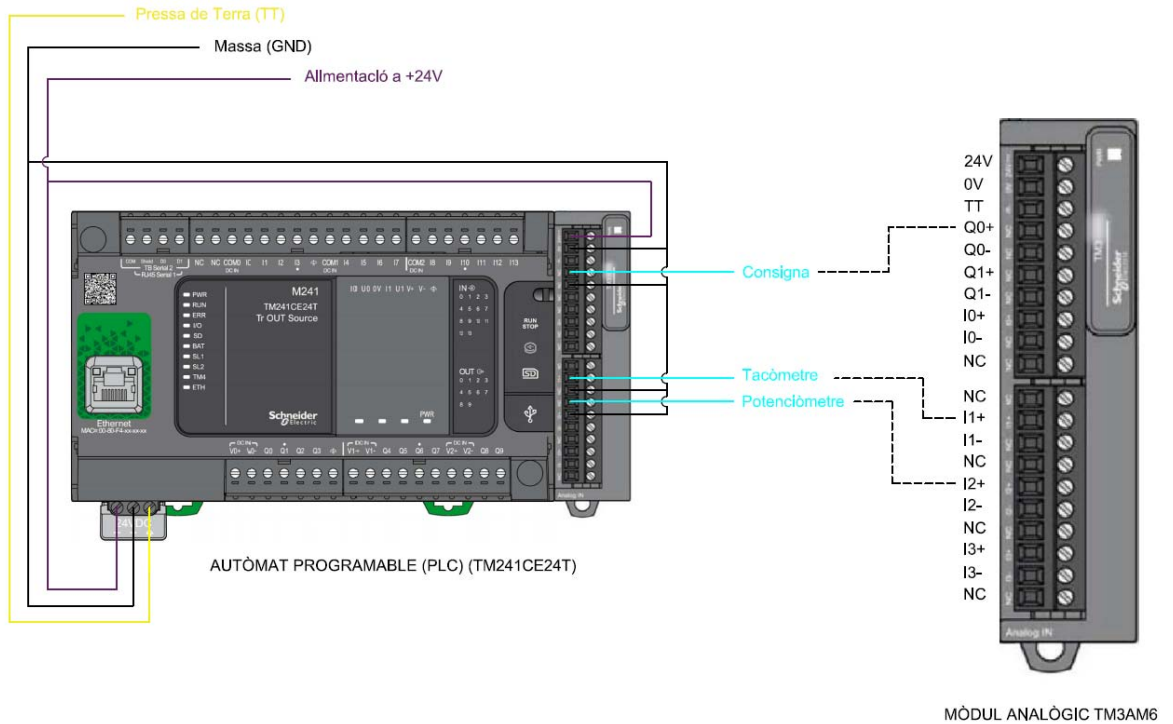
- Diagrama de blocs funcionals (FBD)
- Diagrama de contactes (LD)
- Diagrama de funcions contínues (CFC)
- Diagrama funcional seqüencial (SFC)
- Llista d'instruccions (IL)
- Text estructurat (ST)

Els ports d'aquests mòduls accepten un rang de tensions de -10V a +10V, per aquesta raó s'han dissenyat les etapes d'adaptació de nivells de tensió seguint aquest criteri.

Finalment, l'elecció del mòdul d'expansió, és irrellevant, ja que ambdós mòduls són compatibles individualment per a la realització del projecte. Tots dos tenen dues entrades i una sortida analògica com a mínim. S'ha triat el TM3AM6. ANNEX 17.

4.1. Cablejat del hardware

Per a la correcta integració dels diferents elements del sistema amb el PLC, s'ha generat un esquema de connexió del cablejat per a aquests components, segons els ports disponibles de l'autòmat (ANNEX 18):



Il·lustració 39 – Esquema de connexions del mòdul analògic

Amb aquestes connexions queden fixats físicament els ports per on el sistema intercanviarà les dades pertinents, però encara farà falta la definició per software dels ports.

4.2. Configuració i explotació del software

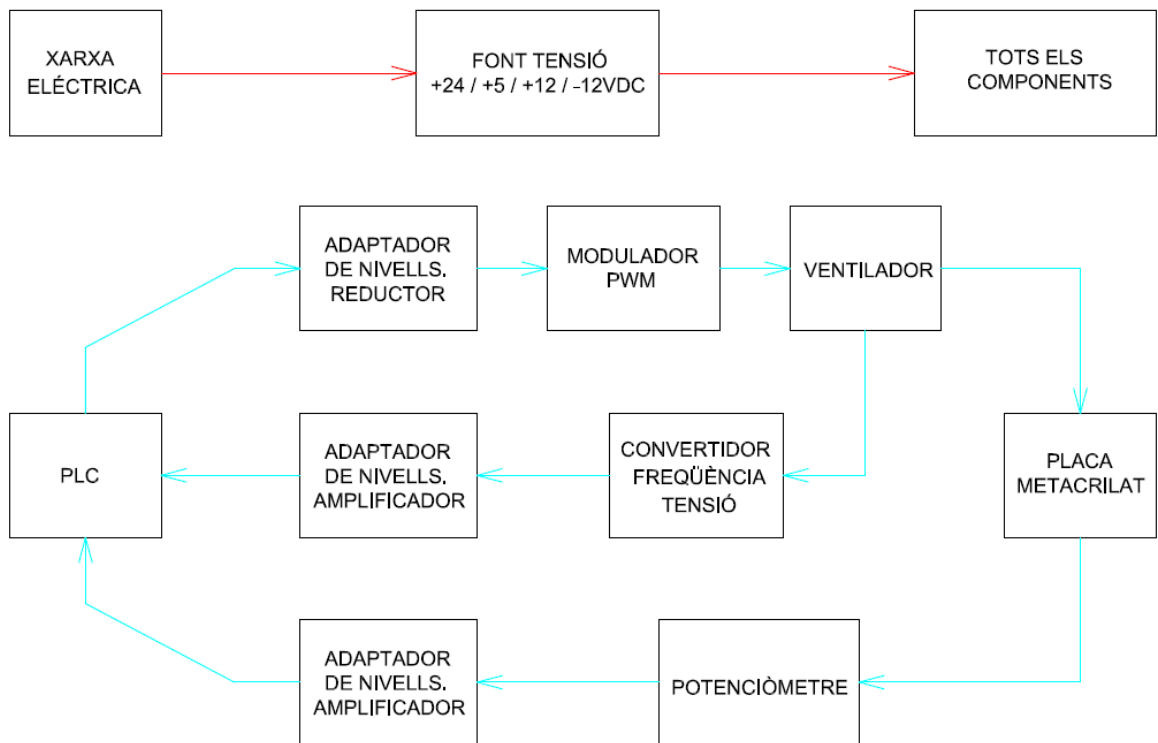
En aquest apartat es tractaran diversos punts previs que són necessaris per començar a programar el codi i el procés de transferència del programa al PLC. Per concloure l'apartat es farà un incís de les tècniques de monitorització utilitzades a les proves. Tot aquest procés de configuració es pot seguir en forma de guia explicativa més extensa a l'ANNEX 19.

Així, els punts clau a seguir són els següents:

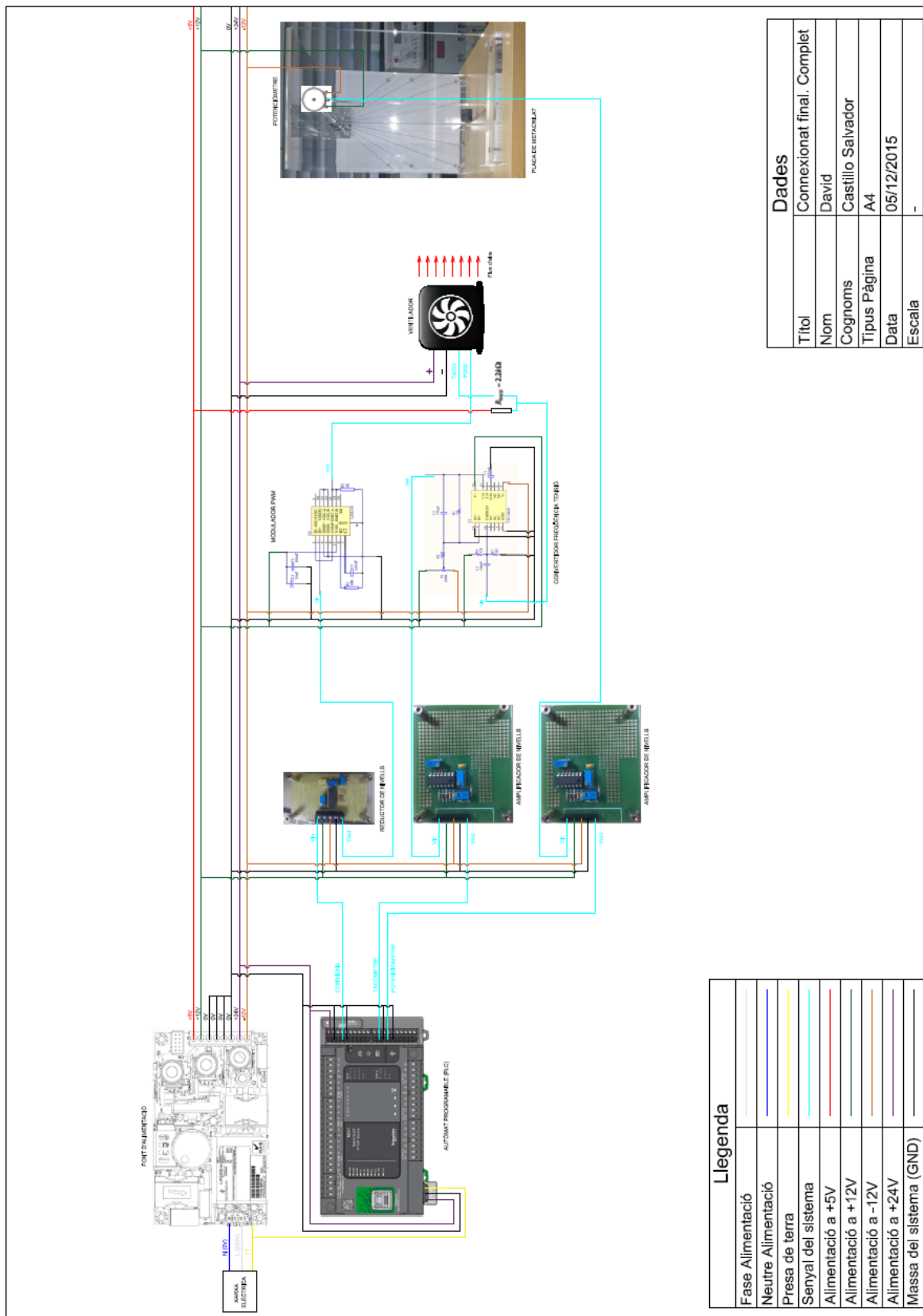
- Creació del projecte.
- Inserció de l'autòmat i els mòduls d'expansió que s'utilitzaran.
- Creació del programa i elecció del tipus de llenguatge.
- Selecció del programa com a tasca principal a executar.
- Configuració de les entrades i sortides de l'autòmat, així com enllaçar-les amb les variables del programa. Elecció del rang dels ports.
- Programació.
- Transferència del programa a l'autòmat.

5. Connexionat

Finalment, s'han connectat tots els components entre si i s'ha confirmat la compatibilitat i el bon funcionament de totes les parts. A continuació es mostra l'esquema general definitiu de tot el muntatge. Tant aquest document com l'esquema de connexionat definitiu pot veure's amb més detall a l'ANNEX 16. S'observa que s'han actualitzat els prototipus d'alguns elements, com ara la placa de metacrilat o els amplificadors de tensió, però treballant de la mateixa manera exposada anteriorment.



Il·lustració 40 - Diagrama de blocs definitiu



Llegenda

Fase Alimentació	—
Neutre Alimentació	—
Presa de terra	—
Senyal del sistema	—
Alimentació a +5V	—
Alimentació a +12V	—
Alimentació a -12V	—
Alimentació a +24V	—
Massa del sistema (GND)	—

Dades

Títol	Connexionat final. Complet
Nom	David
Cognoms	Castillo Salvador
Tipus Pàgina	A4
Data	05/12/2015
Escala	—

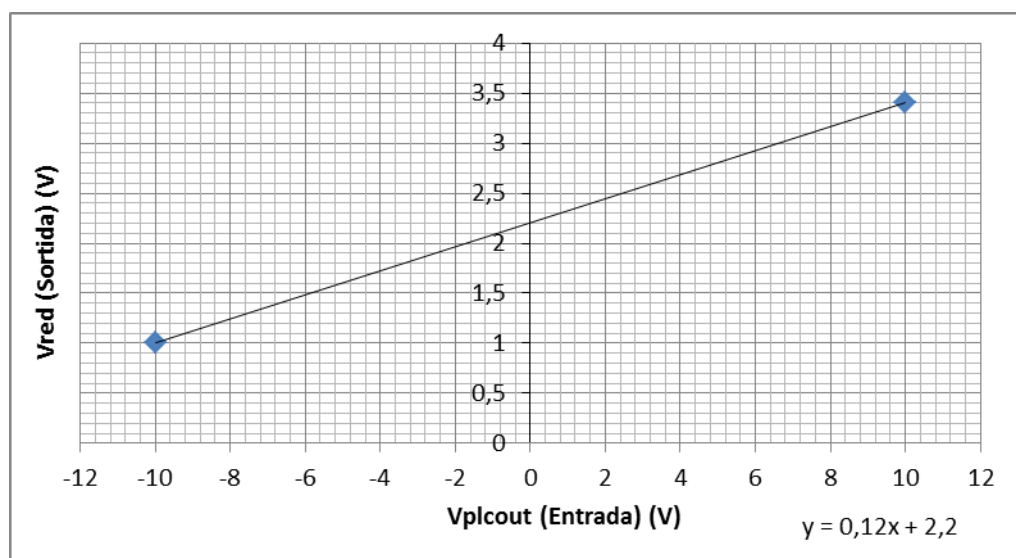
6. Modelat teòric

En aquesta secció es modelarà el sistema de forma teòrica mitjançant les eines i coneixements dins la física, l'electrònica i la mecànica de fluids apreses al llarg de la carrera. Aquest estudi estarà dirigit en la recerca de les fórmules que relacionen el grau d'obertura de la placa de metacrilat amb la tensió injectada pel PLC.

6.1. Adaptador de nivells. Reductor

És una primera etapa d'adaptació del nivell de voltatge el que es troba la sortida del PLC. En aquesta etapa es reescala la tensió d'entrada per valors que s'ajusten al comportament del modulador PWM.

A continuació es pot veure la gràfica del comportament ideal d'aquest component:



Gràfica 1 – Comportament ideal reductor de nivells

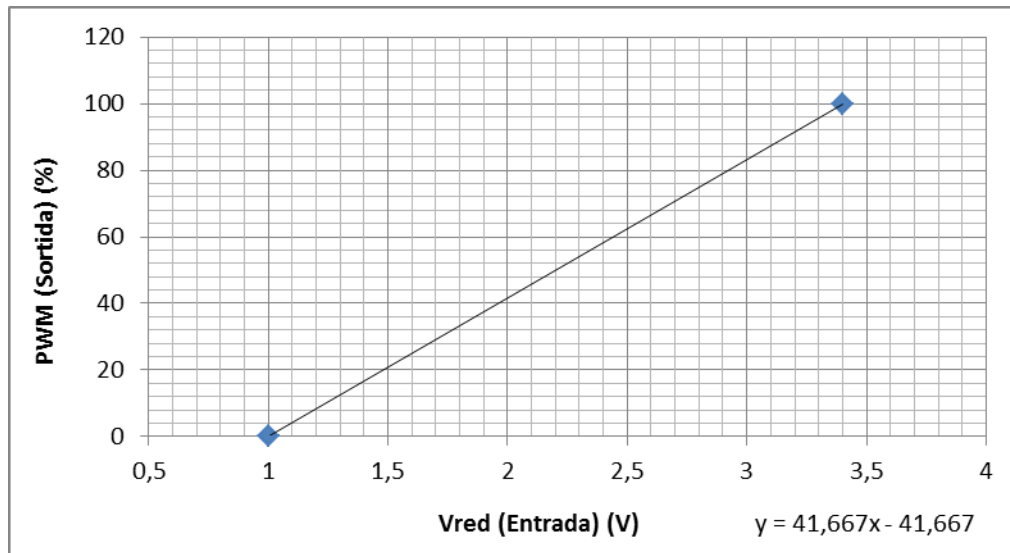
Analíticament:
$$Vred = 0.12 \cdot Vplcout + 2.2 \quad \text{per a } Vplcout = [-10, +10]V \quad (6.1.1)$$

6.2. Modulador PWM

La segona etapa del sistema és un modulador PWM, on transformarà el senyal constant d'entrada a un senyal quadrat que el ventilador és capaç d'entendre.

Aquesta transformació es pot veure representada en la següent gràfica, on es mostra la variació del cicle de treball o “*duty cycle*” en funció de la diferència de potencial que li arriba a l'entrada. Aquesta variació del cicle de treball esdevé una variació del senyal periòdic que entra al ventilador, on els transistors commutaran formant diferents valors mitjans i controlant la velocitat del rotor. Aquest mòdul s'entén com instantani i no té comportament dinàmic.

El seu comportament ideal serà doncs:

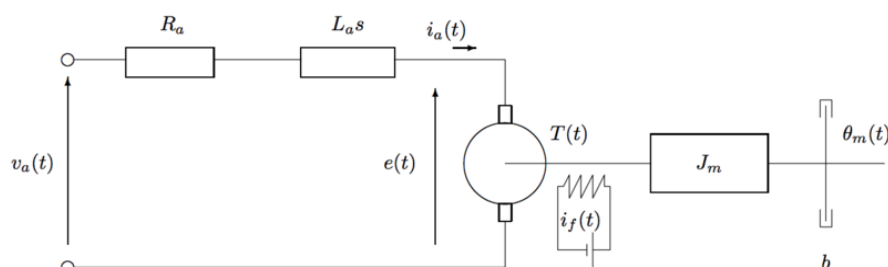


Gràfica 2 - Comportament ideal modulador PWM

Analíticament: $PWM = 41,67 \cdot Vred - 41,67$ per a $Vred = [+1, +3,4]V$ (6.2.1)

6.3. Velocitat Angular

El ventilador del sistema, no és més que un motor de corrent contínua acoblat amb unes aspes que dirigiran l'aire a la placa de metacrilat. Doncs bé, aquest conjunt es pot modelitzar com el sistema representat a continuació, que correspon a un motor de corrent continu d'excitació en sèrie [3].



Il·lustració 41 - Model d'un motor de corrent continu d'excitació en sèrie

D'aquest esquema se'n deriven dues parts, l'elèctrica i la mecànica.

Dinàmica elèctrica

El circuit elèctric d'un motor de corrent continu pot ser representat per tres elements dominants:

- Una resistència R_a , que té el seu origen en la pèrdua de tensió del propi conductor.
- Una inductància $L_a s$, derivada de les nombroses espiras que envolten l'estator.
- Una força contraelectromotriu $e(t)$ que es manifesta com una resistència de contacte en les escobretes.

Dinàmica mecànica

Els elements principals de la dinàmica mecànica d'un motor son els següents:

- Un parell $T(t)$, originat pel corrent de l'induït $i_a(t)$ i per la interacció amb el camp magnètic.
- Una inèrcia de la càrrega acoblada al motor J_m , en aquest cas les aspes del ventilador.
- La posició angular que el rotor assolirà $\theta_m(t)$.

El funcionament del motor és el següent:

Al circular un corrent pel debanat de l'induït, com a resultat de l'interacció amb el camp magnètic, s'exerceix sobre el rotor un parell que és directament proporcional al camp magnètic i al corrent de l'induït. Donat que s'ha suposat el camp magnètic constant, el parell motor serà proporcional al corrent de l'induït.

$$T(t) = K_t \cdot i_a(t) \quad (6.3.1)$$

Per altra banda el gir de les espiras del debanat de l'induït en presència del camp magnètic produeix una caiguda de tensió o força electromotriu proporcional a la velocitat de gir:

$$e(t) = K_e \cdot \dot{\theta}_m(t) \quad (6.3.2)$$

Així aplicant kirchhoff i estudiant l'única malla elèctrica, s'obté:

$$v_a(t) = R_a \cdot i_a(t) + L_a \cdot \frac{di_a(t)}{dt} + K_e \cdot \dot{\theta}_m(t) \quad (6.3.3)$$

On aplicant la transformada de Laplace s'obté l'equació que regeix la dinàmica elèctrica.

$$v_a(s) = (R_a + s \cdot L_a) \cdot i_a(s) + K_e \cdot s \cdot \theta_m(s) \quad (6.3.4)$$

En quan a la dinàmica mecànica la regeix la següent equació, on s'ha considerat una força viscosa en oposició al moviment (b) i proporcional a la velocitat.

$$T(t) = J_m \cdot \ddot{\theta}_m(t) + b \cdot \dot{\theta}_m(t) \quad (6.3.5)$$

Aplicant Laplace:

$$T(s) = (J_m \cdot s + b) \cdot \dot{\theta}_m(s) \quad (6.3.6)$$

I finalment relacionant les equacions 6.3.1, 6.3.4 i 6.3.6 s'obté:

$$\frac{\theta_m(s)}{v_a(s)} = \frac{K_t}{s \cdot [(J_m \cdot s + b) \cdot (R_a + s \cdot L_a) + K_t \cdot K_e]} \quad (6.3.7)$$

Equació que relaciona la posició angular de les aspes en funció de la tensió en borns del ventilador.

Però, per a què sigui útil pel projecte es faran dues consideracions. Per una banda, l'objectiu d'aquest apartat és el de trobar la relació entre la velocitat angular i la tensió aplicada en borns del ventilador, per aquest motiu serà necessària la modificació de la formula eliminant l'integrador, és a dir:

$$\dot{\theta}_m(s) = s \cdot \theta_m(s) \quad \rightarrow \quad \frac{\dot{\theta}_m(s)}{v_a(s)} = \frac{K_t}{(J_m \cdot s + b) \cdot (R_a + s \cdot L_a) + K_t \cdot K_e} \quad (6.3.8)$$

I considerar, que la dinàmica elèctrica es pot depreciar en front de la mecànica, ja que la part elèctrica és molt més ràpida. Originant finalment la següent funció de transferència:

$$\frac{\dot{\theta}_m(s)}{v_a(s)} = \frac{K_t}{J_m \cdot s + b + K_t \cdot K_e} \quad (6.3.9)$$

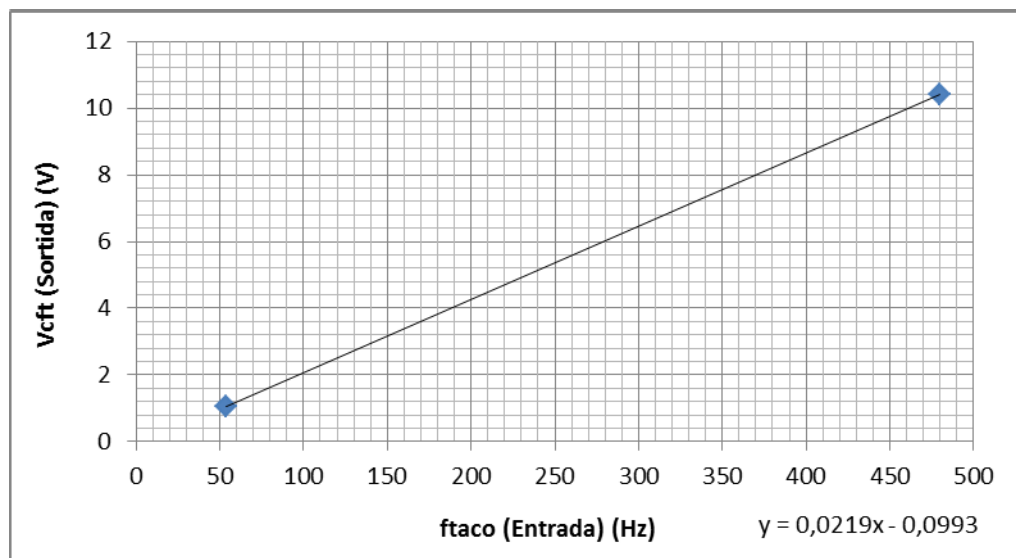
On s'observa que l'equació resultant és de primer ordre. Fet que facilitarà l'obtenció experimental de la funció de transferència del ventilador.

Com a últim comentari d'aquest apartat és important observar com, en el cas particular del ventilador estudiat, el senyal del tacòmetre, és a dir, la velocitat angular del ventilador en cada instant, està representada per un senyal periòdic de freqüència variable i que és proporcional a la velocitat angular. Aquesta relació serà estudiada en altres punts més endavant, però es pot avançar que té la següent forma:

$$\dot{\theta}_m(t) = K \cdot f(t) \quad (6.3.10)$$

6.4. Convertidor Freqüència – Tensió

Aquest component establirà una relació proporcional entre el senyal periòdic variable de sortida del ventilador, que representa la velocitat, i una tensió continua de sortida del convertidor. El comportament ideal d'aquest component es representa a continuació:



Gràfica 3 - Comportament ideal convertidor freqüència tensió

Essent aquesta relació: $Vcft = 0.022 \cdot f_{TACO} - 0.099$ (6.4.1)

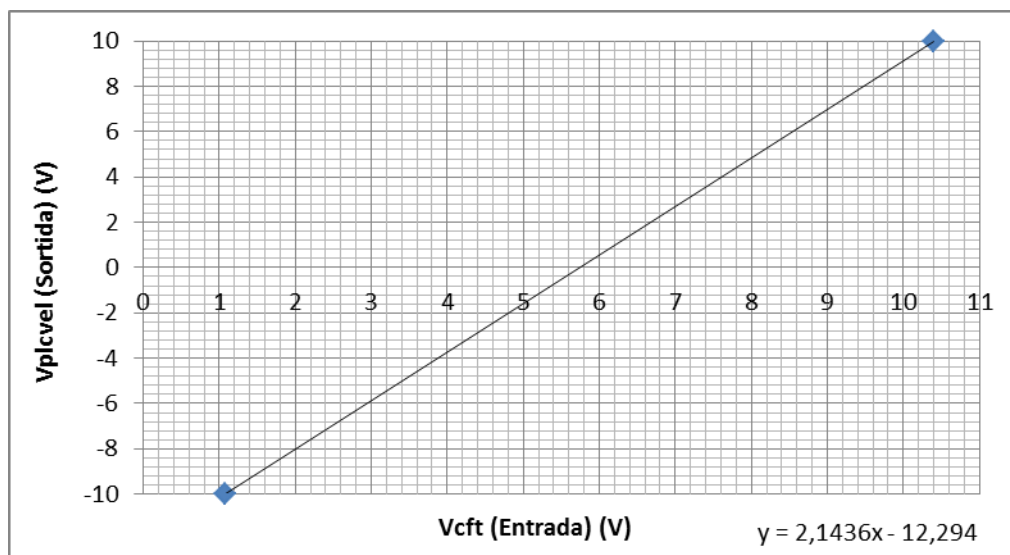
per a $f_{TACO} = [53.47, 480.12] Hz$.

Cal esmentar, que el comportament d'aquest component no és instantani, ja que genera la tensió de sortida a partir d'un valor mig que estima de l'entrada, per aquesta raó necessita diversos períodes per donar una tensió. Aquesta dinàmica però, segueix sent molt ràpida i a l'apartat experimental s'analitzarà juntament amb la dinàmica del ventilador.

6.5. Adaptador de nivells. Amplificador.

Semblant a l'apartat 6.1, l'amplificador de nivells reescalarà el senyal provinent del convertidor Freqüència – Tensió per adaptar-lo a l'entrada del PLC, l'encarregat de tractar el senyal.

Aquesta adaptació té la forma i funció següents:



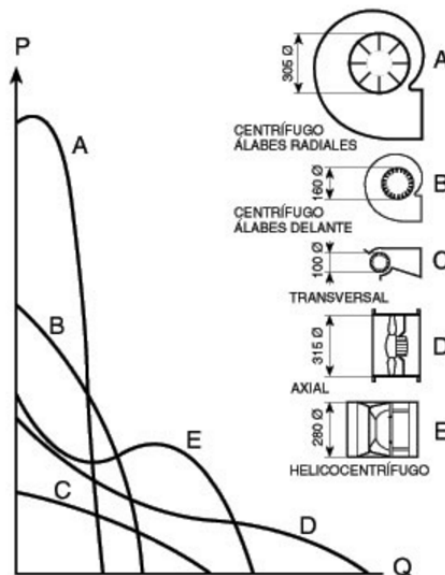
Gràfica 4 - Comportament ideal de l'amplificador de nivells

$$\text{Analíticament: } V_{plcvel} = 2.14 \cdot V_{cft} - 12.29 \quad \text{per a} \quad V_{cft} = [+1.07, +10.4]V \quad (6.5.1)$$

6.6. Cabal d'aire

Per conèixer la força que està aplicant el ventilador a la placa primer s'ha d'especificar el tipus i en quines condicions està treballant, ja que la força incident a la placa depèn del flux impulsat del ventilador i aquest flux, pot adoptar diferents formes.

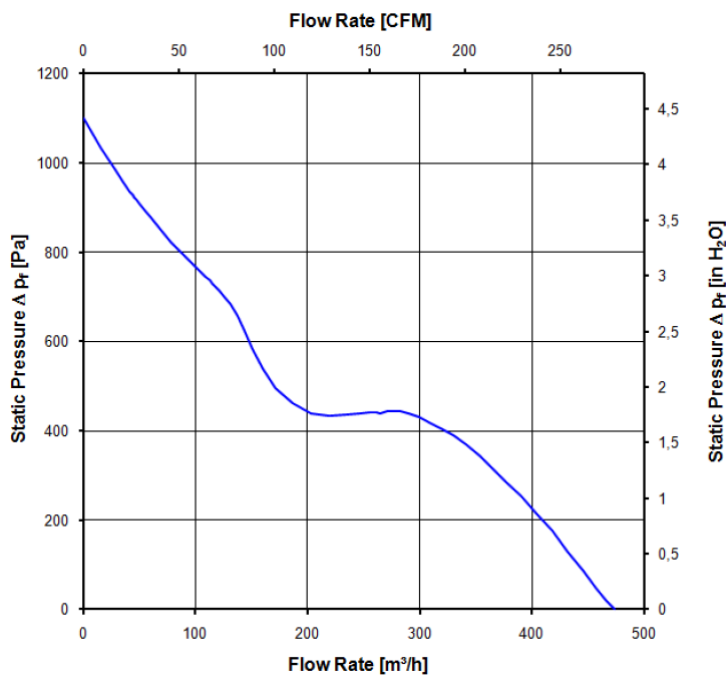
- Primer, és necessari entendre que l'estudi de generadors i bombes fluidodinàmiques, així com els ventiladors, es fa a partir de l'anomenada corba característica. Aquesta corba pren diverses formes depenent del tipus de ventilador. A continuació es pot veure un exemple posant de manifest com s'altera la forma de la corba depenent del tipus de bomba o de l'orientació dels seus àleps [4]:



Il·lustració 42 – Corbes característiques de diferents màquines hidràuliques

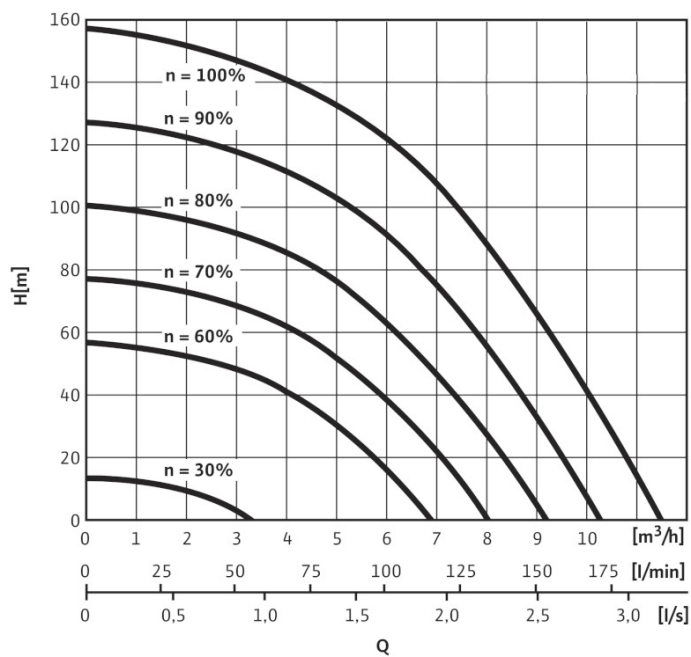
Pel cas del ventilador del sistema, la seva corba característica serà semblant a la representada com a D, ja que és un model de ventilador axial.

A continuació, s'observa la corba característica del ventilador extreta de la fitxa del ventilador, on s'observa la seva semblança amb la corba teòrica:



Il·lustració 43 – Corba característica del ventilador 4114N/2H7P

- Altra característica a tenir en compte de les màquines hidràuliques en general, és que la seva velocitat de gir, si mantenim la resta de paràmetres constants, modifica l'amplitud de la corba, tal i com es pot veure a la següent gràfica:



Il·lustració 44 - Variació de la corba en variar la velocitat angular

D'aquest gràfic es dedueix fàcilment que l'augment del cabal d'aire que empeny la placa de metacrilat serà degut a l'augment de la velocitat de rotació del ventilador, que estarà controlada pel senyal PWM d'entrada al ventilador.

Altrament, es pot arribar a aquesta conclusió a partir de l'estudi adimensional de la bomba, estudiant el que s'anomenen punts homòlegs del sistema. Aquest estudi porta a redefinir les tres variables més importants d'una bomba, és a dir, pressió, potència i rendiment, com un conjunt de termes adimensionals i que depenen d'altres conjunts adimensionals derivats del diàmetre del rodet, la densitat del fluid i la velocitat de gir [5]:

$$\Delta p, \text{ pressió comunicada al fluid: } g_1 \left(\frac{Q}{\omega D^3}, \frac{\mu}{\rho \omega D^2}, \frac{k}{D} \right) = \frac{\Delta p}{\rho \omega^2 D^2} \quad (6.6.1)$$

$$P, \text{ Potència: } g_2 \left(\frac{Q}{\omega D^3}, \frac{\mu}{\rho \omega D^2}, \frac{k}{D} \right) = \frac{P}{\rho \omega^3 D^5} \quad (6.6.2)$$

$$\eta, \text{ Rendiment: } g_3 \left(\frac{Q}{\omega D^3}, \frac{\mu}{\rho \omega D^2}, \frac{k}{D} \right) = \eta \quad (6.6.3)$$

On μ és la viscositat del fluid i k la rugositat de l'entorn.

Així, suposant un estudi pel mateix ventilador i diferents punts homòlegs de funcionament, tenim les següents propietats:

$$\frac{\Delta p_1}{\rho \omega_1^2 D^2} = \frac{\Delta p_2}{\rho \omega_2^2 D^2} \quad \frac{P_1}{\rho \omega_1^3 D^5} = \frac{P_2}{\rho \omega_2^3 D^5}$$

$$\frac{Q_1}{\omega_1 D^3} = \frac{Q_2}{\omega_2 D^3} \quad (6.6.4)$$

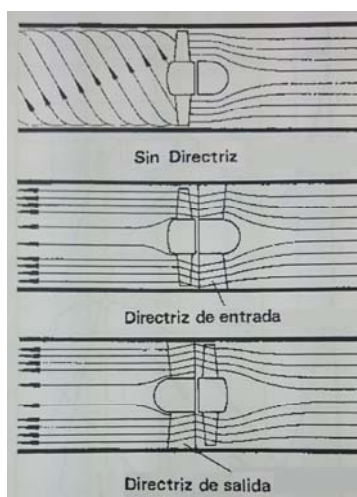
On a partir d'aquesta darrera equació es demostra el comportament comentat al gràfic anterior:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{\omega_2}{\omega_1} \quad (6.6.5)$$

- Finalment, com que no s'ha instal·lat el conjunt ventilador-placa en cap espai encapsulat tipus canonada, l'aire té pas lliure fins a arribar a la placa, que significa que el sistema no té cap tipus de resistència com a resultat del fregament de colzes, obstacles o parets. Aquest raonament ens indica la zona de treball que tindrà el ventilador al sistema, ubicant-se a la dreta del gràfic, on la corba característica passa per alts cabals i poca altura manomètrica.

Una vegada s'ha establert el tipus de ventilador i es coneix la zona de treball, cal tenir en compte les següents consideracions de cara a la forma que pot adoptar el flux d'aire:

- Depenent dels accessoris que posem al ventilador el seu flux es veurà modificat. A continuació es mostra una imatge amb els diversos tipus d'accessoris que pot portar i la distribució del flux que produeix cadascun:

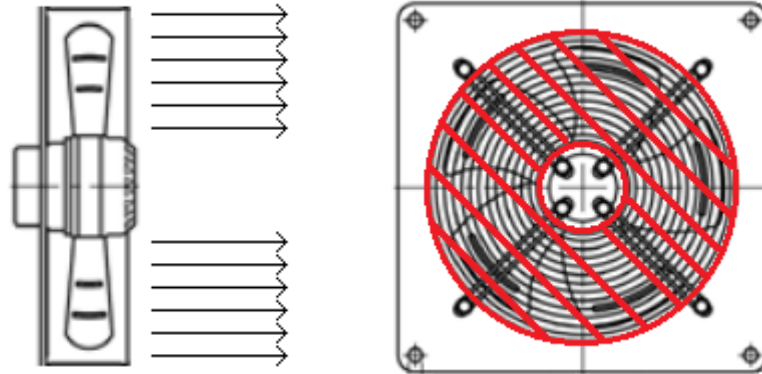


Il·lustració 45 - Flux d'aire d'un ventilador axial amb diferents accessoris

Aquesta imatge representa un flux passant per un ventilador axial dins una canonada, que no és el cas del ventilador del sistema, però serveix d'il·lustració per veure com el ventilador, si no té inclòs cap directriu, el flux té una component rotatòria que modifica la direcció del flux entrant. Per aquest motiu, al ventilador utilitzat, se li han instal·lat directrius tant a l'entrada com a la sortida.

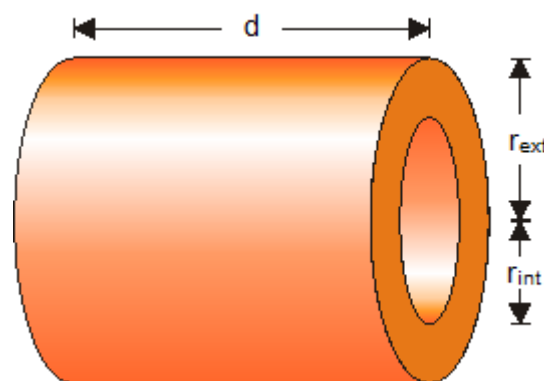
- Una altra propietat del flux d'un ventilador axial, és que no tenim flux al centre, ja que és la localització del motor i per allà no passa aire.

Aquestes dues últimes propietats del flux queden representades a la següent imatge, la qual s'estudiarà per poder relacionar la velocitat angular amb el cabal i per tant, amb la força aplicada a la placa:



Il·lustració 46 - Flux de perfil (esquerra) i flux en alçat (dreta)

Idealment, el flux d'aire que incidirà en la placa de metacrilat es pot tractar com una distribució uniformement repartida (Il·lustració 46 Esquerra). Això és degut al fet de que el ventilador expulsa l'aire per la superfície ratllada en vermell (Il·lustració 46 Dreta), és a dir, la superfície de rotació de les pales, formant així un volum en forma de cilindre buit com el següent:



Il·lustració 47 - Àrea del flux generat pel ventilador

Així doncs, ja que ara la distribució és coneguda, ja es pot calcular la força amb la qual aquesta distribució empeny la placa:

Es pot relacionar el cabal que li arriba a la placa amb la força que s'aplicarà, ja que, segons l'equació de la conservació de la quantitat de moviment [6]:

$$\sum \vec{F} = m \cdot \vec{a} = m \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d}{dt}(m \cdot \vec{v}) \quad \text{on, operant, s'arriba a la següent equació:}$$

$$\sum \vec{F} = \int_{S_c} \rho \cdot \vec{v} \cdot (\vec{v} \cdot \vec{n}) dA \quad (6.6.6)$$

$$\text{Llavors,} \quad F = \int_{S_c} \rho_{\text{aire}} \cdot \vec{v} \cdot (\vec{v} \cdot \vec{n}) dA = \rho_{\text{aire}} \cdot v^2 \cdot A = \rho_{\text{aire}} \cdot v_{\text{flux}}^2 \cdot A \quad (6.6.7)$$

On, ρ_{aire} és la densitat de l'aire, v_{flux} és la velocitat del flux i A és l'àrea transversal del cilindre buit abans tractat.

Per altra banda, és possible determinar la velocitat mitjana del flux d'aire utilitzant la fórmula (6.6.5), que relaciona cabal i velocitat angular per a un mateix diàmetre del ventilador.

Segons el fabricant, el punt de màxim caudal i velocitat angular es troba en $Q_{\text{max}} = 475 \frac{m^3}{h}$

i $n_{\text{max}} = 9500 \text{ min}^{-1}$ ($\omega_{\text{max}} = 994.84 \frac{rad}{s}$). Substituint a (6.6.5):

$$\left. \begin{aligned} \frac{Q_2}{Q_1} = \frac{\omega_2}{\omega_1} \end{aligned} \right\} \quad Q \left[\frac{m^3}{h} \right] = \frac{Q_{\text{max}}}{\omega_{\text{max}}} \cdot \omega \quad (6.6.8)$$

$$\text{Passant a } \left[\frac{m^3}{s} \right]: \quad Q \left[\frac{m^3}{s} \right] = \frac{Q_{\text{max}}}{\omega_{\text{max}}} \cdot \omega \cdot \frac{1}{3600} = \frac{Q_{\text{max}}}{\omega_{\text{max}} \cdot 3600} \cdot \omega \quad (6.6.9)$$

Que és l'expressió del caudal respecte de la velocitat angular de les pales.

Pel que fa la velocitat, s'utilitzarà la velocitat mitja de la distribució, que s'ha idealitzat com uniforme i que impacta la placa com el cilindre buit abans vist:

$$\left. \begin{aligned} v_{\text{flux}} &= \frac{Q}{A} \\ Q &= \frac{Q_{\text{max}}}{\omega_{\text{max}} \cdot 3600} \cdot \omega \\ A &= \pi \cdot (r_{\text{ext}}^2 - r_{\text{int}}^2) \end{aligned} \right\} \quad v_{\text{flux}} = \frac{\frac{Q_{\text{max}}}{\omega_{\text{max}} \cdot 3600} \cdot \omega}{\pi \cdot (r_{\text{ext}}^2 - r_{\text{int}}^2)} \quad (6.6.10)$$

Finalment, la fórmula que relaciona la velocitat angular amb la força és la següent:

$$F = \rho_{aire} \cdot v_{flux}^2 \cdot A = \rho_{aire} \cdot \left(\frac{\frac{Q_{max}}{\omega_{max} \cdot 3600} \cdot \omega}{\pi (r_{ext}^2 - r_{int}^2)} \right)^2 \cdot \pi (r_{ext}^2 - r_{int}^2) = \frac{\rho_{aire} \cdot \left(\frac{Q_{max}}{\omega_{max} \cdot 3600} \right)^2}{\pi (r_{ext}^2 - r_{int}^2)} \cdot \omega^2 \quad (6.6.11)$$

Que per a valors de $\rho_{aire} = 1.2046 \frac{Kg}{m^3}$, $r_{ext} = 0.058m$ i $r_{int} = 0.0275m$ s'obté:

$$F = 2.586 \cdot 10^{-6} \cdot \omega^2 \quad (6.6.12)$$

6.7. Angle girat de la placa

Pel que fa a la placa de metacrilat, es pot estudiar tant l'estàtica com la dinàmica. Estudis els quals, seran d'utilitat més endavant.

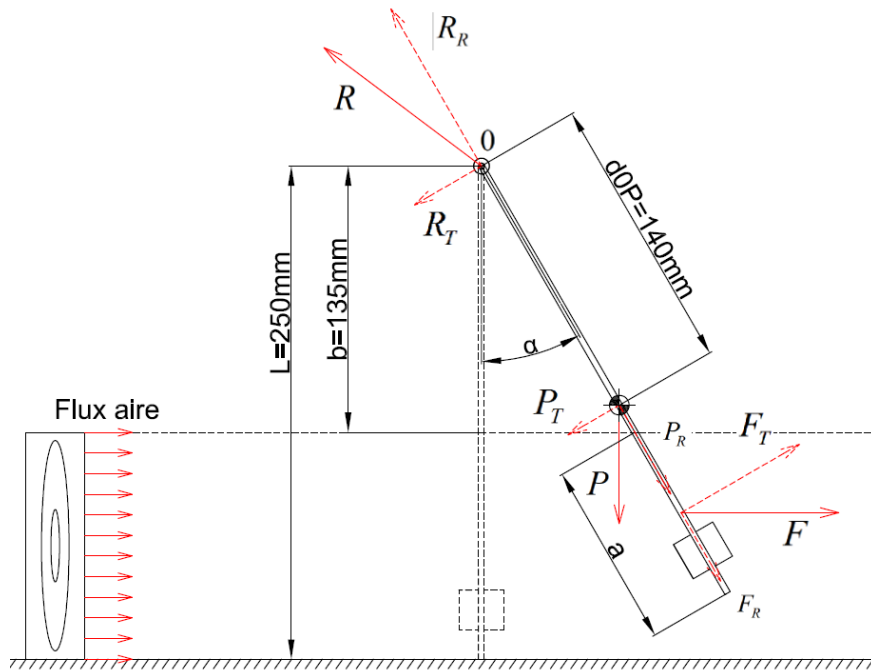
6.7.1. Estàtica

Un pas previ, serà la determinació del centre de masses del conjunt, que per efecte dels imants, s'haurà mogut en direcció a aquests:

$$x_{CDM} = \frac{\sum m_i \cdot x_i}{\sum m_i} = \frac{m_{PLACA} \cdot x_{PLACA} + m_{IMANT} \cdot x_{IMANT} + m_{IMANT} \cdot x_{IMANT}}{m_{PLACA} + m_{IMANT} + m_{IMANT}} = 0.14m \quad (6.7.1.1)$$

On la distància al centre de la placa és $L = 0.125m$, la distància entre l'eix de gir i els imants és de $x_{IMANT} = 0.225m$ i les masses dels cossos són $m_{PLACA} = 0.172Kg$ i $m_{IMANT} = 0.015Kg$.

Amb l'esquema següent i fent suma de forces i moments i igualant a zero, es poden establir les següents relacions (ANNEX 20):



Il·lustració 48 – Diagrama estàtic de forces

$$\sum F_R = 0$$

$$R_R = P_R + F_R$$

(6.7.1.2)

$$\sum F_T = 0$$

$$F_T = P_T + R_T$$

(6.7.1.3)

$$\sum M_0 = 0$$

$$F_T \cdot \left(L - \frac{a}{2} \right) = P_T \cdot \overline{dOP}$$

(6.7.1.4)

$$\begin{aligned} R_R &= P \cos \alpha + F \sin \alpha \\ R_T &= F \cos \alpha - P \sin \alpha \end{aligned} \quad F = \frac{\overline{dOP} \cdot P \cdot \tan \alpha}{L - \frac{a}{2}} \quad (6.7.1.5)$$

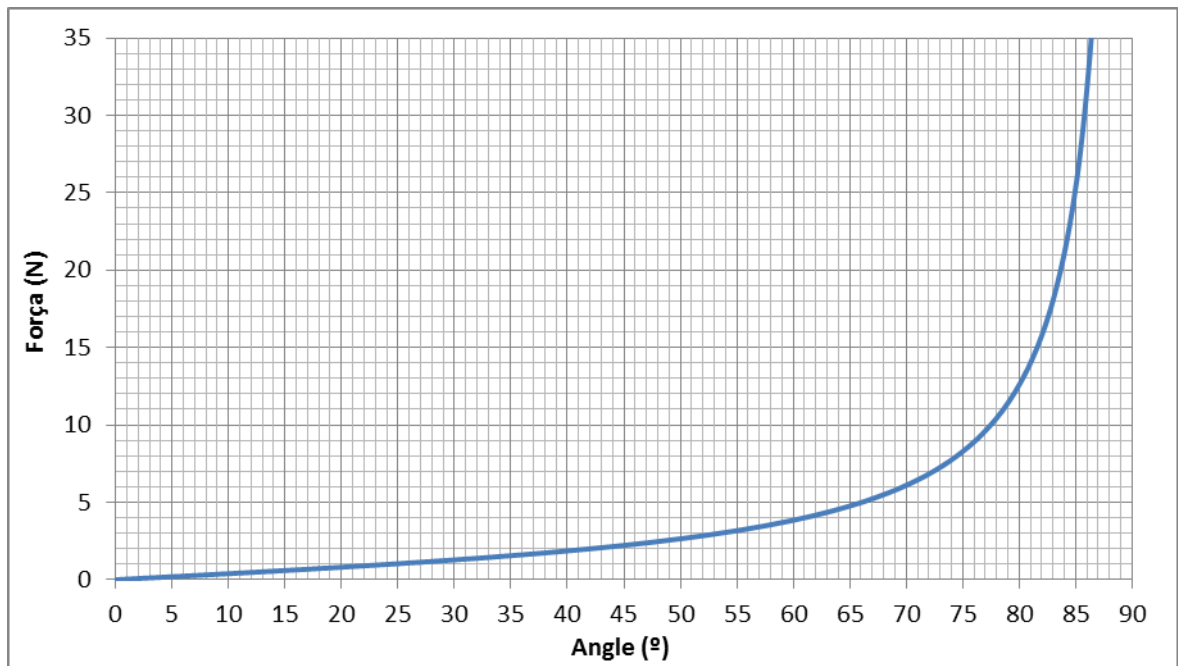
On a és un paràmetre que depèn de l'angle i val: $a = L - \frac{b}{\cos \alpha}$ (6.7.1.6)

Finalment: $F(\alpha) = \frac{2 \cdot \overline{dOP} \cdot P \cdot \sin \alpha}{L \cdot \cos \alpha + b}$ (6.7.1.7)

I per a $P = m \cdot g = 0.202 \text{Kg} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 1.98 \text{N}$, $L = 0.25 \text{m}$, $b = 0.135 \text{m}$ i $\overline{dOP} = 0.14 \text{m}$, les característiques físiques reals de la placa:

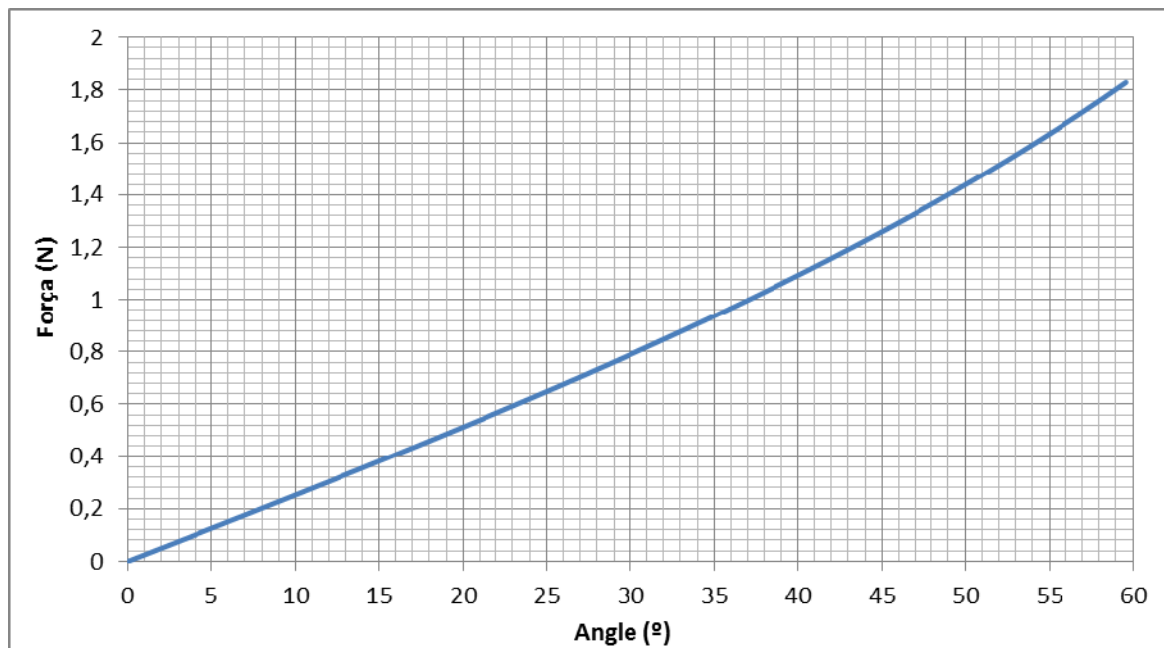
$$F(\alpha) = \frac{0.555 \cdot \sin \alpha}{0.25 \cdot \cos \alpha + 0.135} \quad (6.7.1.8)$$

S'ha de tenir en compte, això si, que la validesa d'aquesta relació és correcte només a l'interval des de 0° fins als 60° , moment en el qual, la placa surt de l'àrea d'acció del flux d'aire i aquest ja no aplica cap força. Així, si es volgués obtenir angles de més de 60° s'hauria de modificar la geometria de la placa fent-la més petita o utilitzar un ventilador amb una superfície més gran. A continuació s'han representat dues gràfiques que mostren aquestes dues situacions:



Gràfica 5 - Força necessària per empenyer la placa ampliant la superfície del flux

En aquesta primera gràfica s'observa com la força necessària per empenyer la placa creix amb un comportament exponencial fins a un límit físic de 90° , punt on la placa restaria horitzontal i la component tangencial de la força seria zero.



Gràfica 6 - Força necessària per empènyer la placa al muntatge

Aquesta altra gràfica, correspon íntegrament al muntatge del projecte i el seu comportament és similar. Com s'ha dit anteriorment, l'àrea d'efecte del flux d'aire es va reduint fins a anul·lar-se als 60° amb la vertical.

En aquest punt ja s'està en condicions de calcular el parell aplicat a la placa de metacrilat, ja que aquest parell era funció tant de la velocitat del flux d'aire, com de la posició de la placa. L'expressió resultant serà d'utilitat més endavant.

Segons l'equació (6.7.1.4), el parell que causa el flux de vent és:

$$\tau_{FLUX} = F_T \cdot \left(L - \frac{a}{2} \right) \quad (6.7.1.9)$$

On, substituint (6.7.1.5) i (6.7.1.6) resulta:

$$\tau_{FLUX} = F \cdot \cos(\alpha) \cdot \left(L - \frac{b}{\cos(\alpha)} \right) = \frac{F}{2} \cdot (L \cdot \cos(\alpha) + b) \quad (6.7.1.10)$$

I ja que la força del flux ha estat calculada en l'apartat anterior (6.7.1.8):

$$\tau_{FLUX} = \frac{\rho_{aire} \cdot \left(\frac{Q_{max}}{\omega_{max} \cdot 3600} \right)^2}{2 \cdot \pi \cdot (r_{ext}^2 - r_{int}^2)} \cdot \omega^2 \cdot (L \cdot \cos(\alpha) + b) \quad (6.7.1.11)$$

Que és el parell que exerceix el flux d'aire segons la velocitat angular del ventilador i segons la posició de la placa de metacrilat.

6.7.2. Dinàmica

La placa del sistema es pot modelitzar com un cos amb un moviment periòdic que es va frenant fins a arribar a un estat de repòs, estat en el qual la placa es posiciona a zero graus.

Aquest comportament és un exemple de moviment harmònic amortit i el seu estudi és un dels més típics a la física, el pèndol.

Partint de la primera llei de Newton, podem expressar el seu comportament, incloent-hi el paràmetre de fregament viscos b , i el de la constant k :

$$F = m \cdot a + b \cdot v + k \cdot x \quad (6.7.2.1)$$

Ja que s'està estudiant el comportament del pèndol sense l'aplicació de forces externes, l'equació estarà igualada a zero. A més, tenint en compte que $\frac{dx}{dt} = v$ i $\frac{dv}{dt} = a$, es pot reescriure l'equació com:

$$m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} + b \cdot \frac{dx}{dt} + k \cdot x = 0 \quad \text{o també} \quad m \cdot \ddot{x} + b \cdot \dot{x} + k \cdot x = 0 \quad (6.7.2.2)$$

Aquesta equació diferencial ordinària té la següent solució:

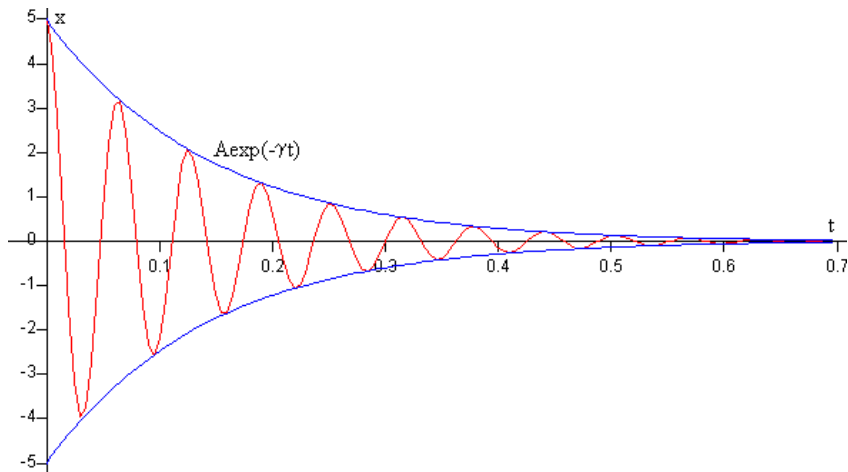
$$x(t) = A_0 \cdot e^{-\gamma t} \cdot \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (6.7.2.3)$$

On $x(t)$ és l'elongació, A_0 és l'amplitud inicial, el terme $A_0 \cdot e^{-\gamma t}$ s'anomena amplitud,

$\gamma = \frac{b}{2 \cdot m}$ és el factor d'amortiment, $\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}}$ la pulsació natural per un pèndol,

$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \gamma^2}$ la pulsació del moviment amortit, φ_0 la fase inicial del moviment i $k = \frac{m \cdot g}{l}$.

La representació d'aquesta solució, per a uns valors arbitraris, és la següent [7]:



Il·lustració 49 - Comportament d'un pèndol. Sistema harmònic amortit

On s'observa un comportament molt semblant al de la placa de metacrilat quan es deixa caure la placa des d'una determinada alçaria (amplitud).

Així, tenint com a model inicial el del pèndol, s'anirà adaptant l'equació als paràmetres de la placa de metacrilat.

Moment d'inèrcia (I)

Com que la variable a controlar al projecte és l'angle de la placa amb la vertical es tindran en compte les forces tangencials com a parells respecte de l'eix de rotació, es a dir, modificant la primera llei de Newton com segueix:

$$F_i = m_i \cdot a_i \quad \rightarrow \quad \frac{\tau_i}{r_i} = m_i \cdot r_i \cdot \alpha \quad \text{on} \quad \tau_i = F_i \cdot r_i \quad a_i = r_i \cdot \alpha$$

Essent τ el moment causat per la força, r la distància al centre de rotació i α l'acceleració angular.

$$\text{Reordenant l'equació resulta: } \sum \tau_i = \sum m_i \cdot r_i^2 \cdot \alpha = \left(\sum m_i \cdot r_i^2 \right) \alpha \quad (6.7.2.4)$$

Per així arribar a la definició de moment d'inèrcia (I), primera de les magnituds a determinar per definir la modelització de la placa de metacrilat.

$$I = \sum m_i \cdot r_i^2 \quad (6.7.2.5)$$

$$I_Z = \int r^2 \cdot dm \quad (6.7.2.6)$$

Doncs bé, el càlcul d'aquest paràmetre no serà trivial, és a dir, no serà el moment d'inèrcia d'una placa rectangular només. Això és degut a dos imants cilíndrics que s'han col·locat al final de la placa per a augmentar la inèrcia de la placa i que augmenta l'estabilitat de la placa en front de pertorbacions del flux d'aire.

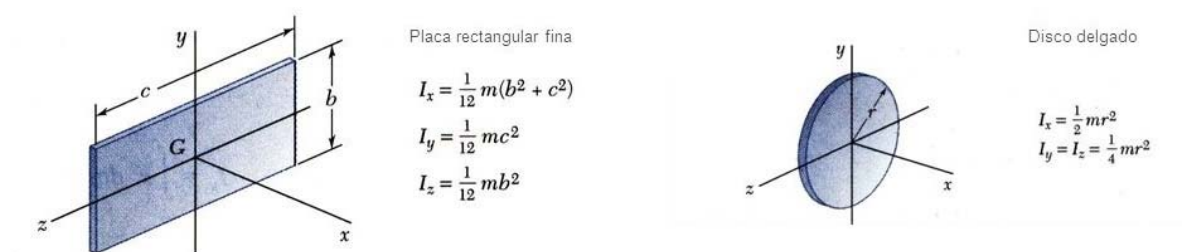


Il·lustració 50 – Imants col·locats al final de la placa de metacrilat

Llavors es tenen dues figures simples, la placa rectangular i dos cilindres, un a cada cara de la placa, on els seus eixos principals d'inèrcia s'hauran de transportar a l'eix global del sistema mitjançant el teorema d'Steiner citat a continuació:

Teorema d'Steiner: $I_{GLOBAL} = I_{CM} + m \cdot r^2$ (6.7.2.7)

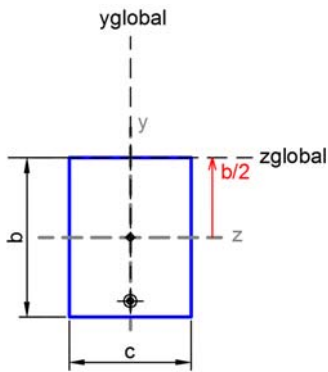
Es partirà de les fórmules del moment d'inèrcia al centre de masses de les taules (ANNEX 21) per a trobar el moment d'inèrcia de tot el conjunt:



Il·lustració 51 - Extracte de les taules de moments d'inèrcia per a figures simples

Així doncs, pel teorema d'Steiner:

Placa de metacrilat:

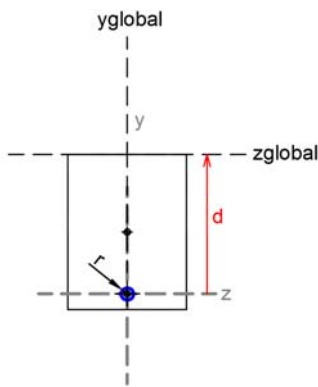


$$I_{GLOBAL_PLACA} = I_{Z_PLACA} + m_{PLACA} \cdot \left(\frac{b}{2}\right)^2 \quad \text{on segons taules,}$$

$$I_{Z_PLACA} = \frac{1}{12} \cdot m_{PLACA} \cdot b^2 \quad \text{s'obté:}$$

$$I_{GLOBAL_PLACA} = \frac{1}{12} \cdot m_{PLACA} \cdot b^2 + m_{PLACA} \cdot \left(\frac{b}{2}\right)^2 = \frac{1}{3} \cdot m_{PLACA} \cdot b^2 \quad (6.7.2.8)$$

Imants:



$$I_{GLOBAL_IMANT} = I_{Z_IMANT} + m_{IMANT} \cdot d^2 \quad \text{on segons taules,}$$

$$I_{Z_IMANT} = \frac{1}{4} \cdot m_{IMANT} \cdot r^2 \quad \text{s'obté:}$$

$$I_{GLOBAL_IMANT} = \frac{1}{4} \cdot m_{IMANT} \cdot r^2 + m_{IMANT} \cdot d^2 \quad (6.7.2.9)$$

On finalment, el moment d'inèrcia del conjunt és:

$$I_{GLOBAL} = I_{GLOBAL_PLACA} + I_{GLOBAL_IMANT} = \frac{1}{3} \cdot m_{PLACA} \cdot b^2 + 2 \cdot \left(\frac{1}{4} \cdot m_{IMANT} \cdot r^2 + m_{IMANT} \cdot d^2 \right) \quad (6.7.2.10)$$

Com que d'imants n'hi ha dos, la component de l'imant queda multiplicada per dos.

Avaluant les dades numèriques queda:

$$I_{GLOBAL} = \frac{1}{3} \cdot 0.172 \cdot 0.25^2 + 2 \cdot \left(\frac{1}{4} \cdot 0.015 \cdot 0.01^2 + 0.015 \cdot 0.225^2 \right) = 0.005103 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (6.7.2.11)$$

S'observa que aquest paràmetre només depèn de la massa del conjunt, que com és constant, també ho serà el moment d'inèrcia.

Coefficient de fregament viscos (b)

L'altre de les magnituds necessàries per definir la dinàmica serà el coeficient de fregament viscos, representat a la fórmula del moviment com al paràmetre b .

Primer se segueix el mateix desenvolupament que per trobar el moment d'inèrcia, és a dir, canviant els eixos de referència pel normal i tangencial a la placa, així com treballar amb els parells que actuen al sistema.

L'equació del moviment queda transformada de la següent manera [8]:

$$m \cdot \ddot{x} + b \cdot \dot{x} + k \cdot x = 0 \quad \rightarrow \quad I \cdot \ddot{\theta} + b \cdot \dot{\theta} + k \cdot \theta = 0 \quad (6.7.2.12)$$

On θ és l'angle de la placa, $\dot{\theta} = \frac{d\theta}{dt}$ la velocitat angular i $\ddot{\theta} = \frac{d^2\theta}{dt^2}$ l'acceleració angular.

Però certament, aquesta no és exactament el comportament de la placa, ja que l'equació està definida per a un sistema amb una molla, d'aquí l'existència de la constant elàstica k , on el seu comportament, encara que semblant, és més aviat el que segueix la massa de la figura de la dreta.



Si es raona l'estudi de les forces que intervenen, s'obté la següent equació, desproveïda de constant elàstica i amb una no linealitat al paràmetre de la θ , és a dir, el sinus:

$$I \cdot \ddot{\theta} + b \cdot \dot{\theta} = \tau_{ext} = -\tau_{pes} = -F_{pes} \cdot d_{CM} = -m \cdot g \cdot \sin(\theta) \cdot d_{CM} \quad (6.7.2.13)$$

On d_{CM} és la distància del centre de masses del conjunt a l'eix de rotació.

Aquest estudi té l'objectiu de determinar la constant de fregament viscos, per el que només s'ha tingut en compte la força efectuada pel propi pes de la placa.

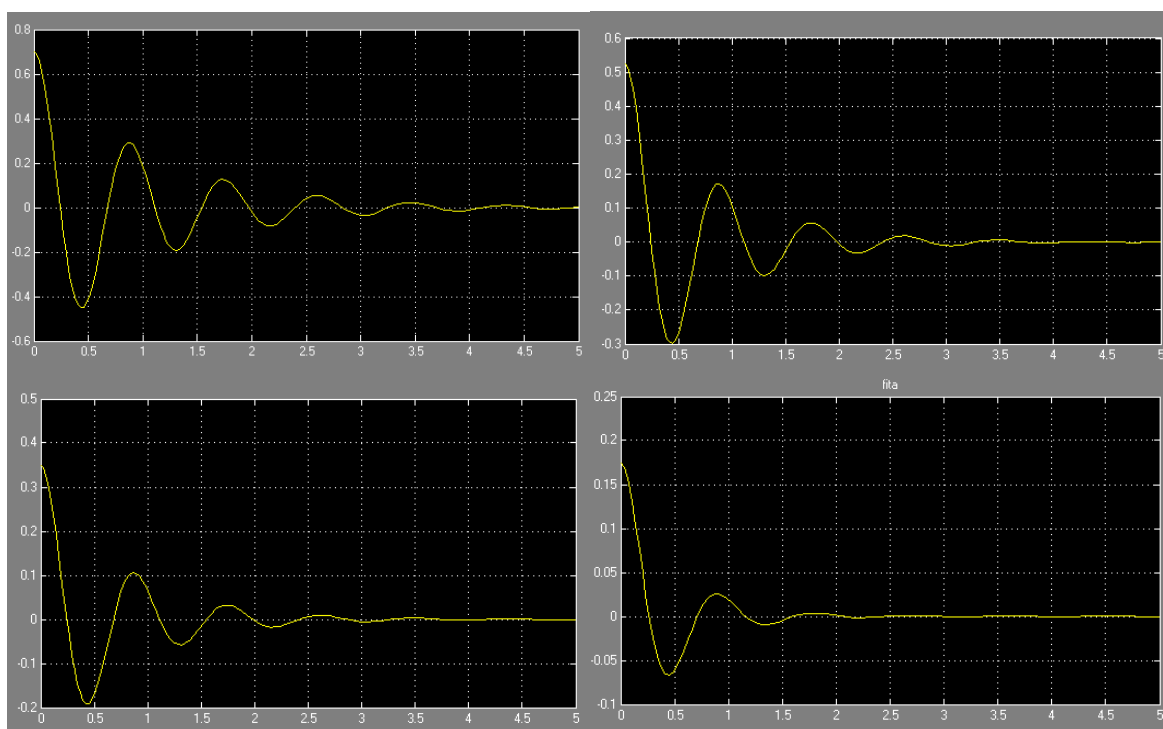
Per a trobar finalment la constant de fregament viscos, s'assajarà la placa al laboratori. Aquest assaig consta de llençar la placa des de diferents altures i cronometrar el temps que triga a aturar-se. Després aquest temps podrà ser substituït a la solució de l'equació i es podrà determinar el paràmetre b .

L'assaig ha tingut els següents resultats:

Posició (°)	Temps (s)
10	1,8
20	2,9
30	3,8
40	4,6

Taula 1 - Temps transcorregut en aturar-se la placa

Degut a que no existeix una solució analítica de l'equació $I\ddot{\theta} + b\dot{\theta} = -m \cdot g \cdot \sin(\theta) \cdot d_{CM}$, s'hi ha introduït al software simulink del matlab per a realitzar la simulació de la solució, la qual serà simulada amb diferents valors de b fins a ajustar-se a la realitat, mitjançant un mètode de prova i error:



Il·lustració 52 – Simulacions per a la determinació del paràmetre b . D'esquerra a dreta i de dalt a baix, simulacions de la caiguda de la placa en 40, 30, 20 i 10 graus.

On els resultats de la simulació són:

Posició (º)	Temps (s)	$b \left(\frac{\text{Kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}} \right)$
10	1,8	0.022
20	2,9	0.014
30	3,8	0.013
40	4,6	0.010

Taula 2 - Resultats de les simulacions

Finalment, utilitzant la mitjana aritmètica queda fixat un coeficient de fregament viscos de:

$$b = 0.01475 \frac{\text{Kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}} \quad (6.7.2.14)$$

Funció de transferència

Ara que ja s'han definit tots els paràmetres necessaris per a la determinació del model de la placa, es considerarà la inclusió de forces externes al model:

$$I \cdot \ddot{\theta} + b \cdot \dot{\theta} = -m \cdot g \cdot \sin(\theta) \cdot d_{CM} + \tau_{ext} \quad (6.7.2.15)$$

L'única força externa que falta per incloure al model és la força que exerceix el ventilador a la placa en forma d'un flux d'aire.

$$I \cdot \ddot{\theta} + b \cdot \dot{\theta} = -m \cdot g \cdot \sin(\theta) \cdot d_{CM} + \tau_{vent} \quad (6.7.2.16)$$

A continuació, es modificarà el model, utilitzant la transformada de Laplace per a trobar la funció de transferència, però hi ha un problema, l'equació no és lineal, per el que farà falta l'ús d'alguna tècnica especial per a obtenir-la.

Pas a pas, la transformació es produeix com segueix:

$$I \cdot \ddot{\theta} + b \cdot \dot{\theta} = -m \cdot g \cdot \sin(\theta) \cdot d_{CM} + \tau_{vent}$$

$$L[I \cdot \ddot{\theta}] + L[b \cdot \dot{\theta}] = L[-m \cdot g \cdot \sin(\theta) \cdot d_{CM}] + L[\tau_{vent}] \quad (6.7.2.17)$$

On $L[\ddot{\theta}] = s^2 \cdot L[\theta]$ i $L[\dot{\theta}] = s \cdot L[\theta]$ per condicions inicials nul·les [9].

Així, portant fora constants i aplicant la transformada de les derivades, de moment queda com:

$$I \cdot s^2 \cdot L[\theta] + b \cdot s \cdot L[\theta] = -m \cdot g \cdot d_{CM} \cdot L[\sin(\theta)] + L[\tau] \quad (6.7.2.18)$$

On s'observa la no linealitat esmentada, el sinus de l'angle. Ja que per definició, només es pot obtenir una funció de transferència quan l'expressió és lineal, s'haurà de linealitzar l'expressió en diversos trams del rang de treball.

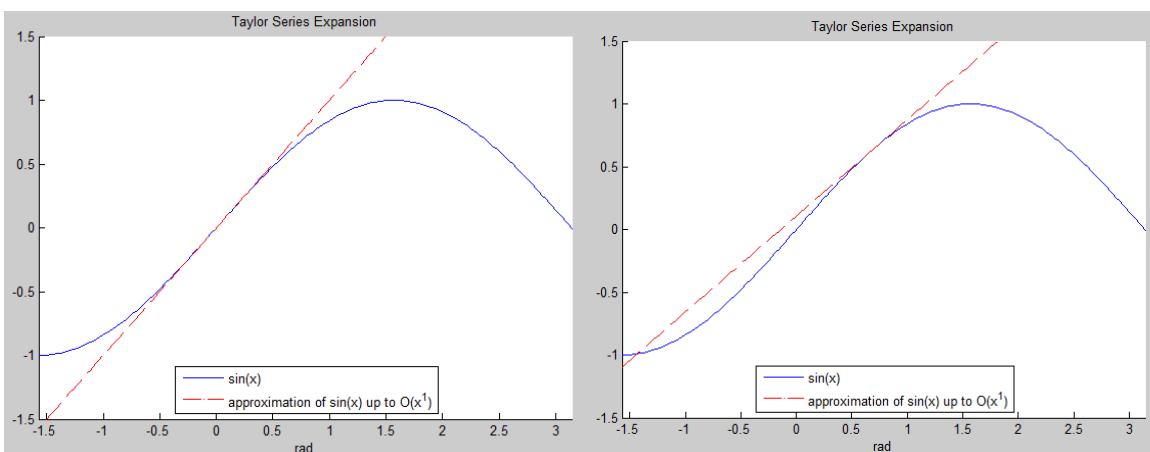
Així, s'utilitzarà la descomposició de Taylor aplicada en diversos punts com a tècnica de linearització.

$$f(x) = f(a) + \frac{f'(a)}{1!}(x-a) + \frac{f^{(2)}(a)}{2!}(x-a)^2 + \dots + \frac{f^{(n)}(a)}{n!}(x-a)^n + R_n(f)$$

Aquest mètode es realitza truncant l'expressió descomposta de Taylor al terme en x , resultant una recta.

D'aquí doncs, se'n derivaran dues funcions de transferència, una que serà vàlida per recorreguts des de 0° fins a 30° , que partirà de l'expressió linealitzada en el punt $\theta = 0^\circ (0rad)$ i una altra que serà vàlida pel tram des dels 30° fins als 60° , i serà la linealitzada en $\theta = 40^\circ (0.7rad)$.

A continuació es pot veure com aquesta linealització és molt fidel a la funció sinus en el rang de treball:



Il·lustració 53 - Linealització per Taylor. Esquerra $\theta = 0^\circ$. Dreta $\theta = 40^\circ$

I les expressions a treballar són:

Per $\theta = 0^\circ (0rad)$:

$$f(\theta) = \sin(\theta) \approx \theta \quad (6.7.2.19)$$

Per $\theta = 40^\circ (0.7rad)$:

$$f(\theta) = \sin(\theta) \approx 0.6428 + 0.7661 \cdot (\theta - 0.6981) = 0.1080 + 0.7661 \cdot \theta \quad (6.7.2.20)$$

Ara, combinant (6.7.2.18) i (6.7.2.19):

$$I \cdot s^2 \cdot L[\theta] + b \cdot s \cdot L[\theta] = -m \cdot g \cdot d_{CM} \cdot L[\theta] + L[\tau] \quad (6.7.2.21)$$

Finalment la dinàmica pel tram 0° a 30° queda modelada com:

$$\frac{\theta(s)}{\tau(s)} = \frac{1}{I \cdot s^2 + b \cdot s + m \cdot g \cdot d_{CM}} = \frac{1}{0.005103 \cdot s^2 + 0.01475 \cdot s + 0.277} \quad (6.7.2.22)$$

En l'altre cas, combinant (6.7.2.18) i (6.7.2.20):

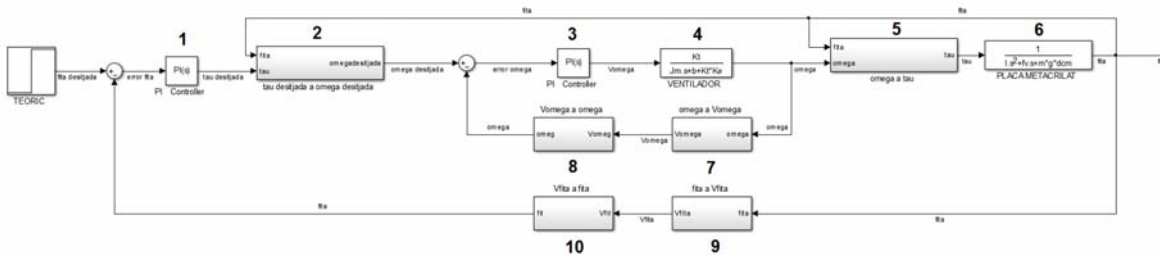
$$I \cdot s^2 \cdot L[\theta] + b \cdot s \cdot L[\theta] = -m \cdot g \cdot d_{CM} \cdot L[0.1080 + 0.7661 \cdot \theta] + L[\tau] \quad (6.7.2.23)$$

La dinàmica pel tram 30° a 60° s'estableix:

$$\frac{\theta(s)}{\tau(s)} = \frac{1}{I \cdot s^2 + b \cdot s + 0.7661 \cdot m \cdot g \cdot d_{CM}} = \frac{1}{0.005103 \cdot s^2 + 0.01475 \cdot s + 0.2125} \quad (6.7.2.24)$$

6.8. Model teòric del sistema

Un cop estudiat el comportament físic de totes les parts que componen el sistema, s'ha representat en un esquema de blocs la modelització de tots els mòduls:



Il·lustració 54 - Esquema de blocs teòric

- Bloc 1: Representa el controlador del llaç realimentat de posició de la placa de metacrilat.

- Bloc 2: Integra la funció $\omega = \sqrt{\tau_{FLUX} \frac{2 \cdot \pi \cdot (r_{ext}^2 - r_{int}^2)}{\rho_{aire} \left(\frac{Q_{max}}{\omega_{max} \cdot 3600} \right)^2 \cdot (L \cdot \cos(\alpha) + b)}}$ corresponent a la funció inversa de l'expressió no lineal (6.7.1.10).

- Bloc 3: Representa el controlador del llaç realimentat de velocitat del ventilador.
- Bloc 4: És la funció de transferència teòrica (6.3.9) del ventilador.
- Bloc 5: Aquest bloc serveix per recuperar el valor de la velocitat angular i és l'expressió (6.7.1.10).
- Bloc 6: És la funció de transferència teòrica de la placa, i segons el punt d'operació serà (6.7.2.17) o (6.7.2.19).
- Bloc 7 i 8: Aquests dos blocs, representen el convertidor freqüència tensió, i el seu punt en comú correspon a la tensió llegida pel PLC. Els dos blocs s'anul·len entre si de cara a l'estudi de control, però s'han mantingut com un mòdul sensor aclaridor del sistema físic.
- Bloc 9 i 10: Passa el mateix que amb el bloc 7 i 8, aquest cop representa el potenciòmetre.

Es pot accedir a l'esquema amb més detall a l'*ANNEX 22*.

7. Model de Control

Una vegada que s'ha entès el funcionament de les parts del sistema i la física que implica, s'obindrà un model experimental que s'utilitzarà per a dissenyar el control de tot el sistema.

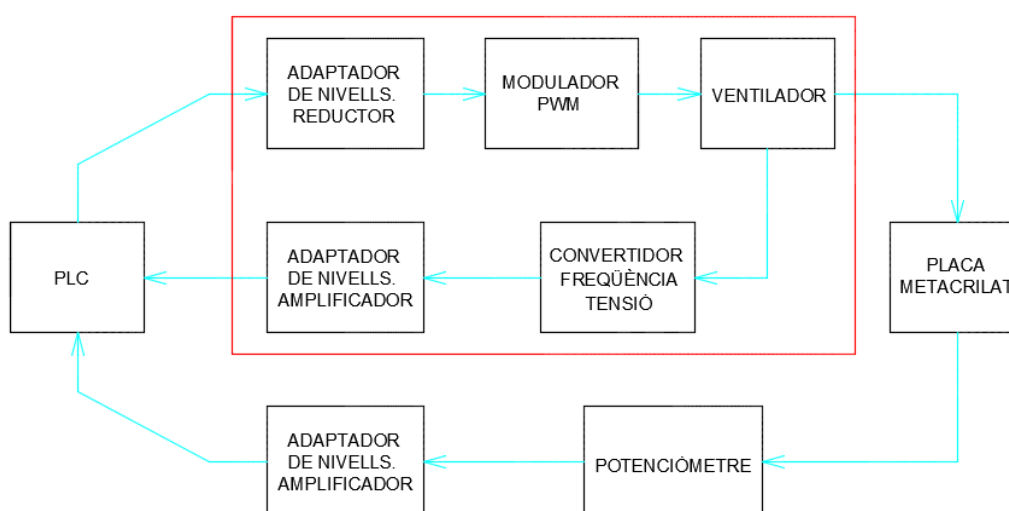
Aquest model integrarà dues plantes. Una primera planta, serà la modelització de la part del sistema que s'encarrega de la monitorització de la velocitat del ventilador, mentre que la segona és responsable de la mesura de l'angle, i serà posteriorment controlada pel PLC.

Així es mostrarà a continuació pas a pas el procés emprat per obtenir cada planta.

7.1. Velocitat Angular

A continuació es determinarà la dinàmica real entre la velocitat angular del ventilador i el senyal que el PLC injecta al sistema.

Com s'ha comentat en punts anteriors, ha sigut necessari la implantació d'un convertidor freqüència a voltatge i una posterior adaptació que transformi la senyal del tacòmetre a una senyal contínua que pugui ser mesurada pel PLC i que variï dintre del seu rang d'entrada. Aquestes dues fases juntament amb el ventilador i el modulador seran tractades com un mateix bloc amb una dinàmica conjunta i constituïran la funció de transferència del ventilador.



Il·lustració 55 - Mòduls que intervenen al llaç de control del ventilador

Tot i això, la velocitat realment està expressada en termes de tensió, si es vol obtenir una funció de transferència amb un guany expressat en unitats de velocitat angular, com ara radians per segon o min^{-1} , s'ha de transformar el senyal del tacòmetre.

Així, ja que la intenció és referenciar la directament de la tensió que rep el PLC del tacòmetre amb la velocitat angular del ventilador, s'ha fet una recollida de punts experimentals per confeccionar els gràfics que permetran deduir aquesta transformació.

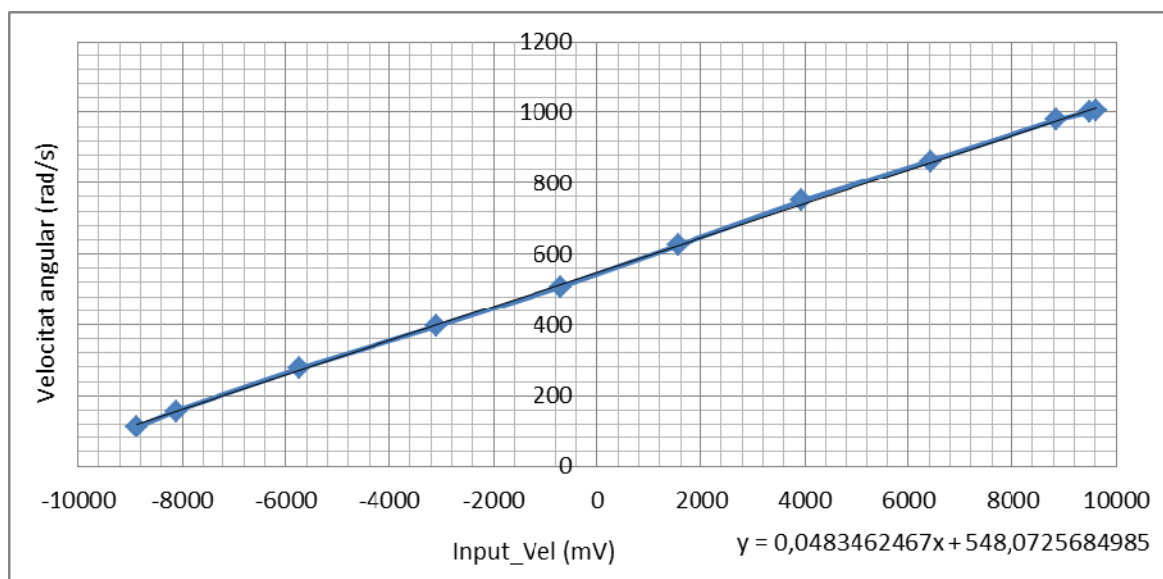
A continuació la taula de valors experimentals i gràfica que relaciona les dues magnituds d'estudi:

Output_PLC (mV)	Input_Vel (mV)	f_{TACO} (Hz)	n (min^{-1})	ω (rad/s)
-10000	-8876	53,47	1069,4	112,0
-8000	-8117	75,40	1508,0	157,9
-6000	-5745	132,30	2646,0	277,1
-4000	-3109	188,40	3768,0	394,6
-2000	-696	242,70	4854,0	508,3
0	1548	298,30	5966,0	624,8
2000	3943	357,80	7156,0	749,4
4000	6428	411,60	8232,0	862,1
6000	8844	467,60	9352,0	979,3
8000	9490	478,20	9564,0	1001,5
10000	9605	480,12	9602,4	1005,6

Taula 3 - Velocitat angular del ventilador

On la velocitat angular s'ha calculat com $n = \frac{f_{TACO} \cdot 60}{3}$ i és una fórmula donada pel fabricant.

Aquesta expressió és la que es feia referència amb la fórmula (6.3.10) en l'apartat 6.3



Gràfica 7 - Relació de la tensió d'entrada al PLC amb la velocitat angular del ventilador

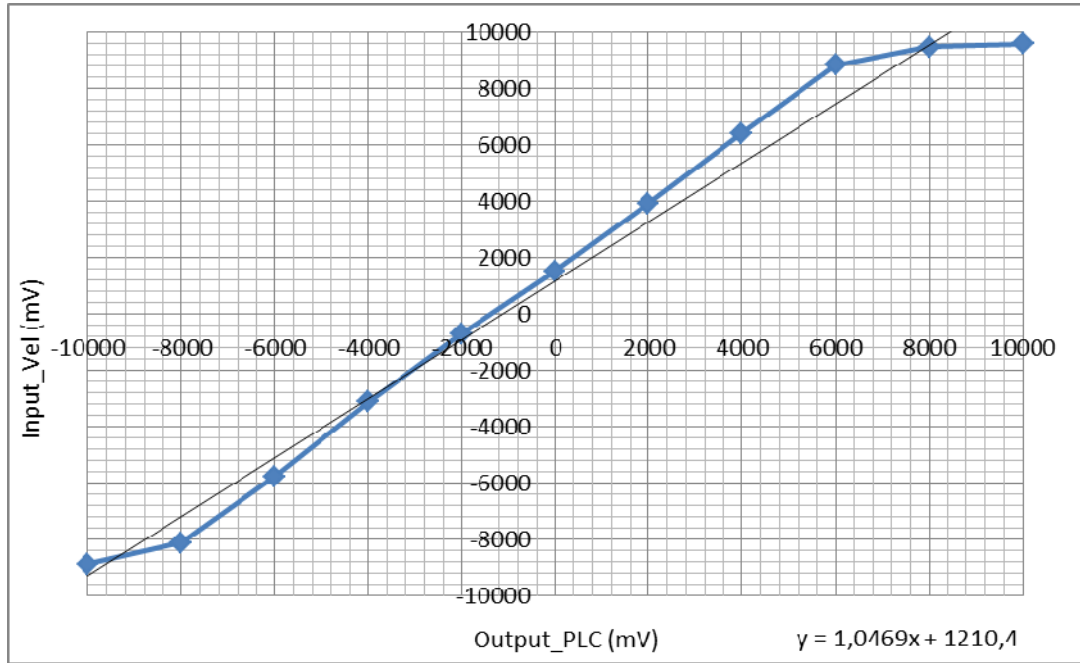
Com es pot observar, la relació entre les magnituds és completament lineal al rang de treball.

7.1.1. Corba estàtica

Aquesta corba, donarà una idea de com és de lineal realment el comportament de la velocitat en front de la tensió que s'injecta al sistema des del PLC. A continuació es mostra una llista de valors obtinguts experimentalment, així com la seva representació:

Output_PLC (mV)	Input_Vel (mV)
-10000	-8876
-8000	-8117
-6000	-5745
-4000	-3109
-2000	-696
0	1548
2000	3943
4000	6428
6000	8844
8000	9490
10000	9605

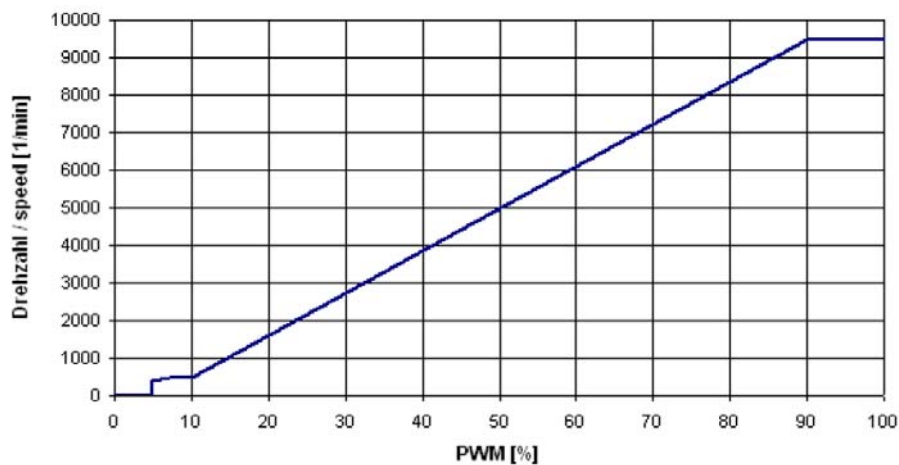
Taula 4 - Valors experimentals de l'entrada i sortida del PLC per a la velocitat



Gràfica 8 - Relació de la tensió de sortida del PLC amb la tensió d'entrada de velocitat

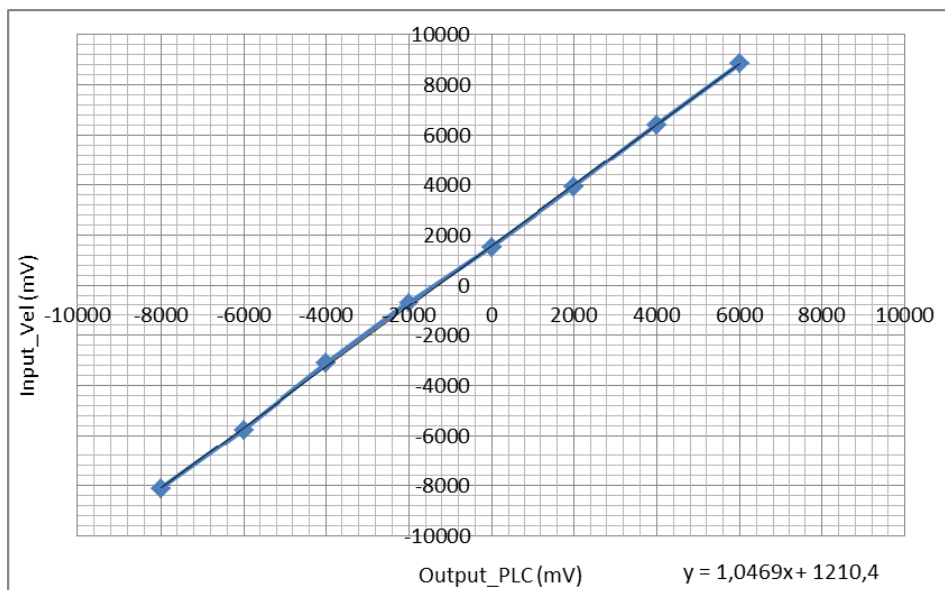
El gràfic representa fidelment el comportament del ventilador, on s'observen dues zones de saturació però amb un comportament lineal ja esperat. Es recorda que la velocitat angular d'un motor de corrent continu és proporcional a la tensió d'entrada als seus borns.

La saturació inferior correspon a un mecanisme de ralenti que té el ventilador i que no li permet reduir la velocitat més de 500 min⁻¹ i aturar-se. L'altra saturació és deguda a què el ventilador ha arribat a la seva màxima velocitat i l'augment de tensió no provoca canvis a la velocitat, que roman a 9500 min⁻¹. Aquests comportaments poden observar-se també a la fitxa tècnica del ventilador:



Il·lustració 56 – Relació entre el cicle de treball d'entrada i la velocitat del ventilador

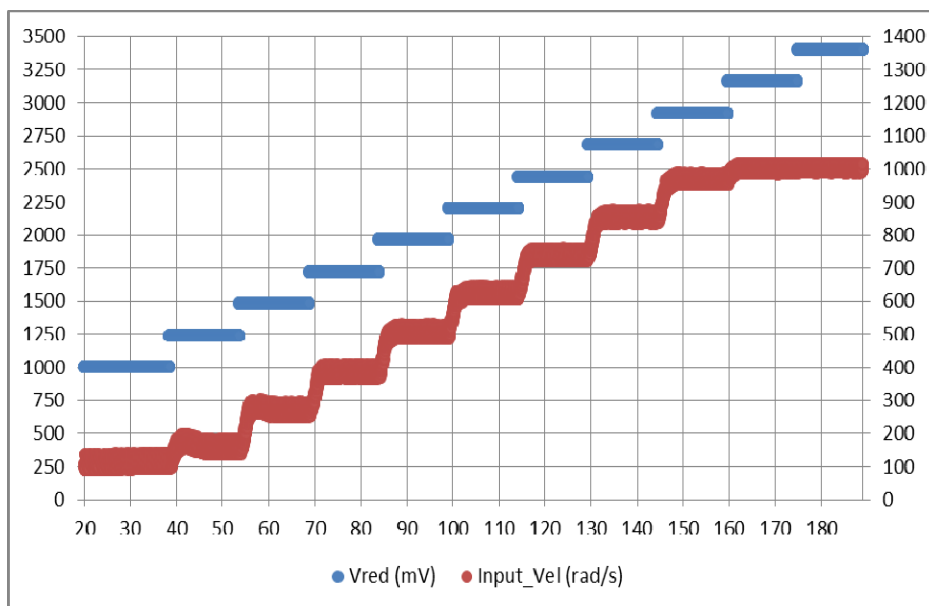
Llavors, si s'eliminen els punts conflictius, s'arriba a la representació d'una corba lineal que justifica el disseny d'una única funció de transferència que servirà per a tot el rang de treball.



Gràfica 9 - Comportament de la velocitat angular

7.1.2. Funció de transferència

Els paràmetres de la funció de transferència s'obtenen a partir d'escombrar tot el rang de treball amb graons i considerant la mitjana dels valors trobats en cada graó, tal com es mostra a continuació:



Gràfica 10 - Escombrat de valors per a la velocitat angular del ventilador

A la gràfica anterior s'han generat diversos graons a l'entrada del sistema per mostrejar el comportament dinàmic del ventilador, que és característic d'una planta de primer ordre. Així s'obté el guany canònic A i la constant de temps τ de la manera habitual.

τ (s)	$A \left(\frac{\text{rad/s}}{\text{mV}} \right)$
1,38	0,1308822581
0,88	0,1845993243
1,26	0,2251244186
1,01	0,2584142857
0,9	0,2835172727
1,04	0,3030086066
0,94	0,3171865672
1,16	0,3319154110
0,84	0,3159784810
0,86	0,2942570588

Taula 5 - Constant de temps i guany canònic per als diferents graons del ventilador

On, els graons en vermell són part de les zones saturades i no es tenen en compte en la mitjana dels valors.

Finalment, la funció de transferència del ventilador té la forma:

$$G_v(s) = \frac{\omega(s)}{V_{red}(s)} = \frac{A}{\tau \cdot s + 1} = \frac{0,27197}{1,027 \cdot s + 1} \quad (7.1.2.1)$$

Amb la velocitat angular en rad/s, la tensió en mV, el guany en $\left(\frac{\text{rad/s}}{\text{mV}} \right)$ i la constant de temps en segons.

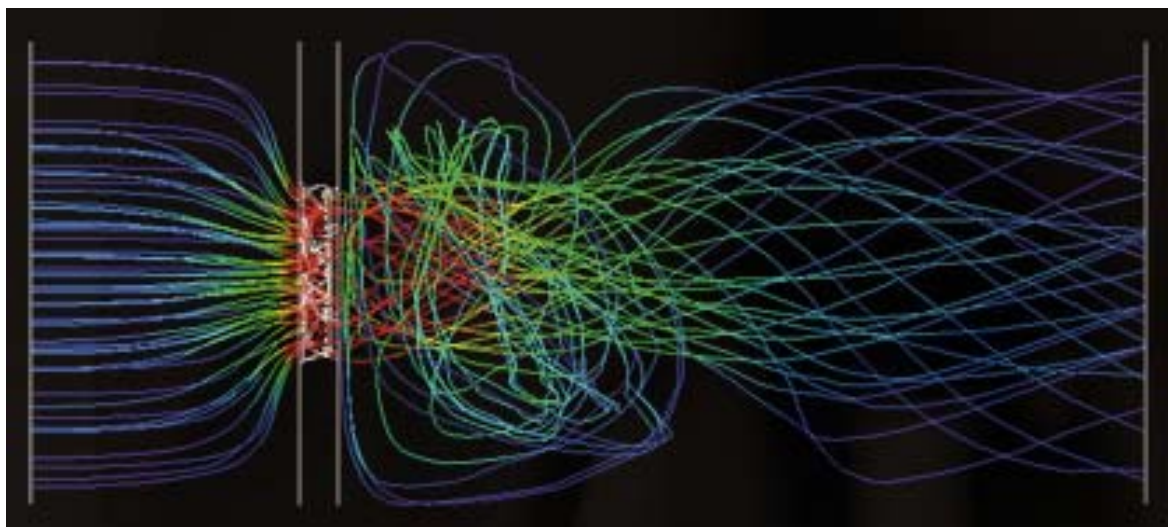
On V_{red} correspon a la tensió reduïda que presenta el circuit entre el reductor de nivells i el modulador de PWM per una qüestió de comoditat, ja que així el guany surt sempre positiu.

7.2. Cabal d'aire

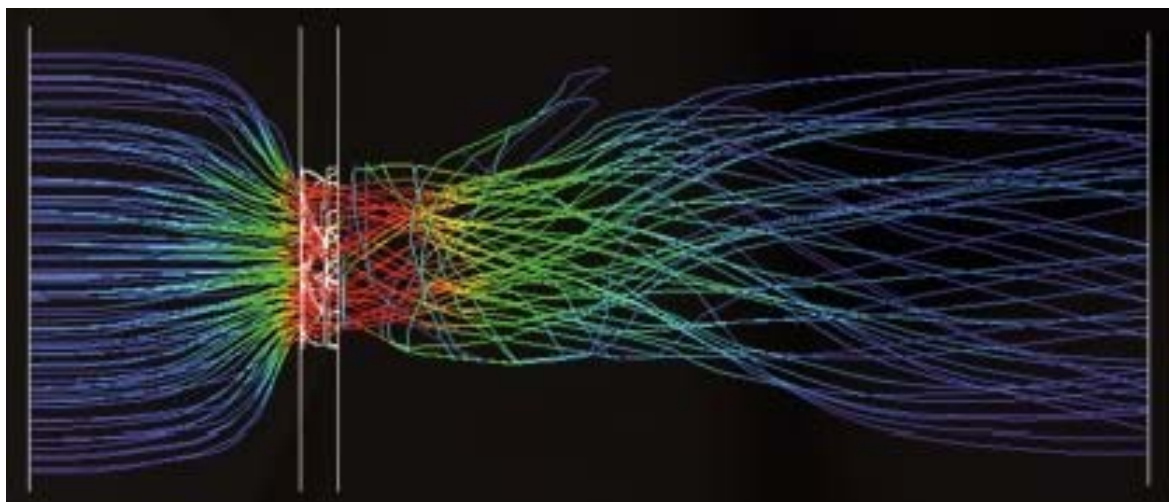
Per a la determinació del cabal d'aire incident o la seva força ara que s'estudia una situació real, és necessari una sèrie de consideracions:

- El flux d'aire no és uniforme
- Hi ha pèrdues de fluxos d'aire per tota la perifèria que s'escapen i no arriben a impactar contra la placa. Aquestes pèrdues són degudes a què el sistema no està dins d'un conducte i el flux tendeix a sortir-se'n de la trajectòria de la placa. A més les fuites s'incrementen quant més espai hi hagi entre el ventilador i la placa
- Existeixen turbulències a la sortida del ventilador que són produïdes per la recirculació del flux.
- Hi ha fortes turbulències a la placa. Aquestes ocasionen pertorbacions en forma d'oscil·lacions que no poden ser previstes i que són més grans contra més cabal li arribi a la placa.

A continuació, una imatge d'una simulació molt representativa del flux que resulta d'un ventilador axial amb i sense directrius [10]:



Il·lustració 57 - Flux d'aire sense directrius



Il·lustració 58 - Flux d'aire amb directrius

On es pot observar la importància de les directrius per a la concentració i homogeneïtat del flux així com la disminució de les turbulències a la sortida.

Així, com es tracta d'un flux caòtic no uniforme i amb pèrdues es considera que la millor opció per relacionar la força que empeny la placa, i per tant el cabal, amb la velocitat de rotació del ventilador, és fent una recollida de dades experimental.

En la següent taula es recull l'entrada del sistema, la velocitat, l'obertura de la placa i el parell que exerceix el flux en la placa per cada angle.

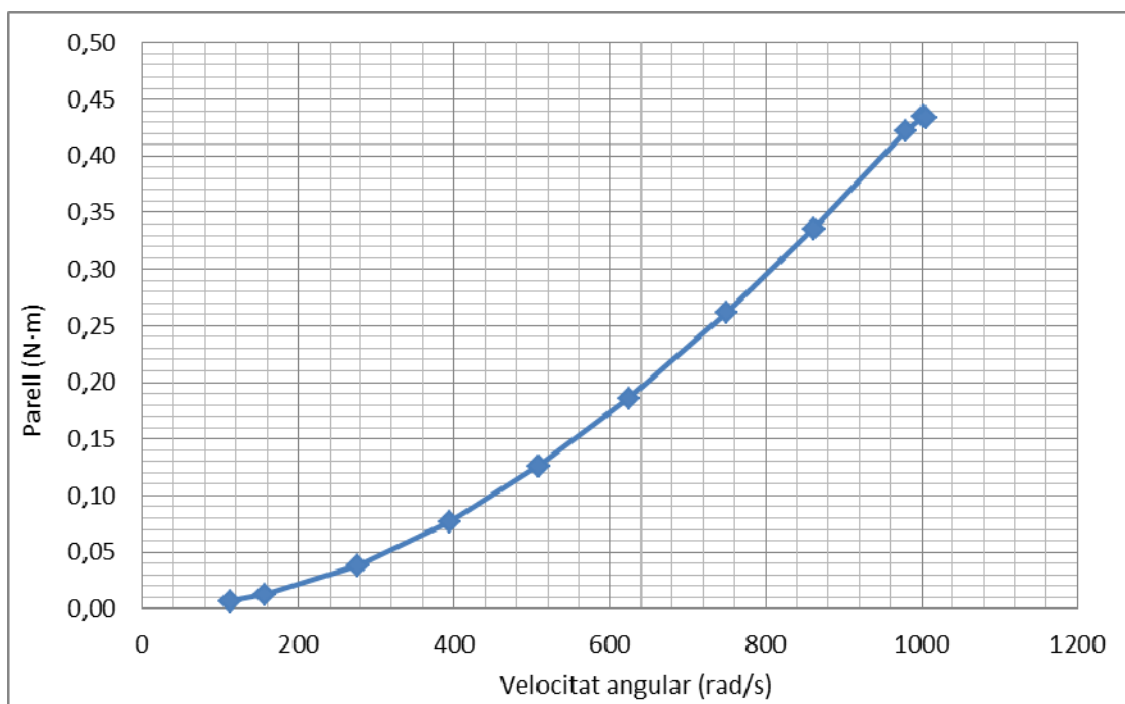
SetValue (mV)	Velocitat angular (rad/s)	Angle (°)	Angle (rad)	τ (N·m)
-10000	112,0	0,00	0,0000	0,0062441180
-8000	157,9	2,00	0,0349	0,0124114236
-6000	277,1	5,00	0,0873	0,0381325600
-4000	394,6	8,00	0,1396	0,0770298985
-2000	508,3	14,17	0,2473	0,1261037412
0	624,8	21,17	0,3694	0,1858240232
2000	749,4	25,83	0,4509	0,2614525635
4000	862,1	31,00	0,5411	0,3356828528
6000	979,3	34,83	0,6080	0,4219672612
8000	1001,5	36,83	0,6429	0,4346883311
10000	1005,6	38,17	0,6661	0,4335548469

Taula 6 - Parell exercit pel flux d'aire

On segons l'expressió (6.7.1.10):

$$\tau_{FLUX} = \frac{\rho_{aire} \cdot \left(\frac{Q_{max}}{\omega_{max} \cdot 3600} \right)^2}{2 \cdot \pi \cdot (r_{ext}^2 - r_{int}^2)} \cdot \omega^2 \cdot (L \cdot \cos(\alpha) + b)$$

Amb aquest mètode es pot representar el parell que empeny la placa en funció de la velocitat angular:



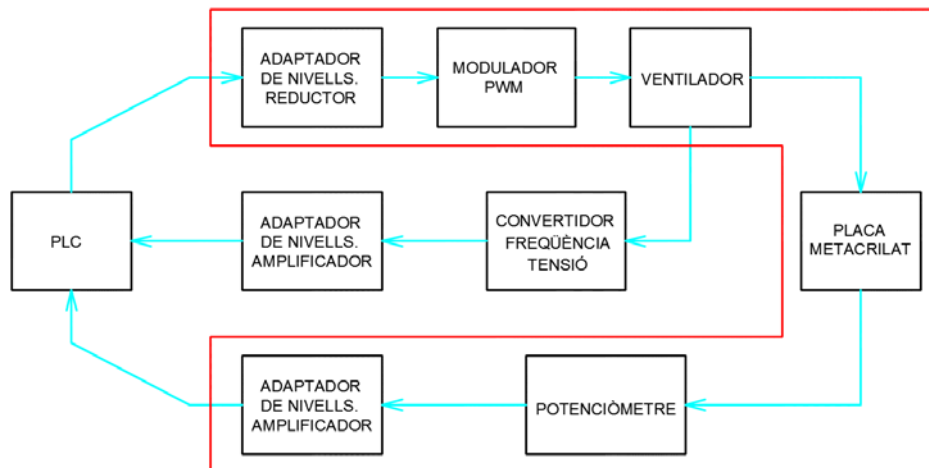
Gràfica 11 - Parell que empeny la placa en funció de la velocitat angular del ventilador

On s'observa un comportament clarament quadràtic.

7.3. Angle girat de la placa

En aquest apartat se seguiran els mateixos passos que per l'obtenció de la funció de transferència de la velocitat angular.

Els mòduls que intervenen en el control en llaç tancat de l'angle de la placa són els següents:

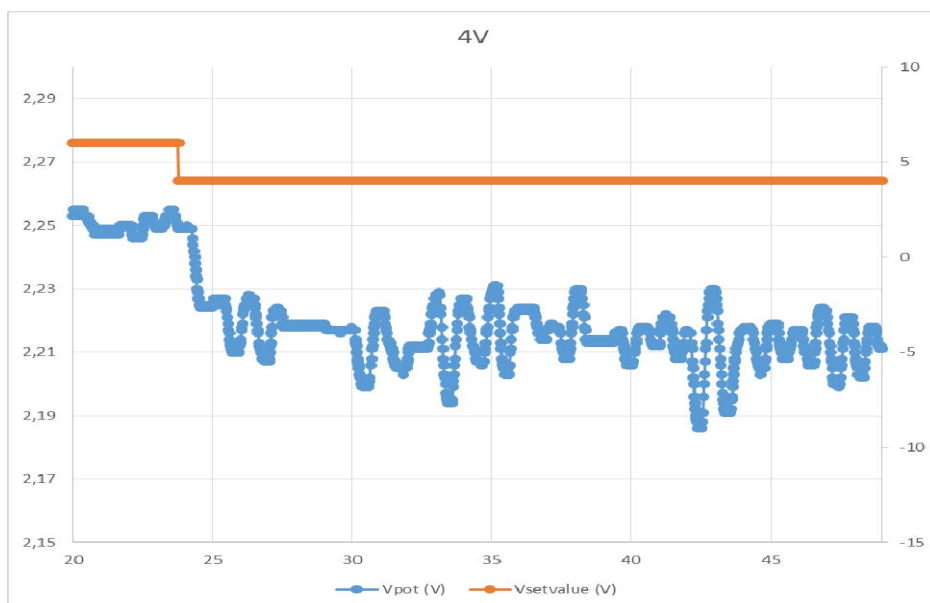


Il·lustració 59 - Mòduls que intervenen al llaç de control de posició

7.3.1. Corba estàtica

Inicialment serà necessari tenir una visió del comportament del sistema en tots els punts en els quals es treballarà. Per aquesta raó, el primer pas que s'ha plantejat, és el de generar la corba estàtica dels components que intervenen en la mesura de l'angle en el sistema.

Quan es treballa amb aquesta planta s'ha de tenir en compte sempre que hi ha diverses turbulències a la zona de la placa, que provoquen que la placa mai arribi a un estat estacionari o que estar dins l'estacionari sigui un rang bastant ampli. A continuació s'observen aquestes turbulències del sistema en resposta a un graó.



Gràfica 12 – Exemple d'oscil·lacions en la resposta del sistema sense els imants

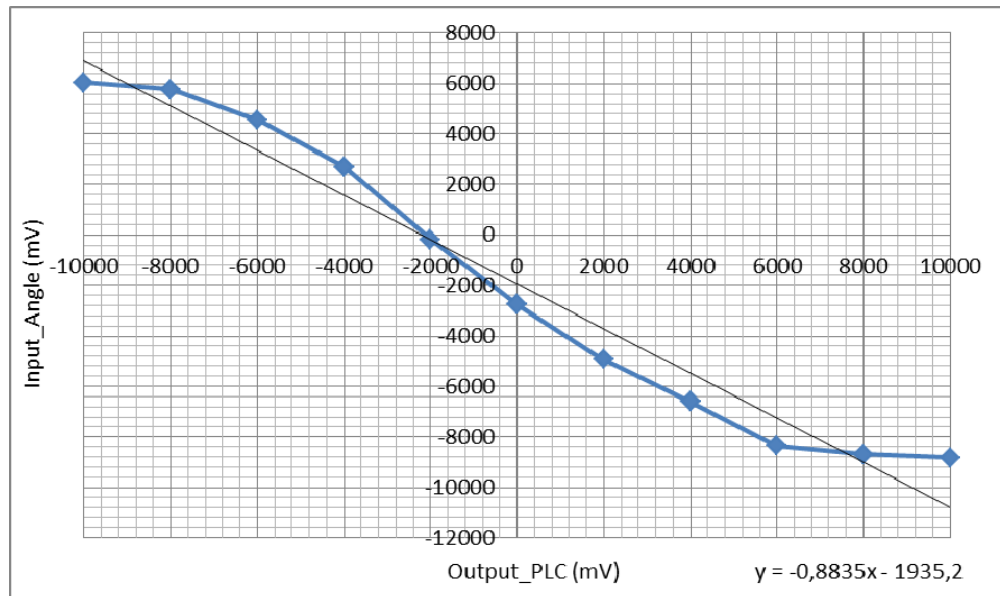
Per aquest motiu s'han incorporat a la placa dos imants que ja s'han tingut en compte en l'estudi estàtic i que s'encarregaran d'augmentar la inèrcia i reduir aquestes pertorbacions. Així, es faran diverses recollides de dades per un mateix punt per tal de precisar el correcte resultat de la corba estàtica:

SetValue (mV)	Input_Angle (mV)			
	Mostra 1	Mostra 2	Mostra 3	Mitjana
-10000	6046	6051	6048	6048
-8000	5770	5763	5765	5766
-6000	4578	4566	4527	4557
-4000	2656	2864	2598	2706
-2000	-224	-321	42	-168
0	-2805	-2675	-2826	-2769
2000	-4952	-4852	-5012	-4939
4000	-6623	-6745	-6449	-6606
6000	-8326	-8265	-8512	-8368
8000	-8503	-8712	-8856	-8690
10000	-8863	-8702	-8912	-8826

Taula 7 - Mostratge dels valors d'angle en funció de l'entrada

Generant finalment, la corba Sortida (Angle) en funció de l'Entrada (Vin):





Gràfica 13 - Entrada de l'angle al PLC en funció de la tensió injectada

Aquest gràfic, ens revela que el comportament del sistema no és lineal, característica que influirà a l'hora de dissenyar el controlador.

7.3.2. Corba Input_Angle - Angle

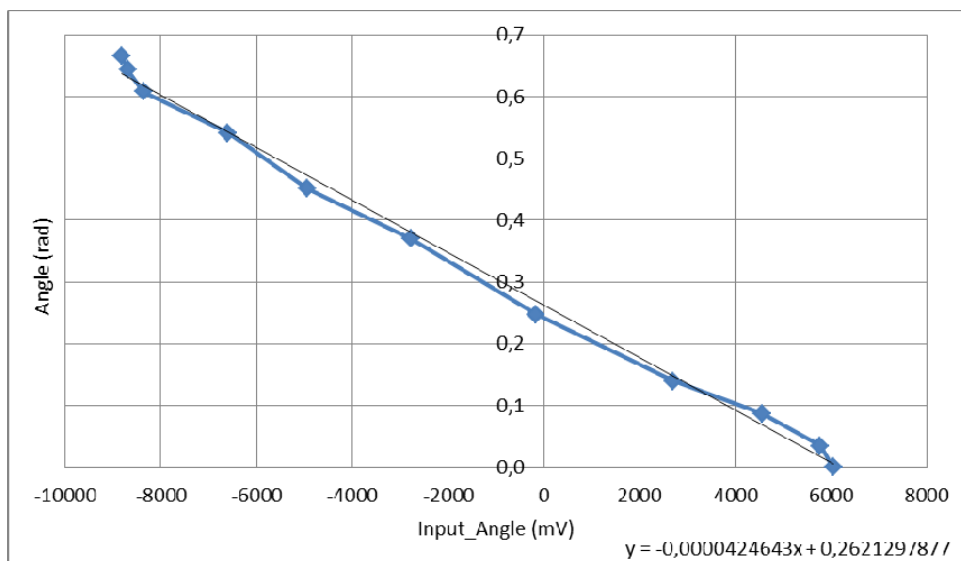
Un pas previ per determinar els paràmetres de la planta del sistema, serà la determinació de la corba que relaciona el voltatge que detecta el sensor, amb el nombre de graus que en aquell instant està marcant la placa de metacrilat.

Fàcilment es poden generar una sèrie de punts gràcies a la funció traça del software de l'autòmat, injectant una sèrie de tensions al sistema i observant la resposta a la placa de metacrilat:

Input_Angle (mV)	Angulo (º)	Angulo (rad)
6048	0,00	0,00
5766	2,00	0,03
4557	5,00	0,09
2706	8,00	0,14
-168	14,17	0,25
-2769	21,17	0,37
-4939	25,83	0,45
-6606	31,00	0,54
-8368	34,83	0,61
-8690	36,83	0,64
-8826	38,17	0,67

Taula 8 - Relació de l'angle de la placa amb la tensió del PLC

Així, a continuació es mostra la corba resultant amb la recta de regressió més adient.



Gràfica 14 - Relació de l'angle de la placa amb la tensió del PLC

7.3.3. Funció de transferència

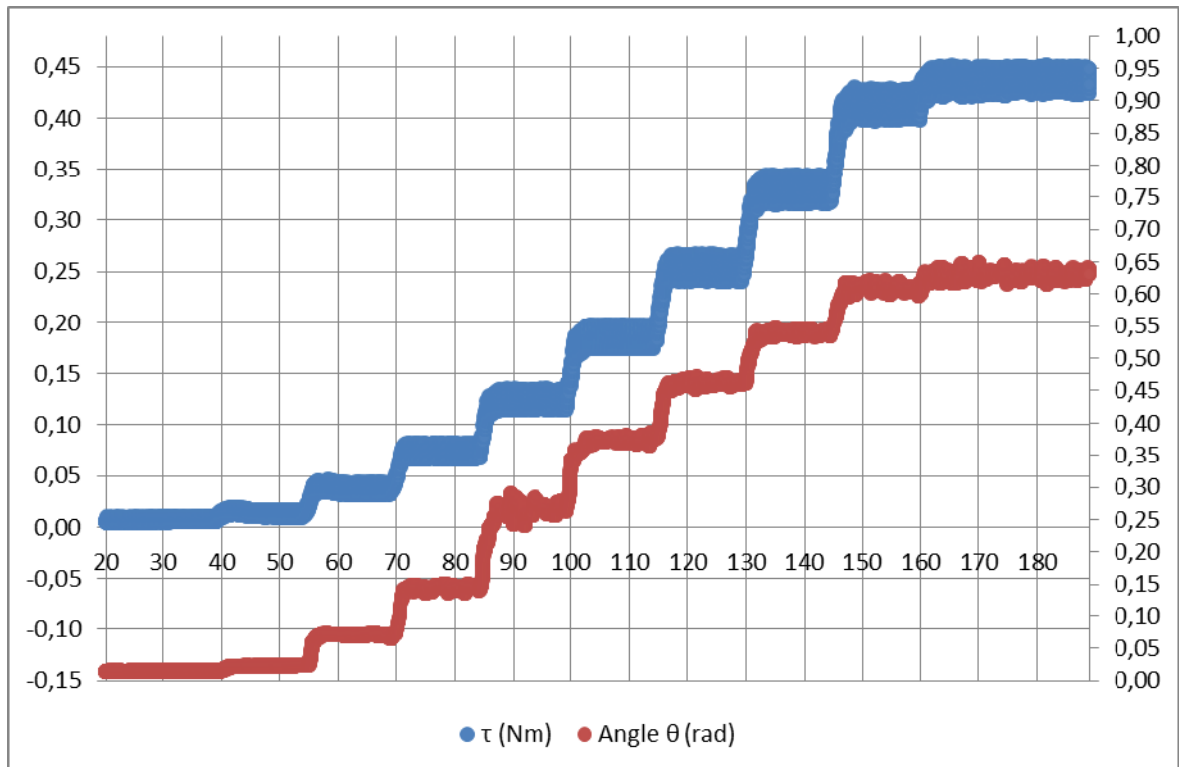
Obtinguda la corba Input_Angle - Angle, ja es poden definir els paràmetres de la planta. Ara bé, cal tenir en compte la següent consideració:

Per a poder integrar la funció de transferència de posició a l'esquema de control, el format escollit haurà de ser el següent:

$$G_A(s) = \frac{A(s)}{\tau(s)} \quad (7.3.3.1)$$

On $A(s)$ és l'angle de la placa de metacrilat expressat en radianys i $\tau(s)$ és el parell exercit pel flux d'aire del ventilador.

Per obtenir aquests paràmetres es realitzarà, com ja s'ha fet per la planta de velocitat, un escombrat de tot el rang d'entrada del PLC realitzant entrades graó en diversos dels punts d'operació:



Gràfica 15 - Escombrat de valors per a la posició de la placa de metacrilat

Fent referència a la gràfica anterior, s'han dut a terme diverses transformacions de les magnituds originals, és a dir, el PLC és capaç de registrar la traça que segueix la tensió als seus ports d'entrada i sortida, per aquest motiu, s'han hagut de transformar aquestes tensions a les magnituds desitjades. Aquesta operació s'ha realitzat tal com s'explica a continuació:

- La magnitud que és representada com les entrades graó, és en realitat la tensió que prové de la velocitat del ventilador, on s'ha transformat a la $\tau(s)$ gràcies a l'expressió (6.7.1.10). Aquesta expressió, necessita de l'angle de la placa en cada instant pel càlcul del parell a la placa.
- L'angle correspon al valor instantani de la tensió rebuda al port d'entrada de posició de l'autòmat transformat fent ús de la recta trobada en l'apartat anterior (Gràfica 14). Aquesta transformació serveix també per transformar la resposta graó, que resulta ser l'angle en radiants.

En primera instància, la resposta observada té la forma d'una resposta de primer ordre, però en el plantejament teòric ha resultat ser una planta de segon ordre (Punt 6.7.2) i,

adicionalment, s'ha observat a la corba estàtica el seu comportament no lineal. Per aquestes raons, l'obtenció d'una sola planta i per tant, d'un sol controlador de caràcter lineal faria que el comportament del sistema no segueixi del tot el comportament real del sistema.

Per resoldre aquesta no linealitat s'ha plantejat la utilització de dues plantes diferents per aproximar el comportament real en dos rangs, tal com s'ha proposat en el càlcul teòric de l'obtenció de la planta teòrica (Punt 6.7.2).

Així, la idea és la d'introduir dos controladors diferents, utilitzant un o un altre en funció de la zona de treball per on la placa passi. Aquesta part es tractarà més detingudament als punts següents.

Finalment, es mostra a continuació, els paràmetres obtinguts per cada resposta graó del rang del PLC:

τ (s)	A $\left(\frac{rad}{Nm}\right)$
2,12	2,0066964286
2,08	1,8994651322
2,28	1,9660780707
2,40	2,0758006697
0,96	1,9684032463
2,22	1,8237171016
1,00	1,6085786761
1,52	1,4571652934
1,30	1,4307987218
1,53	1,4162647966

Taula 9 - Constant de temps i guany canònic per als diferents graons de la placa

On s'ha realitzat una mitjana aritmètica dels valors per formar les dues plantes, ignorant els valors en vermell que corresponen a les zones de saturació del ventilador, on els valors obtinguts no són precisos.

S'obtenen doncs, les següents plantes experimentals per a la placa de metacrilat:

$$G_{A1}(s) = \frac{\theta(s)}{\tau(s)} = \frac{A}{\tau \cdot s + 1} = \frac{1,98}{2,253 \cdot s + 1} \quad (7.3.3.2)$$

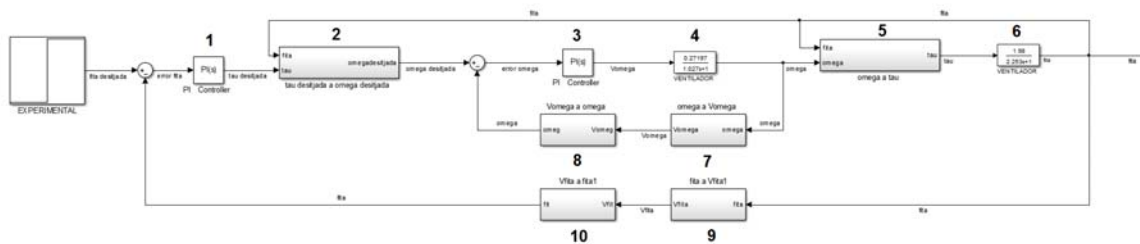
$$G_{A2}(s) = \frac{\theta(s)}{\tau(s)} = \frac{A}{\tau \cdot s + 1} = \frac{1,714}{1,425 \cdot s + 1} \tag{7.3.3.3}$$

Amb el parell en Nm, l'angle en radiants, el guany en $\left(\frac{rad}{Nm}\right)$ i la constant de temps en segons.

El lliendar de canvi entre la planta 1 i la 2, està aproximadament als 20° de la placa de metacrilat.

7.4. Model experimental del sistema

En aquest apartat, es farà un breu recordatori dels blocs que componen l'esquema de control, on aquesta vegada els blocs de les plantes del sistema han sigut obtingudes de manera experimental:



Il·lustració 60 - Esquema de blocs experimental

- Bloc 1: Representa el controlador del laç realimentat de posició de la placa de metacrilat.

- Bloc 2: Integra la funció $\omega = \sqrt{\tau_{FLUX} \frac{2 \cdot \pi \cdot (r_{ext}^2 - r_{int}^2)}{\rho_{aire} \cdot \left(\frac{Q_{max}}{\omega_{max} \cdot 3600}\right)^2 \cdot (L \cdot \cos(\alpha) + b)}}$ corresponent a la funció inversa de l'expressió no lineal (6.7.1.10).

- Bloc 3: Representa el controlador del laç realimentat de velocitat del ventilador.
- Bloc 4: És la funció de transferència experimental (7.1.2.1) del ventilador.

- Bloc 5: Aquest bloc serveix per recuperar el valor de la velocitat angular i és l'expressió (6.7.1.10).
- Bloc 6: És la funció de transferència experimental de la placa, i segons el punt d'operació serà (7.3.3.2) o (7.3.3.3).
- Bloc 7 i 8: Aquests dos blocs, representen el convertidor freqüència tensió, i el seu punt en comú correspon a la tensió llegida pel PLC. Els dos blocs s'anul·len entre si de cara a l'estudi de control, però s'han mantingut com un mòdul sensor aclaridor del sistema físic.
- Bloc 9 i 10: Passa el mateix que amb el bloc 7 i 8, aquest cop representa el potenciòmetre.

Es pot accedir a l'esquema amb més detall a l'ANNEX 23.

8. Control

S'arriba finalment a l'apartat que dóna sentit al projecte, on es prendran en consideració tots els punts anteriors per avaluar l'estabilitat del sistema i realitzar simulacions amb les funcions deduïdes anteriorment. Un cop validats els models es dissenyaran i implementaran diversos controladors pel sistema.

Les simulacions que es veuran a continuació estan realitzades amb el software Simulink del Matlab i fins que no s'entri a la fase del disseny dels controladors, estaran controlades amb un mateix controlador en igualtat de condicions per al seu anàlisi i comparació.

8.1. Validació del llaç de control de velocitat del ventilador

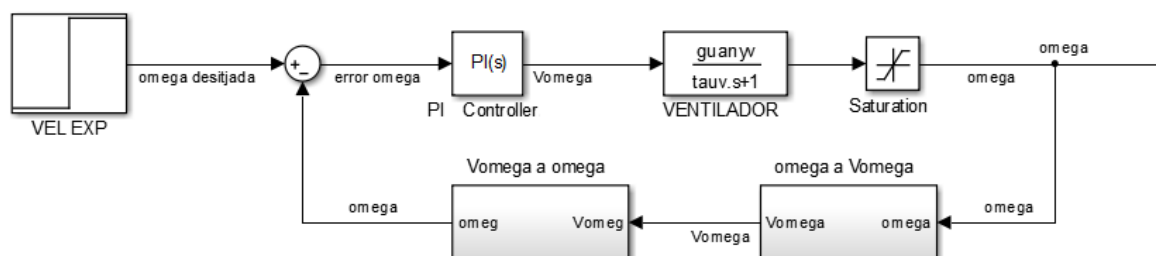
Per validar que el comportament del model del ventilador és l'esperat i semblant a la realitat es tindran en compte tant el model teòric com l'obtingut experimentalment.

En el cas particular del model teòric del ventilador, conté paràmetres interns desconeguts del ventilador, i posat que el fabricant no permet la difusió d'aquesta informació, s'ha optat per utilitzar la planta de velocitat del ventilador experimental per al disseny del controlador.

Planta de velocitat teòrica:
$$G_{V_{TEOR}}(s) = \frac{\omega(s)}{V_{red}(s)} = \frac{K_t}{J_m \cdot s + b + K_t \cdot K_e} \quad (6.3.9)$$

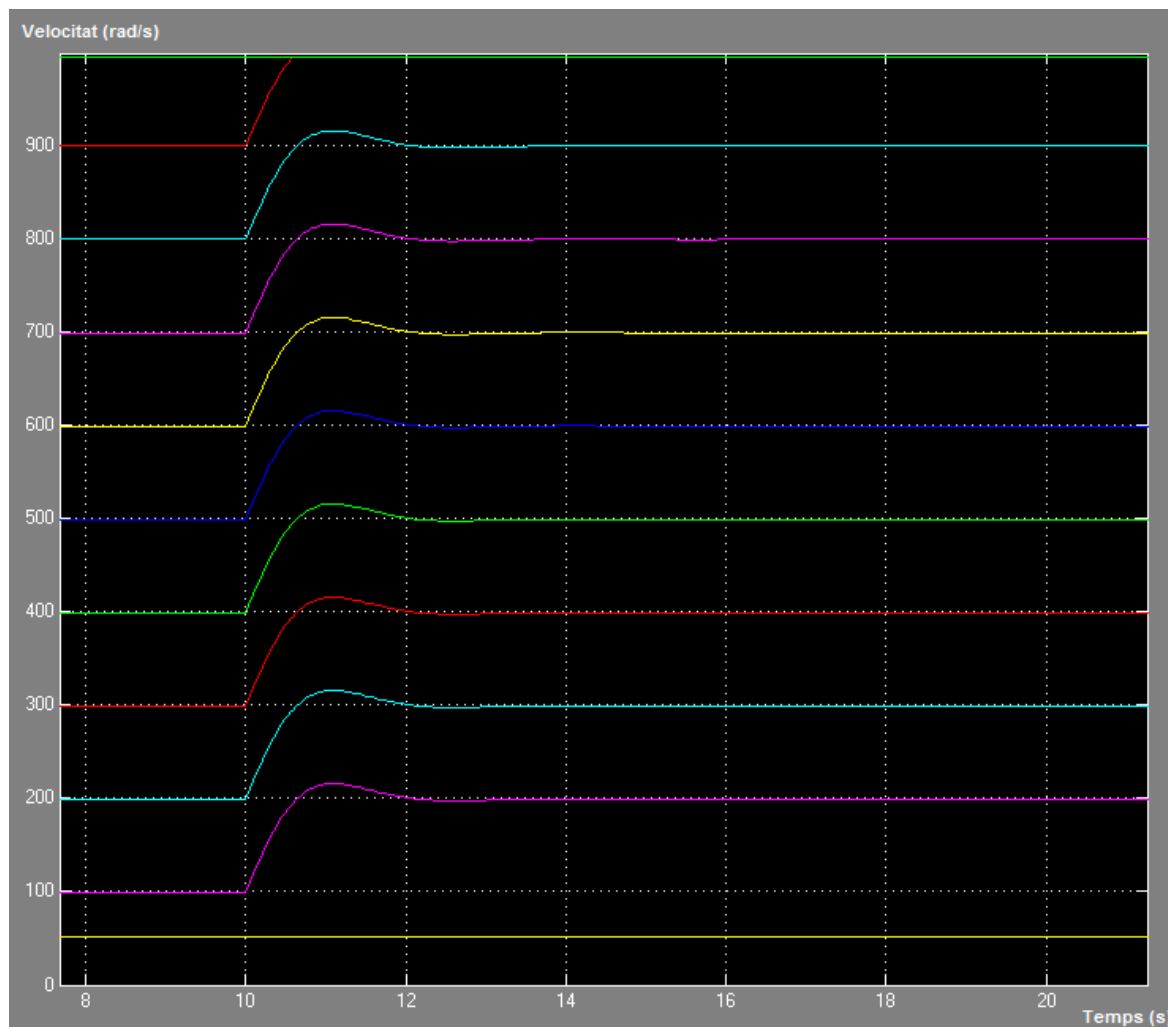
Planta de velocitat experimental:
$$G_{V_{EXPER}}(s) = \frac{\omega(s)}{V_{red}(s)} = \frac{0,27197}{1,027 \cdot s + 1} \quad (7.1.2.1)$$

Així es simularà la planta experimental amb un controlador proporcional-integral (PI) amb diferents consignes per validar que el seu comportament és fidel a la realitat:



Il·lustració 61 - Llaç de control de la velocitat del ventilador

Com es pot observar, s'hi ha introduït una saturació per a apropar encara més el sistema a la realitat, on es limita la velocitat del ventilador entre els 500 min^{-1} i els 9500 min^{-1} corresponent al límit de velocitat físic del ventilador.



Il·lustració 62 - Diferents consignes de velocitat

Queda doncs, validada la planta per al rang entre els $52,36 \text{ rad/s}$ i els $994,84 \text{ rad/s}$.

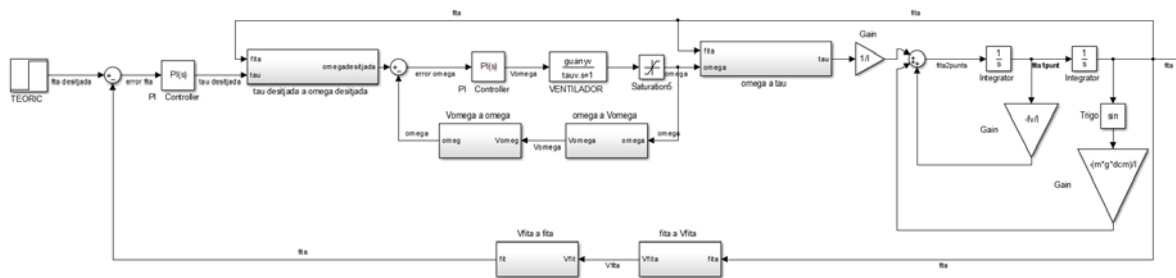
8.2. Validació del llaç de control de posició de la placa de metacrilat

Per la validació de la planta de posició, es triarà l'opció més convenient d'entre les diferents plantes obtingudes al llarg del estudi.

8.2.1. Validació teòrica

Per una banda, s'estudiarà la possibilitat d'utilitzar com a planta de referència, les plantes de l'estudi teòric, ja que estan formades per paràmetres reals de la placa i és molt fàcil d'adaptar a altres tipus de plaques que es puguin utilitzar en un futur. D'aquesta manera, cada paràmetre té un significat físic.

Com a recordatori, es va fer un truncament de l'expressió de Taylor del sinus en dos punts de treball per a adaptar el comportament de la planta a un comportament lineal. Doncs, a continuació s'observen diverses corbes, mostrant l'exactitud de les aproximacions lineals en comparació amb la simulació no lineal, que és la següent [11]:



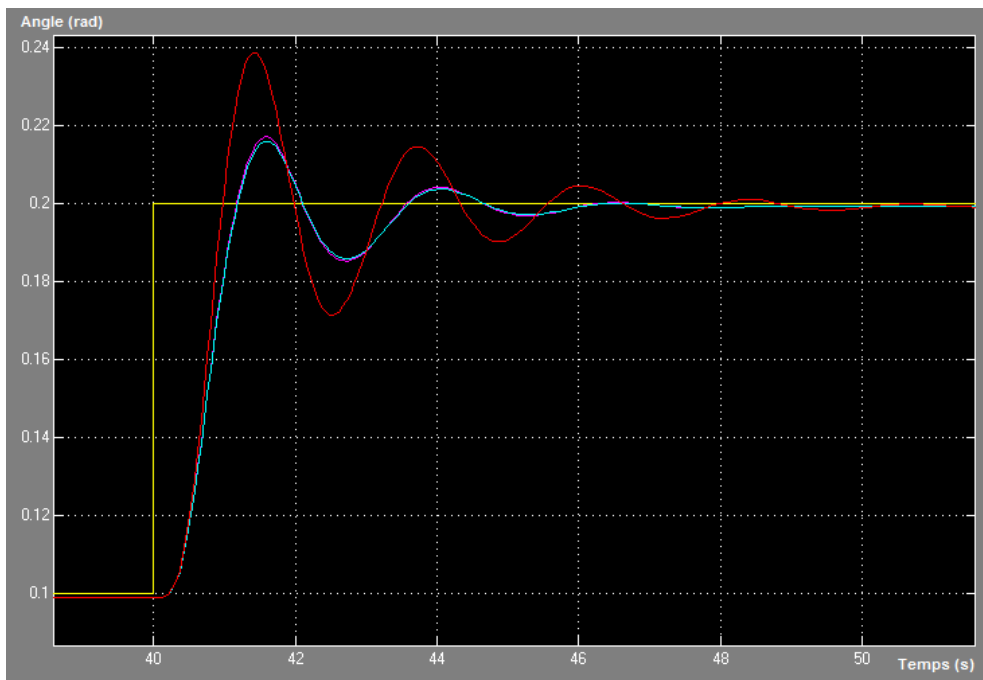
Il·lustració 63 - Diagrama de la simulació no lineal

I les funcions de transferència es recorda que són:

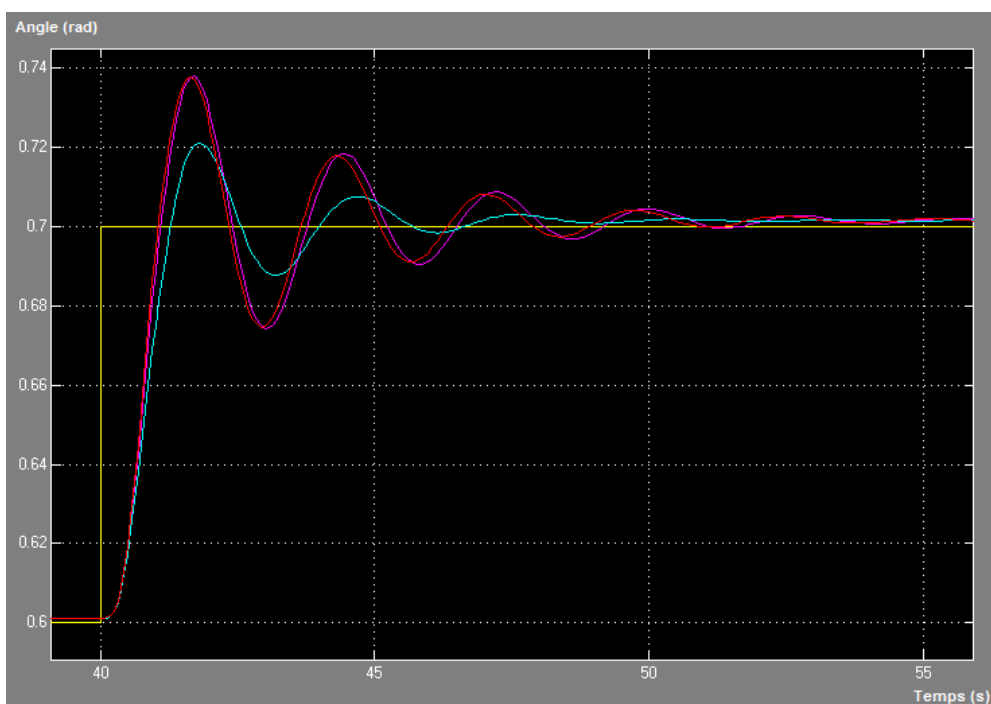
$$G_{A_{TEO1}}(s) = \frac{\theta(s)}{\tau(s)} = \frac{1}{I \cdot s^2 + b \cdot s + m \cdot g \cdot d_{CM}} = \frac{1}{0.005103 \cdot s^2 + 0.01475 \cdot s + 0.277} \quad (6.7.2.22)$$

$$G_{A_{TEO2}}(s) = \frac{\theta(s)}{\tau(s)} = \frac{1}{I \cdot s^2 + b \cdot s + 0.7661 \cdot m \cdot g \cdot d_{CM}} = \frac{1}{0.005103 \cdot s^2 + 0.01475 \cdot s + 0.2125} \quad (6.7.2.24)$$

Així, en les següents simulacions, la línia lila és la simulació no lineal, la blava la resposta de la planta per a angles petits (menys de 30°) i la vermella la resposta de la planta per a angles grans (més de 30°):



Il·lustració 64 - Respostes dels sistemes per a angles petits



Il·lustració 65 - Respostes dels sistemes per a angles grans

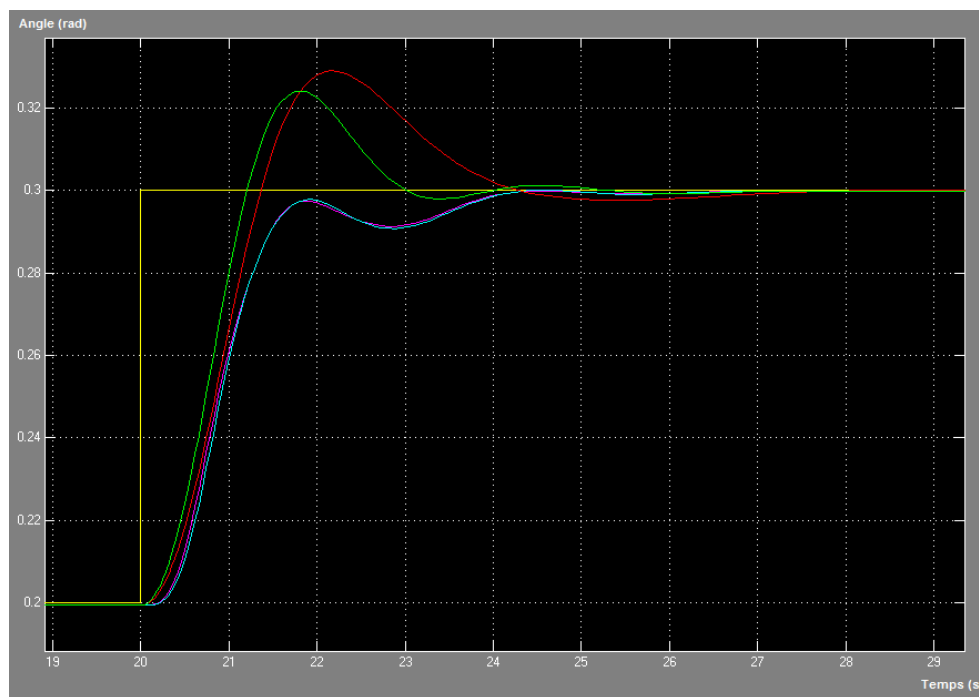
Es compleix doncs, que cada planta treballa més fidelment a la realitat al voltant del seu punt de treball. Es valida així, l'opció teòrica per a dissenyar els controladors pertinents.

8.2.2. Validació experimental

Si bé és cert que ja es podria dissenyar el controlador utilitzant les plantes obtingudes teòricament, es contemplarà si l'opció d'emprar les plantes obtingudes experimentalment, s'ajusten millor a la realitat.

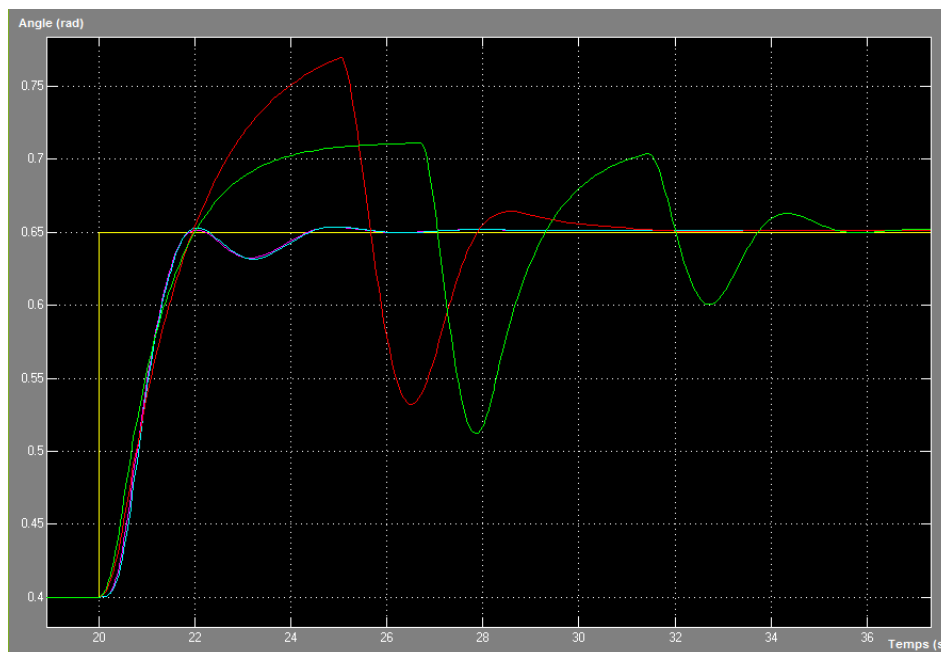
A continuació, es compara el comportament de la resposta a un graó de les plantes experimentals i les teòriques. S'observen les següents respostes:

- Lila: Resposta a la planta teòrica per a angles petits.
- Blava: Resposta a la planta teòrica per a angles grans.
- Verda: Resposta a la planta experimental per a angles petits.
- Vermella: Resposta a la planta teòrica per a angles grans.



Il·lustració 66 - Comportament del sistema per a angles petits

Per a petits angles, totes les plantes semblen funcionar i ajustar-se en menor o major grau a la realitat, però si es força la simulació per a angles més grans, s'obté la següent resposta:



Il·lustració 67 - Comportament del sistema per a angles grans

On la saturació del ventilador comença a malbaratar l'acció de control ocasionant una resposta estranya. Aquest comportament es repeteix per a diversos controladors provats a la simulació.

Així doncs, per evitar aquests comportaments i, ja que les plantes de segon ordre teòriques plasmen de manera més fidel el comportament real, s'ha considerat la utilització de la planta teòrica pel disseny dels controladors definitius, amb l'afegit, de que és molt més fàcil determinar la funció de transferència d'una placa de metacrilat utilitzant els paràmetres físics que la componen.

Per tant, queden invalidades les plantes experimentals, que es recorda que eren de primer ordre i amb la forma:

$$G_{A_{EXP1}}(s) = \frac{\theta(s)}{\tau(s)} = \frac{A}{\tau \cdot s + 1} = \frac{1,98}{2,253 \cdot s + 1} \quad (7.3.3.2)$$

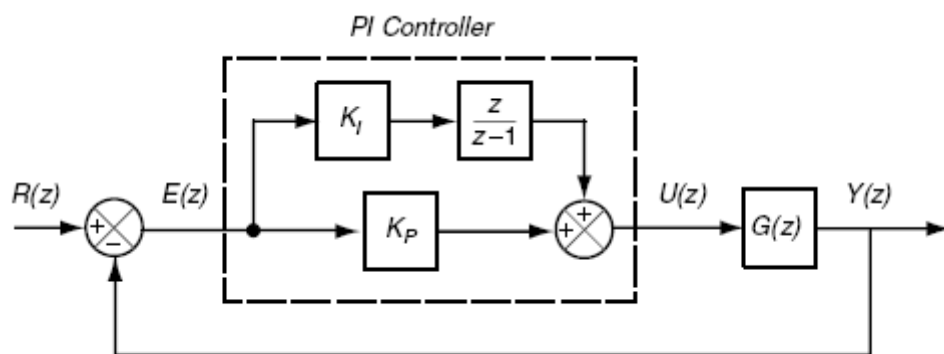
$$G_{A_{EXP2}}(s) = \frac{\theta(s)}{\tau(s)} = \frac{A}{\tau \cdot s + 1} = \frac{1,714}{1,425 \cdot s + 1} \quad (7.3.3.3)$$

8.3. Controlador de velocitat

Després de validar la planta només queda fixar el tipus, els paràmetres del controlador i un dels diversos mètodes de disseny apressos al llarg de la carrera.

En aquest cas, el sistema és suficientment senzill com perquè el mètode d'assignació de pols no finalitzi en un sistema d'equacions gran i farragós, per aquesta raó s'utilitzarà aquest mètode.

Es partirà d'un controlador PI (Proporcional-Integral), que a priori s'entén suficient per controlar de manera eficaç el sistema:



Il·lustració 68 - Controlador Proporcional-Integral

Així doncs, la primera etapa del disseny del controlador és la d'aplicar la transformada en z de la planta de velocitat del ventilador.

El procés simbòlic de transformació d'una planta de primer ordre es realitza mitjançant un mantenidor, en aquest cas, d'ordre zero, que multiplicats entre si i transformats al camp z esdevé la següent expressió:

$$\text{Planta genèrica de primer ordre:} \quad G(s) = \frac{A}{\tau \cdot s + 1} \quad (8.3.1)$$

$$\text{Mantenidor d'ordre zero:} \quad M_{oz}(s) = \frac{1 - e^{-T_s \cdot s}}{s} \quad (8.3.2)$$

$$G(z) = M_{oz}(s) \cdot G(s) = \frac{1 - e^{-T_s \cdot s}}{s} \cdot \frac{A}{\tau \cdot s + 1} = Z \left[1 - e^{-T_s \cdot s} \right] \cdot Z \left[\frac{\frac{A}{\tau}}{s \cdot \left(s + \frac{1}{\tau} \right)} \right] =$$

$$= A \left(\frac{z-1}{z} \right) \cdot \frac{z \cdot \left(1 - e^{-\frac{T_s}{\tau}} \right)}{(z-1) \cdot \left(z - e^{-\frac{T_s}{\tau}} \right)} = \frac{A \cdot \left(1 - e^{-\frac{T_s}{\tau}} \right)}{z - e^{-\frac{T_s}{\tau}}}$$

On finalment:

$$G(z) = \frac{A \cdot \left(1 - e^{-\frac{T_s}{\tau}} \right)}{z - e^{-\frac{T_s}{\tau}}} \tag{8.3.3}$$

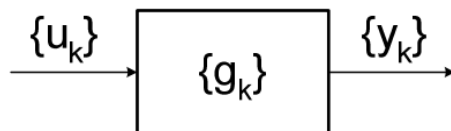
I avaluat per als paràmetres de la planta de velocitat:

$$G_V(z) = M_{oz}(s) \cdot G_V(s) = \frac{1 - e^{-0.001 \cdot s}}{s} \cdot \frac{0,27197}{1,027 \cdot s + 1} = \frac{0,0002646}{z - 0,999027} \tag{8.3.4}$$

Així es troba finalment l'expressió de la planta de velocitat del ventilador en termes de z i és possible aplicar el mètode d'assignació de pols per al sistema on s'avaluarà, és a dir, el PLC, on s'implementarà el controlador. Aquest sistema digital anirà mostrejant tots els ports d'entrada amb un període de mostratge de 0.001 segons ($T_s = 0.001s$).

La segona fase del disseny dels controladors resta en la implementació d'un codi de programació a l'autòmat que actuï de controlador del sistema. L'acció de control del codi serà el resultat de la transformació del controlador dissenyat PI en les anomenades equacions en diferències.

Per a qualsevol funció de transferència en z, la transformació a equació per diferències ve donada per una reestructuració de coeficients tal com es mostra a continuació [12]:



$$G(z) = \frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_m z^{-m}}{1 - a_1 z^{-1} - \dots - a_n z^{-n}} \tag{8.3.5}$$

$$y_k = a_1 \cdot y_{k-1} + a_2 \cdot y_{k-2} + \dots + a_n \cdot y_{k-n} + b_0 \cdot u_k + b_1 \cdot u_{k-1} + \dots + b_m \cdot u_{k-m} \tag{8.3.6}$$

I per al cas d'un controlador PI en el camp discret z , la forma és la següent:

$$PI(z) = K_p + K_I \frac{T_s \cdot (z+1)}{2(z-1)} = \frac{\left(K_p + \frac{K_I \cdot T_s}{2}\right)z + \left(\frac{K_I \cdot T_s}{2} - K_p\right)}{z-1} = \frac{\left(K_p + \frac{K_I \cdot T_s}{2}\right) + \left(\frac{K_I \cdot T_s}{2} - K_p\right)z^{-1}}{1-z^{-1}}$$

I ja que

$$PI(z) = \frac{b_0 + b_1 \cdot z^{-1}}{1 - a_1 \cdot z^{-1}} \quad (8.3.7)$$

Els coeficients són:

$$a_1 = 1 \quad b_0 = \left(K_p + \frac{K_I \cdot T_s}{2}\right) \quad b_1 = \left(\frac{K_I \cdot T_s}{2} - K_p\right) \quad (8.3.8)$$

On finalment, el codi a implementar serà:

$$y_k = a_1 \cdot y_{k-1} + b_0 \cdot u_k + b_1 \cdot u_{k-1} \quad (8.3.9)$$

Aquesta serà la llei de control que haurà de realitzar el codi al PLC, on treballarà amb les mostres de l'entrada i la sortida actuals i passades.

Finalment, l'última fase del disseny dels controladors esdevé un cicle de prova i error, millorant el codi fins que el controlador dissenyat es comporti com s'espera a la realitat.

Un dels problemes que han sorgit, és que no es poden utilitzar pols massa ràpids, ja que l'acció de control satura i la resposta sofreix retards i altres inestabilitats. Així, es va millorar el comportament implementant una saturació per software de l'acció de control que evita que surti del rang de treball. Aquesta millora ha permès imposar pols més ràpids, on s'ha reduït el temps d'establiment i permet arribar a l'estacionari uns segons abans.

En el cas de la planta de velocitat, no és possible trobar un controlador amb un temps d'establiment menor sense perjudicar l'acció de control, això és degut al fet que l'arrissat del convertidor Freqüència-Tensió s'hauria de polir més o millorar el circuit amb un filtre passa baixos, a continuació es demostrarà l'obtenció dels paràmetres definitius del controlador de la velocitat del ventilador.

Primer, s'imposen els pols per a un sistema en temps continu, on es fixen el sobrepuig màxim en 9,73% i el temps d'establiment en 5s [13]:

Sobrepuig màxim:

$$M_p(\%) = e^{-\frac{\xi \cdot \pi}{\sqrt{1-\xi^2}}} \cdot 100 = 9,73 \quad (8.3.10)$$

$$\xi = 0,595698 \quad (8.3.11)$$

Temps d'establiment: $t_s = 4 \frac{1}{\sigma} = 5s$ (8.3.12)

$$\sigma = 0,8 \quad (8.3.13)$$

Ja que els pols en temps continu es poden expressar de dues formes diferents, es poden igualar dues expressions i determinar els pols desitjats:

$$s = -\sigma \pm \omega j \quad (8.3.14)$$

$$s = -\xi \cdot \omega_n \pm \omega_n \cdot \sqrt{\xi^2 - 1} \quad (8.3.15)$$

Igualant la part real:

$$\sigma = \xi \cdot \omega_n \quad (8.3.16)$$

$$\omega_n = \frac{\sigma}{\xi} = \frac{0,8}{0,595698} = 1,34296 \text{ rad/s} \quad (8.3.17)$$

Igualant la part imaginaria:

$$\omega = \omega_n \cdot \sqrt{1 - \xi^2} = 1,0787 \text{ rad/s} \quad (8.3.18)$$

Així es troben els pols en temps continu del sistema:

$$s = -\sigma \pm \omega j = -0,8 \pm 1,0787 j \quad (8.3.19)$$

I finalment els pols en temps discret:

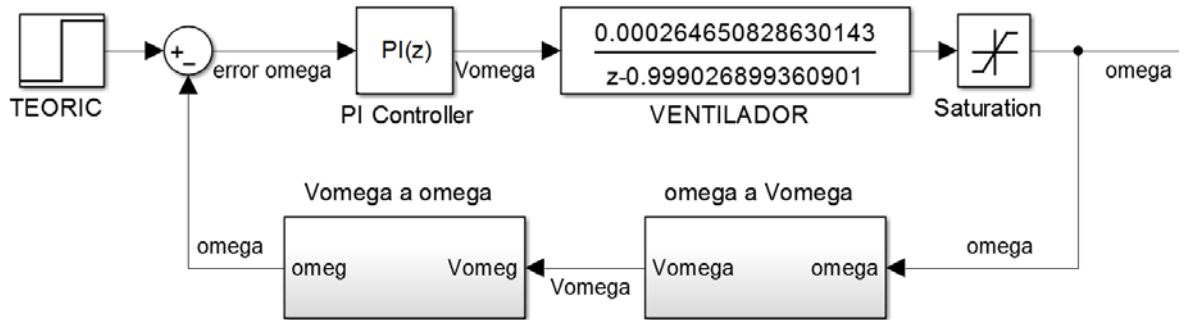
$$z = e^{sT_s} = 0,9992 \pm 0,0010778 j \quad (8.3.20)$$

Obtenint així, el polinomi del denominador desitjat:

$$Den_{DES}(z) = (z - 0,9992 + 0,0010778 j) \cdot (z - 0,9992 - 0,0010778 j) \quad (8.3.21)$$

$$Den_{DES}(z) = z^2 - 1,99839947721 \cdot z + 0,998401279317 \quad (8.3.22)$$

Per altra banda, el llaç de control de velocitat és el següent:



Il·lustració 69 - Llaç de control de velocitat del ventilador

On per al càlcul, no és necessari aplicar els canvis redundants de magnitud de la realimentació, ni la saturació. Així queda un sistema senzill com els que estem acostumats a tractar (Il·lustració 67), on el controlador és un PI, la planta és la del ventilador i el sensor és unitari. Per tant avaluat per $T_s = 0,001s$:

$$W_v(z) = \frac{G_c G_v H}{1 + G_c G_v H} = \frac{0,2646 \cdot 10^{-3} \cdot ((K_p + 0,0005 \cdot K_I) \cdot z + 0,0005 \cdot K_I - K_p)}{z^2 + (0,26 \cdot 10^{-3} \cdot K_p + 1,3 \cdot 10^{-7} \cdot K_I - 1,9) \cdot z + 1,3 \cdot 10^{-7} \cdot K_I - 0,26 \cdot 10^{-3} \cdot K_p + 0,9}$$

Per a $G_c(z) = \frac{\left(K_p + \frac{K_I \cdot T_s}{2}\right) \cdot z + \left(\frac{K_I \cdot T_s}{2} - K_p\right)}{z - 1}$, $G_v(z) = \frac{0,0002646}{z - 0,999027}$ i $H(z) = 1$.

Així, el denominador de la transmitància de llaç tancat és:

$$Den(z) = z^2 + (0,26 \cdot 10^{-3} \cdot K_p + 1,3 \cdot 10^{-7} \cdot K_I - 1,9) \cdot z + 1,3 \cdot 10^{-7} \cdot K_I - 0,26 \cdot 10^{-3} \cdot K_p + 0,9 \quad (8.3.23)$$

Que resolent el sistema (8.3.19) amb (8.3.18) coeficient per coeficient dóna els següents paràmetres del controlador PI:

$$K_p = 1,4704 \quad K_I = 4,732 \quad (8.3.24)$$

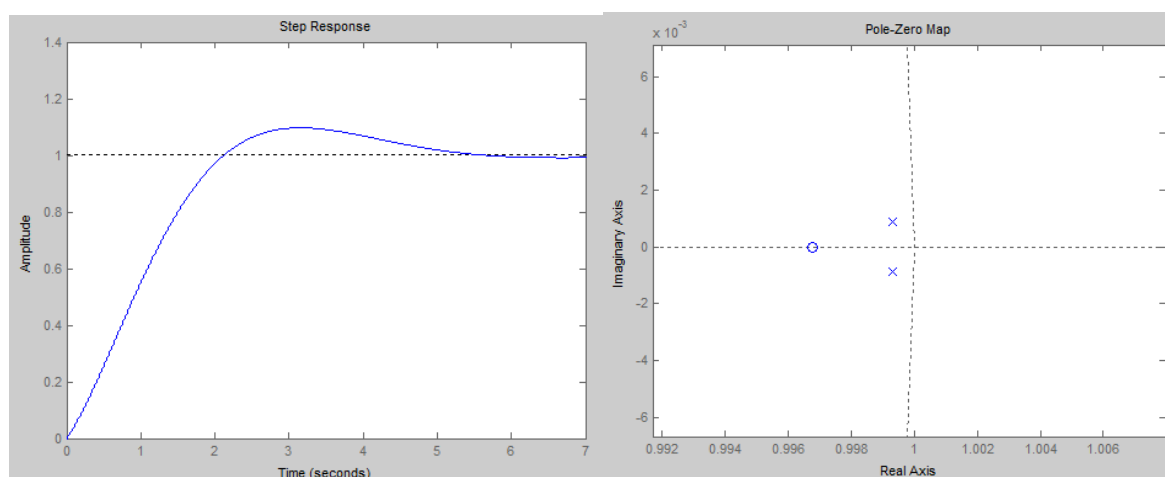
I avaluant els coeficients de l'equació en diferències (8.3.8):

$$a_1 = 1 \quad b_0 = 1,4728 \quad b_1 = -1,468 \quad (8.3.25)$$

On finalment, el codi a implementar serà:

$$y_k = y_{k-1} + 1,4728 \cdot u_k - 1,468 \cdot u_{k-1} \quad (8.3.26)$$

A continuació s'exposen els diagrama de pols i la resposta que donarà aquest controlador:



Il·lustració 70 - Resposta graó i pols per al llaç de posició

8.4. Controlador de posició

Com al cas del control de velocitat, al primer pas serà determinar les plantes del sistema de posició en temps discret. Aquest procés es realitza de forma similar al procés seguit per determinar la funció de transferència de la velocitat del ventilador.

On per a angles petits:

$$G_{A_{TEO1}}(z) = M_{OZ}(s) \cdot G_{A_{TEO1}}(s) = \frac{1 - e^{-0.001 \cdot s}}{s} \cdot \frac{1}{0,005103 \cdot s^2 + 0,01475 \cdot s + 0,277} \quad (8.4.1)$$

$$G_{A_{TEO1}}(z) = \frac{0,000097887 + 0,000097792}{z^2 - 1,99706 \cdot z + 0,99711} \quad (8.4.2)$$

I per angles grans:

$$G_{A_{TEO2}}(z) = M_{OZ}(s) \cdot G_{A_{TEO2}}(s) = \frac{1 - e^{-0,001 \cdot s}}{s} \cdot \frac{1}{0,005103 \cdot s^2 + 0,01475 \cdot s + 0,2125} \quad (8.4.3)$$

$$G_{A_{TEO2}}(z) = \frac{0,000097887 + 0,000097793}{z^2 - 1,99707 \cdot z + 0,99711} \quad (8.4.4)$$

On s'observa, que les expressions són tan semblants, que és possible que per l'estudi en temps discret, no es pugui fer distincions entre angles grans i petits.

S'obtidran a continuació els paràmetres del denominador desitjat, així com els paràmetres de la planta de la mateixa forma que per l'altre llaç de control, on aquí també s'ha optat per un controlador PI.

Així, fixant paràmetres de la manera més convenient:

$$\text{Sobrepuig màxim:} \quad M_p(\%) = e^{-\frac{\xi \cdot \pi}{\sqrt{1-\xi^2}}} \cdot 100 = 0 \quad (8.4.5)$$

$$\xi = 1 \quad (8.4.6)$$

$$\text{Temps d'establiment:} \quad t_s = 4 \frac{1}{\sigma} = 7,91s \quad (8.4.7)$$

$$\sigma = 0,5057 \quad (8.4.8)$$

On, resolent (8.3.10) i (8.3.11):

Igualant la part real:

$$\omega_n = \frac{\sigma}{\xi} = \frac{0,5057}{1} = 0,5057 \text{ rad/s} \quad (8.4.9)$$

Igualant la part imaginaria:

$$\omega = \omega_n \cdot \sqrt{1-\xi^2} = 0 \text{ rad/s} \quad (8.4.10)$$

Així es troben els pols en temps continu del sistema:

$$s = -\sigma \pm \omega j = -0,5057 \pm 0 j \tag{8.4.11}$$

I finalment el pol en temps discret:

$$z_1 = e^{sT_s} = 0,999502 \tag{8.4.12}$$

Obtenint així, un dels pols del denominador desitjat. En aquest cas, s'hauran de fixar dos pols no dominants perquè es mantinguin les especificacions fixades.

Aquests pols s'han fixat com uns pols complexos conjugats a:

$$z_{2,3} = 0,998778 \pm 0,007317 j \tag{8.4.13}$$

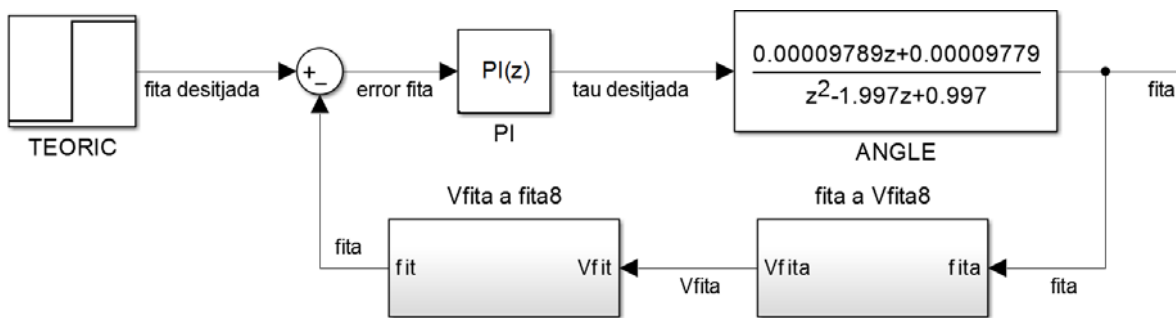
Com es pot comprovar a continuació, els pols fixats són menys dominants que el pol que té les especificacions dissenyades.

$$Dom = \frac{\ln(|z_{2,3}|)}{\ln(|z_1|)} = 2,4 \tag{8.4.14}$$

Possiblement el pol principal hauria de ser encara més dominant, però la resposta obtinguda a la planta experimental ja és prou bona. Així, el polinomi desitjat serà:

$$Den_{DES}(z) = z^3 - 2,99706z^2 + 2,99417z + 0,99711 \tag{8.4.15}$$

Per altra banda, el llaç de control de posició de la placa és el següent:



Il·lustració 71 - Llaç de control de posició de la placa de metacrilat

Com en el cas del llaç de velocitat, no és necessari aplicar els canvis redundants de magnitud de la realimentació. Així queda un sistema senzill amb un controlador PI, la planta de la placa de metacrilat i el sensor unitari.

Avaluat per $T_s = 0,001s$ i per a $G_C(z) = \frac{\left(K_P + \frac{K_I \cdot T_s}{2}\right) \cdot z + \left(\frac{K_I \cdot T_s}{2} - K_P\right)}{z-1}$,

$G_{ATEOI}(z) = \frac{0,000097887 + 0,000097792}{z^2 - 1,99706 \cdot z + 0,99711}$ i $H(z) = 1$.

Així, el denominador de la transmitància de llaç tancat $W_A(z) = \frac{G_C G_A H}{1 + G_C G_A H}$ és:

$Den(z) = z^3 + (4,89 \cdot 10^{-8} \cdot K_I + 0,97 \cdot 10^{-4} \cdot K_P - 3) \cdot z^2 + (9,78 \cdot 10^{-8} \cdot K_I - 9,43 \cdot 10^{-8} \cdot K_P + 3) \cdot z + 4,89 \cdot 10^{-8} \cdot K_I - 0,98 \cdot 10^{-4} \cdot K_P - 0,98$ (8.4.16)

Així, resolent el sistema (8.4.15) amb (8.4.16) coeficient per coeficient dona els següents paràmetres del controlador PI:

$K_P = 0,009885$ $K_I = 0,13897$ (8.4.17)

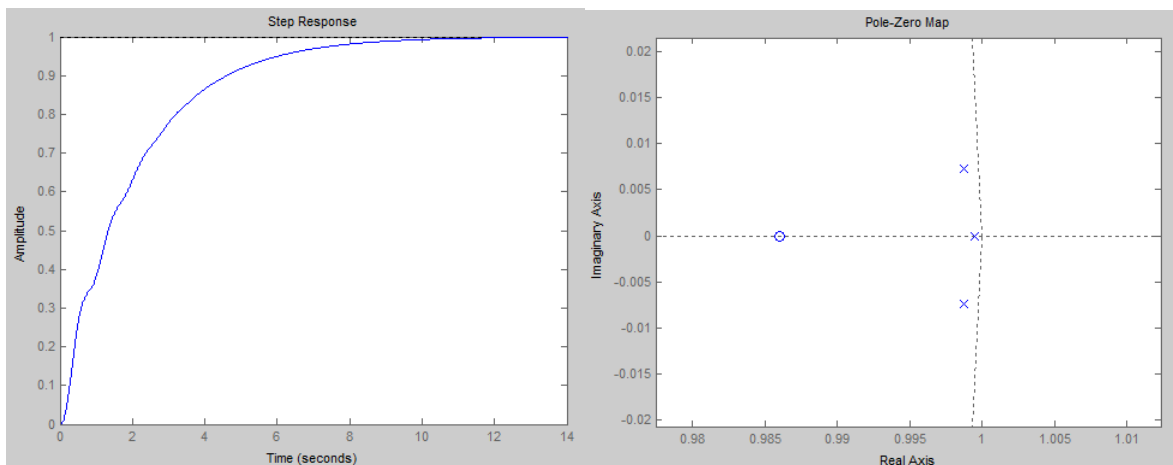
I avaluant els coeficients de l'equació en diferències (8.3.4):

$a_1 = 1$ $b_0 = 0,009954104451$ $b_1 = -0,009815137741$ (8.4.18)

On finalment, el codi a implementar serà:

$y_k = y_{k-1} + 0,009954104451 \cdot u_k - 0,009815137741 \cdot u_{k-1}$ (8.4.19)

A continuació s'exposen els diagrama de pols i la resposta que donarà aquest controlador:

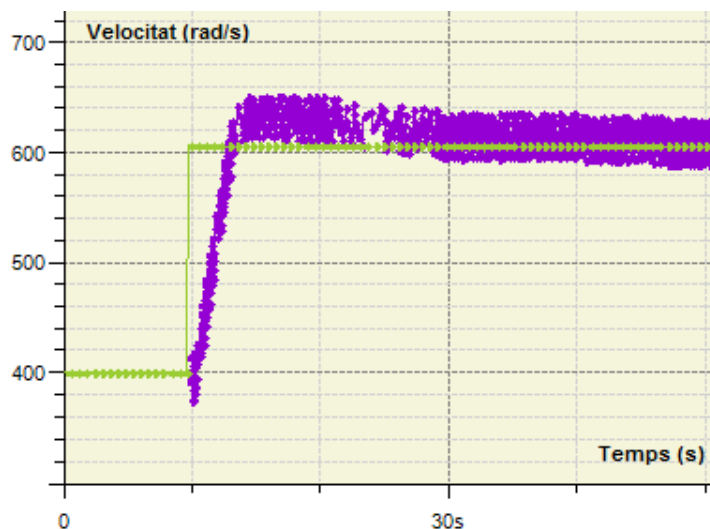


Il·lustració 71 - Resposta graó i pols per al llaç de posició

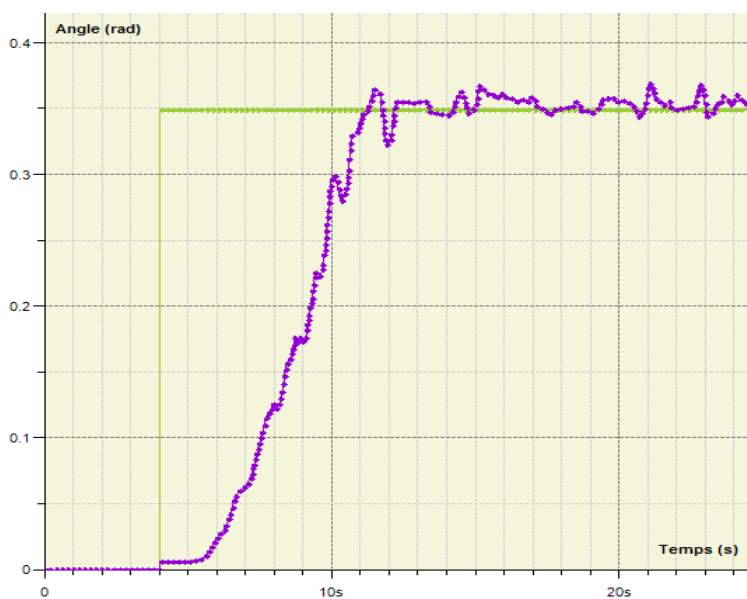
Per al controlador del llaç de posició de la placa, cal esmentar que s'ha calculat amb la planta preparada per treballar en angles petits, però com que en l'estudi, la forma discreta d'aquestes plantes i el fet que al sistema experimental ja funciona apropiadament, s'ha decidit simplificar el tipus de control amb un sol PI per a tot el rang de treball.

8.5. Resultats

A continuació s'han exposat les respostes de cada llaç i un altre utilitzant els dos llaços de control alhora en el sistema experimental.



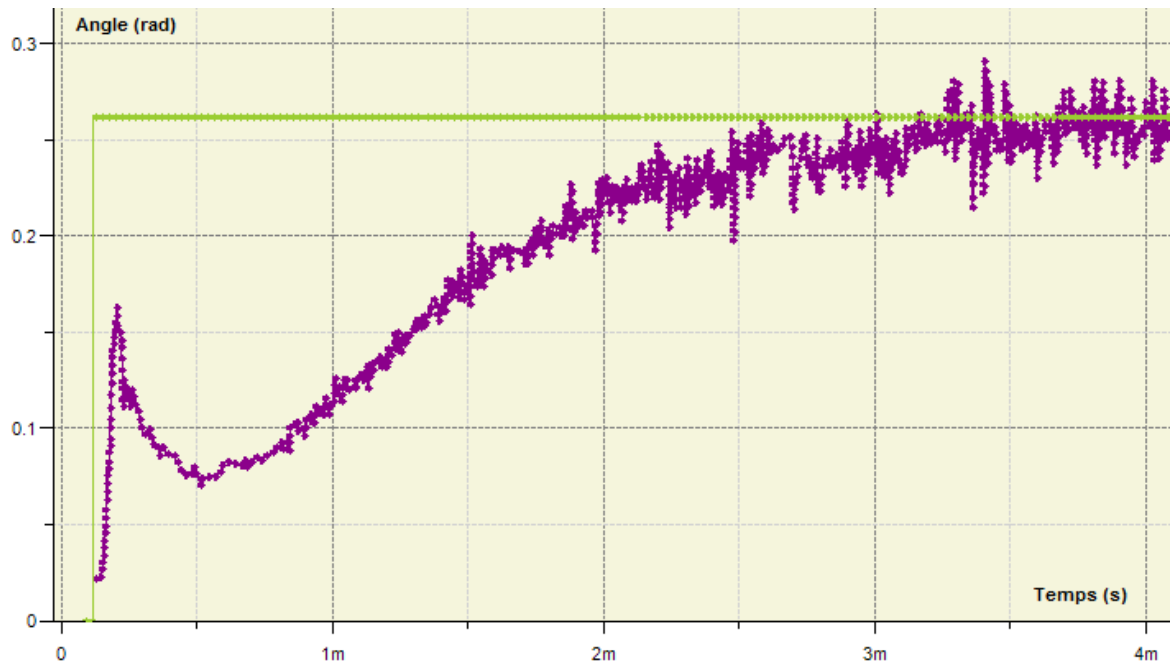
Il·lustració 72 - Resposta graó de velocitat angular del ventilador



Il·lustració 73 - Resposta graó de la posició de la placa de metacrilat

Com s'observa, les respostes individuals són molt semblants a les calculades per disseny.

Sorgeix un problema però, quan s'intenten implementar els dos controladors alhora. La resposta té un comportament estrany i encara que si arriba al valor de consigna, triga més temps del compte.



Il·lustració 74 - Resposta graó de la posició de la placa amb els dos controladors actuant

Després d'una sèrie de proves no s'ha trobat el motiu d'aquest comportament tan lent, així que com a controlador definitiu s'ha establert el controlador PI de posició en solitari, a expenses de poder millorar el sistema amb l'acció dels dos controladors tal com s'havia pensat des d'un inici.

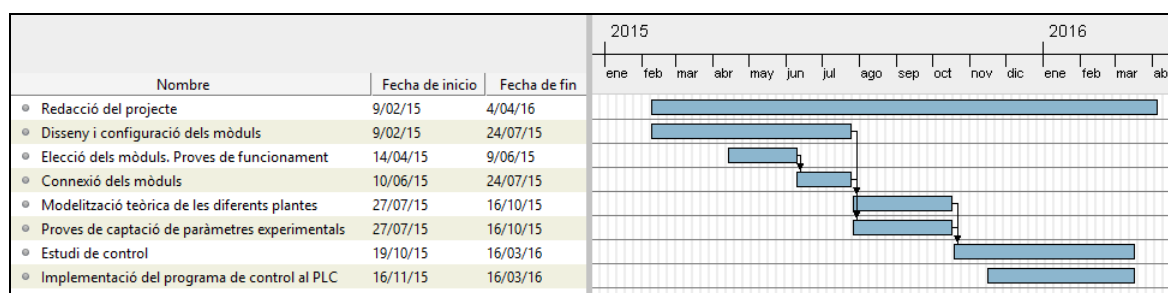
Estudi econòmic

Dintre d'aquest apartat, es farà un estimat de tots els costos que ha implicat el treball final de carrera per al departament de control i els dividirà en diversos punts, així com un apartat que contempli l'aprovisionament de múltiples sistemes idèntics al laboratori.

Costos laborals

S'entenen com a costos laborals a les despeses que té la universitat en pagar els sous de tots els individus implicats en la realització del projecte. Aquests sous estaran distribuïts segons el rang del personal i el temps implicat en la seva realització.

A continuació es mostra el diagrama de Gantt del projecte, on reparteix per tasca els 14 mesos de durada que ha tingut el projecte:



Il·lustració 75 - Diagrama de Gantt del projecte

Analitzant el diagrama i per pròpia experiència s'estableixen les hores de treball implicades de cada part, estudiant, tutor i consultes a enginyers del departament al llarg de l'any. Finalment, es pot formar un registre del cost laboral de cada part si es consulta el sou que estableix el conveni universitari d'educació [14]:

Rang salarial	Sou brut (€/mes)	Duració projecte (mesos)	Hores totals implicades al treball (h)	Hores totals (h)	Rati d'implicació (%)	Cost laboral (€)
Catedràtic	3.069,48	14	50	2.240	2,23	959,21
Col·laborador	1.928,26	14	20	2.240	0,89	241,03
Enginyer Junior	1.495,41	14	720	2.240	32,40	6.729,35

Taula 10 - Cost laboral

On, els sous són estimats i extrets del conveni d'educació universitària de 2014.

El cost laboral del projecte s'estima doncs en 7.929,59 €

Costos de producció i materials.

A continuació s'enumerarà una llista dels costos de tots els materials i equips que s'han necessitat per a la realització del prototip:

Component	Unitats	Preu	Total
Definitius			
Estructura de metacrilat	1	469,27 €	469,27 €
Potenciòmetre (Novotechnik P2201 A502)	1	245,39 €	245,39 €
Modulador PWM (Texas Instruments LM3524D)	1	5,89 €	5,89 €
Convertidor Freqüència – Tensió	1	18,59 €	18,59 €
Font d'alimentació (Emerson LPQ200-M)	1	127,53 €	127,53 €
Plaques adaptadores de nivell. Amplificador	2	57,66 €	115,32 €
Plaques adaptadores de nivell. Reductor	1	57,66 €	57,66 €
Ventilador Gran 5314/2TDHP amb control de PWM	1	149,36 €	149,36 €
Total Definitius			1.189,01 €
Descartats			
Servomotor (Maxon Motor Control ADS 50/5 4-Q-DC)	1	463,85 €	463,85 €
Font d'alimentació (MW MeanWell SP-240-48)	1	122,63 €	122,63 €
Ventilador (ebm-papst 4114N/2H4)	1	73,82 €	73,82 €
Ventilador (ebm-papst 4114N/2H7P)	1	114,21 €	114,21 €
Total Descartats			774,51 €
TOTAL			1.963,52 €

Taula 11 - Costos de producció i materials

Costos indirectes

Com a costos indirectes es tractaran bàsicament les amortitzacions i altres recursos emprats al projecte. Per començar, es tindrà en compte les amortitzacions dels equips i llicències utilitzats:

Concepte	Valor (€)	Mesos d'amortització	Amortització (€/mes)	Mesos	Cost al projecte (€)
PC	500	96	4,17	14	58,33
PLC + Mòduls Analògics	1210	120	10,88	14	141,17
Llicència AutoCad	2.750	15	183,33	14	2.566,67
Llicència Microsoft Office	150	60	2,50	14	35,00

Taula 12 - Amortitzacions

Altres cost indirecte a tenir en compte té a veure amb la recerca d'informació rellevant al projecte, la connexió a internet. Aquest servei té un cost de 19,95€/mes, aprofitat en un 35% al mes, correspon a 7 €/mes i 97,76€ en total. Esmentar que el servei no queda en desús ni molt menys, aquesta connexió és utilitzada per a tothom en el departament, però s'ha tingut en compte només la part proporcional destinada a l'ús d'aquest servei dins l'àmbit del projecte.

També s'ha de tenir en compte la utilització de la xarxa elèctrica per poder fer funcionar el sistema i tota la instrumentació per les proves, així com el propi ordinador. A continuació es mostrarà el consum que pot haver estat generat per aquests aparells així com el cost derivat.

Aparell	Potència elèctrica (W)	Ús diari (h)	Consum mensual (kWh/mes)	Preu mitjà del kWh (€/kWh)	Cost Electricitat (€/mes)	Mesos	Cost Electricitat total (€)
Ventilador	83	4	6,64	0,071	0,47	14	6,58
Ordinador	400	4	32,00	0,071	2,27	14	31,78
PLC	40	4	3,20	0,071	0,23	14	3,22

Taula 13 - Cost de la utilització de la xarxa elèctrica [15]

Altres costos

Aquest apartat reuneix costos que l'alumne ha afrontat, durant l'any de transcurs del projecte com són el cost del transport al lloc de treball i els costos d'impressió de les còpies del treball:

Concepte	Cost
Impressió i enquadernació	200
Transport	525

Taula 14 - Altres costos

Per al transport s'ha comptat 105€ trimestrals i correspon al preu reduït de transport amb tram, vehicle que com es veurà més endavant, és més ecològic que utilitzar un vehicle privat amb motor basat en combustibles fòssils.

Pressupost

Els diferents costos dels apartats anteriors queden tabulats a la següent taula resum, on s'observa un cost total estimat de 13.534,12€ per al projecte final de carrera.

CONCEPTES	TOTAL
COSTOS LABORALS	
Sous	7.929,59 €
TOTAL COSTOS LABORALS	7.929,59 €
COSTOS DE PRODUCCIÓ I MATERIALS	
Components definitius	1.189,01 €
Components descartats	774,51 €
TOTAL COSTOS DE PRODUCCIÓ I MATERIALS	1.963,52 €
COSTOS INDIRECTES	
Amortitzacions	2.801,17 €
Internet	97,76 €
Consum elèctric	41,58 €
TOTAL COSTOS INDIRECTES	2.916,01 €
ALTRES COSTOS	
Impressió i enquadernació	200,00 €
Transport	525,00 €
TOTAL ALTRES COSTOS	725,00 €
TOTAL PROJECTE	13.558,62 €

Taula 15 - Pressupost del projecte

Cost de la substitució dels sistemes

La raó de ser del projecte, és la de substituir totes les plantes educatives que existeixen ara mateix al laboratori de control per unitats com la projectada, per això es farà una petita reflexió del possible cost, en euros, i el temps, que pot necessitar replicar la planta prototipus unes 12 vegades.

Previ a l'estudi, s'han de tenir en compte que en aquest apartat no es contarà amb els següents costos:

- Material descartat durant el projecte, ordinadors, llicències, Internet i altres recursos que no són necessaris o ja existeixen en aquesta etapa.
- Transport i enquadernació, ja que no juguen un paper directe en el muntatge dels sistemes.

Doncs, per pròpia experiència, i tenint en compte que l'esquema de cablejat del sistema, així com els programes del PLC ja estan fets, s'ha estimat que una planta pot estar connectada i en funcionament en una setmana (40h), preveient els possibles problemes de funcionament que hi puguin haver i treballant exclusivament en aquest projecte.

Això correspon a un sou del col·laborador de 482,07 € per sistema. Incloent aquesta dada a l'estudi s'ha confeccionat la següent taula:

Component	Unitats	Preu	Total
Sou col·laborador	12	482,07 €	5784,78 €
Estructura de metacrilat	12	469,27 €	5.631,24 €
Potenciòmetre (Novotechnik P2201 A502)	12	245,39 €	2.944,68 €
Modulador PWM (Texas Instruments LM3524D)	12	5,89 €	70,68 €
Convertidor Freqüència – Tensió	12	18,59 €	223,08 €
Font d'alimentació (Emerson LPQ200-M)	12	127,53 €	1.530,36 €
Plaques adaptadores de nivell. Amplificador	24	57,66 €	1.383,84 €
Plaques adaptadores de nivell. Reductor	12	57,66 €	691,92 €
Ventilador Gran 5314/2TDHP amb control de PWM	12	149,36 €	1.792,32 €
PLC + Mòduls Analògics	12	766,34 €	9.196,08 €
TOTAL			29.248,98 €

Taula 16 - Pressupost de 12 sistemes

On finalment s'estima uns 2.437,42 € per sistema, és a dir 29.248,98 € costarà la connexió i posada en marxa de les noves plantes del laboratori.

Una opció a considerar per a abaratir costos, seria la utilització dels ordinadors ja existents, amb targetes A/D D/A també existents que substituirien al PLC, principal cost dels sistemes. En aquesta opció, es podria utilitzar el software simulin del Matlab per a funcionar com a controlador.

Estudi d'impacte ambiental

En aquest punt es pretén identificar i interpretar els impactes ambientals que ha produït la realització del prototipus, així com de predir els impactes derivats del seu ús. Finalment s'estudiarà la capacitat que té el sistema de ser reciclat, és a dir, quines de les parts poden ser reutilitzades.

Disseny

Quan a la fase de disseny, s'identificaran tots aquells recursos utilitzats que no formin part de la vida útil del sistema.

En primer lloc, els viatges que l'alumne i professors han efectuat per arribar al lloc de treball, en aquest cas el laboratori, on s'ha realitzat el disseny i posteriors proves del sistema. El transport, si es vol reduir emissions contaminants a l'atmosfera de la ciutat, hauria de ser majoritàriament per transport públic, maximitzant l'ús de vehicles elèctrics (Tram) o en tot cas híbrids (Autobusos). És d'aquesta manera com es pot reduir l'emissió de partícules contaminants com ara CO₂, CO i NO_x. Per donar una idea, l'ús de vehicles completament elèctrics en front a vehicles amb motors dièsel, redueixen en quatre vegades els Kg de CO₂ de la crema de combustible primari emesos a l'atmosfera.

Un altre recurs menys significatiu però existent, és l'energia, en forma d'electricitat, utilitzada en el transcurs de les proves, tant d'il·luminació de la sala com l'alimentació dels equips. Aquesta energia prové de les centrals elèctriques connectades a la xarxa. Aquesta energia necessària, ja que serveix per a l'alimentació de petits equips, podria ser generada per sistemes de producció d'energia neta, com ara panells solars. Aquests panells estarien instal·lats al terrat de l'edifici i haurien de ser capaços d'enviar aquesta energia i la d'altres habitacions o departaments alhora, estalviant-ne a més alguns kWh de la factura de la llum.

Fabricació

D'entre els múltiples materials i equips proporcionats per construir el sistema, els dos més destacats i que poden ser motiu d'estudi de la seva fabricació són fonamentalment dos, la gran estructura de metacrilat i tota l'electrònica, que és majoritàriament la resta de components.

Per una banda, el metacrilat (PMMA) és un polímer que té el seu origen en el tractament de compostos primaris com ara l'acetona (C₃H₆O), el metanol (CH₃OH) i l'àcid cianhídric (HCN) i

que necessita calor en la seva reacció per formar la cadena polimèrica característica del metacrilat $(C_5O_2H_8)_n$. Els diversos processos que impliquen la formació i conformat del metacrilat utilitzen màquines elèctriques com forns, injectors, laminadores, etc. Aquestes màquines no emeten residus contaminants, ja que només necessiten electricitat i aigua per a l'evacuació de calor. Així, el punt a millorar en el procés de conformat hauria de ser l'origen de l'energia elèctrica, la qual hauria de generar-se en centrals amb la millor eficiència possible. És clar, això ja no és competència de la fàbrica.

Quan a l'electrònica, el seu conformat té la necessitat d'utilitzar substàncies molt tòxiques, com ara el Crom (Cr), el Cadmi (Cd) o el Mercuri (Hg). Aquest processat haurà de complir les normes de seguretat i del medi ambient perquè els possibles residus puguin ser eliminats o confinats amb el menor impacte possible. Durant la fase de proves del sistema han estat guardats en entorns ventilats i secs, prolongant la seva vida útil.

Explotació

Com a principals focus d'impacte ambiental en aquesta fase s'han considerat dos, el consum elèctric i l'acústic:

El consum elèctric que pot generar un conjunt de 12 sistemes com l'estudiat pot ser reduïda mitjançant panells solars de captació fotovoltaica. Fent un anàlisi aproximat i per fer-se una idea:

Una placa fotovoltaica, rep del sol uns 1000W com a mitja, que queden reduïts a uns 100W útils a causa de la poca eficiència que tenen avui dia aquets tipus de panells. Si durant 8 hores de sol al dia són capaces de captar aquests 1000W màxims, l'energia que aporten a la xarxa des de les bateries seria d'uns 800W·h.

Doncs bé, el consum màxim d'un sistema com el proposat, serien uns 523W com a màxim. Assumint 4 hores de pràctiques al dia, uns 2092W·h. S'ha de tenir en compte que aquest és el consum màxim dels equips i que en realitat el seu consum mitjà serà inferior:

Aparell	Potència elèctrica (W)
Ventilador	83W
Ordinador	400W
PLC	40W

Taula 17 – Potència consumida del equips

És a dir, que farien falta tres plaques d'un metre quadrat cadascuna per fer front a un sistema al llarg del dia. Com que hi haurien 12 unitats al laboratori, farien falta 32 plaques fotovoltaïques. És possible que la teulada de l'edifici no pugui donar espai a tantes plaques o que no hi estigui permès per altres sistemes que allà operen, així com utilitzar-les única i exclusivament pel laboratori de control, raó per la qual les plaques que hi capiguessin estarien connectades a la xarxa de l'edifici amb l'objectiu de reduir el consum global d'aquest [16].

Per altra banda, s'hauria d'analitzar un possible focus ambiental que pot ser motiu de malestar i queixes de personal del laboratori i d'aules contigües, el soroll que el ventilador desenvolupa en treballar a altes velocitats. Aquest soroll comença a fer-se desagradable en assolir el 80% del PWM que el controla, i pot arribar a uns 74 dB, que corresponen al soroll d'una aspiradora. Aquest soroll multiplicat pels 12 sistemes que es preveuen instal·lar al laboratori poden ocasionar un problema al departament.

Finalment, com a mal menor, pot ser difícil treballar amb punts de ventilació al llarg de la taula. Aquest problema pot ser solucionat amb una bona configuració dels ventiladors, o amb deflectors posats a continuació de la placa de metacrilat, quan el flux d'aire ja ha interactuat amb la placa.

Fi de vida

En finalitzar la fase d'explotació, el sistema pot sotmetre's a un procés de reciclatge que comprèn la totalitat dels components electrònics i l'estructura de metacrilat. A continuació es farà un breu incís dels processos que seguiran els components del sistema, una vegada s'ha acabat la seva utilitat al departament, això inclou també l'opció de reutilitzar-los en altres projectes.

El metacrilat és un polímer termoplàstic que pot ser recuperat de forma mecànica o química, si volem recuperar el metacrilat per altres aplicacions o per reciclatge tèrmic, és a dir, cremat com a combustible. Aquesta última opció no emet partícules contaminants a l'atmosfera més enllà de l'aigua i el CO₂ habitual en un procés de combustió.

Per altra banda el reciclatge de components electrònics és un procés més car, a causa de substàncies contaminants com el Crom (Cr), el Cadmi (Cd) o el Mercuri (Hg). Aquests residus s'han de portar a punts verds especialitzats en la recollida i tractament d'aquests tipus de residus. En aquests centres se separen els elements contaminants per eliminar-los de forma controlada o, la seva majoria, per reutilitzar-los en altres processos de fabricació. Un exemple és la utilització del Cadmi (Cd) en la indústria de la porcellana. Tota la resta de materials són fàcilment reutilitzables. Els metalls es poden fondre per tornar-se a utilitzar i els plàstics poden triturar-se o descompondre's químicament, en processos similars al del cas del metacrilat.

Conclusions

Al llarg d'aquest PFC s'han tractat una sèrie de fases, per les quals són necessàries diferents coneixements de la teoria tractades a la carrera. Aquestes fases han suposat una sèrie de problemes, solucions i millores que estan plasmades a continuació en forma de conclusió.

Muntatge i connexió de la planta:

- El camí de l'enginyer es basa en un cicle interminable de recerca i error, fins que finalment s'assoleixen els objectius que prèviament s'han establert. Aquesta dita, és una de les premisses d'aquest treball, ja que clarament, s'ha necessitat un pas enrere, és a dir, descartar el servomotor com a element del sistema, per a finalment avançar en el projecte utilitzant un modulador de PWM i un altre tipus de ventilador.
- És un problema també, en el moment d'incorporar múltiples mòduls en un sistema, tot el cablejat que hi pot haver a la taula. En aquest aspecte, s'ha tingut l'oportunitat de prototipar uns mòduls d'adaptació de nivells que després s'han fabricat de manera definitiva i més compacte. Amb aquesta premissa s'entén que una posterior millora del sistema, és la d'unificar tots els components en una mateixa placa de circuit imprès que redueixi cablejat i material no necessari.
- Altre millora que hauria permès un millor i més ràpid control, resideix en l'arribat del convertidor de freqüència-tensió, que amb més investigació es podria haver millorat i haver portat un senyal al PLC més neta i constant.

Modelització teòrica i experimental:

- Fàcilment és possible trobar-se amb sistemes que no segueixen una dinàmica lineal. També és cert, que com a enginyers nosaltres posem el límit en aprofundir en l'exactitud d'una operació, és a dir, no sempre serà necessari augmentar el grau d'un sistema per aconseguir una resposta exacta, si amb una planta de primer ordre ja s'obtenen resultats ben ajustats.

Programació del software de control:

- Aquest projecte i la decisió d'utilitzar un PLC com a controlador, ha servit per fer un pas endavant en l'aprenentatge de la programació d'aquests equips, però es ven clar que són costosos. Així doncs, és més fàcil i barat, la utilització d'ordinadors i targetes A/D D/A ja implantades i un software com ara el Matlab, reduint així costos i la necessitat d'haver d'aprendre el funcionament del PLC.

Així, queda com a punt extra a esmentar, que també s'ha complert l'objectiu secundari, és a dir, la redacció d'un projecte de la manera més entenedora possible i amb la finalitat de servir d'ajuda a altres lectors que estiguin en aquesta mateixa fase de la carrera o, si finalment es repliquen les plantes del sistema en el laboratori, per a fer de guia pels alumnes que ho necessitin.

Agraïments

En primer lloc, m'agradaria agrair al Ramon, el meu tutor, per fer possible aquest projecte i per mostrar sempre una predisposició a resoldre els dubtes que van anar sortint al llarg del treball.

En segon lloc, agrair a la resta de personal docent del departament de control el donar-me un cop de mà proporcionant-me consells, materials i recursos per a l'elaboració del sistema.

Finalment vull agrair a la meva família i amics la paciència i el suport que he rebut al llarg de la carrera, especialment en aquesta última etapa, per la que finalitzo també l'etapa d'estudiant, per començar a treballar professionalment en el camp que sempre m'ha agradat des de petit, l'Enginyeria Industrial.

Bibliografia

Referències bibliogràfiques

- [1] MC GRAW HILL. Mecànica de Fluidos, Victor L. Streeter, ISBN 958-600-987-4, Colombia 2000.
- [2] BECKOFF NEW AUTOMATION TECHNOLOGY. Tipos de lenguajes de programación, 2004.
[http://infosys.beckhoff.com/espanol.php?content=../content/1034/tcplccontrol/html/tcplcctrl_languages%20fbd.htm&id=, 11 de setembre de 2015].
- [3] ISA. Modelado de un motor de CC, 26 Novembre 2008
[http://isa.uniovi.es/ISAwiki/index.php/Modelado_de_un_motor_CC, 12 Març 2015]
- [4] S&P. Tipos de Ventiladores, 2008.
[<http://www.soler-palau.mx/ventiladores1.php>, 14 d'agost de 2015].
- [5] MINISTERIO DE INDUSTRIA, ENERGÍA Y TURISMO. ATECIR, Madrid, Juny 2012.
[/documentos/documentos_10_Guia_tecnica_seleccion_de Equipos_de transporte_de _fluidos._ http://www.idae.es/uploads Bombas_y_ventiladores_758f070c.pdf, 6 de març de 2015].
- [6] PRENTICE HALL. Máquinas Eléctricas, Javier Sanz Feito, ISBN 84-205-3391-2, Madrid 2002.
- [7] UNIVERSIDAD DEL PAIS VASCO. Oscilaciones Armónicas, 2010.
[<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/oscilaciones/amortiguadas/amortiguadas.htm>, 25 de Abril de 2015].
- [8] UNIVERSIDAD DE ALMERIA. Oscilaciones Armónicas, 2010.
[<http://www.ual.es/~mnavarro/Tema%205%20Oscilaciones.pdf>, 19 de Abril de 2015].

- [9]** UNIVERSIDAD DE CASTILLA-LA MANCHA. Transformada de Laplace, 2010.
[<https://www.uclm.es/profesorado/raulmmartin/AmpliacionMatematicas/laplace.pdf>, 26 de Abril de 2015].
- [10]** NOCTUA. Focused Flow, 2007.
[<http://noctua.at/es/focused-flowtm-frame>, 13 de Març de 2015].
- [11]** UNIVERSIDAD DE OVIEDO. Modelizado y simulación de sistemas no lineales. 2008
[<http://isa.uniovi.es/wiki/isa/images/8/8a/Prac2-0910.pdf>, 29 de Gener de 2016]
- [12]** INGENIERIA DE CONTROL. Transformada Z, 2004.
[http://www.control-class.com/Tema_3/Slides/Tema_3_Transformada_Z.pdf, 14 de setembre de 2015].
- [13]** UPC. Sistemas de control en temps discret, Ramón Costa, ISBN 978-84-9880-463-8, Barcelona 2014.
- [14]** UPC. Taules Retributives, 2014.
[https://www.upc.edu/transparencia/informacio-de-personal/Retribucions_PDI_2014.pdf, 18 de Març de 2016].
- [15]** TARIFA DE LUZ. Tarifa de la luz, 2015.
[<http://www.tarifadeluz.com/index.php>, 20 de Març de 2016].
- [16]** COMPARATIVO COCHE ELÉCTRICO VS COCHE COMBUSTIÓN, 2015.
[<https://electromovilidad.net/comparativa-coche-electrico-vs-coche-combustion/>, 22 de Març de 2016].

Bibliografia complementària

MATLAB & SIMULINK CONTROL TUTORIALS. Control PID, 2007

[<http://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=Introduction§ion=ControlPID>]

SCHNEIDER ELECTRIC. SoMachine V4.1 Tutorial: Writing and Application, 12 Gener 2015

[https://www.youtube.com/watch?v=8Ct4miXhPgl&list=PLa7UGrWOTyjnLb4nbGiJWvuRI_6O09Pej]

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIEROS DE SAN SEBASTIÁN. Práctica nº 3: Sistemas Eléctricos. ESTUDIO DE LA MÁQUINA DE C.C, 2009-2010

[http://www1.ceit.es/asignaturas/SistElec/Practicas/PR_SIS_03.pdf]

WIKIPEDIA. Momentos de Inercia, 2015

[https://es.wikipedia.org/wiki/Momento_de_inercia]

MATLAB. Taylor, 2006

<http://es.mathworks.com/help/symbolic/taylor.html>