

# ***Disseny i implementació d'un sistema de monitorització per a un sistema de gasificació de biomassa***

---

*Autor: Ignacio Alegre Ribas*

*Director: Josep Andreu Vidal Clos*

*Ponent: Antoni Sudrià Andreu*

*Quadrimestre de Primavera 2016*

---

## Resum

En el marc del projecte de Gasificació del CITCEA-UPC iniciat el curs 2012-2013, amb el suport del Centre de Cooperació pel Desenvolupament de la UPC, per dissenyar i produir un gasificador per a un hospital del Txad aquesta memòria recull el treball realitzat durant els últims mesos en una de les parts finals del projecte. Durant aquest temps s'ha dissenyat i programat un sistema de monitorització per ser utilitzat durant les proves de posta en marxa i posada a punt del gasificador

Aquest treball conté una introducció a la tecnologia de gasificació necessària per contextualitzar tècnicament el projecte on s'introdueixen els principis de funcionament de la gasificació junt amb les diferents tecnologies actuals existents. A continuació es fa una explicació de les especificacions tècniques requerides pel projecte inicial i en conseqüència de la tipologia de gasificador triada pel gasificador desenvolupat.

Tot seguit s'entra en el cos del treball on es desenvolupa la feina feta per dissenyar i programar el sistema de monitorització. Aquesta part comença amb una explicació detallada dels processos i punts concrets del gasificador que cal controlar per tal de poder tenir informació en els moments de posta en marxa. Es fa un estudi dels diversos sensors disponibles per la recollida de dades i una tria en funció de les necessitats. Així mateix es fa també una tria del microcontrolador que serà l'encarregat de fer les lectures i enviar-les al PC pel seu processament. A continuació s'explica el disseny de la interfície gràfica que ha de mostrar les dades en temps d'execució d'una forma clara de forma que els operaris coneguin en tot moment l'estat de les reaccions del gasificador. Per últim es comenten les modificacions fetes en el conjunt del sistema de monitorització introduïdes a partir de les proves d'aquest en les primeres postes en marxa.



# Sumari

<b>RESUM</b>	<b>1</b>
<b>SUMARI</b>	<b>3</b>
<b>1. GLOSSARI</b>	<b>5</b>
<b>2. PREFACI</b>	<b>6</b>
2.1. Origen del projecte.....	6
2.2. Motivació.....	6
<b>3. INTRODUCCIÓ</b>	<b>8</b>
3.1. Objectius del projecte.....	8
3.2. Abast del projecte .....	8
<b>4. GASIFICACIÓ: ESTAT DE L'ART</b>	<b>9</b>
4.1. Funcionament de la gasificació.....	9
4.2. Tipus de gasificadors .....	12
4.2.1. Llit fix.....	12
4.2.1.1. Tecnologia "Updraft".....	12
4.2.1.2. Tecnologia "Downdraft" .....	13
4.2.1.3. Tecnologia "Crossdraft" .....	14
4.2.2. Llit Fluiditzat .....	15
<b>5. GASIFICADOR CITCEA-UPC</b>	<b>17</b>
5.1. Característiques principals.....	17
5.2. Estat actual .....	20
<b>6. SISTEMA DE MONITORITZACIÓ</b>	<b>22</b>
6.1. Descripció de les necessitats del sistema .....	22
6.2. Sensors.....	25
6.2.1. Sensors de temperatura.....	26
6.2.2. Sensors de pressió .....	38
6.3. Lectura de dades .....	43
6.4. Disseny del circuit .....	54
6.5. Programació del sistema de monitorització .....	57
6.5.1. Programació de l'Arduino.....	57
Programació del programa de tractament de dades i disseny de la interfície gràfica...	59
Modificacions introduïdes arran de la posta en marxa .....	64
6.6. Pressupost del sistema de monitorització.....	65

---

<b>CONCLUSIONS</b>	<b>69</b>
<b>AGRAÏMENTS</b>	<b>70</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>71</b>
Referències bibliogràfiques .....	71
Bibliografia complementària .....	72
<b>ANNEXOS</b>	<b>73</b>
Annex A Equacions i coeficients per linealitzar un termoparell de tipus K.....	73
Annex B Datasheets dels diferents components electrònics .....	76

# 1. Glossari

- **CITCEA-UPC** Centre d'Innovació Tecnològica en Convertidors Estàtics i Accionaments
- **CCD-UPC** Centre de Cooperació pel Desenvolupament
- **CERTEC** Centre d'Estudis del Risc Tecnològic
- **MyDpG** Misión y Desarrollo para Goundi
- **Goteo** plataforma de crowdfunding amb la que s'ha finançat la construcció del gasificador
- **GasCea** projecte de gasificació del CITCEA-UPC
- **Syngas** Gas de síntesi
- **FlamesLab** Laboratori del foc
- **NTC** Termistors de Coeficient de Temperatura Negatiu
- **PTC** Termistors de Coeficient de Temperatura Positiu
- **RTD'S** o Detectors Resistius de Temperatura
- **ANSI** (American National Standards Institute) Institut Nacional Americà de Estandardització
- **NIST** (National Institute of Standards and Technology) Institut Nacional de Estàndards i Tecnologia
- **A/D** convertidor Analògic Digital
- **IDE** (Integrated Development Environment) Interfície de Desenvolupament Integrat
- **SPI** (Serial Peripheral Interface) Protocol de comunicacions
- **CLK** Clock o rellotge
- **MISO** Master Input Slave Output
- **MOSI** Master Output Slave Input
- **CS** Chip Select

## 2. Prefaci

### 2.1. Origen del projecte

En el context actual on la tendència en el mercat de l'energia sembla que migra cap a la generació distribuïda, el procés d'electrificació de països en vies de desenvolupament segueix un model en la mateixa direcció.

En aquest context l'any 2012 el CITCEA-UPC va començar un projecte d'electrificació d'un Hospital de Goundi al Txad, Àfrica, en col·laboració amb la ONG "Misión y Desarrollo para Goundi (MyDpG)". Diversos projectes i estudis han estat realitzats en col·laboració mútua i també amb el suport del Centre de Cooperació pel Desenvolupament CCD de la UPC.

El projecte "GasCea" va decantar-se per la generació d'electricitat a partir de la gasificació de biomassa en les fases inicials per la seva component ecològica i sobretot dinamitzadora de la societat i l'economia local. Un dels objectius primaris era precisament integrar a la població local en diverses etapes del projecte i garantir d'aquesta manera la continuïtat del mateix en acabar la col·laboració.

Així doncs aquest TFG ve precedit per altres que han anat marcant el camí i han anat aprofundint diversos aspectes d'aquesta tecnologia i del context. En el marc del projecte de gasificació del CITCEA-UPC s'ha dissenyat un gasificador i s'ha construït amb l'ajuda dels Tallers d'Aspiració S.L., a la Celler de Ter finançat per una campanya de micromecenatge amb Goteo. Actualment el projecte està en una fase de proves de posta en marxa del prototip i de redisseny d'alguna de les parts per resoldre comportaments no esperats.

### 2.2. Motivació

El present projecte, "*Disseny i implementació d'un sistema de monitorització per a un sistema de gasificació de biomassa*", s'emmarca dins d'aquest context més general ja explicat i surt de la necessitat de dotar d'un sistema de monitorització i de recollida de dades adaptat al gasificador desenvolupat.

Neix també de la voluntat de fer un pas més en un projecte amb una trajectòria singular com a contraposició dels projectes d'enginyeria habituals, que busquen el rendiment econòmic per

sobre d'altres finalitats. Es vol apostar per un model de societat i d'enginyeria no únicament enfocada al creixement econòmic sinó també al creixement social. Un desenvolupament ecològic i envers els altres amb un caràcter global.

El projecte “GasCea” és un projecte de cooperació amb països en vies de desenvolupament i ho és en plural per la seva filosofia *opensource*<sup>1</sup>, que permet que el resultat del projecte sigui reproduïble arreu del món, i perquè en aquest sentit s'ha elaborat un manual constructiu i s'està realitzant un de funcionament. Per això, i com ja s'ha dit, no s'ha fet un enfocament des d'un punt de vista assistencialista sinó des d'un punt de vista de cooperació, de capaciació de la societat local, perquè sigui aquesta la que hagi de reproduir la tecnologia dissenyada i siguin altres comunitats les que puguin també beneficiar-se d'aquesta.

---

<sup>1</sup> Opensource: terminologia que s'aplica a aquells continguts que són creats i distribuïts amb l'objectiu de que tothom en pugui fer ús i benefici individual o col·lectiu d'aquet, modificant-lo, adaptant-lo o complementant-lo.



## 3. Introducció

### 3.1. Objectius del projecte

El present projecte queda emmarcat dins del projecte de gasificació actual del CITCEA-UPC i com a tal persegueix assolir els mateixos objectius a través de complir els específics. Així doncs els objectius que han motivat la realització d'aquest projecte segueixen a continuació:

- Realitzar el disseny d'un sistema de monitorització de baix cost i fàcilment reproduïble independentment de la formació prèvia i amb eines bàsiques.
- Dissenyar un programa d'adquisició de dades i una interfície gràfica útil i senzilla per l'usuari o operari del gasificador.
- Construir un prototip d'aquest sistema de monitorització i posar-lo en funcionament pel gasificador del centre CITCEA-UPC.

### 3.2. Abast del projecte

Per poder assolir els objectius plantejats anteriorment el projecte inclou diferents parts: es realitzarà un disseny conceptual del que s'ha de desenvolupar, un recull de les característiques i especificacions que el sistema de instrumentalització i monitorització ha d'acomplir.

Es farà també un estudi de diferents solucions aplicables per realitzar les diferents mesures i processat de dades per desenvolupar un prototip. Es configurarà el microcontrolador i el PC que rebrà les dades que inclourà també un programari desenvolupat en el llenguatge de programació seleccionat per tal de realitzar la monitorització.

## 4. Gasificació: Estat de l'art

La gasificació és una tecnologia que permet extreure l'energia provinent de la biomassa i, alhora, ofereix la possibilitat de que aquesta sigui utilitzada per diferents finalitats. Entre elles es troben l'obtenció d'energia elèctrica o l'obtenció de combustible per a vehicles a més a més del tradicional us que se'n fa de la biomassa obtenint energia tèrmica a partir de la combustió directa.

L'origen de la gasificació es remunta al 1798 quan simultàniament va ser descoberta a França i a Anglaterra [1]. Cap a meitats del segle XIX a Europa es feia servir com a font de calor i ja cap a finals del mateix segle, a Anglaterra, es van fer les primeres adaptacions per alimentar motors de combustió. Tot i així aquesta tecnologia no va ser gaire important ni va estar estesa fins a l'inici de la Segona Guerra Mundial on, amb l'escassetat dels combustibles fòssils, va agafar una gran rellevància. Entre el 1940 i el 1946 als països del Nord d'Europa gran part dels vehicles industrials, motors estacionaris o dels vaixells funcionaven amb gas de síntesi. A Dinamarca el 95% d'aquests vehicles usaven la gasificació com a combustible i per Suïssa aquest percentatge arribava al 40% dels vehicles de transport [2]. En acabar la guerra l'abaratiment del preu dels combustibles fòssils va desplaçar l'ús d'aquesta tecnologia per la seva poca competitivitat.

En l'actualitat, la gasificació torna a ser una opció viable com a font d'energia renovable. El normalment alt preu dels combustibles fòssils i la previsió de que aquests continuïn pujant després de l'actual baixada, junt amb la certesa de que l'esgotament d'aquets recursos fòssils s'apropa, ha tornat a posar sobre la taula aquesta tecnologia juntament amb d'altres. Avui en dia ja és una realitat en alguns països en vies de desenvolupament, ja que permet l'aprofitament dels recursos locals i la no dependència dels combustibles fòssils. En el primer món es donen alguns casos on l'aplicació d'aquesta tecnologia és molt interessant. Un exemple es trobaria en els sistemes autònoms aïllats on l'accés de biomassa és abundant o per també en sistemes de generació distribuïda on es pot complementar amb altres fonts d'energies renovables.

### 4.1. Funcionament de la gasificació

La gasificació és un procés termoquímic que, mitjançant un conjunt de reaccions i processos, és capaç de produir un gas de síntesi a partir de biomassa de tipus llenyós. Col·loquialment es parla de la gasificació com una combustió incompleta de la biomassa que permet transformar el combustible sòlid en combustible en estat gasós. Així doncs la biomassa segueix les següents

fases des del seu estat inicial fins que s'obté aquest gas de síntesi o *syngas*.

- 1- Assecatge
- 2- Piròlisi
- 3- Combustió
- 4- Reducció

Totes aquestes fases i reaccions tenen lloc en un espai molt reduït del gasificador que, depenent de la tipologia de gasificador i de la geometria del reactor, no sempre tenen lloc en el mateix ordre ni distribució. Més endavant, quan s'introdueixin les diverses configuracions possibles [pàg. 12] s'entrarà també en les diferents distribucions existents.

### **Assecatge**

En aquesta primera fase és duu a terme un procés físic imprescindible per preparar la biomassa. Aquesta és escalfada, sovint aprofitant en un intercanviador el calor excedent del gas generat en fases posteriors, a temperatures d'entre 100 °C i 200 °C. D'aquesta manera s'aconsegueix reduir la humitat present en la biomassa fins a un 10-20% d'aigua. Dita proporció d'aigua és la ideal que ha de contenir la biomassa per ser gasificada de la manera més eficient. Una proporció superior d'aigua pot provocar que, en etapes futures, part de l'energia requerida per realitzar certes reaccions químiques sigui absorbida per dur a terme aquesta evaporació d'aigua. Per contra, una biomassa amb menys humitat de la recomanada, tot i que és difícil d'aconseguir, pot causar que durant l'etapa de combustió es consumeixi més biomassa de la necessària o que no es puguin dur a terme les reaccions de forma idònia per la falta d'aportació d'hidrogen present en la molècula d'aigua. En ambdós casos això acaba afectant negativament a la eficiència del gasificador.

### **Piròlisi**

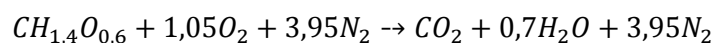
Una vegada la biomassa ja està en les condicions òptimes d'humitat, degut a l'elevada temperatura a la que es troba, es duu a terme la piròlisi. Es tracta d'un procés endotèrmic, que consisteix en la descomposició tèrmica de la biomassa en diferents productes, on un d'ells és el conegut carbó vegetal.

Durant les reaccions de piròlisi la biomassa és sotmesa a altes temperatures, aproximadament entre 350-400°C, i es descomposa en subproductes més senzills. El procés té lloc en absència total d'oxigen i la biomassa entrant es transforma en una barreja de carbó, altres combustibles líquids, vapors de quitrà i una primera porció del gas de síntesi.

## Combustió

Les reaccions que conformen el conjunt de la gasificació són majoritàriament reaccions endotèrmiques [6]. Cal, però, invertir part de la biomassa per generar una combustió completa, reacció altament exotèrmica, per poder aportar l'energia necessària a la resta de reaccions.

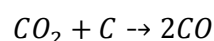
Així doncs una petita porció de la biomassa que s'introdueix inevitablement serà sotmesa a una combustió completa seguint la següent reacció química (Equació 1). Els gasos sortints d'aquesta combustió són vapor d'aigua ( $H_2O$ ) i diòxid de carboni ( $CO_2$ ) majoritàriament i seran els reactius de altres reaccions i permetran l'obtenció de gas de síntesi. En aquesta etapa es duu a terme també una combustió incompleta doncs tots els productes de la piròlisi o el carbó vegetal no poden reaccionar amb l'oxigen injectat, ja que està present en menor quantitat a l'estequiomètrica, que és la necessària per fer una combustió completa. El producte doncs de la combustió incompleta serà principalment monòxid de carboni ( $CO$ ).



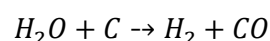
Equació 1

## Reducció

Aquesta és l'última etapa que té lloc en el procés de gasificació i és en si el punt clau on es genera la majoria del gas de síntesi. Es tracta també d'un conjunt de reaccions, la majoria endotèrmiques, on els productes de la combustió ( $H_2O$  i  $CO_2$ ) i el carbó vegetal creat durant la piròlisi reaccionen entre si per produir gas de síntesi. Les reaccions que es duen a terme es poden veure en les equacions següents (Equació 2 i Equació 3).



Equació 2



Equació 3

## 4.2. Tipus de gasificadors

Les reaccions descrites anteriorment no sempre es duen a terme en el mateix ordre ni amb la mateixa eficiència. Com ja s'ha dit amb anterioritat, això depèn molt de la configuració i del tipus de tecnologia de gasificació emprada. A continuació es farà un breu resum de les tecnologies existents avui en dia tot remarquant les diferències entre unes i altres. Aquestes configuracions es poden agrupar en dos grans grups, els de llit fix i els de llit fluïditzat tot i que existeixen altres tipologies experimentals.

### 4.2.1. Llit fix

Els gasificadors de llit fix engloben aquells en que el combustible està recolzat en una superfície, habitualment anomenada graella, i les reaccions es duen a terme de forma diferenciada per sobre d'aquesta. Gràcies a aquesta configuració són molt robustos i adequats per a diverses aplicacions on destaquen l'alimentació de vehicles o la generació d'electricitat amb generadors de fins a 10 MW de potència elèctrica.

#### 4.2.1.1. Tecnologia "Updraft"

És la tecnologia més simple de gasificació tot i que aquest mateix fet causa certs inconvenients en la qualitat del gas generat que es detallen a continuació. Rep el seu nom pel fet de que la biomassa i l'aire tenen sentits de flux oposats en la direcció vertical per la seva geometria constructiva.

A la Figura 1, es mostra un esquema del funcionament d'un gasificador de tipus Updraft. En els gasificadors "Updraft" l'aire s'introdueix per la part inferior i la biomassa és introduïda per la part superior, per on també s'extreu el gas de síntesi generat. Les reaccions doncs, tenen lloc en el següent ordre ascendent: combustió, reducció, piròlisi i assecatge. Com es pot veure el gas generat a la zona de reducció passa per la zona de piròlisi i és conduit a la sortida sense passar per la zona de combustió. Aquest fet provoca que el contingut en quitrans del gas extret sigui molt alt doncs l'etapa on es produeixen, la piròlisi, no es troba a prou temperatura per eliminar-los completament, procés conegut com craqueig de quitrans. Per altra banda, un factor positiu és la temperatura de sortida dels gasos que és més baixa que en altres tecnologies, fet que augmenta la eficiència tèrmica del gasificador.

## Updraft Gasifier

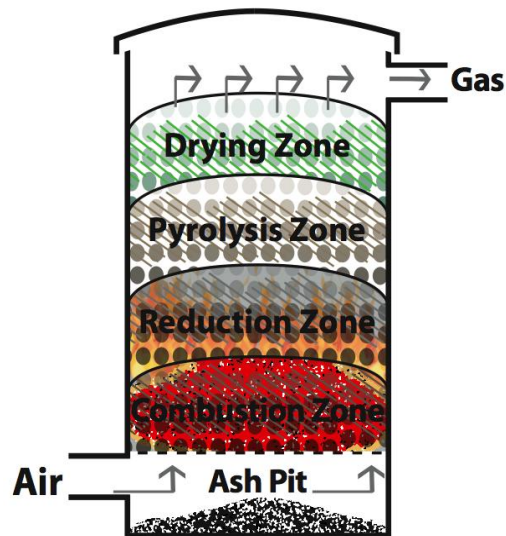


Figura 1 Esquema de funcionament d'un gasificador "Updraft" Font: AllpowerLabs Bibliografia [3]

### 4.2.1.2. Tecnologia "Downdraft"

La tecnologia "Downdraft" rep el seu nom perquè tant la circulació de l'aire o agent gasificant com la de la biomassa tenen el mateix sentit descendent en la direcció vertical. El seu funcionament com es pot veure esquemàticament a la Figura 2, difereix de la tipologia "Updraft" en que la reacció de combustió es dona entre la etapa de piròlisi i l'etapa de reducció. Aquest fet és clau en un dels punts crítics de la gasificació; doncs al tenir la combustió junt amb la piròlisi, fa que la temperatura a la que es produeix aquesta augmenti i es redueixi la formació de quitrans. La biomassa s'introdueix per la part superior on hi ha un accés que romandrà tancat durant l'operació regular del gasificador i només s'obre per recarregar-lo. Per altra banda, l'entrada d'aire es duu a terme a través dels injectors col·locats al punt d'estretament del reactor on es produeix la combustió. Per sobre d'aquest punt tenen lloc la piròlisi i l'assecatge i per sota la reducció, la sortida de cendres i la sortida del gas.

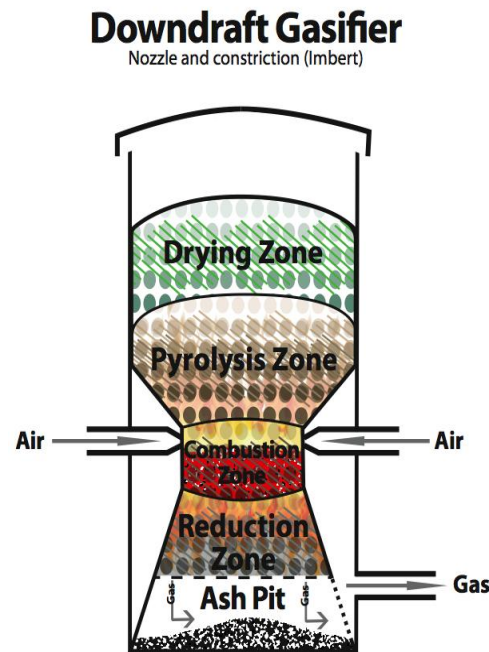


Figura 2 Esquema de funcionament d'un gasificador "Downdraft" Font: AllpowerLabs Bibliografia [3]

Per aquest motiu és el gasificador de llit fix que genera un gas de més qualitat i és el més estès de tots, sobretot en les aplicacions de transport o generació elèctrica on cal introduir el gas a un motor i és requisit indispensable que aquest gas contingui una porció mínima de quitrans i impureses.

#### 4.2.1.3. Tecnologia "Crossdraft"

La tecnologia "Crossdraft" va ser dissenyada per a l'ús exclusiu de carbó vegetal que, en ser cremat, pot arribar a temperatures superiors als 1500°C. Aquest fet, destructiu per la majoria de materials habituals amb els que es fabriquen els gasificadors, va ser resolt gràcies a una nova geometria. El carbó com en els altres casos s'introdueix per la part superior i és la gravetat la que s'encarrega de portar-lo cap a la zona de combustió. L'aire, en aquest gasificador, és injectat per un injector que, per un costat, s'endinsa en el gasificador com es pot veure en la Figura 3. Aquest fet provoca que les màximes temperatures de combustió es produeixin al centre del gasificador de manera que el propi carbó actua d'aïllant davant les parets del gasificador.

## Crossdraft Gasifier

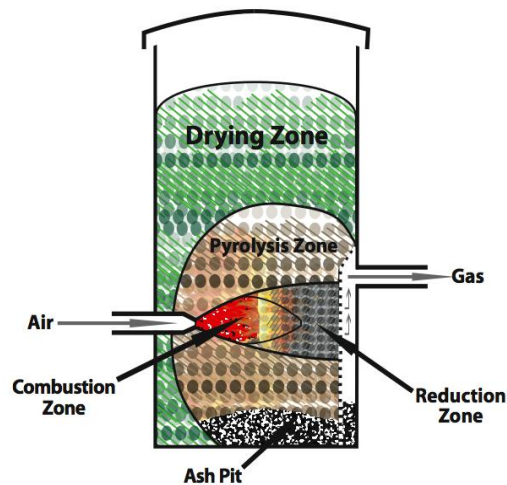


Figura 3 Esquema de funcionament d'un gasificador "Crossdraft" Font: AllpowerLabs Bibliografia [3]

Aquest tipus de gasificador proporciona un gas de gran qualitat quan és també alimentat amb un carbó de la mateixa qualitat. La seva nul·la capacitat d'eliminació de quitrans obliga doncs a només fer-lo servir amb aquest combustible de manera que limita molt les possibles aplicacions del gasificador i encareix l'obtenció del combustible per la dificultat de obtenció de carbó de tals característiques.

### 4.2.2. Llit Fluïditzat

Al tractar-se d'una tecnologia radicalment diferent a les vistes fins ara, la seva aplicació conseqüentment ho és també. Per les seves prestacions aquests sistemes són adequats per generar potència elèctrica entorn el rang de 1 a 100 MW.

L'element diferencial d'aquesta tecnologia, si és que n'hi ha un de sol, és la manera en la que el combustible es troba en el gasificador. L'aire o l'agent gasificant és injectat per la part inferior del gasificador a una velocitat variable i el combustible, que ha estat reduït a pols abans d'introduir-lo al gasificador, es manté en suspensió per l'efecte de l'agent gasificant.

Aquesta configuració permet que les reaccions de gasificació tinguin lloc d'una manera molt homogènia per tot el gasificador i que per tant la relació entre el volum de gas generat i el volum de reactor sigui molt major.



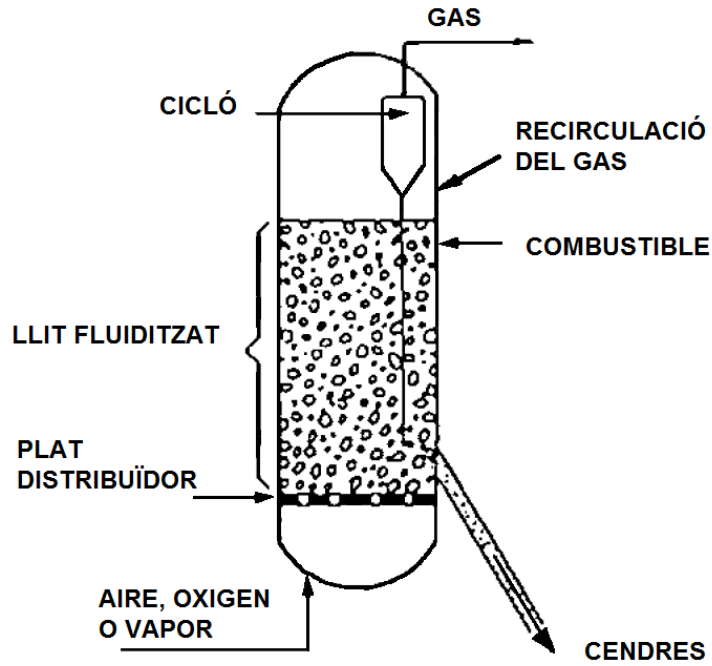


Figura 4 Esquema de funcionament d'un gasificador de llit fluiditzat. Font: FAO Bibliografia [4]

Com es pot veure en la Figura 4, aquests gasificadors inclouen un cicló que separa les cendres del gas produït doncs ambdós surten del reactor per la part superior. Per contrapartida, la generació de quitrans en aquesta configuració és elevada si es produeixen canvis freqüents de càrrega de treball.

## 5. Gasificador CITCEA-UPC

En aquest punt es pretén fer una recopilació del conjunt de decisions preses al llarg del projecte “GasCea” que queden fora de l’abast d’aquest projecte, però que sens dubte condicionen el desenvolupament del mateix ja que han definit el gasificador del CITCEA-UPC tal i com és avui (Figura 5). Les fonts per tant seran les mencionades a la bibliografia complementària doncs no s’ha fet més que un recull i síntesi dels punts claus d’aquestes.



Figura 5 Gasificador CITCEA-UPC en les instal·lacions dels Tallers d’Aspiració a Celler de Ter, Girona.  
Font: Elaboració pròpia.

### 5.1. Característiques principals

El gasificador desenvolupat al CITCEA-UPC ha estat desenvolupat per abastir d’energia elèctrica un hospital del Txad, Àfrica. Concretament les necessitats esmentades són el bombeig d’aigua d’un pou, l’electricitat necessària als quiròfans i la de la resta de l’hospital. Aquests consums s’han estimat que en el moment màxim no superaran els 10 kW i per tant s’ha pres com a dada alhora de dimensionar la resta dels sistemes.

La tria de la tecnologia de gasificació com s’ha dit queda fora de l’abast d’aquest treball. Tot i així, després d’un estudi més extensiu que la resumida introducció a la tecnologia exposada en el punt anterior [pàg. 9] i pels requeriments imposats en el plantejament del projecte, que

responen a les necessitats concretes dels destinataris, es pot afirmar que la opció seleccionada, fabricar un gasificador downdraft, és sens dubte la més apropiada per satisfer les necessitats exposades.

El recorregut concret del gas que caldrà monitoritzar es pot veure en l'esquema de la Figura 6. La biomassa, que entra per la part superior de la tolva, reacciona amb l'agent gasificant que entra pels injectors en la part superior del reactor. És en aquesta zona, entre el reactor i la graella, on es produeixen les reaccions de gasificació. Una vegada sintetitzat, el gas és conduït primer al cicló on es desprèn de partícules en suspensió com cendres o carbó no reaccionat i els primers condensats d'aigua i quitrans. A continuació s'introdueix a l'intercanviador de calor on cedeix part de la calor continguda a la biomassa ajudant així a l'etapa d'assecatge d'aquesta. Seguidament passa pel filtre on s'ha de despreure de la resta de quitrans, partícules en suspensió i vapor que encara contingui. Per últim el gas es pot desviar cap al cremador en els transitoris d'arrencada i d'aturada o cap al motor de combustió per tal de generar l'electricitat.

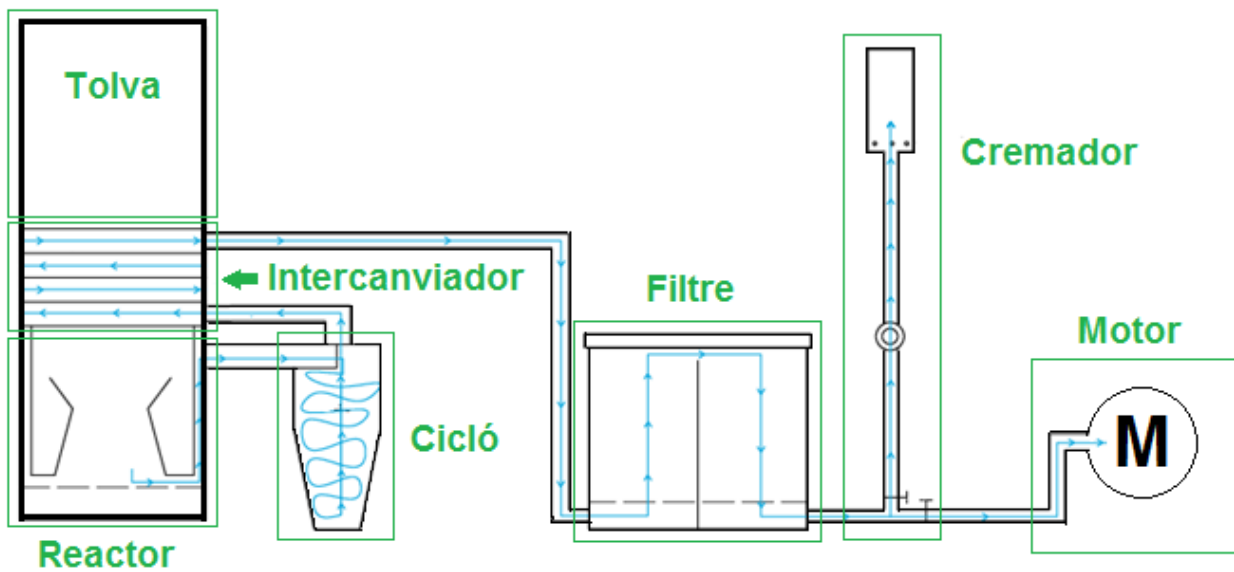


Figura 6 Esquema del recorregut de gas per les diferents parts del gasificador. Font: elaboració pròpia.

El disseny de les peces es va realitzar durant el curs 2013-2014 en base a diverses fonts i manuals constructius tot i que no es va seguir una metodologia concreta. El modelatge i els plànols de les peces van ser fets amb Solid Works es pot veure un exemple a la Figura 7 que hi ha a continuació. En aquesta es poden observar els plànols del cicló, una de les parts importants en el tractament del gas de síntesi una vegada aquest surt del reactor.

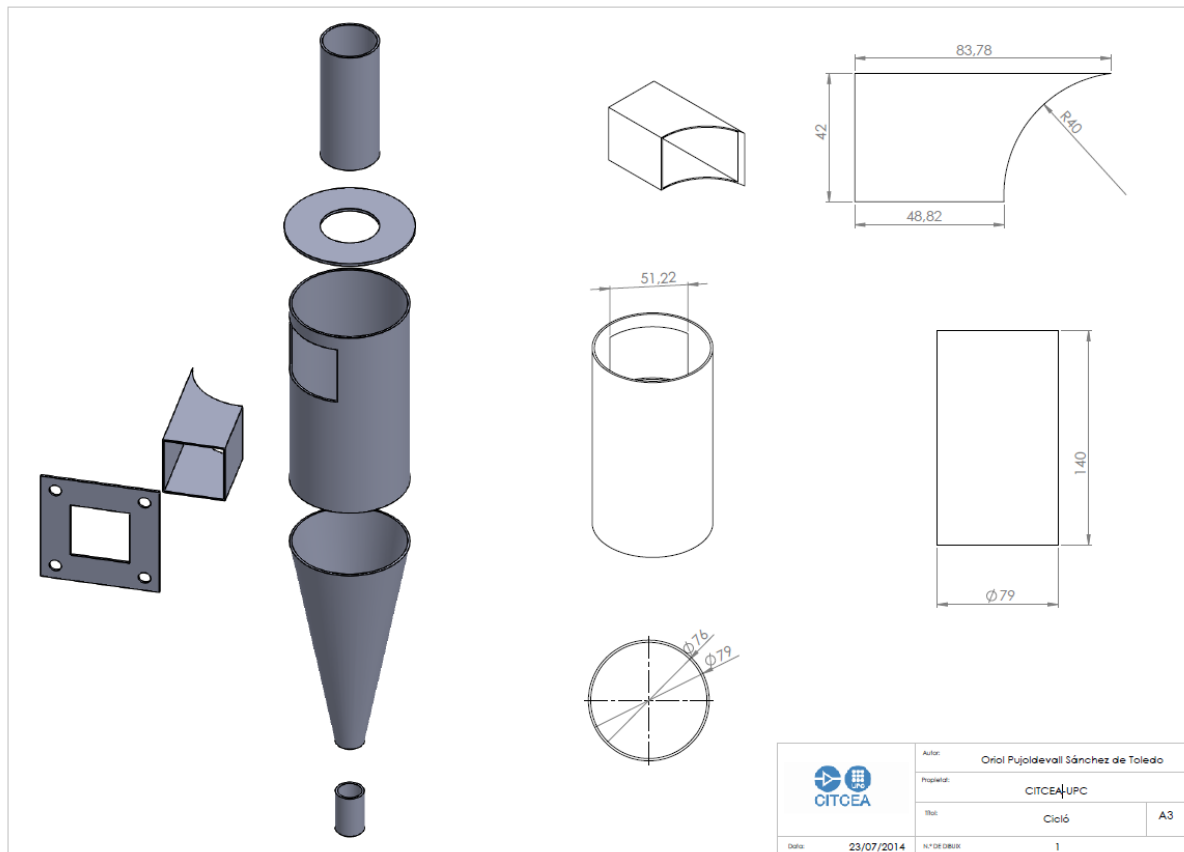


Figura 7 Plànol explosionat del cicló, part del sistema de condicionament del gas. Font: Projecte “GasCea”

La fabricació de les peces i l'acoblament de les diferents peces va ser dut a terme als Tallers d'Aspiració de Celler de Ter, mateix indret on es van realitzar les primeres proves de funcionament tant del gasificador com del sistema de monitorització que es descriu en aquest projecte. A la Figura 8 es poden veure algunes peces que conformen el gasificador exposades abans del muntatge.



Figura 8 Detall de diverses peces del gasificador preparades per ser muntades entre si. Font: Elaboració pròpia

## 5.2. Estat actual

El projecte “GasCea” es troba en una etapa de proves experimentals de posada en marxa. S’han realitzat proves de posada en marxa tant a la Celler de Ter, lloc on es va fabricar el gasificador com en un laboratori especialitzat per fer proves amb foc, el “FlamesLab” una de les instal·lacions del CERTEC (Centre d’Estudis del Risc Tecnològic), situat al edifici de l’ETSEIB de la UPC.

Els resultats obtinguts fins al moment no han estat del tot satisfactoris. Es va aconseguir fer gas inflamable en una de les proves però no s’ha pogut repetir. S’estudien diverses hipòtesis que poden ser les causants d’aquest fet, algunes d’elles són:

- **El mal dimensionament del reactor.** Recentment, a causa d’alguns resultats experimentals s’han tornat a refer els càlculs de dimensionat del gasificador amb més rigor i els resultats no han estat els esperats.
- **El tipus de biomassa o la mida d’aquesta:** S’han realitzat proves amb diversos tipus de biomassa, estella de pi i pelets i tenint cura de la mida d’aquesta en el moment d’introduir-la o en la mida del carbó que s’empra per engegar el gasificador per primera vegada.
- **L’estanqueïtat del gasificador.** Un fet clau pel gasificador és que sigui estanc. No només pel fet de que el gas que s’està generant és explosiu i no convé que hi hagi

fuites sinó perquè desequilibra les proporcions d'oxigen en les diferents parts del gasificador. L'entrada d'aire per un altre punt que no siguin els injectors fa que per un costat la quantitat d'oxigen a la zona de la reacció sigui inferior a la ideal i per l'altre hi hagi un excés d'oxigen en altres zones del gasificador causant així un desequilibri en les reaccions i una reducció en l'eficiència global.

- **La velocitat del gas en l'interior del gasificador.** Durant els transitoris d'arrencada i d'aturada es fa servir un bufador per generar el buit i fer circular el gas pel sistema. Durant el funcionament serà el mateix motor el que realitzi aquesta tasca. Actualment s'està fent amb un bufador que es pensa que potser no es capaç de crear prou succió.

Resoldre la influència d'aquestes hipòtesis en el funcionament és una prioritat. Tot i així aquests motius o una combinació d'alguns d'ells podrien no ser les causes principals i no es descarta que hi hagi altres factors que puguin influir.

## 6. Sistema de monitorització

### 6.1. Descripció de les necessitats del sistema

Com ja s'ha explicat anteriorment el gasificador que es vol monitoritzar es tracta d'un prototipus experimental. Com a tal la recollida de dades és de gran importància per al seu posterior estudi doncs durant les diferents proves es voldran estudiar els règims de funcionament i els canvis que es produeixin variant diferents paràmetres. Al ser un sistema de monitorització caldrà també tenir en compte les necessitats dels operadors de la màquina i proveir-los de tota informació necessària. Per tant s'ha de dissenyar un sistema que alhora pugui fer aquestes dues tasques.

En el sistema de monitorització del projecte es voldran fer mesures de les pressions i temperatures de diferents punts clau en el procés de generació de gas amb dos objectius principalment:

- Primerament, i com ja s'ha dit anteriorment, proporcionar als operadors del gasificador informació sobre l'estat de funcionament actual. D'aquesta manera els tècnics coneixeran l'estat de les reaccions que s'estan duent a terme a l'interior i podran executar petites rectificacions que permetin treballar en el punt òptim de generació de gas.
- El segon objectiu és poder recollir les dades per analitzar-les posteriorment. Aquestes dades, juntament amb els resultats dels anàlisis de la qualitat del gas produït, es podran analitzar per trobar correlacions. Així, es podran conèixer les condicions més favorables per a la producció d'un gas de qualitat, amb l'objectiu últim d'establir unes pautes per poder treballar en el règim de funcionament òptim.

Com es pot observar, ambdós objectius són dependents entre si doncs el primer busca conèixer l'estat del sistema per poder ajustar paràmetres per arribar a l'òptim i l'altre busca trobar la configuració que genera un gas de màxima qualitat a partir de les relacions entre la configuració dels paràmetres ajustables i la qualitat de gas extreta.

Una vegada justificat el perquè de fer aquest sistema de recollida de dades/monitorització cal veure com funcionarà, en quins punts cal situar els sensors i sobretot quins i per què son els resultats teòrics esperats a cadascun d'aquests punts. Així doncs s'ha considerat que el gasificador del projecte "GasCea" tindrà cinc punts de mesura que es poden veure en la Figura 9 i que estan llistats a continuació.

- 1- Reactor
- 2- Graella
- 3- Cicló
- 4- Entrada del filtre
- 5- Sortida del filtre/entrada del motor

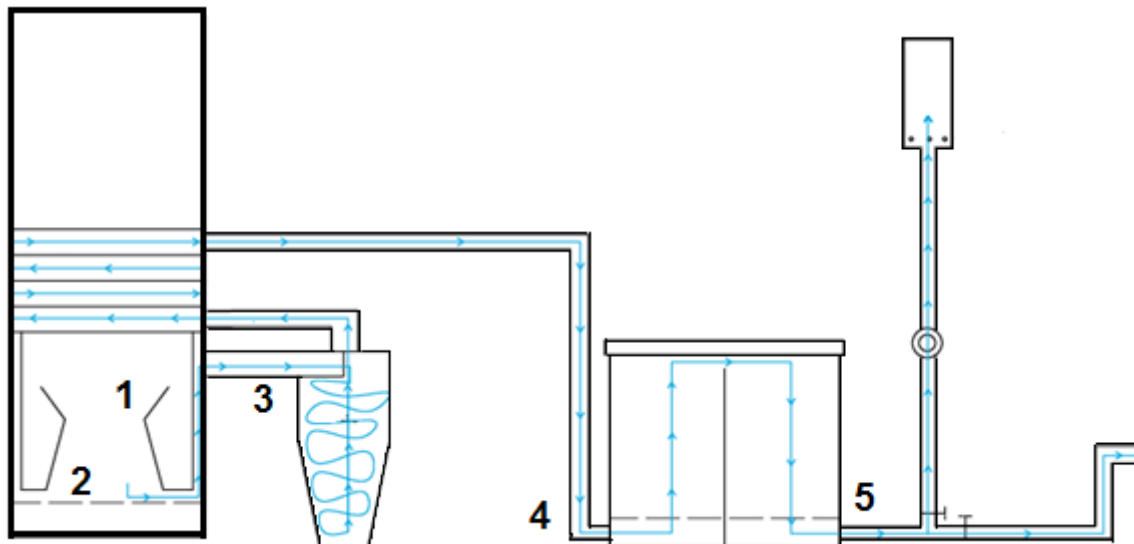


Figura 9 Esquema del recorregut del gas amb els punts de mesura. Font: Elaboració pròpia

En aquests punts es mesuraran alhora pressions si temperatures doncs cal minimitzar la quantitat de forats en el sistema i cada punt de mesura és un punt potencial de fuga. Un número inferior de punts de mesura ens faria passar per alt informació del que succeeix a l'interior del sistema i s'ha considerat que un número superior tampoc oferiria una millora apreciable en els resultats.

### **El Reactor**

El reactor i concretament en l'estretament o coll d'aquest és el punt on es troben les temperatures més elevades. La generació de gasos combustibles comença entorn els 600 °C però l'objectiu és mantenir-se proper als 800-900 °C ja que a aquestes temperatures es garanteix una mínima generació de quitrans. Temperatures de 1000 °C o superiors afavoreixen la fusió dels silicats del carbó i la biomassa fent aparèixer conglomerats que poden obstruir el coll del reactor.

Les pressions han de ser les més altes del sistema doncs és el punt més llunyà al generador



de buit (el motor o el bufador depenent de si el sistema es troba en regim de generació o en els transitoris d'arrencada/aturada) i també al costat dels injectors d'aire que com ja s'ha dit és l'únic punt teòric d'entrada d'aire al sistema. Per tant s'esperaran pressions atmosfèriques o lleugerament inferiors. Pressions superiors a l'atmosfèrica poden indicar inflamació dels gasos generats amb el possible perill d'explosió.

### **La graella**

És el segon punt on s'esperen temperatures més elevades doncs és el punt immediatament posterior al reactor. Tot i així el sensor de temperatura pot donar mesures falsejades en quedar tapat per les cendres i per fragments de carbó que tingui a sobre.

### **El cicló**

A l'entrada del cicló comença el procés de condicionament del gas. Cal recordar que és necessari netejar-lo de partícules en suspensió, quitrans i finalment ajustar la seva temperatura. El gas és conduït per diversos conductes que aporten una pèrdua de càrrega important i aquest fet afectarà també a les lectures de pressió.

La temperatura esperada ha de ser molt propera a la de la graella i en ocasions puntuals com les comentades en l'apartat anterior, on el sensor de la graella dona una lectura falsejada, pot ser superior a aquesta última.

### **Entrada del filtre**

A l'entrada del filtre el gas ve directe de l'intercanviador de calor amb la biomassa i per tant les temperatures esperades són molt inferiors, de l'ordre dels 100-130 °C.

Les pressions seran inferiors a les de l'entrada del cicló doncs entre un punt i l'altre trobem grans pèrdues de càrrega tant en el cicló com en l'intercanviador de calor.

### **Sortida del filtre/entrada del motor**

Al sortir del filtre el gas ha d'estar totalment preparat per a ser introduït al motor de combustió interna. En aquest punt és clau que la temperatura sigui la esperada, al voltant dels 80°C ja que temperatures superiors poden malmetre el motor i temperatures inferiors redueixen la eficiència del motor.

La següent Taula 1 recull un resum dels rangs de pressió i temperatura en tot el sistema. Cal remarcar que són valors esperats doncs el sistema és un prototip dissenyat per l'equip del Gasificador del CITCEA-UPC i per tant caldrà comprovar-los experimentalment.

	Pressió (mBar)			Temperatura (°C)		
	Mínima	Treball	Màxima	Mínima	Treball	Màxima
Reactor	-	Atmosfèrica	Atmosfèrica	600	800	1000
Graella	-	990	Atmosfèrica	400	500	600
Cicló	-	980	Atmosfèrica	200	300	400
Entrada del filtre	-	960	Atmosfèrica	-	150	300
Sort. Filt./entr. Mot.	-	940	Atmosfèrica	-	80	100

Taula 1. Resum de les pressions i temperatures màximes i mínimes esperades. Font: Creació pròpia

## 6.2. Sensors

### Introducció a la instrumentalització electrònica

La instrumentalització electrònica tracta les tècniques i els recursos per recopilar informació de l'entorn per tractar-la i millorar els processos tant automàtics funcionant amb un controlador com manuals, operats per un usuari. Els sistemes de instrumentalització comprenen bàsicament doncs dos camps, la instrumentalització i la instrumentalització de control, tot i que habitualment ambdós tipus de sistemes són emprats alhora per poder automatitzar els processos.

El primer grup, com s'ha dit, busca fer una lectura i un condicionament dels senyals d'entrada per mostrar-los a l'usuari i es basa en els captadors, els sensors i els transductors. El segon grup busca controlar el sistema per mitjà d'actuadors o accionadors i a partir de la informació d'entrada. Es pot veure a la Figura 10, que en ambdós casos es segueix el mateix esquema, els sensors mesuren paràmetres dels processos i, o bé l'usuari o bé un controlador, pren les decisions pertinents per alterar l'estat dels processos.

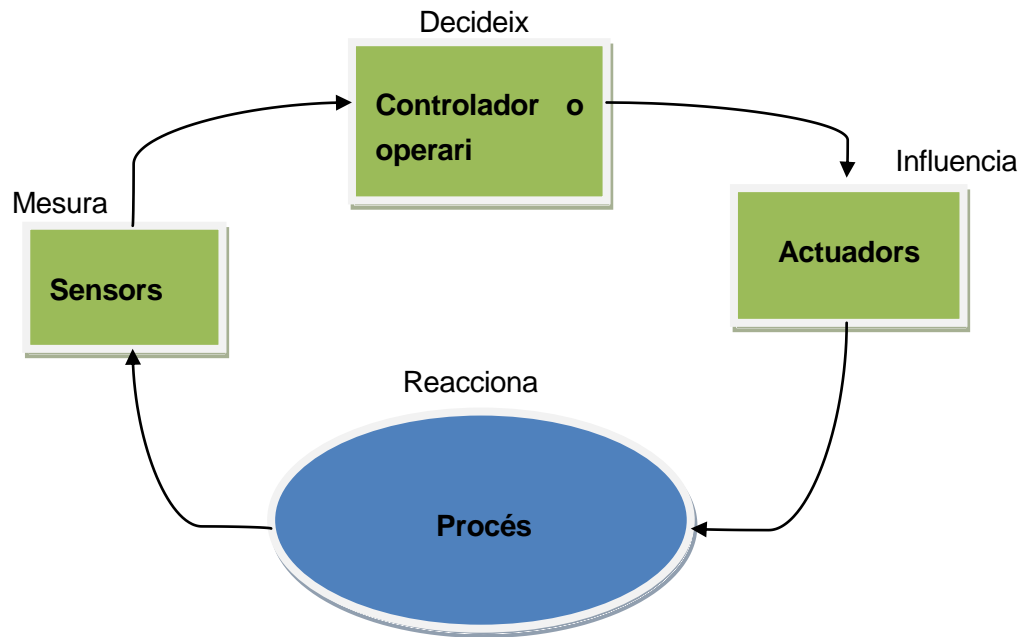


Figura 10 Esquema del funcionament dels sistemes d'instrumentalització. Font: Lessons in Industrial Instrumentation. Bibliografia [8]

En aquest treball com ja s'ha explicat anteriorment es centrarà únicament en el disseny d'un sistema de instrumentalització i tota la part de decisió i actuació serà manual. A continuació, per tant es presentaran els diferents sensors considerats per mesurar els paràmetres comentats amb anterioritat.

### 6.2.1. Sensors de temperatura

La temperatura és una magnitud termodinàmica que defineix el grau de calor present en un cos i que determina si està en equilibri amb el seu entorn en funció de la circulació d'aquest. En una gran part dels processos industrials és important mesurar-la per tal de poder controlar-los. Per fer-ho s'han desenvolupat diferents tècniques per poder fer lectures ràpides i fiables d'aquesta magnitud. Existeixen doncs diverses tipologies de sensors de temperatura que es poden dividir segons el seus principis de funcionament: mecànics, elèctrics o de radiació tèrmica.

Dins dels sensors de tipologia elèctrica es troben principalment els termistors, els RTD'S (de l'angles Sensors Resistius de Temperatura) i els termoparells tot i que també es poden mesurar

canvis de temperatura amb díodes o altres elements de base silici. Són àmpliament utilitzats en sistemes electrònics per la seva versatilitat i baix cost.

En el grup dels sensors mecànics es troben sensors basats en la dilatació d'algun material, ja sigui un metall unifilar o un conjunt bimetall (unió de dos metalls amb coeficients de dilatació diferents) o un líquid en un tub de vidre, mercuri, alcohol etc. Aquests sistemes s'utilitzen habitualment en aparells que no inclouen electrònica i per tant no els considerarem en el següent estudi.

Per últim es troben els sensors de radiació tèrmica que capten la radiació emesa pels cossos a estudiar i són un exemple els piròmetres o els sensors òptics. Aquest tipus de sensors tenen un preu molt elevat, són difícils de calibrar i només poden fer lectures de les temperatures superficials dels cossos que mesuren. Per tant no seran d'utilitat en el cas d'estudi on es volen conèixer les temperatures de punts interiors del sistema i per tant tampoc en farem un estudi més extensiu. Tot i així en la fase de posada en marxa s'emprarà una càmera termogràfica que mitjançant un sensor de radiació òptic permetrà veure les temperatures superficials de les diferents parts del gasificador.

Així doncs l'elecció serà entre uns sensors de tipologia elèctrica que són els termistors, els RTD'S i els termoparells.

### Termistors

Els termistors són uns sensors que es comporten com resistències tèrmiques, resistències que varien el seu valor en funció de la seva temperatura, i que essencialment són semiconductors formats per una barreja sintetitzada d'òxids metàl·lics. Existeixen al mercat dos tipologies diferents els NTC (Coeficient de Temperatura Negatiu) i els PTC (Coeficient de Temperatura Positiu) tot i que en la majoria de aplicacions es fa servir el primer tipus.

D'entre les seves característiques destaca la seva alta sensibilitat, en alguns casos la variació d'1 °C de temperatura pot fer variar la resistència en fins a un 6%. Aquesta alta sensibilitat justifica que siguin àmpliament utilitzats en sistemes de control de temperatura. Una altra característica de gran importància és la seva velocitat de resposta davant variacions de temperatura. Això es deu a la seva reduïda massa en comparació amb altres sensors de temperatura.

Per altra banda, aquestes mateixes característiques limiten l'ús dels termistors a rangs petits de temperatures doncs les resistències varien tant que es fa molt difícil poder fer la lectura amb un

únic aparell. Un altre inconvenient dels termistors és la seva resposta no-lineal davant els canvis de temperatura que pot ser parcialment mitigada amb circuits de linealització però tot i així aquest fet que limita el seu ús a aplicacions on no és imprescindible la seva precisió.

Per aquestes propietats són molt utilitzats per mesurar temperatures tant de gasos, líquids com sòlids en rangs de temperatura que es troben entre els  $-50^{\circ}\text{C}$  i els  $200^{\circ}\text{C}$  tot i que és possible trobar termistors que facin mesures en altres rangs de temperatura fins als  $450^{\circ}\text{C}$ .

Com és habitual en tots els sensors de temperatura es fan servir encapsulats per protegir el sensor mentre està exposat a allò que ha de mesurar. Els encapsulats poden ser d'acer, alumini o plàstics i en el seu interior podem trobar les següents configuracions mostrades a la Figura 11: tipus bola, tipus disc o tipus barra.

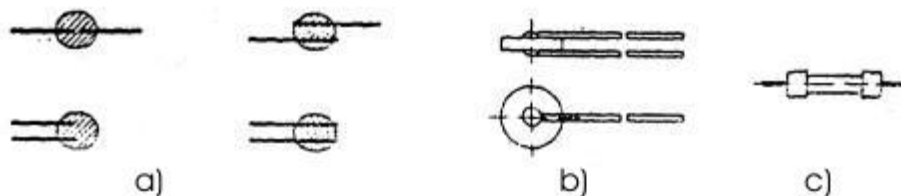


Figura 11 Formes constructives de termistors NTC a. Tipus globus amb diferents tipus de terminals - b. Tipus disc - c. Tipus barra. Font: Elementos y Equipos Eléctricos UNCOR [9].

### NTC (Coeficient de Temperatura Negatiu)

Estan fabricats a partir d'una barreja d'òxids de Mn, Ni, Co, Cu i Fe i amb un material ceràmic. Típicament presenten una resistència d'entre  $50\Omega$  i  $1M\Omega$  a  $25^{\circ}\text{C}$  i una sensibilitat del 4% a aquesta mateixa temperatura.

### PTC (Coeficient de Temperatura Positiu)

Els PTC són també resistències que estan construïdes amb Bari Estronci amb Titani, l'adició d'agents dopants dona la característica resistiva respecte a la temperatura tot i que com s'ha dit pràcticament no s'utilitza avui en dia per mesurar temperatura.

## RTD'S

Els RTD'S o Detectores Resistius de Temperatura funcionen també gràcies a la correlació entre les variacions de temperatura i resistència. A diferència dels termistors els elements sensitius són metalls purs i la relació de temperatura-resistència és directament proporcional. La mesura es realitza a partir d'un circuit amb una font, l'element sensitiu i un instrument de mesura.

Els RTD més habituals estan formats per una resistència de Platí doncs és el material més estable i exacte. La gran reproductibilitat associada a la relació temperatura-resistència d'aquest material fa que hagi estat instaurat com a referència internacional de temperatura entre  $-260\text{ }^{\circ}\text{C}$  i  $630\text{ }^{\circ}\text{C}$ . També s'utilitzen altres tipus de materials com el Níquel, la combinació Níquel-Ferro, Coure i Tungstè. Típicament tenen una resistència entre  $20\ \Omega$  i  $20\text{k}\ \Omega$ .

L'avantatge més important és que són lineals en el rang de temperatura entre  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  i  $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Analitzant diversos tipus de termoresistències es poden trobar les de Níquel que són molt més fàcilment linealitzables que les de Platí a través d'un circuit pont però per contra el rang de temperatura que poden mesurar és més petit que aquestes, només entre  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  i  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Per altra banda, les termoresistències de coure encara presenten una linealitat més precisa però estan limitades en rang, de  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  i presenten baixa resistivitat fet que obliga a fer servir fils de menor diàmetre.

Les termoresistències de Tungstè no són gaire utilitzades doncs és un material menys estable que els altres esmentats. L'únic avantatge que presenta és la gran resistència mecànica que presenta, fet que permet emprar fils molt prims obtenint així termoresistències d'elevada resistència elèctrica.

Els circuits amb termoresistències prenen tres configuracions bàsiques: bifilar, trifilar i quadrifilar (veure Figura 12). La configuració bifilar és emprada quan els cables de connexió són tan curts que pot ser negligida la resistència que aquests aporten al circuit. La configuració trifilar tendeix a cancel·lar la resistència introduïda per la longitud dels cables de connexió si aquests són d'igual longitud i diàmetre i es troben a iguals temperatures a ambdós costats de la connexió de la termoresistència al pont de Wheatstone, circuit per mesurar resistències desconegudes, en el que està muntada. Aquesta configuració ofereix lectures suficientment precises en instal·lacions industrials de fins a 20 metres de cable. Per últim, la configuració amb 4 cables permet obtenir major exactitud sempre que els 4 cables siguin d'igual secció, longitud i material i es trobin a iguals temperatures. Només s'empra en instal·lacions de més de 20

metres de longitud.

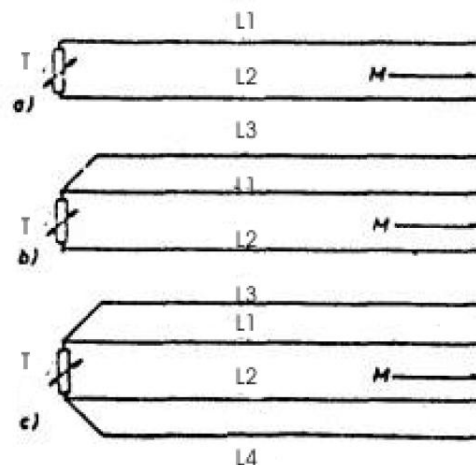


Figura 12 Sistemes de connexió de termorresistències a) Bifilar, b) Trifilar, c) Quadrifilar Font: Elementos y Equipos Eléctricos UNCOR [9].

Per últim, si comparem una termorresistència de platí de  $100 \Omega$  i un termoparell tipus K (explicats en profunditat al següent punt), la variació de resistència del primer és deu vegades més gran que la del segon en l'interval que va de  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  i això explica que les termorresistències siguin menys sensibles a les interferències d'altres circuits electromagnètics. La interconnexió de termorresistències i instruments de mesura es fa amb cable de coure a diferència dels termoparells on calen cables de compensació de preus superiors.

### Termoparells

Els termoparells són els sensors més utilitzats en la indústria a qualsevol tipus d'aplicació, excloent les mesures en components electrònics. La seva configuració i el seu principi de funcionament són, a priori, molt senzills tot i que cal tenir en compte algunes consideracions que s'aniran exposant.

Un termoparell està constituït bàsicament per dos fils de metalls diferents. En el moment que els dos fils s'uneixen en un punt i aquest és escalfat es duu a terme un fenomen: es crea una diferència de potencial molt petita, de l'ordre dels milivolts, entre els altres extrems dels fils (veure Figura 13). Aquesta diferència de potencial entre els dos fils és proporcional a la temperatura a la que es troben i varia també amb la temperatura d'una forma aproximadament lineal (no és realment lineal com s'analitzarà més endavant) i només cal mesurar-lo i fer la conversió a temperatura per mitjà d'unes taules.

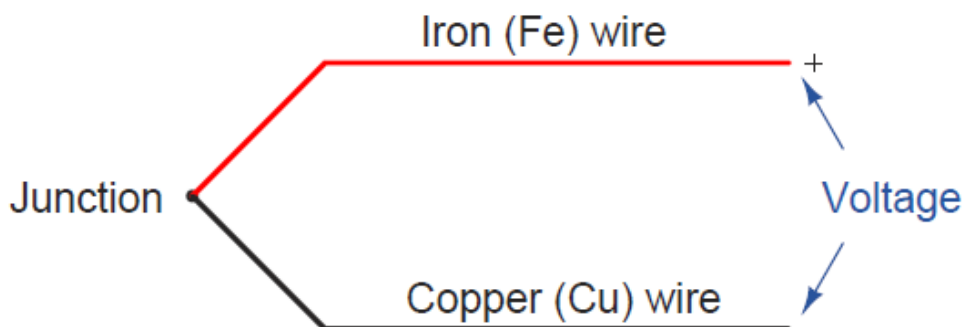


Figura 13 Detall de la unió d'un termoparell i de la diferència de potencial que es genera Font: Lessons In Industrial Instrumentation. Bibliografia [8]

Existeix però, un altre factor que cal tenir en comte en l'aplicació de termoparells. En el punt de mesura, que habitualment és anomenat "punt fred", ja que en la majoria d'aplicacions es mesuren temperatures superiors a la temperatura ambient, també es generarà una f.e.m.. Aquesta serà proporcional a la temperatura ambient ja que torna a haver una connexió entre dos metalls diferents i, si no es té en compte, alterarà la lectura. S'entrarà més en profunditat en aquest tema en els propers punts ja que és causa també de que en cas de necessitar allargar els cables dels termoparells calgui fer-ho amb els mateixos materials que el propi termoparell.

Els termoparells, per la naturalesa dels medis als que són exposats habitualment, requereixen ser protegits amb uns encapsulats per tal d'allargar la seva vida útil i aquests són majoritàriament d'acer inoxidable o de materials ceràmics. Caldrà tenir en compte aquest factor ja que es voldran mesurar temperatures de gasos potencialment reductors com el monòxid de carboni.

Pel seu principi de funcionament qualsevol unió entre dos metalls qualsevols formen un termoparell. Tot i així existeix una classificació elaborada per l'Instrument Society of America (ISA) i publicada a les normatives ANSI i ratificades més tard per altres normatives Europees (DIN, BS, NF...) que marca 7 tipologies de combinacions concretes més i designades amb una lletra i un codi de colors. Aquestes es mostren a la Taula 2. Val a dir que alguns fabricants han experimentat amb altres materials trobant combinacions que augmenten la resistència, allarguen la vida útil o inclús augmenten la f.e.m. o el rang de temperatures mesurable. De totes maneres no existeixen estudis amb tanta profunditat com els tipus estandarditzats. Entre els més destacables es troba la combinació de Tungstè reni capaç de mesurar temperatures de fins 2.760 °C.



Tipus	Cable positiu	Cable negatiu	Rang de temperatures
T	Coure (blau)	Constantà (vermell)	-270 a 400 °C
J	Ferro (blanc)	Constantà (vermell)	-210 a 1200 °C
E	Crom (lila)	Constantà (vermell)	-270 a 1000 °C
K	Crom (groc)	Alumel (vermell)	-270 a 1372 °C
N	Nicrosil (taronja)	Nisil (vermell)	-270 a 1300 °C
S	Pt90% - Rh10% (negre)	Platí (vermell)	-50 a 1678 °C
B	Pt70% - Rh30% (gris)	Pt94% - Rh6% (vermell)	0 a 1820 °C

Taula 2 Tipus de termoparells estàndard. Font ANSI/ASTM E-230

### Compensació en fred

Com ja s'ha introduït en un circuit on es connecta un termoparell hi ha inevitablement dos punts on metalls diferents entren en contacte. El primer punt és el que interessa per fer la lectura i el segon és un que caldrà tractar o compensar d'una manera adequada per no falsejar la lectura i obtenir el valor real de temperatura.

$$V_{voltímetre} = V_{J1} - V_{J2} + V_{rjc} \quad \text{Equació 4}$$

Existeixen diverses opcions per tal de compensar aquesta unió en fred dels termoparells. I totes passen per conèixer la temperatura en la segona unió i tractar després la lectura. Una de les opcions és intercalar una font de tensió (veure Figura 14) que constantment contraresti el potencial introduït per la unió freda. Cal, però, conèixer la temperatura de la unió freda per tal de poder actualitzar el valor de la font.

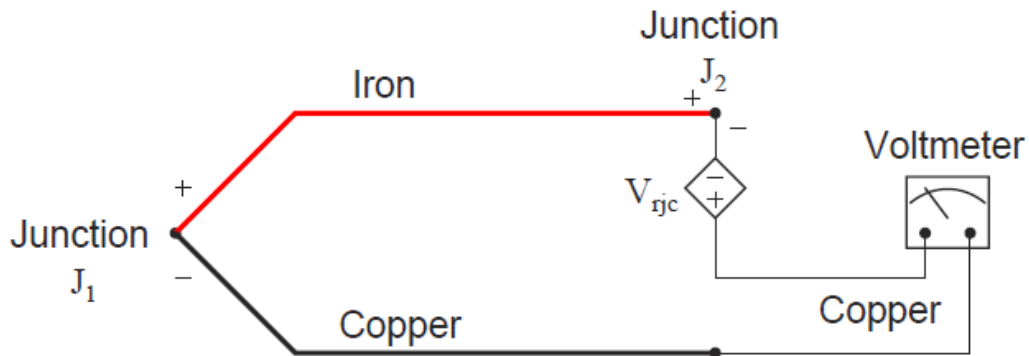


Figura 14 Es pot observar el detall de la font de voltatge intercalada entre el voltímetre i la unió freda. Font: Lessons In Industrial Instrumentation. Bibliografia [8]

Una altra metodologia que soluciona el punt anterior és la de fixar la temperatura de la unió freda (d'aquesta manera sempre s'ha de realitzar la mateixa compensació) i calcular la lectura real mitjançant la equació següent (Equació 5) on es coneix el valor de la f.e.m. generada a temperatura constant i només cal sumar-la per contrarestar la que inevitablement es genera. En el passat aquest era el mètode que s'emprava més, com es mostra a Figura 15 submergint la unió freda en aigua a 0°C amb gel es fixava la temperatura i després es tractava la lectura.

$$V_{\text{voltímetre}} = V_{J1} - V_{J2} + V_{\text{ferro-coure a } 0^{\circ}\text{C}}$$

Equació 5

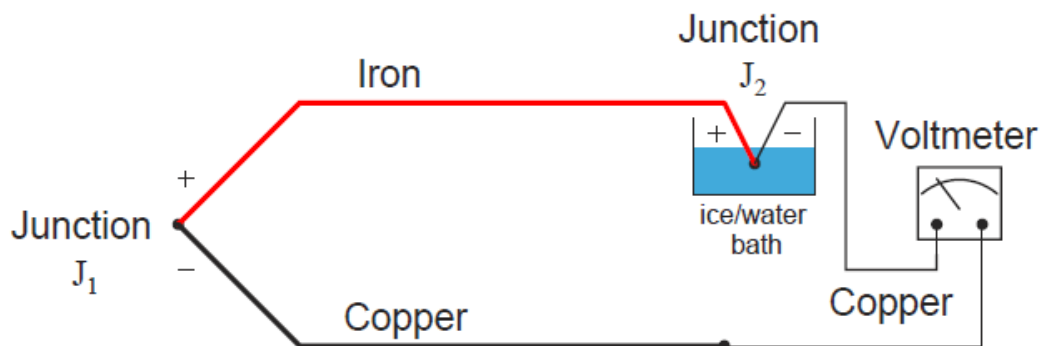


Figura 15 Es pot observar el detall de la unió freda submergida en aigua a 0°C per tal de fixar la temperatura en aquest punt. Font: Lessons In Industrial Instrumentation. Bibliografia [8]

Una altra metodologia possible per realitzar la compensació en fred consisteix en implementar un component electrònic que incorpora un altre sensor de temperatura (habitualment de caràcter resistiu) (veure Figura 16) i tractar automàticament la lectura per mostrar directament la temperatura real mitjançant l'Equació 5 anterior.

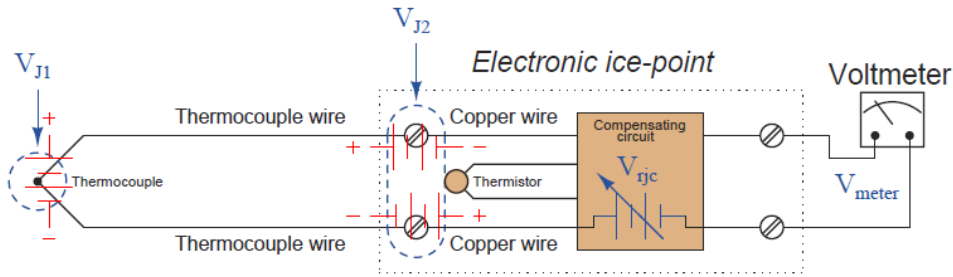


Figura 16 Es pot observar el component electrònic que realitza la compensació amb la lectura d'un termistor. Font: Lessons In Industrial Instrumentation. Bibliografia [8]

Fins ara els mètodes que s'han vist són els de compensació per hardware però existeix també la possibilitat de fer-la en el software. Un mètode molt similar a l'anterior consisteix en fer les lectures del termoparell i de la temperatura en el punt fred també amb un termistor o un RTD i amb un convertidor A/D passar ambdues lectures a digital i després fer la compensació matemàticament a un microxip o al computador que rep la entrada digital veure Figura 17. Aquesta és la metodologia que seguiran els compensadors triats en el sistema com s'explica en l'apartat 6.3.

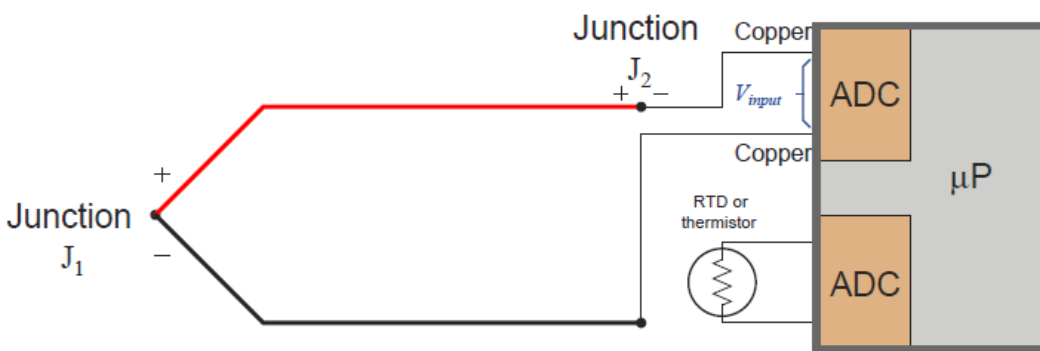
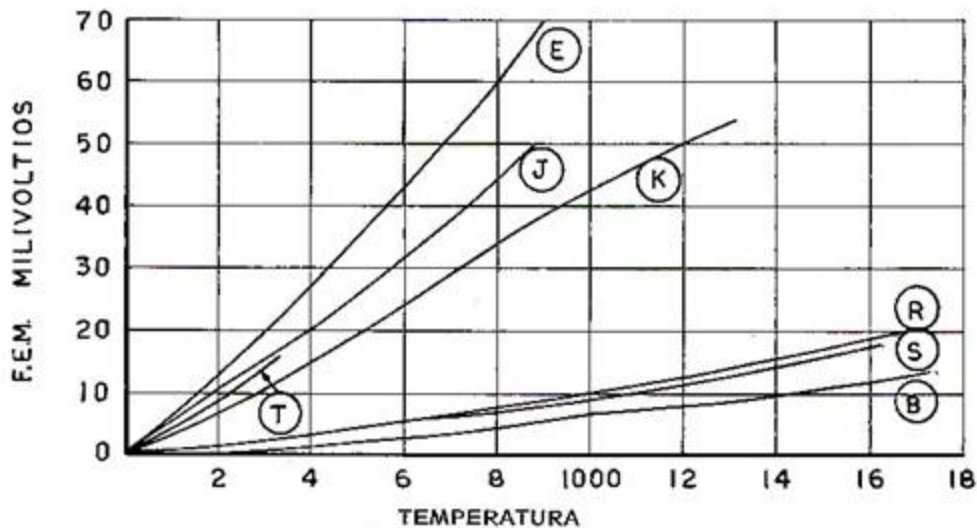


Figura 17 Es pot observar com el component electrònic que realitza la lectura i la conversió a digital, pot incloure la part de compensació o enviar ambdues lectures al computador. Font: Lessons In Industrial Instrumentation. Bibliografia [8]

### Linealització

Un altre aspecte important de la lectura dels termoparells és que la relació temperatura-voltatge no és estrictament lineal com es pot veure al Gràfic 1. Diferents entitats com per exemple d'institut Americà "National Institute of Standards and Technology (NIST)" ofereixen els valors tabulats per els termoparells estàndard.



Gràfic 1 F.E.M./Temperatura mesurada pels termoparells. Font ANSI/ASTM E-230

Aquests instituts donen també unes equacions que permeten linealitzar aquesta relació. Per exemple, en el cas dels termoparells de tipus K l'equació seria de 9è grau (Equació 6). Cal concretar que una única equació per tot el rang de temperatures no s'ajustaria prou bé i per això es fan múltiples intervals variant els coeficients constants.

$$E = \sum_{i=0}^n c_i (t_{90})^i + a_0 e^{a_1 (t_{90} - a_2)^2} \quad \text{Equació 6}$$

On E = f.e.m., les  $c_i$  i  $a_i$  estan a l'Annex 1 i les unitats són  $t_{90}$  (°C) i E (mV). Font: NIST

Elecció dels sensors de temperatura

Arribats a aquest punt cal preguntar-se quin sensor que serà el més adequat per l'aplicació d'estudi. En les taules que hi ha a continuació es pot veure per un costat una comparativa de les sensibilitats (Taula 3) a diferents temperatures dels diferents aparells on es pot observar la gran diferència entre els tipus de sensors.

Si la sensibilitat fos un factor crític l'opció més adequada serien els termistors. En la segona Taula (Taula 4) es troba una segona comparativa, ara dels principals avantatges i inconvenients de cadascun dels tipus de sensors ja esmentades com a resum per fer la selecció.

Sensor	mV/°C		
	-178°C	10°C	37,8°C
<b>Termistor en curtcircuit pont</b>	4680	72000	3870
<b>RTD de Pt en curtcircuit pont</b>	18	36	54
<b>Termoparells:</b>			
<b>Coure/Constantà</b>	36	48	38
<b>Ferro/Constantà</b>	48	50	52
<b>Crom/Alumini</b>	38	40	42
<b>Pt/Pt - 10% Rh</b>	6	6	6

Taula 3 Sensibilitats relatives de termistors, RTD i termoparells

<b>Sensors de temperatura</b>		
<b>Termistors</b>	<b>RTD'S</b>	<b>Termoparells</b>
Avantatges	Avantatges	Avantatges
<p>Temps de resposta ràpid i molta sensibilitat</p> <p>Molta repetibilitat</p>	<p>Més estable i precís</p> <p>Més lineal que el termoparell</p> <p>Més repetibilitat que el termoparell</p>	<p>No presenta problemes de resistència en el cablejat</p> <p>Ràpida resposta a les variacions de temperatura</p> <p>Simple i robust (resistent a ambients extrems)</p> <p>Econòmic</p> <p>Rang ampli de temperatures ( -200°C a 1500°C)</p>
Inconvenients	Inconvenients	Inconvenients
<p>Inadequat per rangs grans de temperatura</p> <p>Temperatures màximes de 450°C</p>	<p>Més car</p> <p>Cal una font de corrent</p> <p>Pateix auto-escalfament</p> <p>Temps de resposta més lent</p> <p>Baixa sensibilitat a petites variacions de temperatura</p> <p>Temperatures màximes de 850°C</p>	<p>No lineal</p> <p>Voltatge baix</p> <p>Menys estable i amb menys repetibilitat</p> <p>Menys sensible a petites variacions de temperatura</p> <p>Cal fer les prolongacions dels cables amb cablejat especial i tenir en compte la compensació.</p>

Taula 4 Comparativa entre termistors, RTD i termoparells

Com es veu, només cal fixar-se en els rangs de temperatura possibles i immediatament queden descartats els termistors i també els RTD'S. Queden doncs els termoparells i concretament es faran servir els de tipus K doncs són els que permeten mesurar tot el rang de temperatures que s'ha previst en el sistema estudiat. Més endavant es veurà com s'ha resolt la compensació en fred i la linealització [Apartat 6.3] per tal de fer una lectura amb el mínim d'error possible.

### 6.2.2. Sensors de pressió

La pressió és una magnitud física que expressa la força exercida per un cos per unitat de superfície. En la indústria la pressió és mesurada en nombroses aplicacions per o conèixer el seu valor o com a instrument per conèixer altres magnituds: el cabal, la densitat o el pes... En conclusió hi ha moltes aplicacions que requereixen de la lectura de la pressió per motius directes o indirectes.

Existeixen diversos tipus de sensors de pressió de fluids però tots estan basats en la força que aquests fan sobre una superfície delimitada. Existeixen doncs dues fases ben definides en la mesura de pressions. La primera consisteix en transformar aquesta pressió en una força que generi un moviment o deformació mecànica i la segona intenten transformar aquesta força o moviment a una magnitud elèctrica tractable directament pel microcontrolador com serà el cas d'estudi o per un computador.

Abans de triar un sensor caldrà tenir en compte que les pressions mesurades hauran de ser en referència a una pressió coneguda. Així doncs en triar el sensor s'haurà de decidir quina volem que sigui la pressió de referència o el zero de pressió en l'aplicació a dissenyar.

Habitualment es fa servir la pressió atmosfèrica (sensors manomètrics o atmosfèrics) que tenen el zero a 1 atm en pressió absoluta i, per tant, poden ser valors positius o negatius o la pressió del buit (sensors absoluts) que només poden prendre valors superiors a 0. No és obligat el triar una d'aquestes pressions de referència, pot ser una altra si és més adient per una aplicació concreta tot i que no és el més habitual. Existeix també una tercera tipologia de sensors que no tenen aquesta pressió de referència però, per altra banda, tenen dues entrades de pressió. Es tracta dels sensors diferencials i, com el seu nom indica, només podran indicar diferències entre les dues pressions mesurades. Això obligarà a disposar d'un altre sensor per conèixer el seu valor absolut.

Així doncs els sensors mecànics són sensors primaris que basen el seu funcionament en principis físics bàsics. Es tracta dels sensors més antics i per si sols ja ofereixen la possibilitat

d'obtenir una lectura directa per l'usuari. Existeixen per exemple els sensors Burdon (veure Figura 18 A i B) que consisteixen en uns tubs de secció el·líptica amb un extrem tapat i que en augmentar la pressió interna tendeixen a redreçar-se. Un altre tipus són els sensors de membrana o diafragma (veure Figura 18 C) que es deformen proporcionalment a la pressió que se'ls aplica com també passa amb els sensors de molla (veure Figura 18 D).

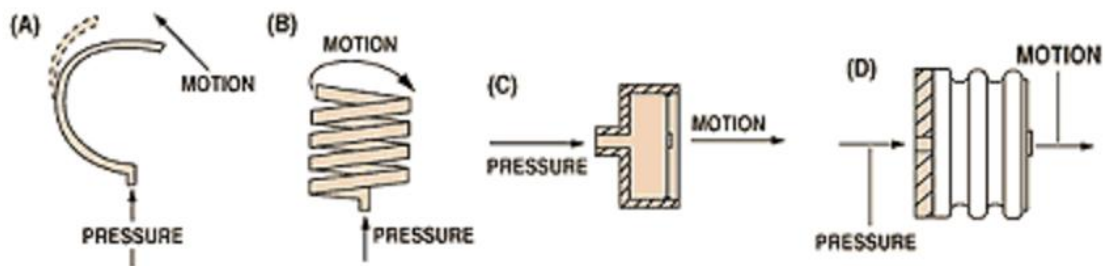


Figura 18 Imatges. Detall del sensor de Burdon, del sensor de membrana i del sensor de molla. Font: [Fundamentals of Pressure Sensor Technology By: Robert E. Bicking](#)

Com ja s'ha dit, els sensors electromecànics consisteixen en una combinació d'uns dels sensors mecànics anteriors, Burdon, de membrana, de molla... i un transductor elèctric. En aquest sentit existeixen una gran varietat de transductors que basen el seu funcionament en diversos principis elèctric, magnètics, òptics etc. A continuació es presenten per punts les diferents tipologies de transductors existents i una petita explicació de cadascun.

**Sensors piezo-resistius:** Com indica el seu nom mitjançant les propietats piezo-resistives d'alguns materials es mesura la variació de resistència de les galgues extensiomètriques, veure Figura 19-A, i s'obté un valor proporcional a la pressió. Habitualment s'inclou en un circuit en configuració del pont de Wheatstone per maximitzar la sortida del sensor. És el tipus de sensor més utilitzat i és adequat pels tres tipus de sensors, absoluts, atmosfèrics i diferencials.

**Sensors Capacitius:** amb un sensor de diafragma es construeix un condensador variable, veure Figura 19-B i es mesura la tensió deguda al moviment. En general es fa servir per mesurar pressions baixes.



**Sensors Electromagnètics:** Mesura el desplaçament d'un diafragma a partir de canvis en la inductància.

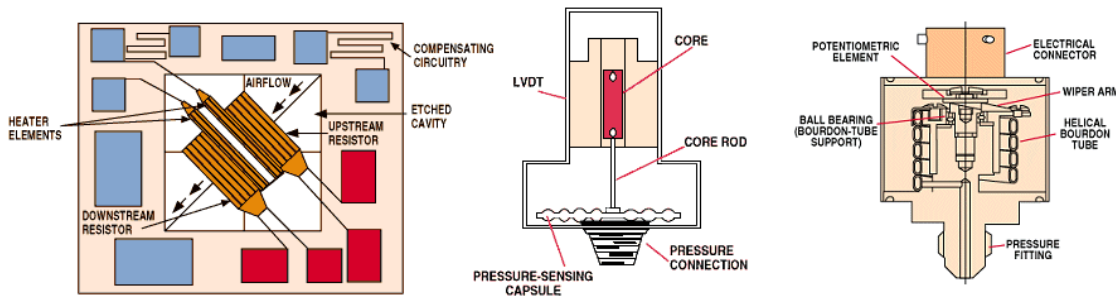


Figura 19. D'esquerra a dreta detalls de les Galgues extensiomètriques, un sensor Burdon que incorpora un potenciòmetre con transductor i un sensor de galgues capacitiu Font: Fundamentals of Pressure Sensor Technology By: Robert E. Bicking

**Sensors Piezoelèctrics:** S'obté la lectura gràcies als efectes piezoelèctrics d'alguns materials com el quarz on es genera un potencial al deformar-los. És molt adequat per sistemes on la pressió varia constantment.

**Sensors Òptics:** és mesura la tensió en una fibra òptica per detectar la pressió aplicada. És adequat per aplicacions que requereixin mesures a altes temperatures o molt remotes.

**Sensors Ressonants:** Utilitza els canvis en la freqüència de ressonància d'un mecanisme de detecció per mesurar l'estrès, o els canvis en la densitat del gas, causat per la pressió aplicada

**Sensors Tèrmics:** Utilitza els canvis en la conductivitat tèrmica d'un gas a causa dels canvis de densitat per mesurar la pressió.

**Sensors de Ionització:** Mesura el flux de partícules de gas carregades que varia a causa dels canvis de densitat per mesurar la pressió.

### Elecció dels sensors de pressió

Un cop vistos els diferents tipus de sensors de pressió cal triar els sensors que millor compliran amb les especificacions del sistema. Tenint en compte l'exposat anteriorment resulta clar que per l'aplicació d'estudi no caldrà un sensor capaç de captar canvis molt dinàmics doncs no serà el cas del sistema en règim de funcionament normal ni caldrà que sigui capaç de mesurar baixes pressions ja que tot i que es treballarà a depressió la pressió de treball serà molt poc

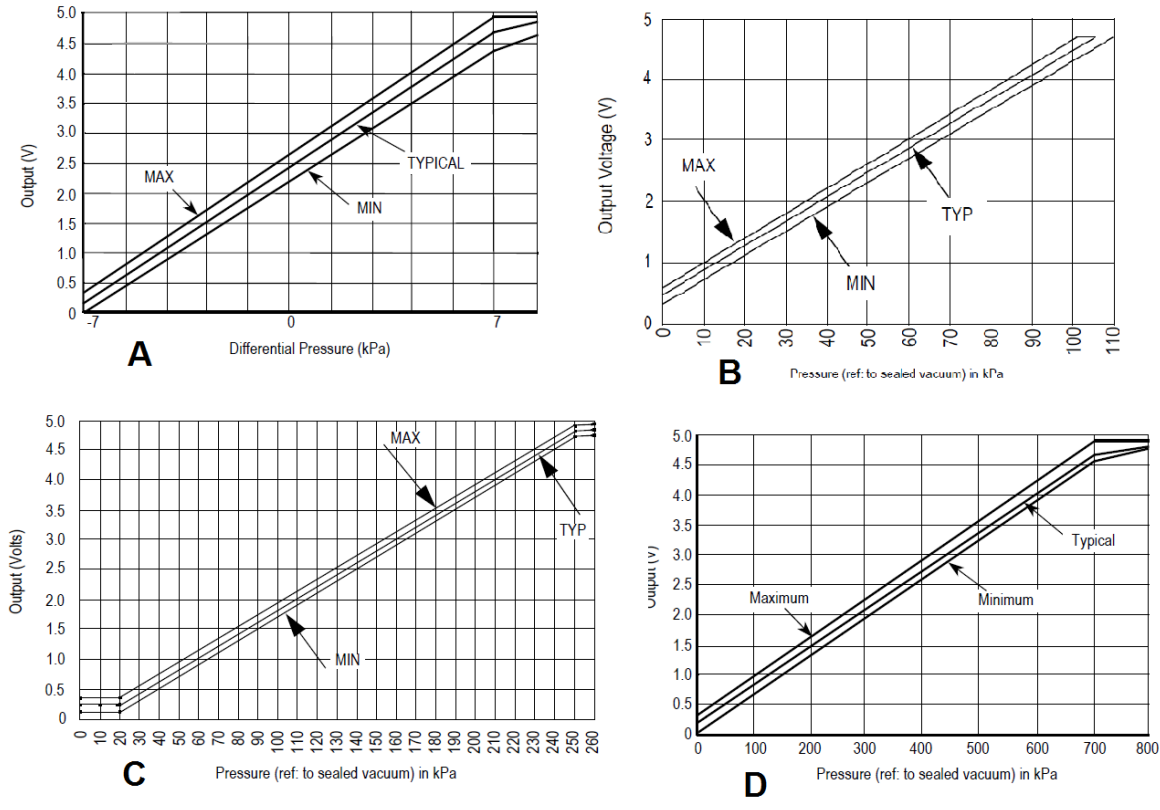
inferior a la atmosfèrica. Per últim serà un requisit mantenir un pressupost baix i per tant la opció més adient seran els sensors piezoresistius. Ara bé, pels diferents punts del sistema anirà bé contemplar la possibilitat de fer servir més d'un tipus de sensor podent oferir així rangs i precisions diferents. A la següent Taula 5 es recullen els diferents sensors de pressió que s'han triat pel sistema.

Nom del sensor	Tipus de sensor	Rang de pressió	Rang de voltatge a la sortida	Precisió	Sensibilitat
MPXV7007	Pressió Diferencial	-7 to 7 kPa	0,5 a 4,5 V	$\pm 5,0 \% V_{FSS}^2$	286 mV/kPa
MPX5100	Pressió Absoluta	0 to 100 kPa	0,2 a 4,7 V	$\pm 2,5 \% V_{FSS}$	45 mV/kPa
MPX4250A	Pressió Absoluta	20 to 250 kPa	0,2 a 4,9 V	$\pm 1,5\% V_{FSS}$	20 mV/kPa
MPX5700	Pressió Absoluta	0 to 700 kPa	0,2 a 4,7 V	$\pm 2,5\% V_{FSS}$	6,4 mV/kPa

Taula 5 Principals característiques dels sensors triats Font: fitxes tècniques dels sensors, veure més detalls a l'Annex 2

Els 4 sensors de la taula són de la mateixa tipologia, piezoresistius amb una senyal de sortida analògica que és proporcional a la pressió aplicada. Per cadascun d'aquests sensors existeix una relació concreta que ve donada en uns gràfics a les fitxes tècniques (Gràfic 2). A sensor MPXV7007, Gràfic 2.B sensor MPX5100, Gràfic 2.C sensor MPX4250A, Gràfic 2.D sensor MPX5700] i que es pot aproximar, al tenir un caràcter aproximadament lineal, mitjançant les següents equacions de primer grau (en el mateix ordre) (Equació 7, Equació 8, Equació 9 i Equació 10).

<sup>2</sup>  $V_{FSS}$  Full Scale Span Es defineix com la diferència entre el valor de voltatge de sortida a la pressió màxima menys el mínim valor de voltatge a la sortida a pressió mínima.



Gràfic 2 Gràfics de sortida dels sensors de pressió. Pressió de sortida en kPa a les abscisses i Voltatge de sortida en V a les ordenades. Font: Datasheets dels sensors veure Annex 2.

$$V_{out} = V_s(0,057 \times P + 0,5) \quad \text{Equació 7}$$

$$V_{out} = V_s(0,009 \times P + 0,04) \quad \text{Equació 8}$$

$$V_{out} = V_s(0,004 \times P - 0,04) \quad \text{Equació 9}$$

$$V_{out} = V_s(0,0012858 \times P + 0,04) \quad \text{Equació 10}$$

$V_{out}$  Voltatge de sortida dels sensors,  $V_s$  voltatge d'entrada (5V),  $P$  pressió mesurada (kPa)

Es poden veure també a la Taula 5 les diferents característiques que presenta cadascun d'ells i, en concret, és interessant fixar-se en la pressió de referència. El primer és de pressió diferencial (veure Figura 20 esquerra) doncs es farà servir per comparar la pressió abans i després del filtre per poder determinar si aquest està obstruït o hi ha una pèrdua de càrrega excessiva, per aquesta aplicació no caldrà conèixer la pressió real i un sensor d'aquesta tipologia s'adaptarà més als requisits del sistema. Els sensors restants són de pressió absoluta (veure Figura 20 dreta) doncs el que es vol obtenir és la lectura de la pressió en els diferents

punts del gasificador. S'han triat de pressió absoluta en contra de sensors atmosfèrics doncs s'estarà treballant amb pressions properes a l'atmosfèrica i s'ha preferit no treballar amb pressions properes a la de referència.



Figura 20. Detall dels sensors de pressió diferencial (esquerra) i els absoluts (dreta), tots amb el mateix encapsulat. Font: fitxes tècniques dels sensors, veure més detalls a l'Annex 2

### 6.3. Lectura de dades

Així doncs, un cop triats els sensors que seran utilitzats en el sistema d'instrumentalització a dissenyar, caldrà tenir clar quin microcontrolador es farà servir i, si s'escau, quins elements auxiliars s'intercalaran entre els sensors i el microcontrolador per fer les tasques d'adaptació del senyal, filtratge, conversió A/D, linealització...

Es continuarà fent el mateix procés que s'ha fet fins ara, poc a poc anar des de la magnitud a mesurar, passant pel transductor per entrar ara en el condicionament del senyal i quan es tingui tot ben definit es podrà triar la placa havent tingut en compte tots els aspectes i condicionants que els punts anteriors han establert i és necessari complir per triar la placa correcta.

Es començarà recuperant quelcom que, en el capítol dels termoparells [Apartat 6.2.1], ha quedat obert. Es tracta de la compensació del punt fred que cal fer en tot moment quan es realitza la lectura per evitar obtenir una lectura falsejada. Per solucionar aquest punt s'han triat les plaques MAX31855 (veure Figura 21) que funcionen com les que explicades en l'apartat dels termoparells mencionat.

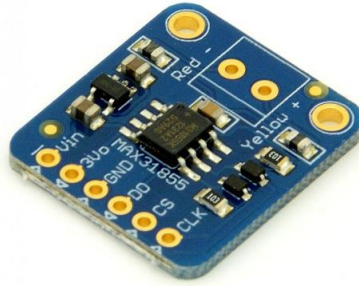


Figura 21. Detall de la placa Font: fitxa tècnica, veure més detalls a l'Annex 2

Aquestes plaques realitzen un conjunt de funcions que resulten a la sortida en una senyal digital en blocs de 32 bits els últims 14 dels quals són els que contenen la lectura de la temperatura. El microxip amplifica la lectura dels termoparells i, a continuació, resol la compensació i fa la conversió de voltatge a temperatura mitjançant la següent fórmula (Equació 11). Aquesta equació mostra que per tal de fer la compensació primer es fa la lectura amb un termistor de la temperatura del punt fred ( $T_{AMB}$ ) i aquesta es resta de la lectura del punt calent ( $T_R$ ).

$$V_{out} = 41,276 (\mu V/^{\circ}C) \times (T_R - T_{AMB}) \quad \text{Equació 11}$$

L'última etapa del microxip és la de la conversió a digital. En la Taula 6 es mostra el significat dels diferents bits. El microprocessador en rebre aquests blocs de bits farà ús d'una llibreria per realitzar la interpretació i la conversió a decimal per poder passar-la al usuari.

BIT	Nom	Descripció
D[31:18]	Lectura de 14-bit del termoparell	Aquest bit conté un valor signed 14-bit amb la lectura del termoparell
D17	Reservat	Aquest bit sempre pren valor 0
D16	Fault	Aquest bit pren valor "1" quan qualsevol dels SVC, SVG, OT o fallades estan actives. El valor per defecte és 0.
D[15:4]	Lectura de 12-bit de la temperatura interna	Aquest bit conté un valor signed 12-bit amb la lectura del punt fred

D3	Reservat	Aquest bit sempre pren valor 0
D2	SVC Fault	Aquest bit és un 1 quan el termoparell està curtcircuitat a Vcc. El valor per defecte és 0.
D1	SVG Fault	Aquest bit és un 1 quan el termoparell està curtcircuitat a GND. El valor per defecte és 0.
D0	OT Fault	Aquest bit és un 1 quan el termoparell està obert (cap connexió). El valor per defecte és 0.

Taula 6 Descripció del significat dels bits enviats pel microxip MAX31855. Font: fitxa tècnica, veure més detalls a l'Annex 2

Les comunicacions de la placa amb el processador es fan mitjançant el protocol SPI i per tant per la lectura d'un termoparell requerirà un senyal de rellotge o Clock (CLK) un de lectura o Master Input Slave Output (MISO) i finalment un de selecció de xip o Chip Select (CS) (veure Figura 22). No caldrà escriure res en el xip i per tant no tindrà MOSI. Evidentment caldrà alimentar aquest xip i ho farem com diu la fitxa tècnica amb els 3,3 V que surten d'un dels pins del microcontrolador. Per tant per un termoparell necessitarem 5 pins, tres digitals i dos d'alimentació però a partir d'aquí, per cada termoparell adicional només ens caldrà un pin extra, un nou CS, per cada termoparell que s'afegeixi.

L'IDE de l'Arduino, que com més endavant s'explicarà, és el microcontrolador que es farà servir, ja incorpora unes llibreries per la comunicació SPI. De totes maneres caldrà implementar una altra llibreria per transformar la informació llegida al pin configurat com a MISO. Aquesta serà informació una paraula com s'ha dit codificada en 32 bits que es llegiran un a un, a continuació es comprovarà la existència de fallades que marquen els bits 0-2 i si no n'hi ha s'agafaran els 14 últims bits i es mirarà el signe en el primer d'aquests 14 i es passarà a binari els últims 13 per després trobar la temperatura amb la Equació 11.

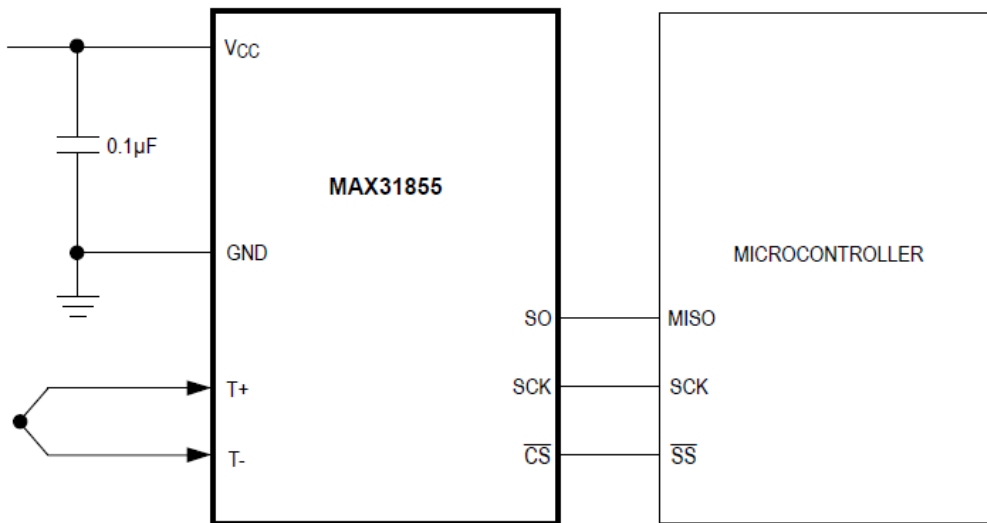


Figura 22 Detall de les connexions dels termoparells amb el microcontrolador intercalant el compensador-conversor A/D. Font: fitxa tècnica, veure més detalls a l'Annex 2

Com es pot veure, a la Figura 22 anterior, també apareix un condensador de 0,1 µF, aquest respon a les consideracions de soroll que cal tenir a causa dels petits nivells dels senyals involucrades. L'amplificador d'entrada és un amplificador de baix soroll dissenyat per permetre la detecció d'entrada d'alta precisió tot i així és recomanable afegir un condensador ceràmic de 10 nF, col·locat en els punts T+ i T-, per tal de filtrar el soroll a les línies de termoparell.

A la Taula 7, mostrada a continuació, es resumeixen i s'afegeixen algunes característiques d'aquestes plaques que seran importants per exemple a l'hora de muntar el circuit o programar la lectura de dades.

Característiques generals del MAX31855	
Lectura de Temperatura	Signed 14-bit
Rang de temperatures	-270°C a 1800°C
Sensibilitat	0,25°C
Precisió de -200°C a +700°C	±2°C
Precisió de +700°C a +1350°C	±4°C

Taula 7 Característiques generals del MAX31855 Font: fitxa tècnica, veure més detalls a l'Annex 2

A la Figura 23 es pot veure també un esquema més detallat del microxip MAX31855 on es pot diferenciar l'amplificador, el convertidor A/D (ADC a la imatge), el compensador de la unió freda i el detector de fallades entre d'altres.

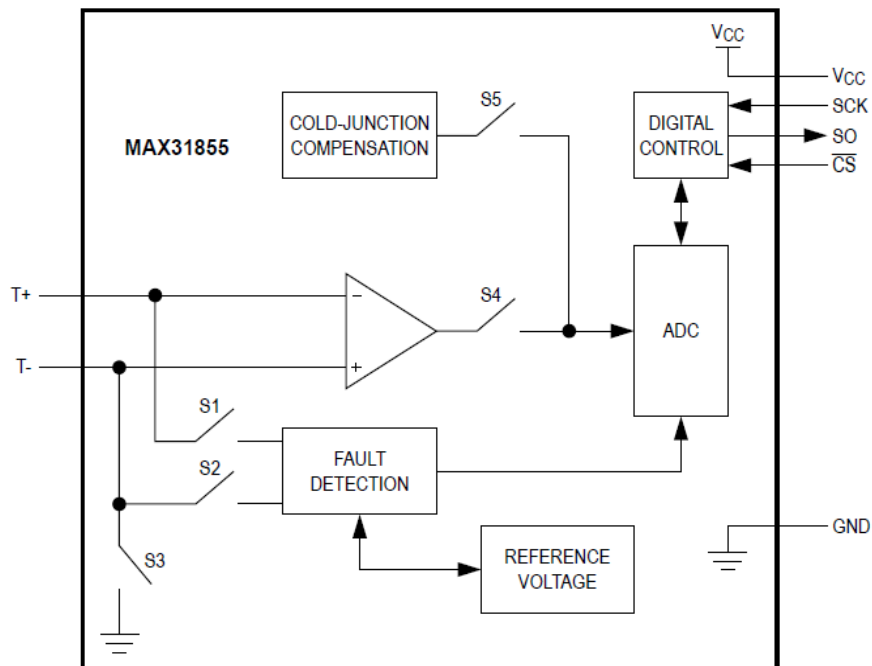
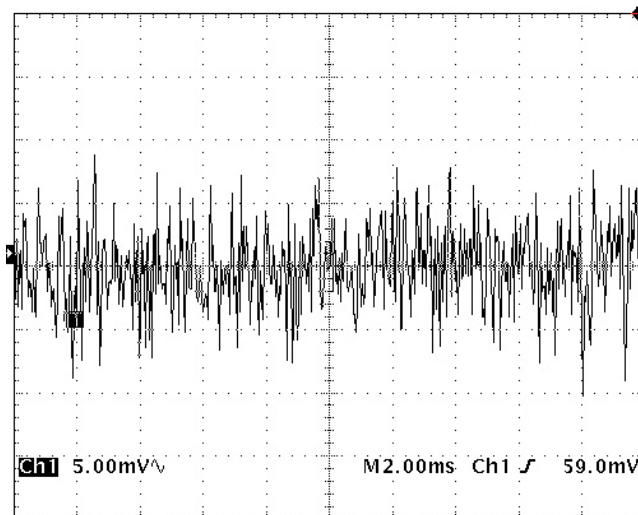


Figura 23 Detall dels components del microxip MAX31855. Font: fitxa tècnica, veure més detalls a l'Annex 2

Per un altre costat també cal condicionar la senyal dels sensors de pressió doncs al tractar-se d'una senyal analògica tindrà molt soroll associat. Al Gràfic 3 que hi ha a continuació es pot veure com seria la lectura amb un oscil·loscopi d'un sensor de pressió genèric.

El transductor dels sensors de pressió produeix una tensió molt petita, en el rang dels mil·livolts i l'amplificador diferencial intern al xip l'amplifica. Això genera que tot i que el transductor té una resposta mecànica de al voltant de 500 Hz, la seva sortida s'estén des de 500 Hz a 1 MHz degut a que el soroll existent també s'amplifica. Aquest fet es mostra a la sortida com es pot veure al Gràfic 3 i és per tant important considerar el filtrat de les senyals. Les opcions de filtrat es mostren a continuació.





Gràfic 3 Vista de lectura d'oscil·loscopi d'un sensor de pressió. Font: Note AN1646, veure més detalls a l'Annex 2

Per un costat es contempla l'aplicació de filtres per hardware i filtres per software. En filtrar amb hardware el fabricant recomana fer servir filtres passius del tipus passa baixos amb freqüència de tall de 650 Hz. Per això, com es veu a la següent imatge (Figura 24) proposa afegir al circuit un condensador de 470 pF. Els resultats d'aquest filtre es mostren en el Gràfic 4 que ens mostra la lectura de la sortida amb l'oscil·loscopi.

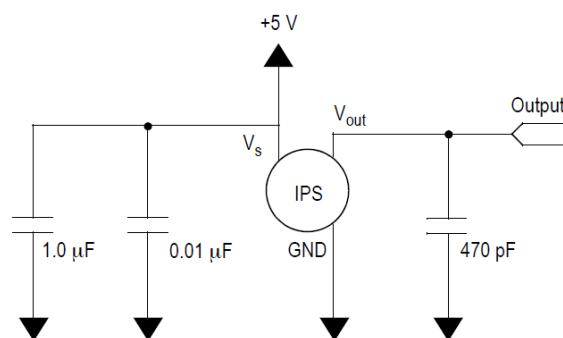
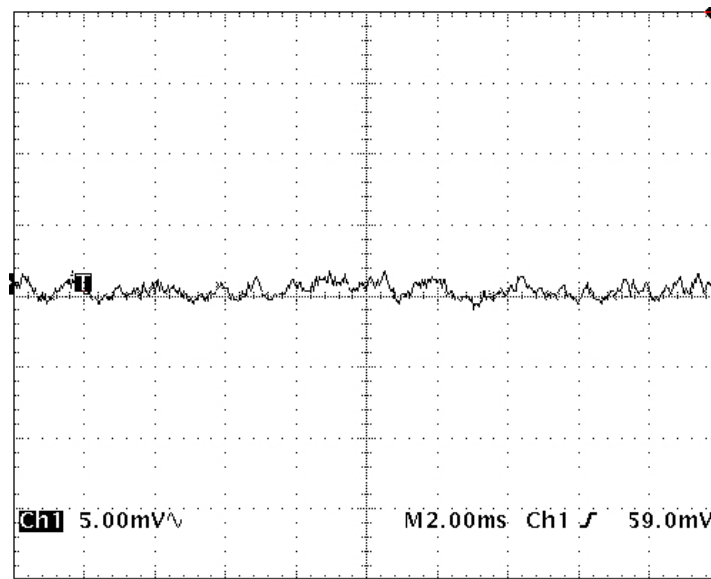


Figura 24 Circuit de filtratge passiu d'un sensor de pressió, s'inclou el filtre de senyal dreta i el de la font esquerra. Font: Datasheet dels sensors de pressió, veure més detalls a l'Annex 2



Gràfic 4 Lectura d'oscil·loscopi d'un sensor de pressió després de un filtre passa-baixos. Font: Note AN1646, veure més detalls a l'Annex 2

La proposta del fabricant en quant a filtres de hardware actius es pot veure a la imatge següent Figura 25 i el resultat en el Gràfic 5 més avall. Val a dir que aquest tipus de filtratge no és adequat per tots els microcontroladors existents i pot ocasionar problemes.

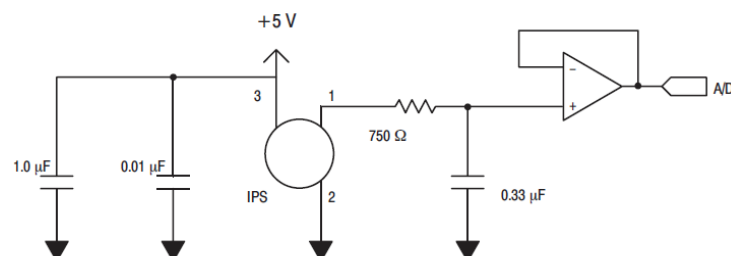
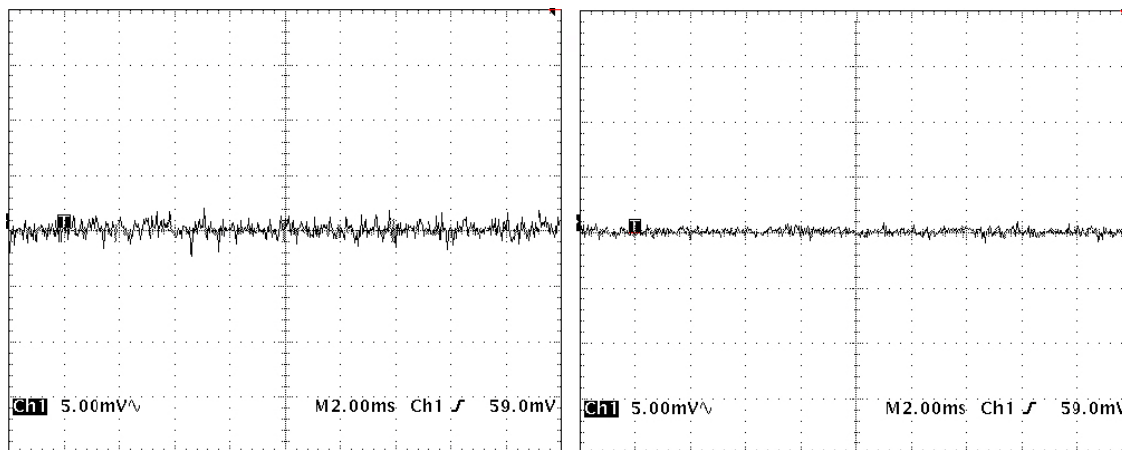


Figura 25 Circuit de filtratge actiu d'un sensor de pressió, s'inclou el filtre de senyal dreta i el de la font esquerra. Font: Note AN1646, veure més detalls a l'Annex 2

Per últim, un mètode de filtratge passa baixos per software consisteix en fer les mitjanes aritmètiques de lectures consecutives. Com es veu en el següent Gràfic 5 una mostra de 10 mitjanes redueix el soroll a aproximadament 2,5 mV pic a pic i una mitjana de 64 mostres redueix el soroll a aproximadament 1 mV pic a pic.

Aquest mètode és simple i no requereix components externs. No obstant això, es requereix RAM per a l'emmagatzematge de dades, més cicles de càlcul i implementar el codi necessari. En aplicacions en què el microcontrolador es recurs limitat o pressió està canviant relativament ràpid, aquest sistema per si sol no serà la millor opció.



Gràfic 5 Lectura d'oscil·loscopi d'un sensor de pressió a després de un filtre de software de 10 mostres a l'esquerra i un filtre de software de 64 mostres a la dreta. Font: Note AN1646, veure més detalls a l'Annex 2

En el sistema desenvolupat com la diferència entre les lectures no és molt gran i ens convé tenir la lectura instantània i no la mitjana amb les anteriors adoptarem el filtre passiu passa-baixos de hardware doncs ens serà suficient per la nostra aplicació.

Per últim, com es pot veure a les imatges següents (Figura 24 i Figura 25) es farà també un últim filtratge que pretindrà amortir les interferències aportades per petites variacions de voltatge de la font que segons el fabricant pot variar al voltant dels  $5\text{ V} \pm 5\%$ . Aquest filtre consistirà en dos condensadors en paral·lel un de  $0,01\ \mu\text{F}$  i un de  $1\ \mu\text{F}$  un al costat del pin de lectura del sensor i l'altre de la sortida de la font.

Un cop arribats a aquest punt on totes les especificacions necessàries ja estan definides només queda la tria el microcontrolador. Existeixen una gran varietat de microcontroladors al mercat, el sistema a dissenyar no requereix molta potència de càlcul ni molta velocitat i per tant seran prioritaris altres aspectes com el preu o la facilitat de programació. Així doncs s'ha volgut emprar una de les plaques Arduino per a realitzar aquesta tasca de recollida i processat de dades del sistema d'adquisició. S'han triat aquests microcontroladors per coherència ja que són també "opensource" com el projecte. A més a més aquesta filosofia les fa ser unes plaques molt versàtils i esteses i sobre les que abunda molta documentació i codi lliure. Aquest fet permetrà un aprenentatge ràpid i un fàcil desenvolupament de l'aplicació del sistema de monitorització.

Actualment existeixen gran varietat de plaques d'Arduino (veure Figura 26) i a primera vista pot semblar difícil triar. Tot i així si es tenen en compte certs aspectes que es vol que la placa satisfaci el nombre de candidates és redueix ràpidament.

Name	Processor	Operating/Input Voltage	CPU Speed	Analog In/Out	Digital IO/PWM	EEPROM [kB]	SRAM [kB]	Flash [kB]	USB	UART
<b>101</b>	Intel® Curie	3.3 V / 7-12V	32MHz	6/0	14/4	-	24	196	Regular	-
<b>Due</b>	ATSAM3X8E	3.3 V / 7-12 V	84 MHz	12/2	54/12	-	96	512	2 Micro	4
<b>Gemma</b>	ATtiny85	3.3 V / 4-16 V	8 MHz	1/0	3/2	0.5	0.5	8	Micro	0
<b>LilyPad</b>	ATmega168V ATmega328P	2.7-5.5 V / 2.7-5.5 V	8MHz	6/0	14/6	0.512	1	16	-	-
<b>LilyPad SimpleSnap</b>	ATmega328P	2.7-5.5 V / 2.7-5.5 V	8 MHz	4/0	9/4	1	2	32	-	-
<b>LilyPad USB</b>	ATmega32U4	3.3 V / 3.8-5 V	8 MHz	4/0	9/4	1	2.5	32	Micro	-
<b>Mega 2560</b>	ATmega2560	5 V / 7-12 V	16 MHz	16/0	54/15	4	8	256	Regular	4
<b>Mega ADK</b>	ATmega2560	5 V / 7-12 V	16 MHz	16/0	54/15	4	8	256	Regular	4
<b>Micro</b>	ATmega32U4	5 V / 7-12 V	16 MHz	12/0	20/7	1	2.5	32	Micro	1
<b>MKR1000</b>	SAMD21 Cortex-M0+	3.3 V / 5V	48MHz	7/1	8/4	-	32	256	Micro	1
<b>Nano</b>	ATmega168 ATmega328P	5 V / 7-9 V	16 MHz	8/0	14/6	0.512 1	1 2	16 32	Mini	1
<b>Pro</b>	ATmega168 ATmega328P	3.3 V / 3.35-12 V 5 V / 5-12 V	8 MHz 16 MHz	6/0	14/6	0.512 1	1 2	16 32	-	1
<b>Pro Mini</b>	ATmega328P	3.3 V / 3.35-12 V 5 V / 5-12 V	8 MHz 16 MHz	6/0	14/6	1	1	32	-	1
<b>Uno</b>	ATmega328P	5 V / 7-12 V	16 MHz	6/0	14/6	1	2	32	Regular	1
<b>Yún</b>	ATmega32U4 AR9331 Linux	5 V	16 MHz 400MHz	12/0	20/7	1	2.5 16MB	32 64MB	Micro	1
<b>Zero</b>	ATSAMD21G18	3.3 V / 7-12 V	48 MHz	6/1	14/10	-	32	256	2 Micro	2

Figura 26. Llistat de totes les plaques Arduino disponibles al mercat amb les principals especificacions tècniques. Font: [www.arduino.cc](http://www.arduino.cc)

El sistema d'estudi com ja s'ha dit necessitarà un mínim de 5 entrades analògiques i 7 entrades digitals tot i que es sobredimensionarà la placa per poder incorporar, en el futur, altres sensors per fer lectures complementàries. Es buscarà doncs un Arduino que pugui incorporar al menys 10 pins analògics d'entrada i 14 de digitals. Això ja descarta gran part dels Arduinos però queden encara els models Due, Mega2560, MegaADK, Micro i Yun. Tots cinc incorporen els elements que es necessiten i són perfectament vàlids per l'aplicació d'estudi. A més a més cadascun incorpora elements i característiques diferents que poden ser complementàries com el Due que incorpora dos ports microUSB en comptes d'un o el Yun que incorpora un mòdul de connexió WIFI.

Tot i així s'ha de triar un i si s'ha de filar prim es poden comparar les velocitats dels processadors. Tots ells, a excepció del Due, porten una velocitat de clock de 16 MHz (el Yun

incorpora un altre pel segon processador que té de 400 MHz pel mòdul de wifi però les tasques del sistema de captació de dades s'executarien en el de 16 MHz). El Due per altra banda incorpora un clock de 84 MHz cosa que el fa aproximadament 5 vegades més ràpid que els altres. Malgrat que la velocitat de càlcul no és un factor crític en el sistema d'estudi, aquesta seria l'elecció final doncs aporta un plus que els altres no aporten.

Anteriorment però, en el projecte "GasCea", es va adquirir un Arduino Mega2560 (veure Figura 27) i per limitacions pressupostàries es farà servir aquesta placa. No és en si un gran problema doncs com ja s'ha explicat aquesta placa era una de les candidates i de fet incorpora elements que les altres no incorporen que seran adequats pel sistema. Una de elles és que la entrada USB es Regular i no micro cosa que la fa lleugerament més robusta i resistent.

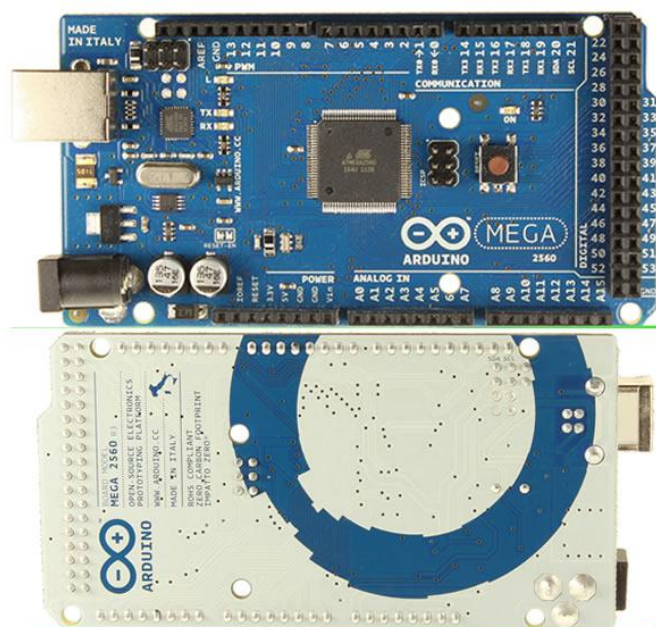


Figura 27 Detall de l'anvers i el revers de la placa Arduino Mega2560. Font: [www.arduino.cc](http://www.arduino.cc)

Un cop decidida quina placa es farà servir, es procedirà a explicar detalladament les principals característiques tècniques que aquesta presenta i que estan resumides a la Taula següent (Taula 8). La placa Mega 2560 incorpora un microcontrolador ATmega2560 I consta de 54 pins digitals input/output i 12 d'analògics només de input. Com ja s'ha dit anteriorment, té un senyal de clock de a 16 MHz un port USB i ofereix la possibilitat de ser alimentat a través d'un jack, el port USB o un dels pins. Disposa d'una memòria flash de 256 KB per emmagatzemar el codi i una SRAM de 8 KB.

Microcontrolador	ATmega2560
Voltatge d'operació	5 V
Voltatge d'alimentació	7-12 V
Voltatge límit	13-20 V
Pins digitals (entrada i sortida)	54 (dels quals 14 permeten configuració PWM)
Pins analògics d'entrada	12
Corrent màxim pels pins	40 mA
Corrent màxim pel pin de 3,3V	50 mA
Memòria flash	256 KB dels quals 8 KB es fan servir pel bootloader
Memòria SRAM	8 KB
Memòria EEPROM	4 KB
Freqüència del clock	16 MHz

Taula 8 Resum de les característiques de la placa Arduino Mega2560. Font: [www.arduino.cc](http://www.arduino.cc)

Per la lectura dels sensors de pressió es faran servir com ja s'ha dit les entrades analògiques. El convertidor Analògic/Digital d'aquestes té una resolució de 10 bits, és a dir que pot prendre 1024 ( $2^{10}$ ) valors diferents i en un rang de 0 V a 5 V. Per tant la sensibilitat dels pins analògics és de 4.9 mV. Com ja s'ha vist cap dels sensors del sistema té una resolució tan alta i per tant es podran llegir sense problemes.

## 6.4. Disseny del circuit

El primer pas per realitzar un circuit és planificar què es pretén aconseguir, quins components es necessitaran i finalment quines restriccions existeixen. Els dos primers punts han quedat prou definits i d'ells surt el esquema elèctric del circuit.

En relació amb les restriccions que existeixen a nivell de disseny cal remarcar que el circuit a construir es tracta d'un prototipus que es farà servir en proves experimentals i que per tant ha de ser robust i capaç de resistir les inclemències a les que estigui exposat mentre sigui operat. És per això que el primer pas es assegurar que el circuit estarà ben protegit durant la seva operació i per tal de que sigui així el primer pas serà adquirir una caixa i mecanitzar-la per tal que permeti la connexió dels diferents sensors però que alhora protegeixi el circuit.

Per altra banda no es té una restricció d'espai però sí de pressupost i per tant convindrà seleccionar la caixa òptima que faciliti el muntatge i la operabilitat amb la caixa de sensors sense ser més gran i per tant més cara del necessari.

Per últim caldrà tenir en compte la ubicació central del microcontrolador deixant accés lliure al port USB (per on el programarem) i al punt d'alimentació d'aquest i la ubicació en la perifèria dels sensors o els connectors pels termoparells. Tenint en ment aquestes limitacions i les dimensions de tots els components es faran els plànols constructius del circuit (veure Figura 29 pàg. 56).

Tenint tot l'anterior en ment s'ha procedit a fer l'assignació dels pins de l'Arduino que hauran d'actuar d'entrades i sortides i que es recullen en la Taula 9 mostrada a continuació.

<b>Funcionalitat</b>	<b>Pins</b>
MISO (entrada digital)	50
CS	24, 26, 28, 30, 32
CLK	52
Entrades analògiques	A0, A1, A2, A3, A4, A7, A8
Alimentació 5V	1 per la par analògica i 1 per la digital
GND	1 per la par analògica i 1 per la digital

Taula 9 Pins de l'Arduino utilitzats i les seves funcionalitats. Font: Elaboració pròpia



Com es tracta d'un prototipus i no es preveu fer-ne més a curt termini s'ha triat muntar-lo sobre una placa foradada de prototipatge. La configuració ja muntada en la caixa de protecció ha quedat de la següent manera (veure Figura 28). En aquesta imatge es poden apreciar diverses parts: en el requadre "A" queden emmarcats, en aquest ordre, els sensors de pressió absolut de rang 0-100 kPa, diferencial de rang 7-(-7) kPa i 0-250 kPa, en el "B" la resta de sensors de pressió absoluta i rang 0-200 kPa. El requadre "C" conté el Arduino Mega2560, es mostra el revers doncs està connectat per les seves entrades a uns pins soldats a la placa i per tant es pot extreure o intercanviar en cas de que hi hagi alguna averia. En el requadre "D" es poden veure les plaques de compensació soldades a la nostra placa i els cables de lectura dels termoparells. Finalment al requadre "E" estan els punts on els termoparells, instal·lats permanentment al gasificador, són connectats a la caixa.

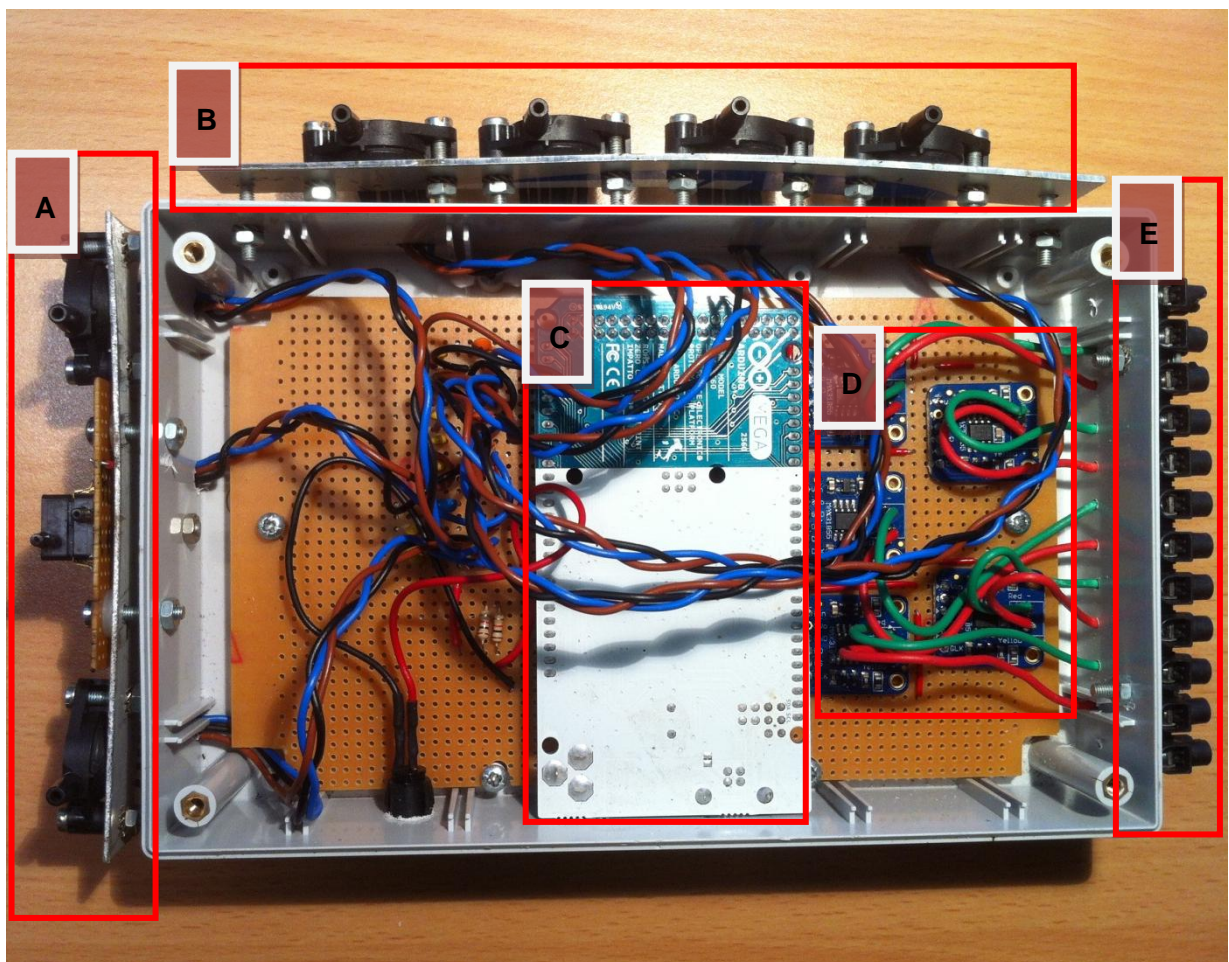


Figura 28 Detall de la caixa de sensors del sistema de monitorització. Font: Elaboració pròpia



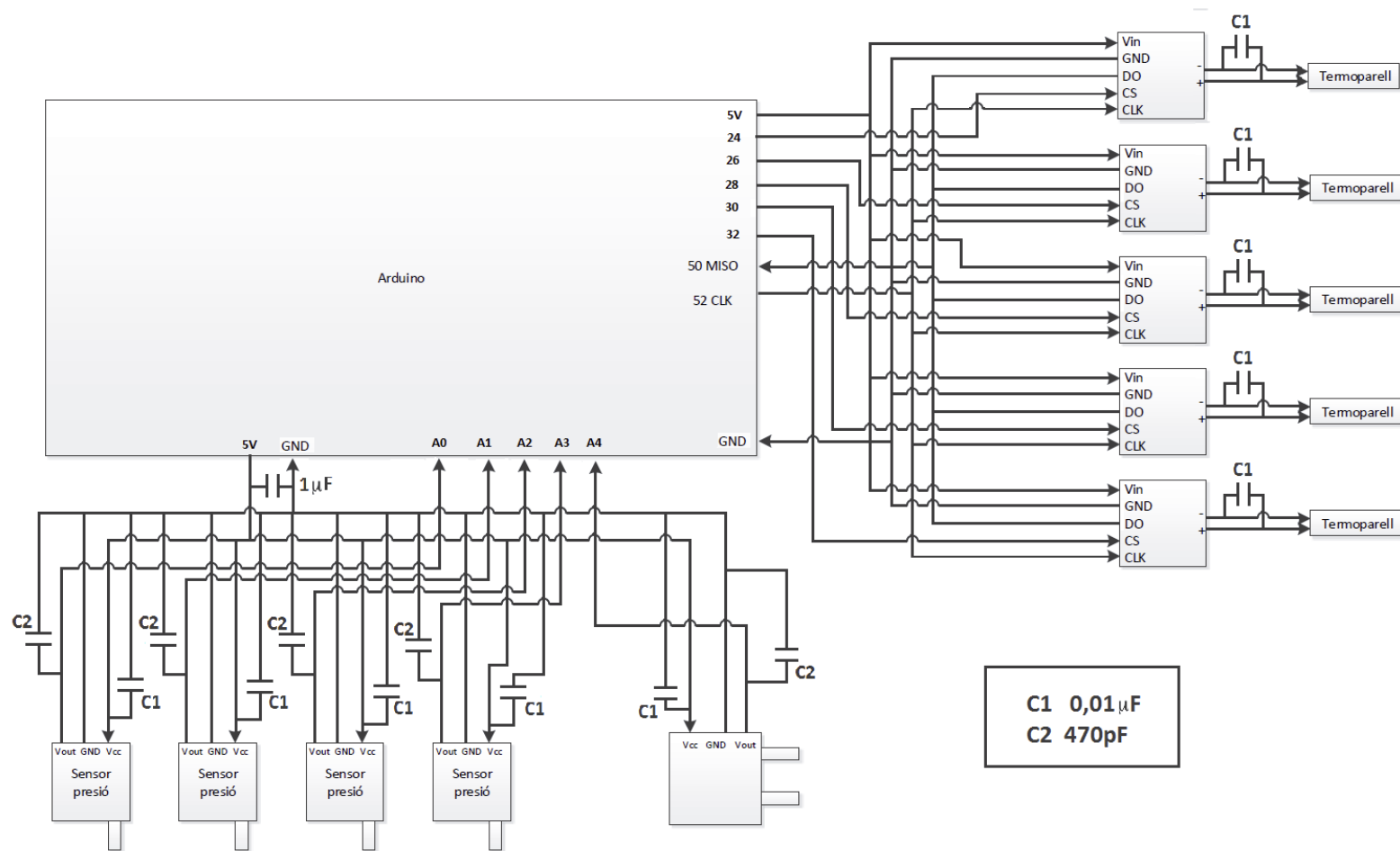


Figura 29 Esquema constructiu del circuit. Font: Elaboració pròpia

## 6.5. Programació del sistema de monitorització

### 6.5.1. Programació de l'Arduino

La plataforma Arduino ofereix una interfície pròpia, veure **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, per programar i carregar els programes en les seves plaques, és gratuïta i es pot descarregar de la pàgina web oficial. Aquest IDE (entorn de desenvolupament integrat) permet debuggar i carregar els programes a la placa mitjançant un port USB. Aquest IDE està basat en Java i Processing i el codi dels sketches o programes a implementar ha d'estar escrit en C++.

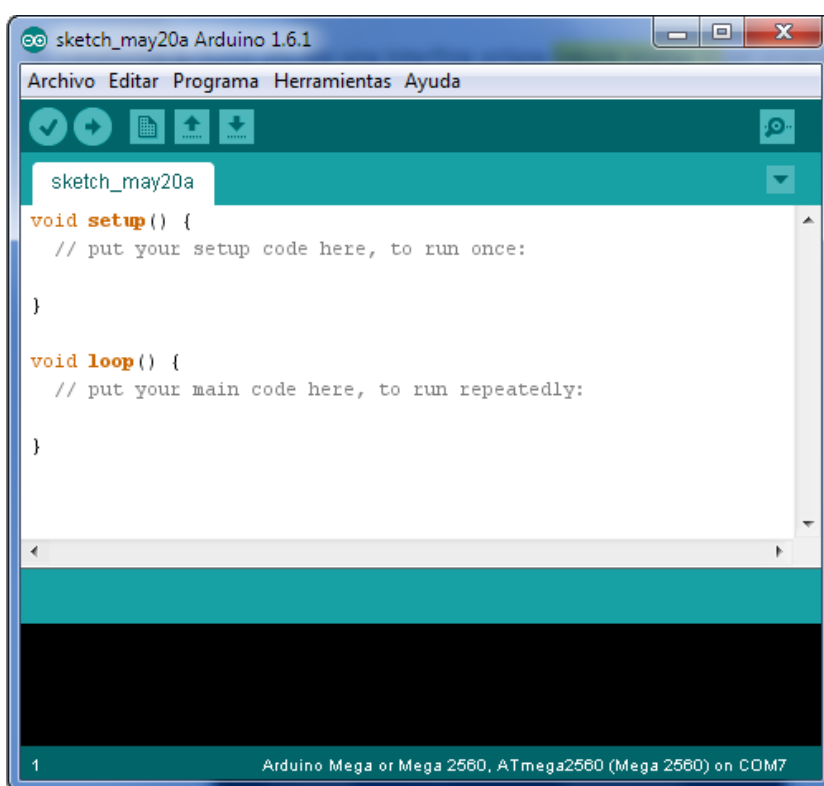


Figura 30 Detall de l'IDE d'Arduino. Font: [www.arduino.cc](http://www.arduino.cc)

Aquest entorn inclou moltes llibreries que permeten configurar els pins de l'Arduino per actuar com a entrades o sortides i per fer els càlculs bàsics i l'enviament al buffer del PC des d'on llegirem les dades. Ha estat necessari però implementar una llibreria especial que ens ha permès interpretar les sortides dels compensadors MAX31855. Aquesta llibreria permet interpretar les paraules de 32 bits en binari i convertir-les als valors pertinents: les lectures en escala decimal o els avisos de curtcircuit o altres errors existents en cas de que n'hi hagi.

Així doncs l'Arduino és l'intermediari entre els sensors i el PC i per tant els protocols de comunicació entre aquests dos caldrà configurar-los amb cura. El codi de l'Arduino contindrà els algorismes a executar per fer les esmentades comunicacions.

Per tal de fer les lectures dels sensors, es configuraran els pins triats com a pins d'entrada mitjançant la comanda "pinMode(pin, INPUT)". Aquesta comanda defineix el funcionament del pin a l'inici del programa i aquest funciona com a pin d'entrada durant tota la execució. Per realitzar les lectures dels sensors de pressió, recordem que són analògics, es farà servir la comanda "analogRead()". Com ja s'ha dit amb anterioritat el convertidor A/D és de 10 bits i per tant la lectura de voltatge podrà prendre 1024 valors entre els 0 V i els 5 V amb el que s'obté una precisió de 4,9 mV. Per altra banda, els termoparells connectats als compensadors MAX31855 es comunicaran amb un protocol de comunicació SPI com s'ha explicat anteriorment i que configura els pins d'entrada MISO i els llegeix amb la comanda "digitalRead(pin)" que s'executa en un bucle 32 vegades (una per bit) per pin en cada lectura. Tot el conjunt de comandes de lectura dels sensors són executades encadenadament i les lectures són afegides a un *string* que finalment és enviat al PC.

La comunicació entre el PC i l'Arduino serà per un port sèrie i per tant els primers passos seran obrir les comunicacions. Per fer-ho s'haurà d'especificar la velocitat de transmissió i el port COM al PC on s'ha connectat l'Arduino. Per la banda del microprocessador la comanda per obrir el port és "Serial.begin(9600)" que especifica la velocitat de transmissió en 9600 baudilis, un valor estàndard que ha de coincidir en els dos aparells que es comuniquen. Una vegada iniciada la comunicació podem escriure en el *buffer* les cadenes de dades o *strings* amb les lectures. El *buffer* és un espai en la memòria temporal que en el nostre cas emmagatzema el que l'Arduino escriu, o envia al PC, fins que el programa ho llegeix i processa.

Per fer la escriptura, en el codi de l'Arduino s'implementa la comanda "Serial.print(lectures)". Aquesta comanda és equivalent a la comanda "Serial.print(lectures, DEC)" que envia les lectures en format text i en base decimal codificades amb el codi ASCII. Existeix també la possibilitat de fer l'escriptura amb la comanda "Serial.print(lectures, BYTE)" que envia els valors de les lectures codificades en binari, proporcionant un estalvi en l'enviament de dades. L'avantatge principal del primer mètode és la possibilitat de visualitzar les lectures a la mateixa interfície de l'Arduino al "monitor sèrie", a més a més alguns dels missatges que s'han d'enviar no són numèrics com és el cas de l'error i caldria codificar aquests numèricament per poder emprar aquesta comanda.

## 6.5.2. Programació del programa de tractament de dades i disseny de la interfície gràfica

Inicialment es va fer l'aposta per realitzar el programa de lectura i tractament de dades del PC amb una interfície senzilla que contingüés pocs elements. Es va triar fer-lo amb llenguatge Python doncs és el que s'ha estudiat en cursos anteriors a la universitat. Es va arribar a realitzar un programa rudimentari però complet. Aquest primer programa no permetia a interacció amb l'usuari, únicament mostrava les lectures. Per fer-ho incloïa gràfiques per tots els sensors amb els mecanismes per netejar falses lectures (curtcircuits dels termoparells que donen pics curts i alteren els gràfics) i sistemes d'alarmes: el fons del gràfic del sensor en qüestió canviava de color en cas de que els valors llegits fossin molt diferents dels esperats, veure Figura 31. Finalment realitzava l'emmagatzematge de les lectures i en tancar el programa realitzava i guardava gràfics per tots els valors guardats de tots els sensors.

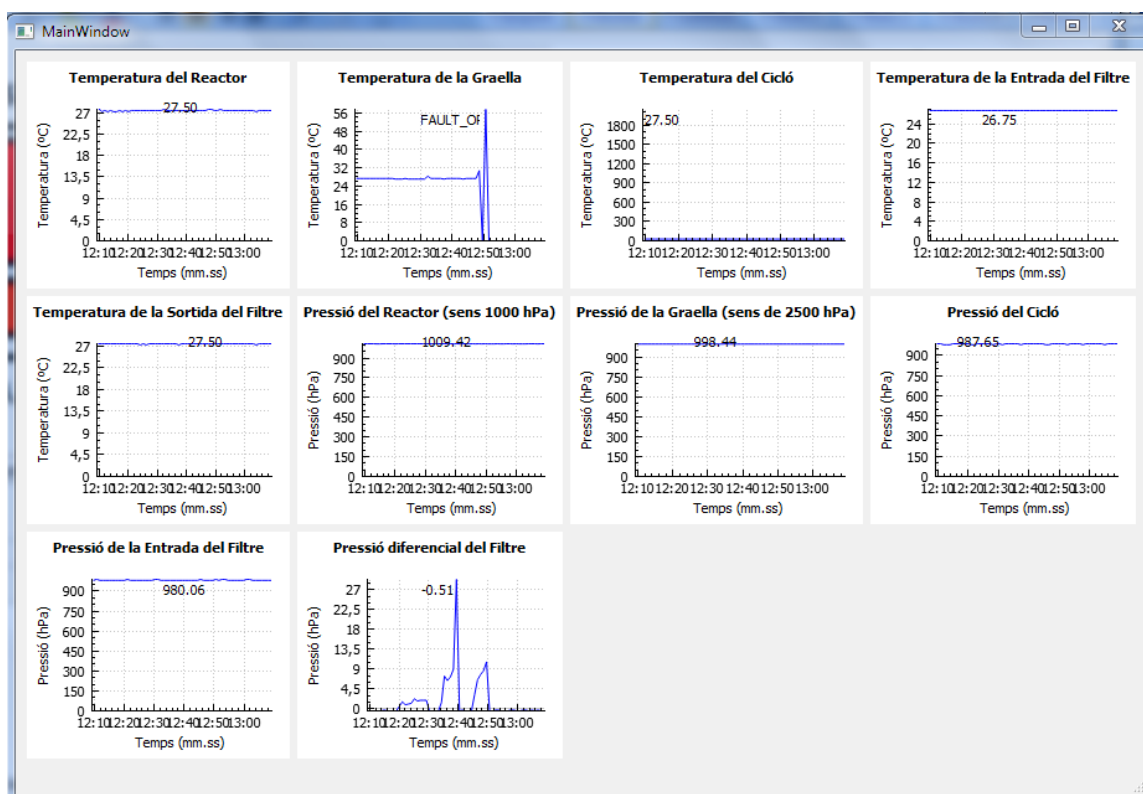


Figura 31 Finestra secundària del sistema de monitorització es mostren dades generades per fer proves amb el sistema, no és una captura del funcionament.. Font: Elaboració pròpia

El problema del programa va venir en el moment de disminuir el període de recollida de dades. Inicialment s'estaven mesurant dades cada 5 segons però en voler disminuir el temps entre lectures fins a 1 segon van començar a aparèixer certs problemes de velocitat de resposta d'aquest i fins i tot de interrupcions forçades.

Es va fer un estudi dels possibles motius i es va decidir deixar el Python per ser un llenguatge interpretat i tornar a començar amb un altre llenguatge informàtic aquest cop compilat.

Per aprofundir una mica més en aquests conceptes s'intentaran definir el significat d'un i de l'altre per justificar aquest canvi i aquest nou enfocament.

En els llenguatges interpretats, el codi font escrit pel programador ha de ser traduït a codi màquina línia a línia i pas a pas cada cop que s'executa el programa. Això aporta uns beneficis a l'hora de programar ja que permet inicialitzar dinàmicament les variables (no cal declarar-les) i com el codi ha de ser interpretat cada vegada pot fer-se en plataformes diverses (caràcter multiplataforma). Per altra banda presenten un gran desavantatge i és que són més lents d'executar ja que necessiten més temps per ser interpretats i és un procés que cal repetir cada vegada que es vol fer servir el programa.

Per altra banda, en els llenguatges compilats el codi font és compilat o traduït a codi màquina una única vegada i per tant el temps entre execucions així com la execució del programa són molt més ràpids. No requereix tampoc cap software addicional per ser executat en altres equips de la mateixa plataforma però si es vol canviar de plataforma, s'ha de tornar a compilar, doncs únicament es pot executar en sistemes equivalents. A l'hora de programar requereix la declaració prèvia de variables funcions i classes.

Així doncs es va decidir aprendre i fer ús del llenguatge C++, un llenguatge compilat molt versàtil i que és considerat l'evolució del C. Per tal de escriure el codi i compilar-lo es va triar l'entorn Qt que inclou un conjunt de llibreries que faciliten la creació d'interfícies gràfiques.

Abans però de tornar a començar es va voler aprofitar la oportunitat del nou inici per fer una planificació de tot el que havia de contenir la interfície gràfica, de quina manera havia de mostrar la informació i quines interaccions havia de tenir amb l'usuari o dit d'una altra manera, quins paràmetres pot modificar aquest i com pot extreure'n el màxim rendiment.

En la caracterització d'aquesta nova interfície, es van establir un seguit de punts que l'hi han donat forma. Es va establir que el programa per un costat havia de continuar fent el que el anteriorment ja feia, és a dir, tenir una finestra on es poguessin veure totes les lectures instantànies amb gràfics dels perfils acumulats de les pressions i temperatures, veure Figura 30, i per l'altre havia de contenir una altra pantalla a mode de resum d'aquestes dades exposades d'una manera més intel·ligible per l'usuari del gasificador a fi que aquest pogués conèixer l'estat del sistema amb una mirada ràpida a la finestra de monitorització.

Així doncs per aquesta segona pantalla, veure Figura 32, es va dissenyar un esquema del gasificador per identificar visualment els diferents punt de mesura amb els valors instantanis i es va programar que el color interior de les diferents parts fos proporcional a la temperatura llegida de manera que si una de les parts s'allunyés de la temperatura esperada es pogués identificar ràpidament només mirant a l'esquema. En aquesta segona pantalla es van incloure també quatre gràfics que recullen:

- 1- Les temperatures del reactor i la graella el primer doncs són les més importants del sistema al ser on es duen a terme les reaccions de gasificació.
- 2- La resta de temperatures que són les del cicló, la de l'entrada del filtre i la de l'entrada al motor doncs cal anar controlant que la temperatura del gas va baixant per poder introduir-lo al motor arribat el moment.
- 3- Les pressions del reactor i la graella altra vegada els motius del punt 1
- 4- La lectura del sensor diferencial del filtre que està connectat a l'entrada i a la sortida d'aquest per detectar si hi ha obstruccions.

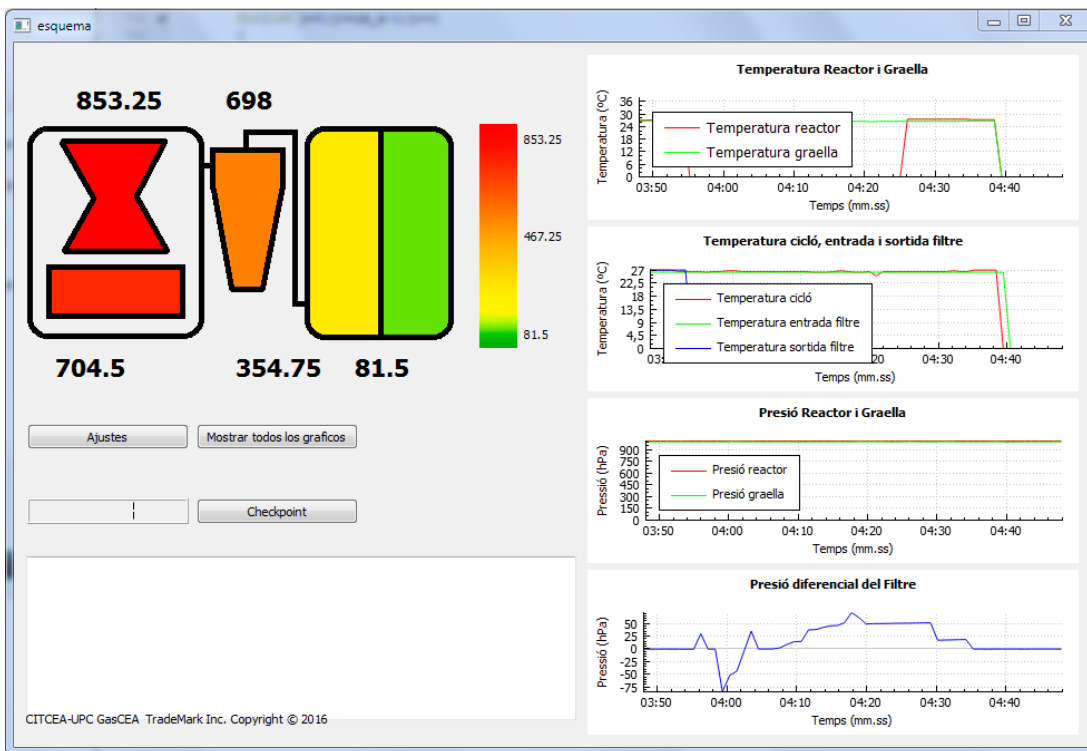


Figura 32 Finestra principal del sistema de monitorització, es mostren dades generades per fer proves amb el sistema, no és una captura del funcionament. Font: Elaboració pròpia

Les llegendes dels gràfics poden ser mogudes o ocultades per l'usuari en cas de que aquestes afectin a la correcta visió dels resultats, d'aquesta manera es permet augmentar l'àrea del gràfic i facilitar la lectura de dades per part de l'usuari.

Per últim aquesta interfície incorpora un conjunt d'elements que afegeixen una funcionalitat molt útil i imprescindible durant la operació experimental del gasificador. Es tracta d'una entrada de text junt amb un comptador que permeten a l'operador anar anotant i guardant directament totes aquelles accions que realitza sobre el gasificador durant la seva operació. Prement el botó "checkpoints" s'emmagatzemen els comentaris junt amb el dia i hora en el que s'han realitzat de manera que es poden relacionar automàticament amb les dades que s'estan recollint en el mateix moment. D'aquesta manera en l'estudi posterior de les dades es poden trobar correlacions entre aquestes i l'evolució posterior de les pressions i les temperatures. Hi ha també, al costat del botó "checkpoints", un comptador que ens permet saber el número de comentaris que hem fet.

Per últim, el sistema de monitorització té una finestra que tot i que és la darrera que s'explica en la execució del programa és la primera que els usuaris es troben. Es tracta de la finestra de *login*, veure Figura 33, on l'usuari té la possibilitat de triar la carpeta on es guardaran les dades, els comentaris dels *checkpoints* i els gràfics que es generen un cop es finalitza la monitorització i de triar el port sèrie on s'hagi connectat l'Arduino.

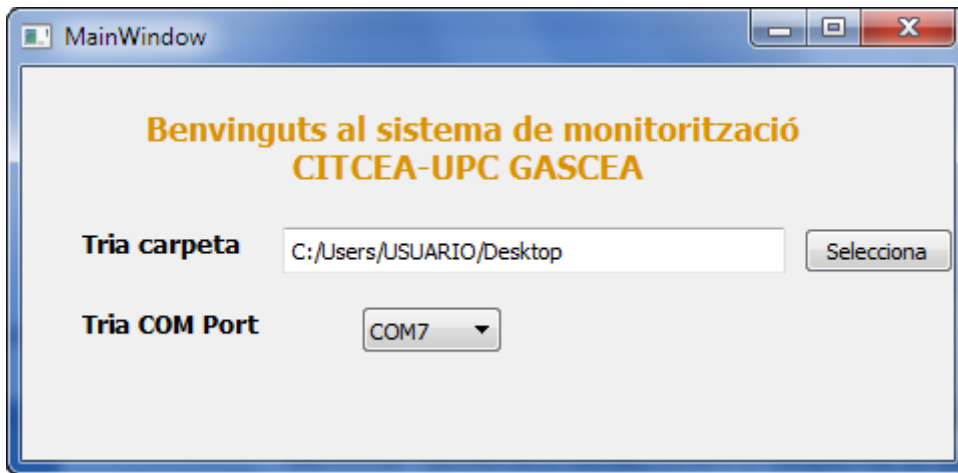


Figura 33. Finestra de login del sistema de monitorització. Font: Elaboració pròpia



### 6.5.3. Modificacions introduïdes arran de la posta en marxa

Les primeres proves del gasificador es van realitzar amb el programa escrit en Python i per tant el fet de que els resultats obtinguts en relació al funcionament del programa ens portessin a començar de nou amb un altre llenguatge més adient és sens dubte la modificació més apreciable.

A nivell de software el canvi de llenguatge i d'entorn de programació va comportar la possibilitat d'afegir la interacció de l'usuari amb el programa durant el funcionament. Com ja s'ha explicat en la segona versió es van realitzar alguns canvis després de successives postes en marxa de l'aparell i es van afegir funcionalitats importants. Una d'elles es la incorporació de la possibilitat de triar la carpeta on guardar les dades doncs el *path* a l'escriptori que ve de sèrie no és el mateix en tots els PC's i reportava errors en executar el programa alguns ordinadors.

Un altra modificació va ser augmentar la mida de les lletres que mostren les temperatures junt a l'esquema per permetre a l'usuari conèixer-les sense haver d'apropar-se tant al ordinador i continuar operant el gasificador. Es va afegir també com s'ha explicat la possibilitat d'anar guardant instantàniament comentaris junt amb es dades per fer el posterior estudi i altres detalls com el de poder ocular les llegendes per visualitzar millor els gràfics.

A nivell de hardware l'única modificació apreciable ha estat la substitució de dos sensors de pressió dels MPX5700 de per dos diferents, el MPX5100 i el MPX4250A que ofereixen rangs més reduïts però alhora més sensibilitat en la lectura.

## 6.6. Pressupost del sistema de monitorització

La realització d'aquest projecte es pot plantejar econòmicament des de diversos punts de vista. Enfocant-lo com un contracte real en el món de la indústria els costos que es derivarien estan detallats a la Taula 10 que hi ha a continuació. Per fer aquest pressupost s'ha considerat que les tasques de disseny, programació i muntatge les ha realitzar un enginyer titulat amb un sou de 40€/h i s'ha estimat que en 5 setmanes i mitja aproximadament ho podria tenir tot enllestit resultant un total de 8800 € en mà d'obra. Els materials per altra banda s'han llistat segons el cost real del producte final i pugen fins als 350,38 €. Cal recordar que es tracta d'un prototip del que només es preveu fer una unitat. Si es tractés d'un producte amb perspectiva de ser comercialitzat alguns costos associats podrien veure's alerats com per exemple el fet de fer un circuit imprès o el temps de disseny del circuit seria un altre. Per últim l'amortització dels materials, el software i les eines utilitzades durant el desenvolupament del projecte sumen un total de 38,08 € considerant que

- Tot els entorns de programació són lliures i per tant no tenen costos associats.
- El PC té un valor de 980 € i s'amortitza en 5 anys amb un ús mitjà de 5 hores diàries (1150 h anuals) per tant el preu d'amortització per hora és de 0,17 €/h
- El material del laboratori (soldador, taules, llums) tenen un valor de 1500 € i s'amortitza en 8 anys amb un ús de 4 hores diàries (920 h anuals) per tant el preu d'amortització per hora és de 0,2 €/h

Tenint tots els costos explicats anteriorment i detallats en la Taula 10 el projecte sencer suma un total de 9188,46 € de cost.

Element	Preu unitari	Nombre d'unitats	Cost (€)
<b>Mà d'obra</b>	-	-	-
Disseny del Sistema	40 €/h	100	4000
Programació	40 €/h	100	4000
Muntatge del Sistema	40 €/h	20	800

<b>Material del sistema de monitorització</b>	-	-	-
Arduino Mega2560	38,76 €/u	1	38,76
Sensor MPX5700	14,55€/u	3	43,65
Sensor MPX4250A	13,93 €/u	1	13,93
Sensor MPX5100	14,55 €/u	1	14,55
Sensor MPXV7007	13,18 €/u	1	13,18
Termoparells tipus K	29,97 €/u	5	149,85
Placa MAX31855	13,46 €/u	5	13,46
Elements passius (condensadors, resistències)	5 €/u	1	5
Placa mil punts	12 €/u	1	10
Cablejat	5 €/u	1	5
Caixa protectora	10,45 €/u	1	17
Alimentador	9,99 €/u	1	9
Cable USB i extensor de 5m	7 €/u	1	7
Altres (cargols de fixació, estany)	10 €/u	1	10
<b>Amortitzacions</b>	-	-	-
Software (Qt, C++, Arduino)	0 €/u	200	0
PC	0,17 €/h	200	34
Soldador	0,2 €/h	20	4,08
<b>Total mà d'obra</b>	-	-	8800

<b>Total materials</b>	-	-	350,38
<b>Total amortitzacions</b>	-	-	38,08
<b>Total</b>	-	-	9188,46

Taula 10 Pressupost 1 del sistema de monitorització. Font: elaboració pròpia

Una altra manera de plantejar el pressupost d'aquest projecte seria des d'un punt de vista més proper a la realitat, que el duigués a terme un estudiant contractat com a becari. En aquest cas si es considera el temps d'aprenentatge i es consideren temps de realització i disseny lleugerament superiors totals contant la supervisió d'un tutor o director de projecte. Els materials del prototip no varien i per tant aquesta part queda inalterada. Les amortitzacions pugen l'equivalent a les hores extres comptabilitzades d'aprenentatge i el sou del becari s'ajusta a la realitat dels convenis de la UPC. A la Taula 11 que hi ha a continuació es mostren els resultats d'aquest segon enfocament que suma un total de 3587,38 € pel projecte sencer.

<b>Element</b>	<b>Preu unitari</b>	<b>Nombre d'unitats</b>	<b>Cost (€)</b>
<b>Mà d'obra</b>	-	-	-
Aprenentatge Programació (Qt, C++, Arduino...)	6	100	600
Aprenentatge muntar circuits	6	10	60
Disseny del Sistema (becari)	6€/h	100	600
Programació	6€/h	100	600
Muntatge del Sistema	6€/h	20	120
Seguiment per part del supervisor	40€/h	30	1200
<b>Amortitzacions</b>	-	-	-

Software (Qt, C++, Arduino)	0 €/u	300	0
PC	0,17 €/h	300	51
Soldador	0,2 €/h	30	6
<b>Total mà d'obra</b>	-	-	3180
<b>Total materials</b>	-	-	346,82
<b>Total amortitzacions</b>	-	-	57
<b>Total</b>	-	-	3587,38

Taula 11 Pressupost 2 del sistema de monitorització. Font: elaboració pròpia

## Conclusions

Un cop finalitzat el projecte del *“Disseny i implementació d'un sistema de monitorització per a un sistema de gasificació de biomassa”*, s'han extret un seguit de conclusions. Primerament de caràcter tècnic arran de la part conceptual i teòrica del projecte però també de caràcter més personal i d'adquisició d'experiència al tractar-se d'un projecte d'aplicació real i immediata del producte dissenyat i desenvolupat havent hagut de fer modificacions introduïdes per les proves de funcionament.

Durant el desenvolupament d'aquest projecte s'ha realitzat un estudi introductori de la tecnologia de gasificació per contextualitzar l'origen del projecte i s'ha confirmat que l'elecció de la tecnologia és la més apropiada per les necessitats a resoldre del projecte. S'ha fet un estudi dels diferents transductors de les magnituds de pressió i temperatura que hauran de ser mesurades pel nostre sistema de monitorització i s'ha fet la tria que s'ha considerat més adequada. A continuació s'ha fet la tria també del microcontrolador Arduino que processarà totes les lectures dels diferents sensors i es comunicarà amb el PC. Seguidament s'han realitzat el disseny i muntatge del circuit. Per últim s'ha realitzar la programació del microprocessador Arduino i dels programes de lectura, comunicacions, monitorització de dades i les interfícies gràfiques, primer amb Python i després amb C++.

Al finalitzar el projecte es pot veure el temps dedicat a fer un programa en un llenguatge no adient per l'aplicació final. Això pot justificar-se per la necessitat d'obtenir un programa funcional per poder començar a fer proves però amb una millor planificació de les tasques en el projecte *“GasCea”* podria haver-se estalviat aquest temps. Tot i així el desenvolupament dels dos sistemes ha permès l'obtenció d'una interfície final molt més elaborada al haver permès plantejar amb calma totes les especificacions necessàries.

A més a més el fet d'haver realitzat un sistema a mida d'un producte que en genèric es podria haver trobat al mercat demostra per una banda les possibilitats que ofereixen els nous microprocessadors i el preu dels components electrònics. Aquest fet es demostra en la quantitat de projectes de desenvolupament de sistemes d'instrumentació i automatitzacions en els últims temps i del que aquest projecte n'és un exemple.

Per últim es vol remarcar la importància de realitzar projectes que tinguin una aplicació pràctica doncs gran part de l'aprenentatge ha estat per aquest motiu. Prendre decisions en equip, haver d'adaptar-se a les circumstàncies externes o limitacions exigeix una feina extra i dóna un realisme al projecte del que un TGF purament teòric no hagués tingut.

## Agraïments

Durant la realització d'aquest projecte i durant la meua petita contribució al projecte "GasCea" del CITCEA-UPC he tingut la oportunitat d'aprendre moltes coses que no es poden aprendre a una classe d'enginyeria. Si bé es cert que la carrera m'ha proporcionat moltes vegades la base per poder treballar i ampliar els meus coneixements i per això estic agraït.

Vull donar les gràcies a l'equip del gasificador per deixar-me participar i conèixer aquest projecte. En especial al Pol que em va introduir al món de la gasificació, a la Íngrid per treballar tant dur per aconseguir els objectius comuns i fer-ho sempre amb un somriure, al Jordi per la seva motivació i ganes i al Toni per creure tant en el projecte i animar-nos a continuar endavant i dirigir el meu TFG. En conjunt a tots quatre per creure en que és possible combinar l'enginyeria amb la cooperació pel desenvolupament i posar-hi tant d'esforç.

Vull agrair també a l'Andreu per dirigir i guiar-me en el TFG i sobretot amb el desenvolupament del programa del sistema de monitorització així com al Chepe per ajudar-me també amb la part constructiva de la caixa de sensors. Per últim agrair a la resta de companys del CITCEA com el Ricard que dediquen part del seu temps a ajudar desinteressadament i per el bon ambient que hi ha al despatx d'energia amb la resta de becaris i enginyers.

## Bibliografia

### Referències bibliogràfiques

- [1] T.B. Reed and A. Das, *Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems*, SERI Solar Energy Reserch Institute
- [2] H. La Fontaine and F.P.Zimmerman, *Construction of a Simplified Wood Gas Generator for Fueling Internal Combustion Engines in a Petroleum Emergeny*, FEMA Federal Emergency Management Agency 1989
- [3] [En línia] <http://www.allpowerlabs.com>
- [4] *Wood gas as Engine Fuel*, FAO Food and Agriculture Organization of te United Nations 1986
- [5] Review: Antonio Molinoa, Simeone Chianeseb i Dino Musmarrab. *Biomass gasification technology: The state of the art overview*.
- [6] Robert E. Bicking, *Fundamentals of Pressure Sensor Technology*, November 1, 1998
- [7] Jacob-Fraden, *Handbook of modern sensors : physics, designs, and applications*, Woodbury (New York)
- [8] Tony R. Kuphaldt, *Lessons In Industrial Instrumentation*, Version 2.06 – Released September 22, 2014
- [9] *Apuntes de Elementos y Equipos Eléctricos* - UNCOR Universidad Nacional de Córdoba
- [10] [En línia] National Institute of Standards and Technology (NIST) <http://srdata.nist.gov/its90/main/>
- [11] [En línia] American National Standards Institute, ANSI ANSI/ASTM E-230, [www.ansi.org](http://www.ansi.org)
- [12] [En línia] Industrial Automation and Mechatronics <http://iamechatronics.com/>
- [13] Maxim Integrated Products, Inc, MAX31855, [www.maximintegrated.com](http://www.maximintegrated.com)
- [14] Freescale Semiconductor, Inc (NXP Semiconductors), MPXV7007 Datasheet,



[www.nxp.com/](http://www.nxp.com/)

[15] Freescale Semiconductor, Inc (NXP Semiconductors), MPX5100 Datasheet, [www.nxp.com/](http://www.nxp.com/)

[16] Freescale Semiconductor, Inc (NXP Semiconductors), MPX4250A Datasheet, [www.nxp.com/](http://www.nxp.com/)

[17] Freescale Semiconductor, Inc (NXP Semiconductors), MPX5700 Datasheet, [www.nxp.com/](http://www.nxp.com/)

[18] AN1646 Motorola Semiconductor Application Note

[19] Arduino & Genuino <https://www.arduino.cc/>

## Bibliografia complementària

Com a bibliografia complementària s'han tingut en compte les memòries dels projectes entregats per a concursos i subvencions a on l'equip ha anat present el projecte "GasCea".

Alguns d'aquests han estat:

- Fondo de Emprendedores Fundación Repsol - V Convocatòria (2015)
- Ajuda PRODUCTE de l'Agència de Gestió d'Ajuts Universitaris de Recerca (AGAUR)
- Programa YUZZ Joves con Ideas del Banc Santander
- Emprèn UPC

Per altra banda per la realització d'aquesta memòria també han estat una guia els nombrosos PFC/TFG/TFM realitzats dins del CITCEA-UPC durant l'evolució del projecte "GasCea". Cal remarcar-ne alguns que han anat aprofundit alguns temes més en profunditat com:

- *Diseño de un gasificador de pequeña potencia eléctrica* de David Martín. Per fer el primer disseny del gasificador.
- *Anàlisi tèrmic i posada en marxa d'un gasificador tipus Downdraft per a microgeneració elèctrica a partir de biomassa* de Ingrid Munné. Per realitzar un fantàstic treball d'anàlisi i modelització del comportament del gasificador, un manual de muntatge i un de posta en marxa imprescindibles.
- *Generació elèctrica mitjançant gasificació de residus agrícoles a Goundi, República del Txad* de en Jordi Giral. Per fer una bona contextualització del projecte aprofundir en la part química imprescindible en la gasificació.

## Annexos

### Annex A Equacions i coeficients per linealitzar un termoparell de tipus K

L' Institut Nacional de Estàndards i Tecnologia Americà (NIST) proporciona unes taules i unes equacions que relacionen la força electromotriu del termoparell (simbolitzada amb una E a les equacions) i la temperatura de referència. A continuació es mostren les equacions i els coeficients pels termoparells tipus K que s'han utilitzat en el present projecte tot i que es poden trobar les equacions pels altres tipus de termoparells en la pàgina web del NIST.

La linealització de termoparells de tipus K es realitza en dos rangs de temperatures. A la Taula següent (Taula 12) es troben els coeficients en unitats °C i mV i estan llistats en ordre creixent de grau, des del terme independent fins a l'ordre màxim. Les equacions que segueixen són les emprades per linealitzar les lectures dels termoparells en el rang de temperatures negatives (-270 °C a 0 °C) (Equació 12) i en el rang de temperatures positives (de 0 °C a 1372 °C) (Equació 13).

$$E = \sum_{i=0}^n C_i \times T^i \quad \text{Equació 12}$$

$$E = \sum_{i=0}^n C_i \times T^i + a_0 \times e^{(a_1 \times (T - a_2))^2} \quad \text{Equació 13}$$

<b>Coeficients</b>	<b>Rang de temperatures negatives (-270 °C a 0 °C)</b>	<b>Rang de temperatures positives (de 0 °C a 1372 °C)</b>
$C_0$	0.000000000000E+00	-0.176004136860E-01
$C_1$	0.394501280250E-01	0.389212049750E-01
$C_2$	0.236223735980E-04	0.185587700320E-04
$C_3$	-0.328589067840E-06	-0.994575928740E-07
$C_4$	-0.499048287770E-08	0.318409457190E-09
$C_5$	-0.675090591730E-10	-0.560728448890E-12
$C_6$	-0.574103274280E-12	0.560750590590E-15
$C_7$	-0.310888728940E-14	-0.320207200030E-18
$C_8$	-0.104516093650E-16	0.971511471520E-22
$C_9$	-0.198892668780E-19	-0.121047212750E-25
$C_{10}$	-0.163226974860E-22	-
$A_1$	-	0.118597600000E+00
$A_2$	-	0.118343200000E-03
$A_3$	-	0.126968600000E+03

Taula 12 Coeficients de linealització Font: NIST

A continuació es mostren també les equacions aproximades inverses pels termoparells de tipus K pels rangs de temperatura donats anteriorment. Les unitats dels coeficients de la Taula 13 són °C i mV i estan llistats en ordre creixent de grau, des del terme independent fins a l'ordre màxim. El rang d'error per cada rang de les equacions inverses es troben també a la Taula 14 que hi ha a continuació.

$$T = d_0 + d_1 \times E + d_2 \times E^2 + \dots + d_n \times E^n$$

Equació 14

<b>Rang de Temperatura</b>	-200 °C a 0 °C	0 °C a 500 °C	500 °C a 1372 °C
<b>Rang de Voltage</b>	-5.891 a 0	0.000 a 20.644	20.644a 54.886
$d_0$	0.0000000E+00	0.000000E+00	-1.318058E+02
$d_1$	2.5173462E+01	2.508355E+01	4.830222E+01
$d_2$	-1.1662878E+00	7.860106E-02	-1.646031E+00
$d_3$	-1.0833638E+00	-2.503131E-01	5.464731E-02
$d_4$	-8.9773540E-01	8.315270E-02	-9.650715E-04
$d_5$	-3.7342377E-01	-1.228034E-02	8.802193E-06
$d_6$	-8.6632643E-02	9.804036E-04	-3.110810E-08
$d_7$	-1.0450598E-02	-4.413030E-05	0.000000E+00
$d_8$	-5.1920577E-04	1.057734E-06	0.000000E+00
$d_9$	0.0000000E+00	-1.052755E-08	0.000000E+00
$d_{10}$	-0.02 a 0.04	-0.05 a 0.04	-0.05 a 0.06

Taula 13 Coeficients de les funcions inverses Font: NIST

<b>Rang de Temperatura (°C)</b>	<b>Rang de f.e.m. (mV)</b>	<b>Rang d'error (°C)</b>
200 a 0	5.891 a 0.000	-0.02 a 0.04
0 a 500	0.000 a 20.64	-0.05 a 0.04
500 a 1372	20.644 a 54.886	-0.05 a 0.06

Taula 14 Rangs d'error de les funcions inverses linealització Font: NIST

---

## **Annex B Datasheets dels diferents components electrònics**

- **Sensors de pressió**
  - **Sensor de pressió MPX5100**
  - **Sensor de pressió MPX4250A**
  - **Sensor de pressió MPXV7007**
  - **Sensor de pressió MPX5700**
- **Amplificadors-Compensadors MAX31855**
- **Arduino Mega2560**
- **Note AN1646 on signal filtering**