



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

TREBALL DE FI DE GRAU

Grau en Enginyeria Elèctrica

**DIMENSIONAT D'UN GASIFICADOR DE BIOMASSA DE
PETITA POTÈNCIA I ESTUDI D'IMPLANTACIÓ EN UNA
MICROXARXA MITJANÇANT MATPOWER**



Memòria i Annexos

Autor:	Míriam Guari Borrull
Director:	Andreas Sumper
Co-Director:	Íngrid Munné Collado
Departament:	EE
Convocatòria:	Gener 2017

Resum

El següent treball està fet en col·laboració amb el projecte del CITCEA-UPC, en el que es pretén trobar la metodologia de dimensionat d'un gasificador de biomassa per la producció de gas combustible. Així doncs, aquest treball recull l'estudi de tots els factors que influencien en la instal·lació de gasificadors de biomassa de petita potència en una microxarxa; des de l'estudi del funcionament del sistema de gasificació i la justificació del dimensionat de totes les parts del gasificador, fins a l'estudi dels canvis en els fluxos de potència a la xarxa de distribució i a la microxarxa degut a la connexió dels gasificadors i així conèixer la quantitat i distribució òptima d'aquests a la microxarxa. La gasificació de biomassa i l'obtenció d'electricitat a partir del gas produït és un procés molt complex, és per això que al treball s'inclouen apartats en els que es descriuen els requeriments per a poder obtenir electricitat un cop creat el gas; com ara els diferents mètodes de neteja als que es pot sotmetre el gas, i el tipus de motor idoni per a l'operació amb gas pobre i les respectives modificacions en aquest necessàries per a l'operació.

Actualment al CITCEA-UPC es disposa d'un prototip de gasificador de biomassa amb el que s'han anat fent proves experimentals al llarg de l'elaboració d'aquest projecte per tal d'aplicar i validar els coneixements adquirits i obtenir gas combustible.

Resumen

El siguiente trabajo está hecho en colaboración con el proyecto del CITCEA-UPC, en el que se pretende encontrar la metodología de dimensionado de un gasificador de biomasa para la producción de gas combustible. Así pues, el presente trabajo recoge el estudio de todos los factores que influyen en la instalación de gasificadores de biomasa de pequeña potencia en una microred; desde el estudio del funcionamiento del sistema de gasificación y la justificación del dimensionado de todas las partes del gasificador, hasta el estudio de los cambios en los flujos de potencia en la red de distribución y la microred debido a la conexión de los gasificadores para así conocer la cantidad y distribución óptima de los gasificadores en la microred. La gasificación de biomasa y la obtención de electricidad a partir del gas producido es un proceso muy complejo, es por este motivo que se incluyen en el trabajo apartados en los que se describe los requisitos para poder obtener electricidad una vez producido el gas; como los distintos métodos de limpieza a los que puede someterse el gas, y el tipo de motor idóneo para la operación con gas pobre y las respectivas modificaciones en éste necesarias para la operación.

Actualmente en el CITCEA-UPC se dispone de un prototipo de gasificador de biomasa con el que se han hecho pruebas experimentales a lo largo de la elaboración del presente trabajo para así poder aplicar y validar los conocimientos adquiridos y obtener gas combustible.

Abstract

The following project is done in collaboration with the CITCEA-UPC labour, which aims to find a sizing methodology of a biomass gasifier for the production of fuel gas. Therefore, this work includes the study of all the factors that influence the installation of biomass gasifiers of small power in a microgrid; from the study of the operation of the gasification system and the justification of the dimensions of all parts of the gasifier, to the study of the changes in the power flows of the main grid and microgrid due to the gasifiers and so know the optimal amount and distribution of these in the microgrid. The biomass gasification and the production of electricity from the produced gas is a very complex process, which is why the project includes some sections in which the requirements in order to obtain electricity once created gas are described; such as the gas cleaning methods, and the type of motor suitable for operation with the produced gas and the respective modifications necessary for its operation.

Currently, CITCEA-UPC has a biomass gasifier prototype with which experimental tests have been done throughout the development of this project to implement and validate the knowledge acquired and to get fuel gas.



Agraïments

Vull agrair als meus pares el recolzament incondicional tant a nivell acadèmic com personal i a la meva germana Alba qui, des de la innocència d'un nen, m'ha mostrat la senzillesa de la vida. També agrair als companys del CITCEA i en especial a l'Íngrid per contagiar-me la seva il·lusió amb aquest projecte tant interessant i per donar-me l'oportunitat de formar-ne part.





Glossari

- **Gas de síntesi:** també anomenat gas pobre o wood gas. Es tracta d'un combustible gasós que es produeix al gasificar biomassa com fusta o pèl·lets. Consisteix en un 40% [1] aproximadament de gasos combustibles, principalment hidrogen, monòxid de carboni i metà, la resta de gasos no son combustibles i consisteixen sobretot en diòxid de carboni i nitògen.
- **kWe:** utilitzat per referir-se a kW elèctrics.
- **kWt:** utilitzat per referir-se a kW tèrmics.
- **MACI:** Motor Altern de Combustió Interna.
- **Carbó vegetal:** es tracta d'un material combustible amb un alt contingut en carboni. Es produeix per l'escalfament en absència d'aire de fusta i residus vegetals, fins a temperatures que oscil·len entre 400 i 700 °C.
- **PCI:** Poder Calorífic Inferior
- **Generació distribuïda:** generació d'energia elèctrica mitjançant diferents fonts d'energia en llocs el més a prop possible de les càrregues.
- **PPM:** Parts Per Milió. Es tracta de la proporció d'un gas en un altre.
- **Nm³/h:** m³/h en condicions Normals, és a dir, 1 atm i 0 °C.



Índex

RESUM	I
RESUMEN	II
ABSTRACT	III
AGRAÏMENTS	V
GLOSSARI	VII
1. INTRODUCCIÓ	13
1.1. Objectiu del treball.....	13
1.2. Abast del treball.....	13
1.3. Motivació	15
1.4. Història de la gasificació.....	15
2. TEORIA DE LA GASIFICACIÓ	17
2.1. Fases del procés de gasificació	17
2.1.1. Assecat.....	18
2.1.2. Piròlisi.....	18
2.1.3. Combustió o oxidació	20
2.1.4. Reducció o gasificació.....	21
2.2. Factors que afecten a la composició del gas	22
2.3. Sistema de gasificació	27
3. TIPUS DE GASIFICADORS	29
3.1. Gasificadors de llit fix	31
3.1.1. Gasificador de tir directe, corrent ascendent o updraft.....	32
3.1.2. Gasificadors de corrent descendent, tir invertit o downdraft.....	33
3.1.3. Gasificadors de tir transversal o crossdraft.....	34
3.2. Justificació de la tria del tipus de gasificador	35
4. BIOMASSA	36
4.1. Impacte de les propietats de combustible per a la gasificació	36
4.1.1. Contingut energètic del combustible.....	36
4.1.2. Contingut d'humitat al combustible	37
4.1.3. Mida de la biomassa i distribució.....	38

4.1.4.	Densitat aparent del combustible	38
4.1.5.	Contingut de matèria volàtil del combustible	39
4.2.	Biomassa escollida	40
4.3.	Composició del gas creat	41
5.	GRUP ELECTROGEN	43
5.1.	Tipus de motor	43
5.1.1.	Funcionament cicle Otto	43
5.1.2.	Funcionament cicle Dièsel	44
5.1.3.	Operació amb motor dièsel o motor de gasolina	45
5.2.	Motor dièsel	46
5.2.1.	Principi de funcionament	46
5.2.2.	Característiques que s'esperen del motor dièsel	48
5.3.	Potència del motor	48
5.3.1.	Disminució del rendiment en operar amb gas pobre	48
5.3.2.	Adaptació del motor dièsel per a l'operació amb gas pobre	49
5.3.3.	Tria del motor en funció de la seva cilindrada	52
5.4.	Grup electrogen escollit	56
5.4.1.	MACI	56
5.4.2.	Generador elèctric	56
6.	DIMENSIONAT DEL GASIFICADOR	58
6.1.	Aspectes generals	58
6.2.	Tremuja de biomassa	58
6.2.1.	Cos de la tremuja	59
6.2.2.	Forma cònica de la tremuja	59
6.2.3.	Sistema d'assecatge	59
6.3.	Reactor	60
6.3.1.	Càrrega específica o hearth load	61
6.3.2.	FAO	63
6.3.3.	Segons Reed and Das	68
6.3.4.	Anàlisi dels resultats	71
6.4.	La graella	73
7.	NETEJA I REFREDAMENT DEL GAS	74
7.1.	Mètodes per a la neteja del gas	74
7.1.1.	Mitjançant el propi pes de les partícules	74
7.1.2.	Mitjançant efectes d'inèrcia	74

7.1.3.	Mitjançant adhesió i humitejant	74
7.1.4.	Condensació	75
7.1.5.	Filtratge mitjançant teles o material orgànic.....	75
7.1.6.	Separació en un camp d'alt voltatge.....	75
7.2.	Dissenys de neteja empleats i recorregut del gas escollits	76
7.2.1.	Cicló.....	78
7.2.2.	Intercanviador de calor	81
7.2.3.	Filtre	82
8.	ESTUDI D'IMPLANTACIÓ EN UNA MICROXARXA	83
8.1.	Introducció	83
8.1.1.	Generadors i càrregues	84
8.1.2.	Línies de transmissió	84
8.1.3.	Transformadors	85
8.2.	Casos d'estudi	85
8.2.1.	Sense generació.....	88
8.2.2.	Amb generació.....	95
9.	ANÀLISI DE L'IMPACTE AMBIENTAL	102
9.1.	Avantatges ambientals	102
9.1.1.	Reducció d'emissions de CO ₂ i de CH ₄	102
9.1.2.	Ajuda en el maneig i disposició de deixalles	103
9.1.3.	Reducció i quasi eliminació de les emissions d'òxids de sofre	103
9.1.4.	Reducció de l'emissió d'òxids de nitrogen.....	103
9.2.	Inconvenients mediambientals	104
9.2.1.	Humitat en la biomassa.....	104
9.2.2.	Agrocombustibles.....	104
9.2.3.	Riscos tòxics.....	104
9.2.4.	Riscos d'incendi	105
9.2.5.	Riscos d'explosió.....	106
9.2.6.	Eliminació dels residus del procés de gasificació	106
	CONCLUSIONS	107
	PRESSUPOST	109
	Quadre descompost	109
	Grup electrogen	109
	Equip de transport del gas.....	110
	Aspirador i xemeneia	112

Cos gasificador i equips de neteja	113
Honoraris enginyeria	114
Resum de pressupost	116
BIBLIOGRAFIA	117
Referències bibliogràfiques	117
Bibliografia complementària	118
ANNEX A	119
A1. Fitxa tècnica del grup electrogen [17].....	120
A2. Fitxa tècnica del MACI [18].....	121
A3. Fitxa tècnica de l'alternador elèctric [19].....	123
ANNEX B	125
B1. Cables de baixa tensió [21].....	126
B2. Cables de mitja tensió [21]	128
ANNEX C	130
ANNEX D	133
D1. Primera prova experimental	133
D2. Segona prova experimental.....	135
D3. Tercera prova experimental.....	137
ANNEX E	139

1. Introducció

1.1. Objectiu del treball

L'objectiu del següent treball és dimensionar un gasificador de biomassa de 20 kW de potència elèctrica per a l'aplicació en petites comunitats, sent aquest presentat com a font d'energia renovable que permet controlar la fluctuació de potència dins un model de generació distribuïda. És per això que, a més a més, es pretén també estudiar la implantació d'aquesta tecnologia en una microxarxa, per demostrar el valor afegit que tenen els gasificadors de biomassa. Es podria dir, doncs, que aquest treball està compost per dues parts distingides pels dos objectius principals del projecte:

- Primera, que va del capítol 2 al 7, on s'aborden tots els temes que fan referència a la tecnologia de la gasificació de biomassa integrada a Motors Alterns de Combustió Interna (MACI) per la generació de potència.
- Segona, que està composta pel capítol 8, en la que s'introdueix al recurs informàtic utilitzat per calcular els fluxos de càrrega i on s'implementen els gasificadors a una microxarxa.

1.2. Abast del treball

El dimensionat d'un gasificador és un estudi que depèn de molts factors, com ara el tipus de gasificador, el tipus de biomassa utilitzada com a combustible, la composició del gas... I molts d'aquests factors depenen els uns dels altres, és per això que és molt important seguir la metodologia emprada en aquest treball.

Primer de tot, s'ha de conèixer la teoria de gasificació (Capítol 2) per saber en quin ordre esdevenen certes reaccions, entendre com es genera el gas i sota quines condicions. De la gasificació de biomassa es poden obtenir diferents productes tals com energia tèrmica, energia elèctrica, altres productes químics o combustibles líquids. Conèixer la finalitat amb que es produeix el gas pobre és essencial per al dimensionat del gasificador, en el cas d'aquest treball, la finalitat és l'obtenció d'energia elèctrica (Capítol 1). Un cop es coneix que es pretén generar electricitat a partir del gas generat, se sap que aquest serà enviat a un grup electrogen i que, per tant, aquest gas ha de tenir el mínim de quitrans possible. A més a més, és molt important conèixer la potència elèctrica que es vol obtenir per saber la potència tèrmica –mitjançant el rendiment tèrmic del grup electrogen– que ha de generar el gasificador i així poder escollir el tipus de gasificador que es dimensionarà (Capítol 3). Tot seguit, sabent les característiques òptimes de la biomassa per al gasificador escollit, es decideix el tipus de biomassa que s'utilitzarà i l'agent gasificant en funció dels recursos econòmics que es tinguin

(Capítol 4). D'aquesta manera, mitjançant la biomassa utilitzada i coneixent l'agent gasificant, s'obté el Poder Calorífic Inferior (PCI) del gas de síntesi (Capítol 4). A partir del PCI del gas, la potència tèrmica que es vol obtenir i el dosat estequiomètric d'aire necessari per a la combustió del gas al cilindre del Motor Altern de Combustió Interna (MACI), es pot obtenir la cilindrada del MACI. A partir d'aquest valor s'escull el grup electrogen (Capítol 5). És important tenir ja el model de grup electrogen abans de dimensionar el gasificador perquè aquest s'ha de dimensionar en funció del cabal volumètric màxim de gas que aquest és capaç de generar, i aquest cabal volumètric s'obté a partir de la capacitat volumètrica del MACI al que s'enviarà el gas. Així doncs, un cop escollit el grup electrogen al que s'enviarà el gas i calculat el cabal volumètric, es procedeix al dimensionat del gasificador (Capítol 6). A la Figura 1.1 es mostra l'esquema de la metodologia a seguir pel dimensionat d'un gasificador de biomassa:

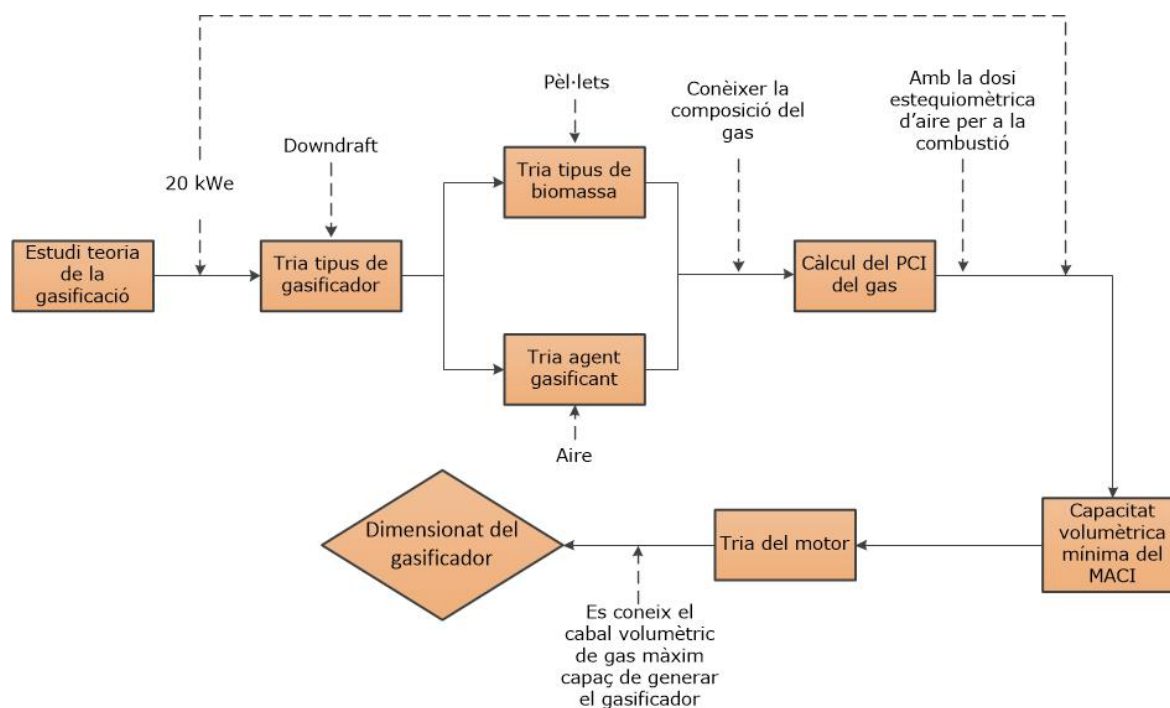


Figura 1.1. Metodologia aplicada per al dimensionat del gasificador (Font: elaboració pròpia)

A més a més, degut a la complexitat que implica fer funcionar un MACI amb gas combustible d'un poder calorífic baix com és el del generat, s'han creat dos apartats que ajuden a l'ús d'aquest; un en el que s'explica com adaptar el MACI per al funcionament amb gas pobre (Apartat 5.3.2) i un altre en el que es descriuen els diferents recursos per a netejar i refredar el gas abans de ser enviat al MACI (Capítol 7).

Per altra banda, la segona part del treball (Capítol 8) consisteix en fer l'estudi d'implantació del gasificador en una microxarxa. En aquest capítol s'hi pot trobar la presentació de la xarxa i microxarxa hipotètiques en les que es farà l'estudi d'implantació dels gasificadors en funció del pic de potència

demandada màxima que pot consumir la microxarxa de la xarxa general, i els transformadors i branques que es troben sobresaturats degut a la connexió de la microxarxa amb tota la suma de demanda que aquesta implica. En el mateix capítol també es pot consultar el programa que s'ha utilitzat per a l'anàlisi de dades tals com la caiguda de tensió en cada bus i el corrent que circula per cada branca per a cada cas.

1.3. Motivació

En les dècades dels 50 i 60 el consum energètic va ser desmesurat. Per aleshores, se li donava una relació molt estreta entre els indicadors de benestar econòmic de la societat i el consum d'energia. A més a més, ja van començar a sortir publicacions tals com *La teoria del pic Hubbert* on es pronosticava que si es seguia amb aquests hàbits de consum, es produiria un esgotament del petroli disponible a finals del segle XXI. Tot això, juntament amb altres factors va desencadenar que a la dècada dels anys 70 es produís un augment progressiu i desmesurat del preu del barril del petroli. Aquest augment dels preus va portar a una forta crisi energètica i econòmica que va repercutir de manera més notable als països en vies de desenvolupament. En aquell moment va aparèixer el que avui en dia es coneix com "problema energètic", el concepte d'estalvi energètic i la necessitat de millorar els rendiments en els processos de producció, transport i consum d'energia. És a partir d'aquí, doncs, que reben un fort impuls les fonts d'energia alternatives als combustibles fòssils.

En la actualitat, gairebé el 80% del consum mundial d'energia es basa en combustible fòssil [2] i les fonts d'energia renovables son utilitzades en un model de generació distribuïda, però en nivells insuficients per resoldre problemes com l'efecte hivernacle. Aquest consum elevat de combustible fòssil està causant problemes ambientals i de salut a causa de l'augment de les emissions de CO₂, NOx i SO₂.

La motivació d'aquest projecte és estudiar i implementar la generació d'energia elèctrica mitjançant biomassa que, combinada amb altres fonts d'energia renovables, podria ser una de les solucions al problema energètic en el futur.

1.4. Història de la gasificació

A finals del segle XIX (1890), es van construir a Anglaterra i Alemanya els primers gasògens o motors de "gas succionat" i fins la 1^a Guerra Mundial el desenvolupament d'aquests va anar creixent, però després de la guerra, l'atenció dels fabricants de motors es va anar centrant cada cop més en l'ús de combustibles líquids per a motors de combustió interna. Durant la 2^a Guerra Mundial, a Alemanya, Dinamarca i Suècia es va tornar a implementar la tecnologia de la gasificació per a vehicles com

autobusos, camions, automòbils, vaixells i trens, tots ells propulsats per gasificadors alimentats a base de fusta, carbó i carbó vegetal. Però l'ús d'aquesta tecnologia va portar problemes com la depuració del gas i la garantia de seguretat, ja que en ocasions es van produir explosions i intoxicació dels operadors per les emissions de CO₂. Així doncs, acabada la 2^a Guerra Mundial es va retornar a l'ús de combustibles líquids.

A mitjans dels anys 70, degut a l'augment dels preus del petroli es va renovar l'interès en la tecnologia de la gasificació de biomassa, especialment en països que depenen de les importacions de petroli però que disposen de grans existències de fusta o altres combustibles de biomassa o, com en el cas de Suècia, com a política oficial per fer front en cas de crisi petrolífera.

L'experiència adquirida en l'ús de gas pobre en vehicles mostra que, al tractar-se d'un sistema que requereix gran quantitat de mà d'obra per a la seva operació i manteniment i que, a més a més, no respon correctament a les variacions de càrrega degut a la seva gran inèrcia tèrmica aquesta tecnologia no es molt viable en quant a vehicles, però que sí que ho és per a instal·lacions fixes com és el cas del gasificador dimensionat en el present treball.

Actualment aquesta tecnologia és molt usada en països en vies de desenvolupament, en particular en aquelles zones que no estan interconnectades elèctricament, on els motors de combustió interna són utilitzats per a la generació d'energia, és d'especial importància la aplicació d'aquesta tecnologia ja que permet la substitució dels combustibles convencionals per combustibles derivats de la biomassa local. Per altra banda, la gasificació de biomassa també és molt usada en països industrialitzats degut majoritàriament a mesures mediambientals, on es busca reduir l'emissió neta de gasos d'efecte hivernacle a l'atmosfera en la generació d'energia.

2. Teoria de la gasificació

Un gasificador de biomassa és una instal·lació que utilitza un o més tipus de biomassa, com ara encenalls de fusta, carbó o residus sòlids orgànics com a combustible d'entrada per produir una mescla de gasos que, posteriorment, poden ser cremats per generar energia. La seva tasca principal és la gasificació, un procés termoquímic en el que un sòlid es transforma en un gas combustible mitjançant una sèrie de reaccions químiques realitzades a alta temperatura i amb una quantitat limitada d'agent gasificant que pot ser aire, oxigen o vapor d'aigua.

2.1. Fases del procés de gasificació

El procés de gasificació consta de quatre fases:

- Assecat
- Piròlisi
- Combustió o oxidació de gasos, vapor i carbó vegetal
- Gasificació o reducció del residu carbonós

Durant l'assecat la biomassa s'escalfa, d'aquesta manera la humitat continguda en ella i que fa disminuir el rendiment del gasificador comença a alliberar-se. Tot seguit, se sotmet a una degradació tèrmica anomenada piròlisi, en la que es descomponen les molècules complexes de la biomassa en d'altres de més senzilles, que són les que permetran dur a terme el procés de gasificació. Els productes de la piròlisi són gasos no condensables, sòlids i líquids. A continuació de la piròlisi esdevenen les fases d'oxidació i reducció, durant les quals els productes de la piròlisi juntament amb l'agent gasificant i sota condicions d'alta temperatura reaccionen entre si per tal de formar el gas final. La calor necessària per l'assecat, la piròlisi i les reaccions endotèrmiques (que absorbeixen energia) de reducció prové de les reaccions exotèrmiques (que desprenen energia) dutes a terme en l'etapa de combustió.

A la Figura 2.1 es mostren les fases en el procés de gasificació i els productes que n'entren i surten de cadascuna. Tot i que aquestes fases siguin freqüentment modelades en sèrie, no hi ha límit definit entre elles i sovint se sobreposen les unes a les altres.

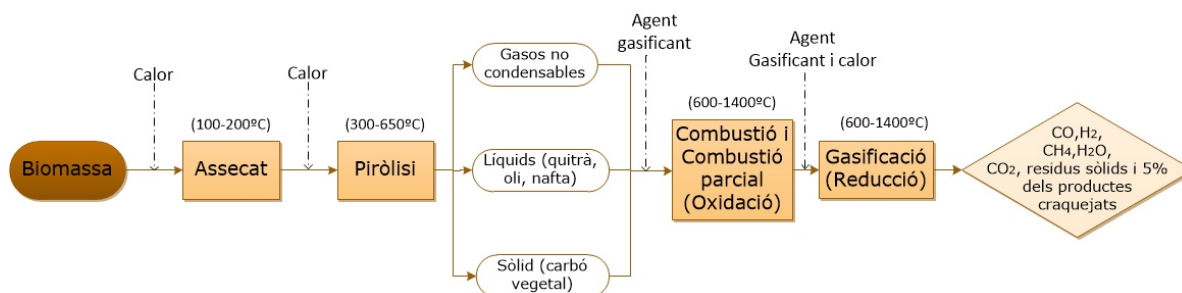


Figura 2.1. Fases del procés de gasificació (Font: elaboració pròpia)

2.1.1. Assecat

Quan s'introdueix la biomassa al gasificador, aquesta pot tenir encara un alt nivell d'humitat. Els rangs d'humitat relativa a la que es troba la fusta recent tallada, per exemple, varien entre el 30 i el 60% [4]. Sota aquestes condicions cada quilogram d'humitat a la biomassa consumeix un mínim de 2260kJ [4] d'energia extra del gasificador per tal d'evaporar aigua, energia que ja no és recuperable, a més a més, un alt contingut d'humitat provoca que les reaccions no es duguin a terme correctament. És per aquests motius, que és molt important el procés d'assecat, dut a terme amb la calor despresa en el procés de combustió.

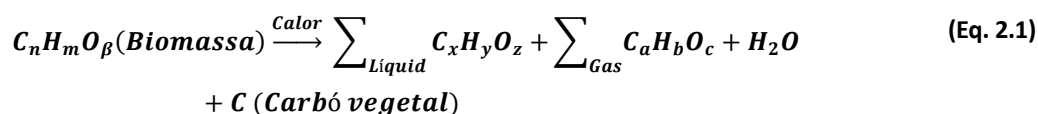
Per a la producció d'un gas combustible amb un valor calorífic acceptable, la majoria de sistemes de la gasificació utilitzen biomassa assecada amb un contingut d'humitat d'entre el 7 i el 20% [1]. És per això que és molt necessari dur a terme el procés d'assecat per extreure tanta humitat com sigui possible de la biomassa abans que aquesta entri al reactor del gasificador. L'assecat final es porta a terme després que la biomassa entra al gasificador, on rep calor des de la zona més calenta, el reactor. Per sobre de 100 °C, l'aigua que té la biomassa s'evapora degut a l'alta temperatura. Quan la temperatura augmenta, els extractes de baix pes molecular comencen a volatilitzar-se. Aquest procés continua fins que s'arriba a una temperatura d'aproximadament 200 °C [4].

2.1.2. Piròlisi

La piròlisi de la biomassa implica l'escalfament d'aquesta en absència d'aire o oxigen, normalment en un interval de temperatura entre 300 i 650°C [4] i durant un temps determinat. Es tracta d'una descomposició termoquímica de les molècules dels hidrocarburs més pesats presents en la biomassa per donar origen a molècules més petites de gasos no condensables (CO, CO₂, H₂ i CH₄), líquids (quitrà, bio-oli i nafta), vapor d'aigua i un residu sòlid d'aspecte carbonós conegut com residu carbonós, char, charcoal o carbó vegetal sense reaccions químiques importants amb cap dels possibles agents gasificants.

- **Gasos:** els productes gasosos de la descomposició primària de la biomassa són vapors i gasos no condensables (gas primari): el vapor està fet de les molècules més pesades; la barreja de gasos no condensables conté les molècules de menys pes com ara el diòxid de carboni, el monòxid de carboni, el metà, l'età, i l'etilè. A part dels gasos no condensables esmenats, hi ha uns gasos addicionals produïts a través del craqueig secundari del vapor, anomenats gasos d'efecte secundari. El PCI dels primaris és típicament de 11MJ/Nm³ [4], mentre que els gasos formats després del segon craqueig tenen un PCI bastant superior: 20 MJ/Mm³ [5].
- **Líquids:** els productes líquids de la piròlisi són quitrans, nafta i bio-oli: els quitrans són un fluid negre la composició dels quals està formada principalment per compostos fenòlics i conté també fins a un 20% d'aigua [4]; la nafta és un hidrocarbur líquid, incolor, volàtil i molt inflamable; el bio-oli és una barreja d'hidrocarburs complexos amb grans quantitats d'oxigen i aigua. Aquest es produeix mitjançant una despolimerització i fragmentació ràpida dels principals components de la biomassa: cel·lulosa, hemicel·lulosa, lignina. El PCI del bio-oli sol estar per sota del de la biomassa abans de ser secada, aquest valor es troba en el rang d'entre 13 i 18 MJ/kg en base humida [5].
- **Sòlids:** el carbó vegetal és el producte sòlid de la piròlisi i està compost principalment de carboni (~ 85%)[4], però que també pot contenir una mica d'oxigen i hidrogen. El Poder Calorífic Inferior (PCI) del carbó vegetal és d'uns 32 MJ/kg [5], valor substancialment superior al de la biomassa abans de ser secada i pirolitzada, que és d'uns 20,4 MJ/kg [6].

La naturalesa dels productes d'aquesta fase depèn de diversos factors com ara la temperatura de pirolització i la velocitat d'escalfament. Així doncs, el procés de piròlisi pot ser representat per una reacció genèrica com la següent:



En funció de la velocitat d'escalfament, la piròlisi pot classificar-se com a piròlisi lenta i ràpida. En la piròlisi lenta, el temps de residència del vapor a la zona de piròlisi és de l'ordre de minuts o més. Aquest procés s'utilitza principalment per a la producció de carbó i es divideix en dos tipus: carbonització i convencional. En la piròlisi ràpida, el temps de residència del vapor és de l'ordre de segons o mil·lisegons. Aquest tipus de piròlisi, que s'utilitza principalment per a la producció de bio-gas i petroli, és de dos tipus principals: flash i ultra-ràpida.

Com més baixa la temperatura, major la quantitat de quitrans i olis. A la Taula 2.1 es mostren les característiques de diferents tipus de piròlisi:

Taula 2.1. Característiques dels diferents tipus de piròlisi (Font: Prabir Basu [4])

Tipus de piròlisi	Temps de residència	Velocitat d'escalfament	Temperatura final (°C)	Productes
Carbonització	Dies	Molt baixa	400	Carbó vegetal
Convencional	5-30 mins	Baixa	600	Carbó vegetal, bio-oli, quitrans, gasos
Flash	<1 seg	Alta	<650	Bio-oli, productes químics, gas
Ultra-ràpida	<0,5 seg	Molt alta	~1000	Productes químics, gas

En el gasificador dissenyat, el temps característic de reacció de piròlisi ronda l'ordre de minuts, i se n'obté carbó vegetal, bio-oli, quitrans i una mescla de gasos no condensables. Així doncs, la piròlisi del gasificador dissenyat és convencional.

2.1.3. Combustió o oxidació

En aquesta fase, duta a terme a la vegada que les reaccions de gasificació, part del residu carbonós es mescla amb l'agent gasificant. Les reaccions d'aquesta fase son exotèrmiques, així doncs, produeixen l'escalfor necessària per dur a terme l'assecat i la piròlisi, a més a més de subministrar calor a les reaccions de gasificació que son endotèrmiques.

Durant la combustió es manté la temperatura entre 600°C i 1400°C [4], depenent del tipus de gasificador, i s'obté diòxid de carboni a partir del carboni i l'aigua de l'hidrogen. L'oxigen procedent del combustible s'incorpora naturalment als productes de la combustió, reduint així la quantitat necessària d'aire per a la combustió.

Les quantitats relatives de combustible, agent gasificant i vapor d'aigua regulen la fracció de carbó o oxigen que reaccionen. Qualsevol quantitat d'oxidant addicional al requerit per mantenir les reaccions endotèrmiques a la temperatura adequada, augmentaria innecessàriament la temperatura del gasificador i les pèrdues, fet que comportaria una reducció de l'eficiència i el poder calorífic del gas produït.

Les reaccions de combustió son generalment més ràpides que les reaccions de gasificació sota condicions similars. A la Taula 2.2 es poden observar les més importants d'aquesta fase:

Taula 2.2. Reaccions durant el procés de combustió (Font: Prabir Basu [4])

Reacció	ΔH (kJ/mol)
$C+O_2 \rightarrow CO_2$ (Combustió)	-394,0
$H_2+1/2O_2 \rightarrow H_2O$ (Combustió)	-242,0

2.1.4. Reducció o gasificació

La fase de gasificació implica reaccions químiques entre els hidrocarburs de la biomassa, el vapor d'aigua, diòxid de carboni, oxigen i hidrogen presents al reactor. De totes les reaccions dutes a terme, la gasificació del carboni és la més important, ja que aquesta implica reaccions entre el carboni present en el carbó vegetal i l'agent gasificant i també entre el carboni del carbó vegetal i el diòxid de carboni resultant de la combustió ($C+CO_2 \rightarrow 2CO$). El carbó vegetal produït durant la piròlisi de la biomassa no té perquè ser carbó pur, també conté una certa quantitat de hidrocarburs que comprenen carboni, hidrogen i oxigen.

La gasificació del carbó vegetal (expressat en forma de Carboni) de la biomassa implica reaccions entre el carbó vegetal i l'agent gasificant. A la Taula 2.3. es recullen algunes de les reaccions més importants amb el carbó, diòxid de carboni, hidrogen, vapor d'aigua i metà al llarg del procés de gasificació.

Taula 2.3. Reaccions durant el procés de gasificació (Font: Prabir Basu [4])

Reacció	ΔH (kJ/mol)
$C+CO_2 \rightarrow 2CO$ (Boudouard)(Reducció)	+172,0
$C+H_2O \rightarrow CO+H_2$ (Aigua-gas)	+131,0
$C+2H_2 \rightarrow CH_4$	-74,8
$C+1/2O_2 \rightarrow CO$	-111,0
$CO+H_2O \rightarrow CO_2+H_2$ (Shift)	-41,2

2.2. Factors que afecten a la composició del gas

El gas de sortida, també anomenat gas de síntesi o gas pobre, surt del gasificador com una barreja de gasos combustibles i no combustibles, juntament amb quitrà, vapor d'aigua, i cendres. Els compostos de sofre com ara el sulfur d'hidrogen (H_2S) i compostos de nitrogen (NH_3 i HCN) en el gas de síntesi son perjudicials ja que els seus condensats son corrosius i contaminants. La generació de sulfur d'hidrogen és de poca importància en la gasificació de biomassa sempre i quan el contingut de sofre no superi el 0,5%. La quantitat dels compostos de nitrogen en el gas depèn del contingut de nitrogen en el combustible, així doncs, sempre i quan s'usi un combustible amb un contingut de nitrogen de menys del 2%, la gasificació serà segura [7].

L'òxid de silici (SiO_2) i òxid de ferro (Fe_2O_3) en pols també son presents en el gas de sortida i són molt perjudicials pel motor per la seva naturalesa abrasiva.

A la Taula 2.4. es mostren els components del gas de síntesi classificats en útils i perjudicials:

Taula 2.4. *Classificació dels components de la mescla del gas de síntesi (Font: Schöpfer, P. and Tobler, J. [7])*

Gasos útils	Gasos i elements perjudicials
Monòxid de carboni (CO)	Diòxid de carboni (CO_2)
Hidrogen (H_2)	Quitrà
Metà (CH_4)	Vapor d'aigua
Acetilè (C_2H_2)	Sulfur d'hidrogen (H_2S)
Etilè (C_2H_4)	Pols (carbó, cendres, SiO_2 , Fe_2O_3)
Età (C_2H_6)	Compostos de nitrogen (NH_3 i HCN)

La composició del gas de sortida, també anomenat gas de síntesi, depèn de molts factors com ara el tipus de gasificador i de l'agent gasificant emprat per dur a terme els processos de combustió i gasificació. A la Taula 2.5 es mostren els rangs dins els quals es troba el PCS del gas obtingut i el % en volum dels principals components de la mescla en funció del tipus d'agent gasificant emprat:

Taula 2.5. Composició del gas obtingut (% en volum) en funció de l'agent gasificant
(Font: INERCO, Divisió d'Enginyeria [7]; Prabir Basu [4])

	PCS [MJ/Nm ³]	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	N ₂	C
Aire	4-7	9-20	14-24	9-20	1-7	46-53	-
Oxigen	12-28	32	48	15	2	3	-
Vapor d'aigua	10-18	50	20	22	6	-	2

La composició del gas de sortida també depèn del poder calorífic i del contingut d'humitat relativa del combustible, definida com la quantitat d'aigua present en aquest i expressada com un percentatge en pes. Per a combustibles de biomassa, aquest és un dels factors més crítics degut a que determina l'energia que se'n pot obtenir mitjançant la combustió d'aquesta. Així doncs, un elevat percentatge d'humitat redueix l'eficiència general del sistema i té una sèrie de conseqüències a nivells tècnics, mediambientals i econòmics.

Altres paràmetres que afecten la composició del gas de sortida són la temperatura del gas a la sortida del gasificador i les pèrdues de calor per convecció, que es produeixen degut al desplaçament de matèria entre regions amb diferents temperatures i radiació, calor que es transmet del medi o cos de més temperatura al de més baixa temperatura. Així doncs, degut a la gran quantitat de paràmetres d'entrada, resulta difícil la predicció de la composició del gas de sortida. Gràcies les Figures 2.2-2.4, es pot identificar el % en volum dels principals elements del gas de síntesi en funció de diferents paràmetres:

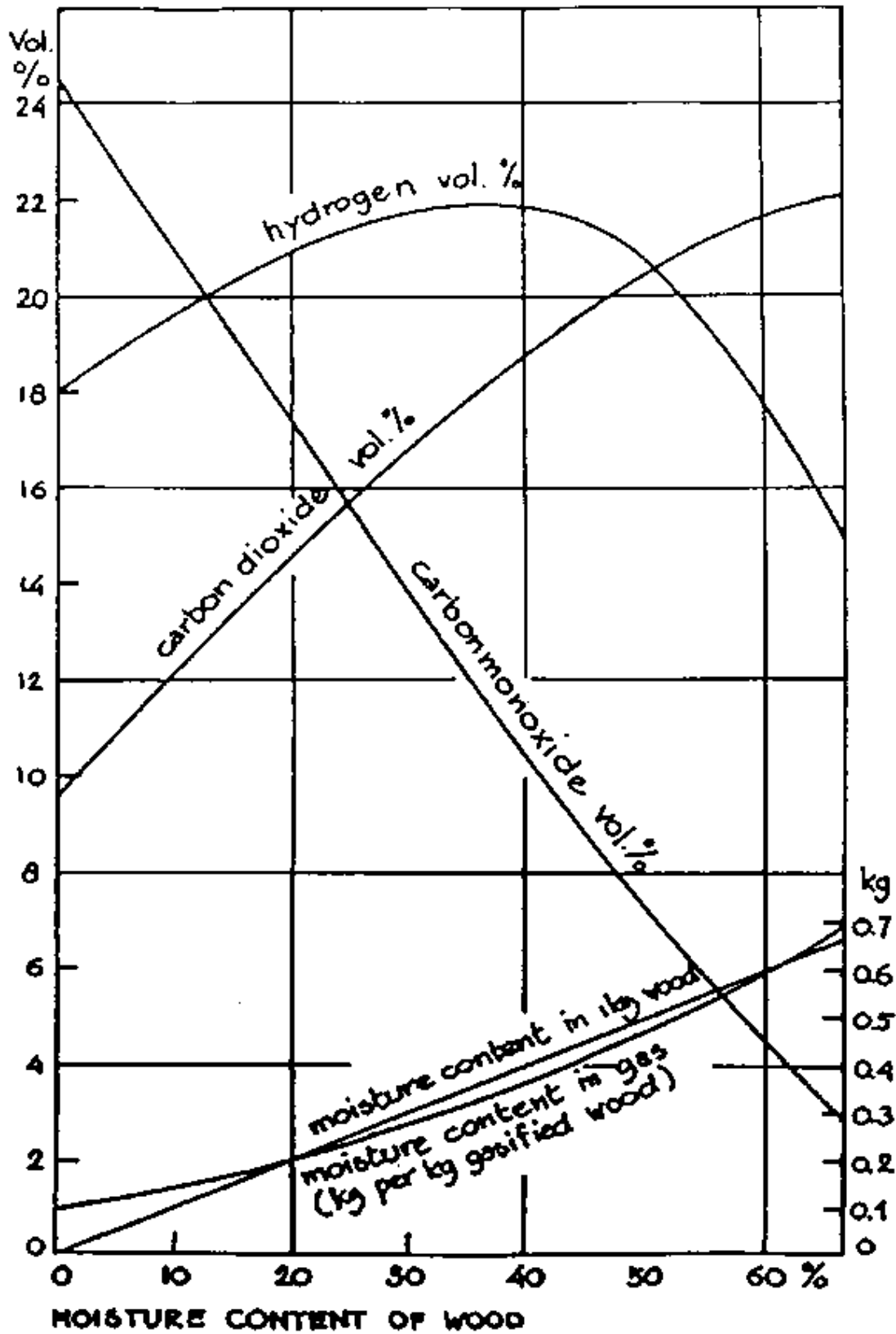


Figura 2.2. Composició del gas en funció del contingut d'humitat de la biomassa (Font: FAO [1])

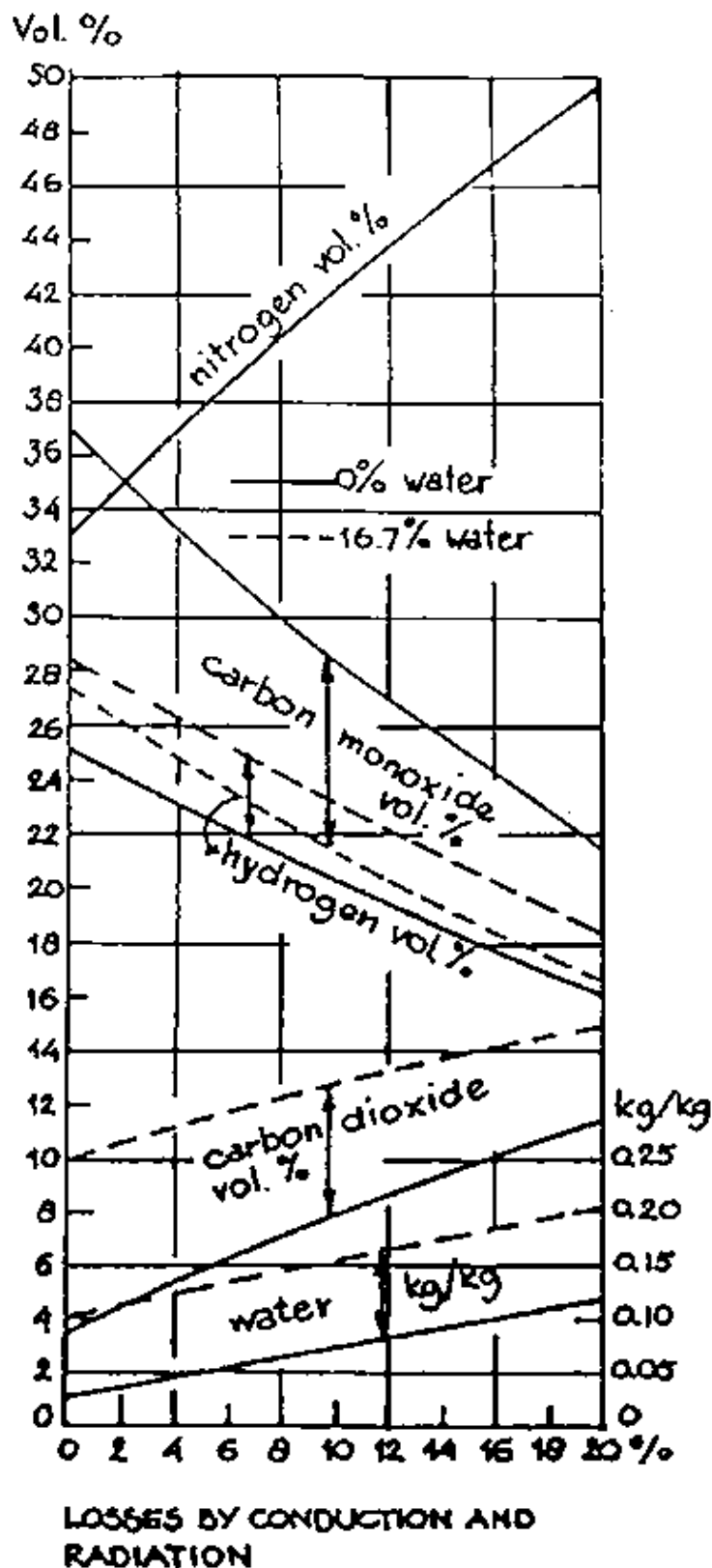


Figura 2.3. Canvi calculat de la composició del gas en funció de les pèrdues per convecció i radiació (Font: FAO [1])

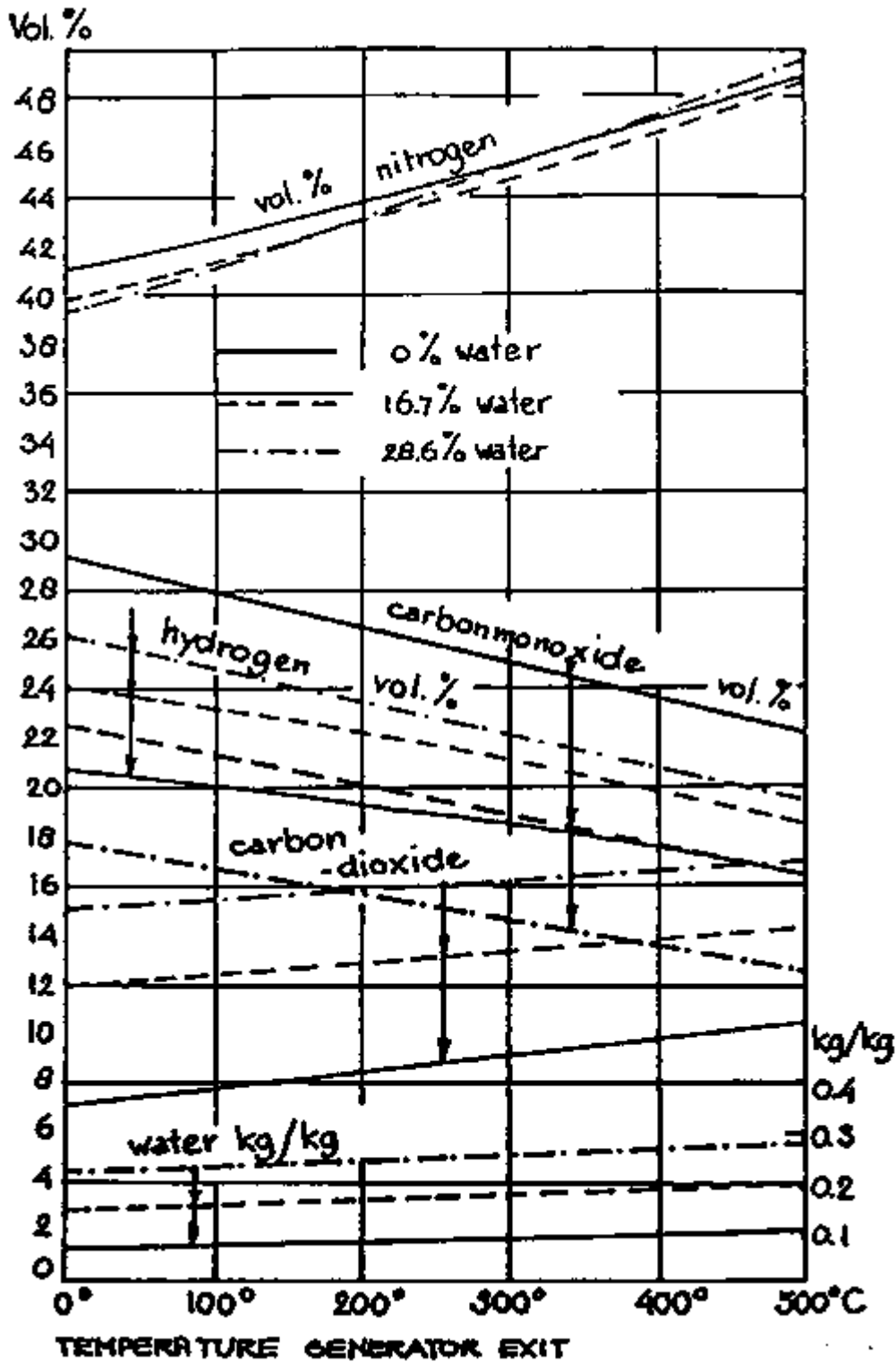


Figura 2.4. Canvi estimat de la composició del gas en funció de la temperatura de sortida del gas (Font: FAO [1])

2.3. Sistema de gasificació

Per obtenir energia elèctrica de la biomassa s'ha de transformar aquesta en un gas combustible per ser enviat a un grup electrogen motor alternatiu de combustió interna (MACI), per a que generi energia mecànica i després transformar-la en elèctrica. Per a més informació sobre el MACI consultar el capítol 5. Així doncs, el primer pas per obtenir electricitat és la gasificació, procés explicat en l'apartat 2.1 d'aquest capítol. Un cop obtingut el gas de síntesi, és molt important sotmetre'l a processos equips de neteja i refredament per a què aquest sigui òptim per a ser enviat al MACI sense fer-lo malbé i generar electricitat. Aquests processos de neteja es poden realitzar mitjançant el propi pes de les partícules, per condensació, adhesió, entre d'altres. Els diferents sistemes de neteja de gasos es detallen al Capítol 7.

Quan es posa en marxa el gasificador, el gas que surt dels equips de neteja i refredament encara no és apte per ser enviat al MACI, degut a que el reactor no ha assolit encara la temperatura idònia de funcionament. És per això que aquest no es connecta directament, sinó que s'envia el gas a una xemeneia mitjançant una clau de pas i un aspirador que genera la succió que generaria l'aspiració d'un motor i permet la circulació del gas a través del sistema. Així doncs, un cop refredat i netejat el gas, s'ha de comprovar que aquest sigui apte pel grup electrogen. Per a tal objectiu es pot procedir a dos exàmens:

- El primer és controlant la temperatura col·locant sondes en diferents punts del sistema, com ara al reactor, sortida del gasificador, en algun dels punts de neteja del gas i a l'entrada del MACI. En el moment que s'observa que la temperatura als diferents punts del sistema és constant i que la temperatura al reactor (on esdevenen les reaccions de combustió i gasificació) es troba entre els 600 i 1400°C [4], significa que aquest ja s'ha estabilitzat i el gas ja és òptim.
- L'altra manera de fer-ne una valoració és cremant el gas que surt de la xemeneia, si la flama surt de color blau, el gas és òptim.

El sistema de gasificació complert, doncs, consta del gasificador, els aparells de neteja i refredament del gas (cicló, intercanviador de calor, filtre...), aspirador i xemeneia (sistema cremador) i MACI. A la Figura 2.5 es pot observar un exemple de sistema de gasificació complert.

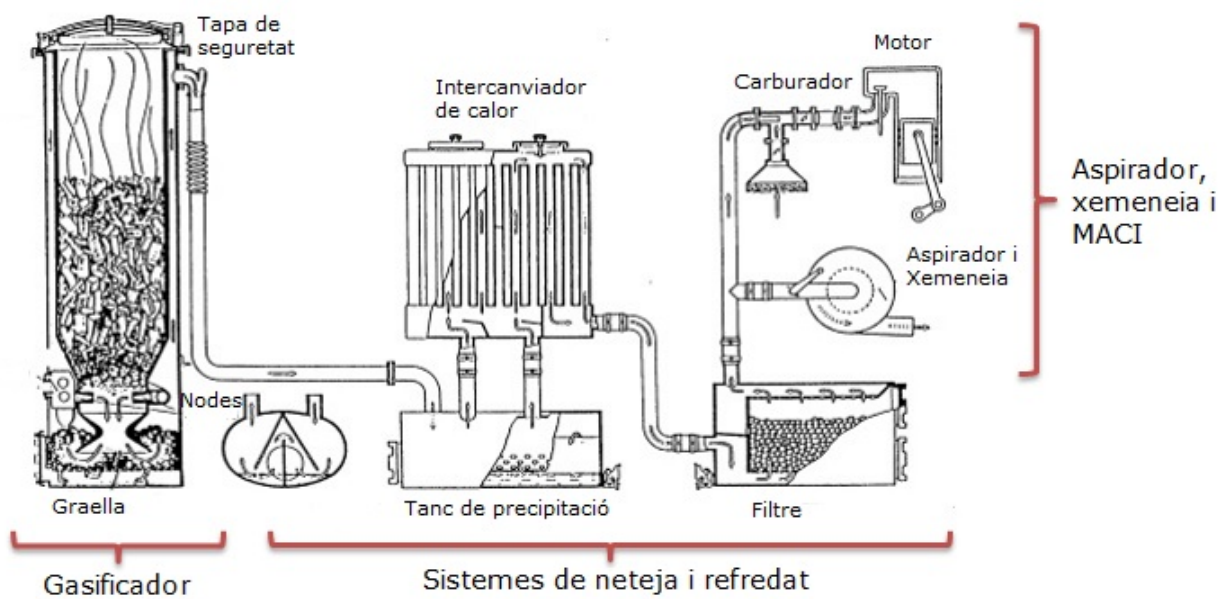


Figura 2.5. Sistema de gasificació complert. (Font: Generator Gas, The Swedish Experience from 1939-1945 [3])

3. Tipus de gasificadors

En aquest capítol es fa un estudi dels diferents tipus de gasificadors, classificats en funció de la tecnologia utilitzada, per tal de decidir quin és el disseny que s'adapta més a la potència i propietats del gas que es pretén obtenir.

Tal i com es mostra a la Figura 3.1, n'hi ha de tres grans tipus: els de llit fix, que són els que usen un llit de combustible sòlid pel qual l'agent gasificant i el gas combustible passen; els de llit fluiditzat, en els quals l'aire puja a través d'una reixa a una velocitat suficientment alta com per mantenir les partícules de combustible en suspensió; i els que gasificadors per arrossegament, en el qual s'hi filtra un raig d'aire d'alta velocitat que forma una zona de recirculació de les partícules fines de combustible. Cadascun d'aquests tres tipus té les seves variants:

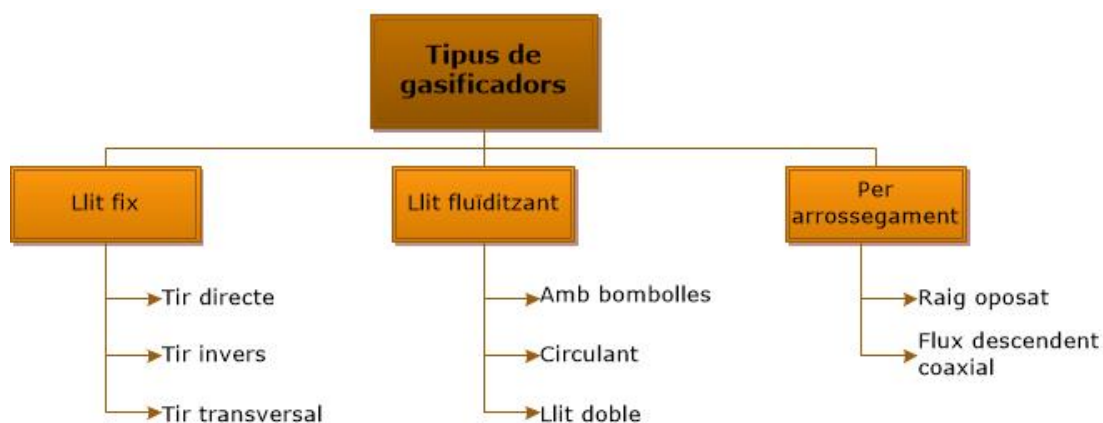


Figura 3.1. Tipus de gasificadors en funció de la tecnologia usada (Font: elaboració pròpia).

En la Taula 3.1 es fa un recull de les principals característiques dels tres grans grups de tipus de gasificadors, com serien la mida de la biomassa que permet gasificar o la temperatura del gas de síntesi a la sortida del gasificador:

Taula 3.1. Característiques de les diferents tecnologies de gasificació (Prabir Basu [4]; FAO [1])

	Llit fix	Llit fluïditzant	Flux per arrossegament
Mida biomassa	<51mm	<6mm	<0,15mm
Temperatura de sortida del gas de síntesi	450-650°C	800-1000°C	>1260°C
Temperatura del reactor	1090°C	800-1000°C	1990°C
Rang de potències (en Watts tèrmics)	10kW-1MW	1MW-100MW	>50MW
Velocitat encesa	Lenta	Ràpida	No especificat
Quitrans en el gas de sortida	Més net que els de llit fluïditzant	Brut	
Tolerància de la biomassa	Més restringida que la de llit fluïditzant	Qualsevol	Inadequat per la biomassa
Eficiència (tèrmica) del gas de sortida	80%	89%	80%

Com es pot apreciar en l'anterior Taula, hi ha un gran rang de criteris per decidir un tipus de gasificador. En aquest estudi, s'està fent el dimensionat d'un gasificador de biomassa de petita potència, així doncs, la gasificació per arrossegament queda descartada degut a que no funciona amb biomassa i els gasificadors de llit fluïditzant també queden descartats degut a que treballen a una potència massa elevada. A continuació, s'explica el funcionament dels tres tipus de gasificador de llit fix.

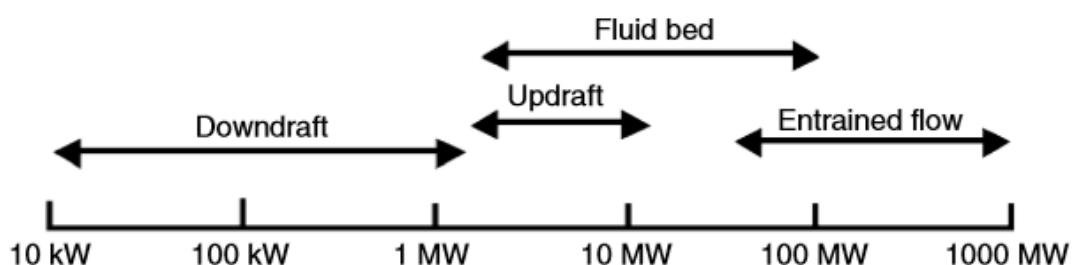


Figura 3.2. Rang de potències tèrmiques (Font: Prabir Basu [4]).

3.1. Gasificadors de llit fix

Aquests tipus de gasificadors poden usar com agent gasificant aire, oxigen i vapor d'aigua. El combustible s'alimenta per la part superior del gasificador i l'extracció de cendres es fa per la part inferior del llit.

N'hi ha de tres tipus segons per on s'extreu el gas. A la Taula 3.2 es recullen les característiques de cadascun d'ells.

Taula 3.2. Característiques dels diferents tipus de gasificador de llit fix (Font: Prabir Basu [4])

	Tir directe	Tir invertit	Tir transversal
Humitat combustible (%)	60 max	25 max	10-20
Temperatura cendres (°C)	>1000	>1250	-
Rang d'aplicació (MW tèrmics)	2-30	1-2	-
Temperatura de sortida del gas (°C)	200-400	700	1250
Quitrans (g/Nm³)	30-150	0,015-3,0	0,01-0,1
PCI_{gas síntesi} (MJ/Nm³)	5-6	4,5-5,0	4,0-4,5
Eficiència del gas de síntesi (%)	90-95	85-90	75-90
Relació de rebuig¹	5-10	3-4	2-3

¹ Relació entre els quitrans existents i els romanents al final del procés.

3.1.1. Gasificador de tir directe, corrent ascendent o updraft

L'aire entra per sota i els quitrans i productes volàtils produïts surten per dalt. A la part alta del gasificador és on s'esdevenen l'escalfament i la piròlisis gràcies a la transferència de calor de les zones inferiors, on es duen a terme les reaccions de reducció i combustió.

Els avantatges de l'ús d'aquest tipus de gasificador són la seva simplicitat, l'alta proporció de carbó vegetal cremat i l'intercanvi intern de calor que resulta en unes baixes temperatures de sortida del gas i alta eficiència de l'equip. Un altre avantatge és la gran varietat de tipus de biomassa amb els que pot treballar.

Per altra banda, els inconvenients del seu ús són la possibilitat de que apareguin fuites en l'equip, fet que pot portar pèrdues d'oxigen i situacions d'explosió perilloses. Un altre inconvenient és els problemes relacionats amb l'eliminació de líquids condensats que contenen quitrans, a més a més, com que el gas de síntesi produït creua tot el llit fix, té una quantitat de partícules elevades de quitrans, fet que fa que el gas no sigui prou adient per ser introduït en un MACI.

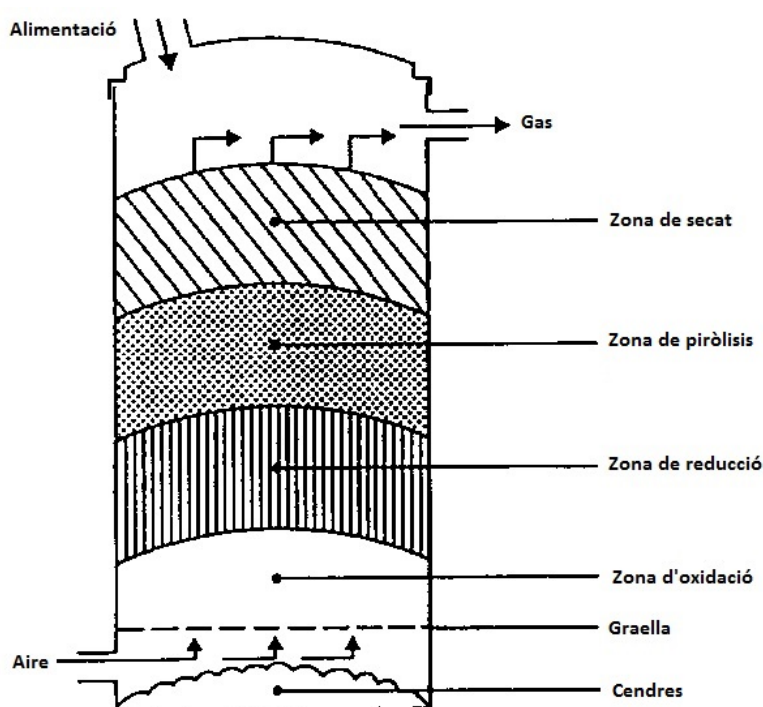


Figura 3.3. Gasificador de corrent ascendent o de tir directe (Font: FAO [1]).

3.1.2. Gasificadors de corrent descendent, tir invertit o downdraft

L'aire s'introdueix a la zona d'oxidació del gasificador o per sobre d'aquesta i el gas surt per la part inferior en comptes de per la superior, d'aquesta manera, el gas i el combustible es mouen en la mateixa direcció i sentit.

El motiu de l'èxit d'aquest tipus de gasificadors és la possibilitat de produir un gas amb un baix nivell de quitrans apropiat per ser aplicat a Motors Alterns de Combustió Interna (MACI).

Un dels inconvenients de les instal·lacions de tir invertit és que no poden treballar amb biomassa de qualsevol tipus; els de baixa densitat, per exemple, comporten problemes de circulació i una caiguda excessiva de pressió [1]. També tenen problemes amb els combustibles amb alt contingut de cendres (formació d'escòria), en major proporció que els gasificadors de tir directe. Un altre dels inconvenients que presenta és la baixa eficiència d'aquest en comparació amb el de tir directe, aquesta baixa eficiència es deu a la manca d'intercanvi intern de calor i al menor poder calorífic del gas [1].

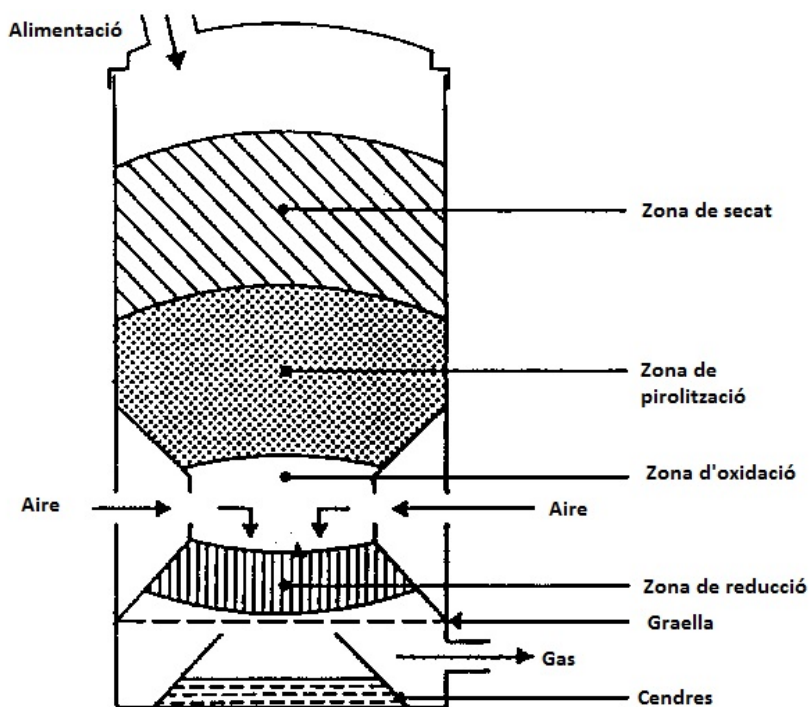


Figura 3.4. Gasificador de corrent descendent o de tir invertit (Font: FAO [1]).

3.1.3. Gasificadors de tir transversal o crossdraft

La gasificació del carbó vegetal produeix temperatures molt elevades (1500°C i més [4]) en la zona d'oxidació que poden causar problemes als materials dels quals està fet el gasificador. En aquest tipus de gasificador, el mateix carbó vegetal serveix d'aïllament contra les altes temperatures.

L'avantatge de l'ús d'aquests gasificadors és la seva possibilitat de treballar en molt petita escala, resultant econòmicament viable en instal·lacions inferiors a 10 kW tèrmics [1].

Un inconvenient dels gasificadors de tir transversal és la seva capacitat mínima de transformació de quitrans i la necessitat conseqüent d'usar carbó d'alta qualitat [1], no poden treballar amb biomassa.

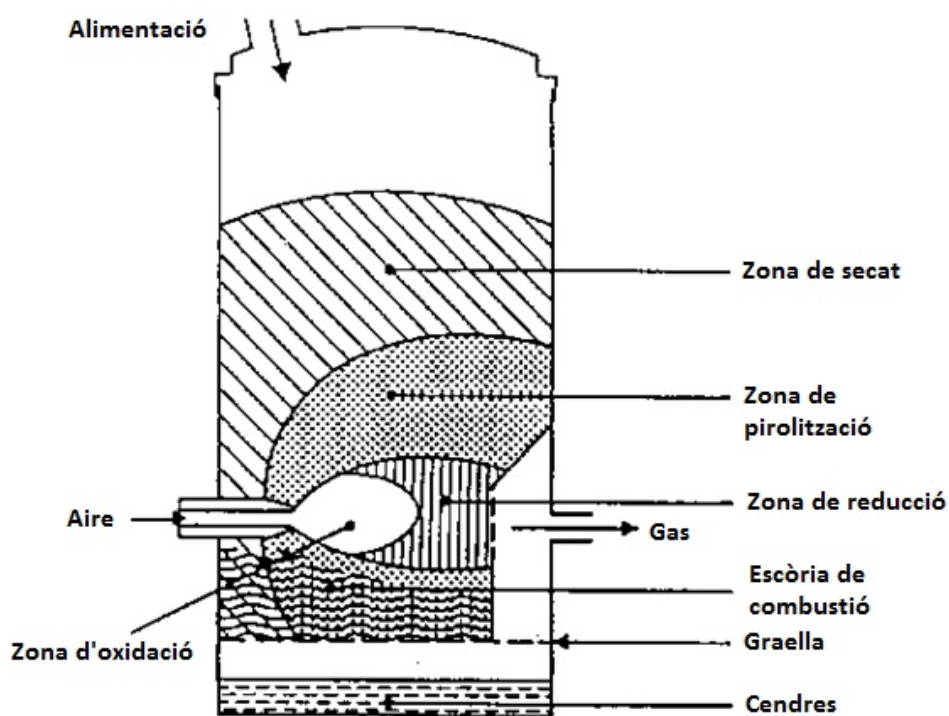


Figura 3.5. Gasificador de tir transversal (Font: FAO [1])

3.2. Justificació de la tria del tipus de gasificador

Com ja s'ha comentat abans en aquest mateix capítol, s'han descartat els gasificadors que funcionen amb la tecnologia de llit fluïditzat i els que funcionen amb gasificació per arrossegament per incompatibilitat amb la biomassa com a combustible i amb el rang de potències que s'està buscant. Així doncs, s'han analitzat un per un els gasificadors de llit fix. A la Taula 3.3 s'hi troba una recopilació dels avantatges i inconvenients de cadascun d'ells:

Taula 3.3. Avantatges i inconvenients tipus de gasificador de llit fix (Font: elaboració pròpia).

	Avantatges	Inconvenients
Tir directe Updraft	Simplicitat, alta proporció de carbó vegetal cremat, alta eficiència deguda a l'intercanvi intern de calor i gran varietat del tipus de biomassa amb la que pot treballar.	Possibilitat de que apareguin fugues a l'equip, fet que pot comportar situacions d'explosió i problemes relacionats amb l'eliminació de quitrans.
Tir invertit Downdraft	Produeix un gas amb un nivell baix de quitrans apropiat per ser aplicat a motors de combustió interna (MACI).	No poden treballar amb biomassa blana i de baixa densitat, problemes amb combustibles amb alt contingut de cendres, baixa eficiència deguda a la manca d'intercanvi intern de calor
Tir transversal Crossdraft	Possibilitat de treballar en molt petita escala, econòmicament viable en instal·lacions inferiors a 10kW elèctrics.	Incapacitat de transformació de quitrans, necessitat d'usar un carbó vegetal d'alta qualitat.

Tenint en compte les característiques, avantatges i inconvenients de cadascun dels tipus de gasificador de llit fix, es decideix que el de tir invertit és el més adequat, ja que treballa dins el rang de potències que interessa. A més a més, el gas de sortida del gasificador dimensionat té per objectiu ser enviat a un grup electrogen format per un motor i un generador, per a tal objectiu, és de gran importància que el gas obtingut tingui la menor quantitat de quitrans possible. Aquesta és una altra de les raons principals per les quals el gasificador downdraft és el més convenient. Per altra banda, els inconvenients que presenta no comporten tants problemes com els inconvenients que presenten els gasificadors de tir directe i transversal.

4. Biomassa

Conèixer la composició del gas de sortida a partir d'ara serà primordial per conèixer el poder calorífic del gas i el cabal volumètric necessari per produir la potència elèctrica desitjada i així escollir el grup electrogen adient i les dimensions del reactor del gasificador.

Com s'ha explicat en l'apartat 2.2, la composició del gas depèn de molts factors: tipus de gasificador, agent gasificant, tipus de biomassa, pèrdues de calor per radiació i convecció, temperatura del gas de sortida. Fins ara ja s'ha especificat al l'apartat 3.2 que el model de gasificador que s'utilitzarà serà Downdraft degut a la potència elèctrica que es vol obtenir i qualitat del gas de sortida. Per altra banda, dins el rang d'agents gasificants que es poden utilitzar hi ha l'oxigen, l'aire i el vapor d'aigua. En aquest projecte com que el que es pretén obtenir és una instal·lació robusta i econòmica capaç de generar energia elèctrica, s'opta per l'aire per raons econòmiques i pràctiques. Com que les pèrdues per radiació i convecció i la temperatura del gas de sortida no son factors que es puguin escollir, el que falta per concretar és el tipus de biomassa que s'utilitzarà per a la generació del gas.

4.1. Impacte de les propietats de combustible per a la gasificació

Per a la gasificació de biomassa es pot utilitzar un rang molt ampli de combustible com són la fusta, el carbó vegetal, residus de fusta com branques, arrels, suro o serradures, així com residus provinents de l'agricultura com ara panotxes de blat de moro, closques de coco, closques d'arròs o palla de cereals. Teòricament, quasi tots els tipus de biomassa amb un contingut d'humitat inferior al 30% [7] poden ser gasificades; tot i això, no tots els combustibles de biomassa comporten un procés de gasificació exitós. La clau per al disseny exitós del gasificador és entendre les propietats i el comportament tèrmic del combustible que es gasifica.

Pes propietats del combustible que influencien en la gasificació es descriuen a continuació.

4.1.1. Contingut energètic del combustible

El contingut energètic de la biomassa es mesura amb el que s'anomena poder calorífic:

- El PCS (Poder Calorífic Superior) es defineix com la quantitat d'energia despresa durant la combustió d'1 kg de combustible en la presència d'oxigen i a la pressió de 1 bar, estant l'aigua generada en el procés es troba en forma líquida.

- El PCI (Poder Calorífic Inferior) es defineix com la quantitat d'energia despresa durant la combustió d'1 kg de combustible en la presència d'oxigen i a la pressió de 1 bar, estant l'aigua generada en el procés es troba en forma de vapor.

Els valors de poder calorífic de la biomassa es poden donar en base seca o en base humida i varien molt en funció del tipus de biomassa. A la Taula 4.1 es mostren els valors de Poder Calorífic Inferior (PCI) de diferents tipus de biomassa:

Taula 4.1. PCI de diferents tipus de biomassa (Font: Energética xxi [20])

Tipus de Biomassa	PCI [MJ/kg]
Pèl·lets	17-19
Estelles	10-16
Pinyola	18-19
Closques de fruits secs	16-19
Llenya	14,4-16,2
Briquetes	17-19

Els tipus de biomassa amb major PCI son sempre millors per a la gasificació. La majoria de combustibles de biomassa tenen un PCI d'entre 10 i 16 MJ/kg, mentre que els combustibles líquids tals com la gasolina i el dièsel tenen un PCI superior.

4.1.2. Contingut d'humitat al combustible

La humitat continguda en els combustibles de biomassa depèn del tipus de biomassa, el seu origen, i el tractament al que s'ha sotmès la biomassa abans de ser utilitzada per la gasificació. El contingut d'humitat de la biomassa es refereix a la humitat inherent en aquesta més la humitat de la superfície d'aquesta. La quantitat d'humitat desitjada per a evitar problemes durant el procés de gasificació està per sota el 15% [7] en volum ja que, com s'ha explicat en apartats anteriors, valors molt elevats d'humitat comporten una reducció de l'eficiència tèrmica del gasificador i que el gas resultant del procés tingui un poder calorífic molt baix. A més a més, encendre biomassa amb grans percentatges de biomassa resulta d'allò més difícil.

A la Taula 4.2 es mostren els valors de Poder Calorífic Inferior (PCI) de diferents tipus de biomassa:

Taula 4.2. Humitat relativa de diferents tipus de biomassa (Font: Energética xxi [20])

Tipus de Biomassa	Humitat (%)
Pèl·lets	<15
Estelles	<40
Pinyola	7-12
Closques de fruits secs	9-15
Llenya	<20
Briquetes	<20

4.1.3. Mida de la biomassa i distribució

La mida de la biomassa empleada per la gasificació afecta en la quantitat de pressió que hi haurà sobre el reactor del gasificador, és a dir, on esdevenen les reaccions de combustió i reducció. La quantitat de pressió sobre el reactor marca la potència necessària per succionar el gas generat. La pressió sobre el gasificador és inversament proporcional a la mida de les partícules de biomassa, així doncs, com més petites les partícules, més pressió [13]. Quanta més pressió, menys producció de gas per hora i cm^2 , fet que implica baixes temperatures i, per tant, alta producció de quitrans. Per altra banda, que les partícules siguin massa grans tampoc interessa ja que disminueix la reactivitat de la biomassa, provocant problemes per a encendre-la i posar en marxa el gasificador i, per tant, baixa qualitat del gas resultant.

Les mides acceptables depenen del tipus de gasificador empleat. En general, els gasificadors que utilitzen fusta treballen correctament amb blocs i encenalls de fusta que van des de 10x5x5 mm fins a 80x40x40 mm, mentre que els gasificadors que utilitzen carbó vegetal, aquest pot anar des de 10x10x10 mm fins a 30x30x30 mm [7].

4.1.4. Densitat aparent del combustible

La densitat aparent està definida com la massa de moltes partícules de la biomassa dividides pel volum total que aquestes ocupen. La densitat del combustible varia considerablement en funció de la humitat d'aquest i la mida de les seves partícules. El volum que la biomassa ocupa no depèn només de la seva densitat, sinó que també de la manera en la que aquesta és apilada. La densitat de la biomassa també té un alt impacte en la qualitat del gas, ja que aquesta influeix el temps de

residència del combustible en la zona de combustió, la velocitat en la que aquest descendeix i el flux de gas generat.

4.1.5. Contingut de matèria volàtil del combustible

L'anàlisi de la matèria volàtil s'inclou en el que s'anomena anàlisi immediat, que comprèn també l'anàlisi de cendres i humitat. La matèria volàtil i l'aigua inherent en el combustible son expulsades d'aquest durant l'etapa de piròlisi a temperatures d'entre els 100°C i els 200°C [4] formant un vapor que consisteix en aigua, quitrans, olis i gasos. La matèria volàtil també es la responsable de la flama durant el procés de combustió.

Les cendres son el residu inorgànic que roman després de la combustió d'aquest. En la pràctica, les cendres també contenen combustible sense cremar. El contingut en cendres i la composició de les cendres també té un impacte en el funcionament del gasificador. L'aglomeració de cendres al reactor provoca la creació d'escòria. Si no es prenen mesures, la formació d'escòria pot comportar excessiva creació de quitrans o que es bloquegi completament el reactor. En general, amb combustibles amb un contingut en cendres inferior al 5% [7] no hi ha problemes de creació d'escòria. A la Taula 4.3 es mostra el contingut en cendres per a diferent tipus de biomassa.

Taula 4.3. *Tipus de biomassa i el seu contingut en cendres (Font: Schöpfer, P. and Tobler, J. [7])*

Tipus de Biomassa	Pes en contingut de cendres (%)
Palla d'Ordi	10,3
Carbó vegetal	2-5
Carbó	5-17
Closques de cacauet	0,9
Closques d'arròs	16-23
Closques de nou	1,1
Encenalls de fusta	0,1
Tiges de blat	7,4

4.2. Biomassa escollida

Finalment, un cop valorades les opcions i propietats de la biomassa, s'opta per operar amb pèl·lets de biomassa degut a la seva idoneïtat tant per la seva composició, humitat i mida. A més a més, tal ser pèl·lets, es coneix també més fàcilment la seva composició i és més fàcil d'obtenir que altres tipus de biomassa, cosa que interessa per poder fer les proves de posada en marxa

Així doncs, la biomassa escollida son pellets en Plus A1 de la marca *Leñas Oliver*. A la Figura 4.1 es pot observar el disseny del sac de 15 kg d'aquests pellets:



Figura 4.1. Bossa de 15 kg de la biomassa que s'utilitzarà (Font: Tienda Biomasa [9])

A continuació es mostren les característiques de la biomassa escollida:

- Diàmetre (mm): 6 ± 1
- Longitud (mm): $3,15 \leq L \leq 40$
- Densitat (Kg/m^3): ≥ 650
- Durabilitat mecànica (%): $\geq 97,5$
- Humitat (% massa): < 10
- Cendres (% massa): $< 0,7$
- Poder calorífic (Kcal/Kg): 4600
- Nitrogen (% massa): $\leq 0,3$
- Sofre (% massa): $\leq 0,3$

4.3. Composició del gas creat

Un cop decidits tots els paràmetres que estan en les nostres mans i que afecten a la composició del gas de sortida, es pot procedir l'obtenció de la composició aproximada d'aquest.

Taula 4.4. Resum de factors escollits que afecten a la composició del gas de sortida
(Font: elaboració pròpia)

Factor	Escollit pel projecte
Model gasificador	Downdraft
Agent gasificant	Aire
Tipus de biomassa	Pellets

Gràcies a les gràfiques proporcionades per la FAO [1] i les taules proporcionades per INERCO Energia [8] que es poden consultar a l'apartat 2.2. es pot fer una aproximació de la composició del gas. Coneixent la quantitat d'humitat en la biomassa utilitzada:

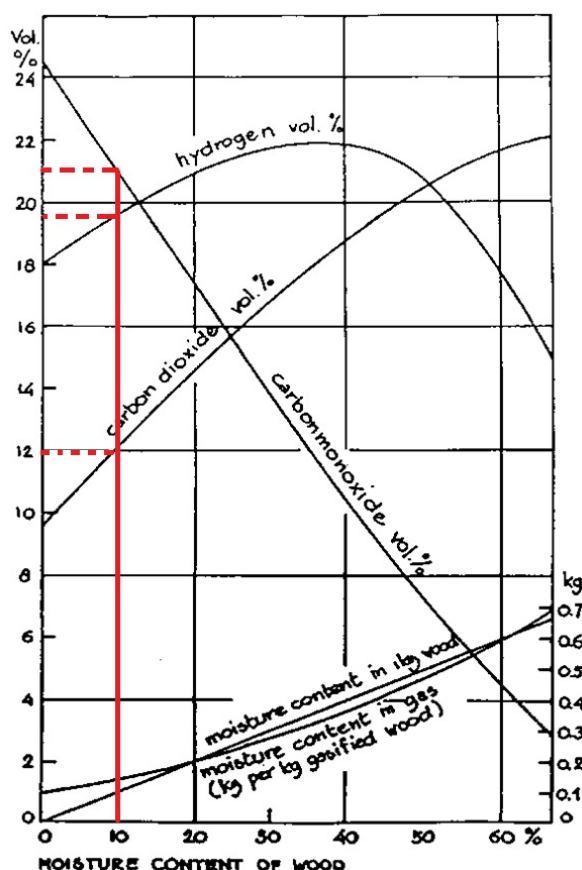


Figura 4.2. Composició del gas de sortida en funció de la humitat de la biomassa (Font: FAO [1])

A partir de la Figura 4.2 i la Taula 2.5 proporcionada per es pot obtenir la composició aproximada del gas de sortida:

Taula 4.5. *Composició del gas de sortida (Font: elaboració pròpia)*

Component	% en volum
CO ₂	12
H ₂	19
CO	21
CH ₄	2
N ₂	46
C	-

5. Grup electrogen

A partir de la biomassa es pot generar electricitat, calefacció per habitatges, hospitals i fins i tot barris sencers en funció de la quantitat de gas produït, així com calor i vapor per a processos industrials i biocarburants per al seu us en transport: biodièsel i biometà per a automoció i bioquerosè per aviació. L'objectiu d'aquest treball és la generació d'energia elèctrica, és per això que aquest capítol se centrarà en l'estudi d'obtenció d'electricitat a partir del biogàs obtingut.

Per a la generació d'electricitat a partir del biogàs s'ha de produir energia mecànica per posteriorment convertir-la en elèctrica. Per a tal objectiu s'usarà un grup electrogen format per un motor tèrmic i un generador elèctric.

5.1. Tipus de motor

El motor tèrmic és una màquina que transforma la calor en treball mecànic mitjançant l'aprofitament de les propietats d'un fluid de treball (gas o vapor d'un líquid), en aquest cas, del gas pobre o de síntesi. Aquesta energia mecànica es transmet a través d'un eix per proporcionar moviment, en aquest cas, al generador elèctric. Hi ha molts tipus de motors tèrmics: estan els de combustió externa, com ara la turbina de gas de cicle tancat, màquina de vapor i el motor Stirling, i els de combustió interna, que poden ser rotatius, alterns o de reacció.

En el cas de l'aprofitament de gasos resultants d'un procés de combustió com és el gas produït, s'usen Motors Alterns de Combustió Interna (MACI), aquests poden ser dièsel o d'explosió, també anomenat de benzina o de cicle Otto. En aquests motors el gas combustiona i empeny un èmbol o pistó, desplaçant l'interior d'un cilindre i fent girar un cigonyal, obtenint finalment un moviment de rotació.

5.1.1. Funcionament cicle Otto

El cicle Otto és el cicle ideal que s'associa al motor d'encesa per espurna, és a dir, motor de gasolina. Els processos termodinàmics que es produeixen estan representats a la Figura 5.1 i són els següents:

- a) Compressió adiabàtica (1-2): compressió del fluid de treball, el pistó ha de realitzar el treball de compressió.
- b) Aportació de calor a volum constant(2-3): introducció instantània de la calor aportada, Q_1 .
- c) Expansió adiabàtica (2-4): expansió, corresponent al treball realitzat pel fluid.
- d) Extracció de calor a volum constant (4-1): extracció instantània de la calor Q_2 .

De fet, en els motors de 4 temps, l'extracció de la calor es produeix en la fase d'escapament de la vàlvula d'escapament (4-1-0) i el fluid s'introdueix en el motor durant la carrera d'admissió (0-1). Aquest fet queda representat gràficament en el diagrama P/V de la Figura 5.1 per una línia horitzontal discontinua. Aquests processos (1-0 i 0-1) s'anul·len teòricament entre ells, donant una pèrdua o guany de calor nuls. Així doncs, en el diagrama P/V del cicle Otto ideal només es considerarà el cicle tancat.

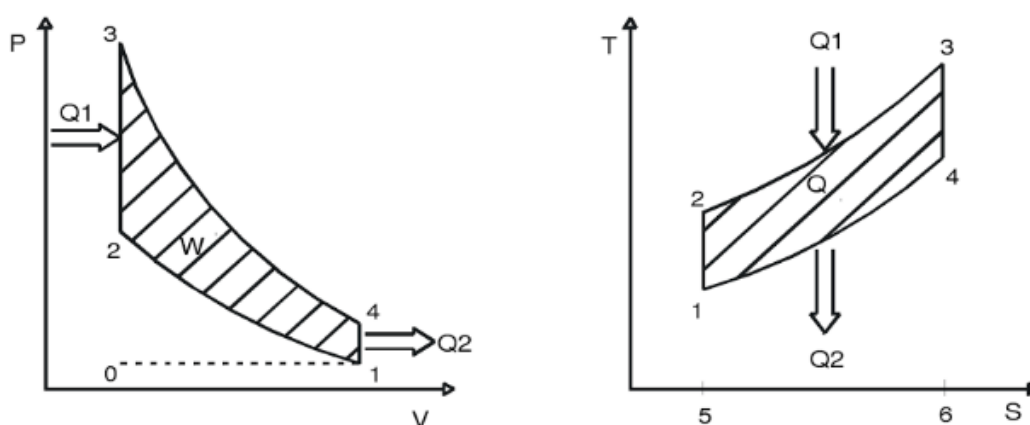


Figura 5.1. Cicle Otto en coordenades P/V i T/S (Font: Jesús A. Álvarez i Ismael Callejón [10])

5.1.2. Funcionament cicle Dièsel

És el cicle de referència assignat als motors d'encesa per compressió per explicar de forma simple i teòrica els processos.

La diferència fonamental entre el cicle Dièsel i el cicle Otto està en la fase d'aportació de calor. En el cicle Otto la calor és introduïda a volum constant i en el cicle dièsel es introduïda a pressió constant. Una altra diferència entre els dos cicles es troba en la relació de compressió: per als motors dièsel es troba entorn del 16 al 24, mentre que per als motors d'encesa per espurna varia entre el 5 i el 10 [7]. Els dos tipus requereixen la màxima relació de compressió per millorar el rendiment. Tot i això, condicionats pel combustible, els motors d'encesa provocada no han de superar una certa relació de compressió per no patir efectes com el picat, que es el dany que es produeix a les bieles quan es produeix l'explosió de la barreja abans de temps, mentre que els motors Dièsel requereixen una relació de compressió mínima per garantir l'encesa per compressió i a partir d'una determinada compressió l'augment de rendiment ja no compensa l'augment de costos i pes del motor capaç de resistir les pressions que es generaran.

Com es pot veure a la Figura 5.2, el cicle està format per quatre línies tèrmiques:

- Compressió adiabàtica (1-2)
- Aportació de calor a pressió constant (2-3): provinent de l'augment de temperatura que es produeix en quant l'aire és comprimit, Q_1 .
- Expansió adiabàtica (3-4): expansió, corresponent al treball realitzat pel fluid.
- Extracció de calor a volum constant (4-1): extracció instantània de la calor Q_2 .

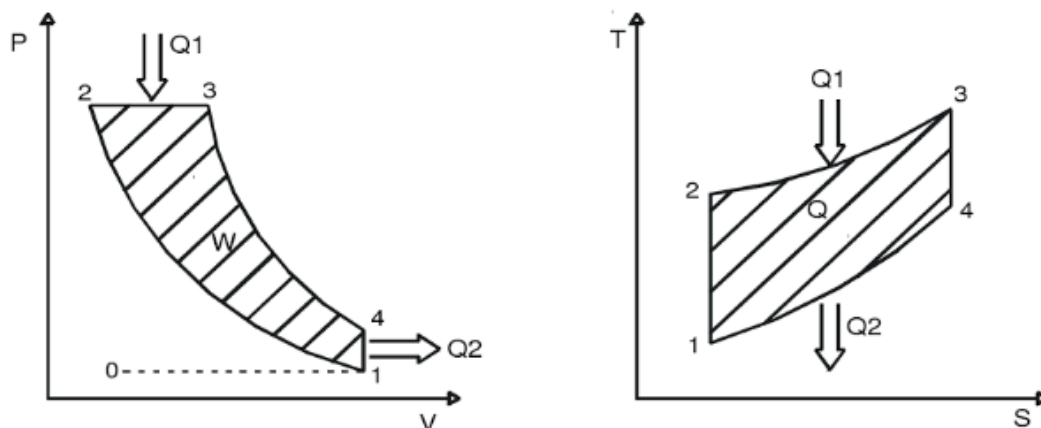


Figura 5.2. Cicle Dièsel en coordenades P/V i T/S (Font: Jesús A. Álvarez i Ismael Callejón [10])

5.1.3. Operació amb motor dièsel o motor de gasolina

Hi ha una diferència significativa entre els motors dièsel i els motors de gasolina pel que fa al mètode d'ignició que s'empra en cadascun per fer-los idonis per al funcionament amb gas pobre; mentre que en el motor dièsel s'usa la compressió de l'aire i l'augment conseqüent de temperatura d'aquest per a la ignició del combustible, en els motors de gasolina s'obté la ignició mitjançant una espurna que crea la bugia del mateix motor.

Pel que fa al rati de compressió, tal com s'ha explicat en l'apartat anterior, degut a que els dièsel treballen sense l'ajuda d'una guspira, han de tenir un rati de compressió molt més elevat que els de gasolina. Aquest fet fa que les peces dels motors dièsel estiguin sotmeses a un estres mecànic superior als motors de benzina, motiu pel qual els seus respectius dissenys són molt més robustos que els de benzina.

Per altra banda, l'eficiència tèrmica dels motors dièsel sol estar per sobre de la dels de gasolina, ja que aquesta és directament proporcional al rati de compressió. Així doncs, per a major relació de compressió, major rendiment o potència del motor per la quantitat de volum de combustible introduït i es necessita menys combustible per produir el mateix nivell de potència.

Un motor dièsel aspira cap a l'interior de la cambra de combustió únicament aire, comprimint-lo durant la carrera de compressió abans que el combustible entri en aquesta. Per altra banda, en els motors de benzina, l'aire es mescla amb el combustible dins d'un carburador abans de ser introduït a la cambra de combustió durant la carrera d'aspiració.

A la Taula 5.1. es poden observar les principals diferències:

Taula 5.1. *Característiques principals d'un motor dièsel i un d'explosió (Schäpfer, P. and Tobler, J. [7]).*

	Motor dièsel	Motor d'explosió
Combustible	Dièsel	Gasolina
Rati de compressió	16-24	5-10
Sistema d'ignició	Compressió	Guspira
Eficiència	25-35%	15-25%

Per a l'adaptació a l'operació amb gas pobre en el motor de gasolina se succiona la barreja d'aire i gas durant la carrera d'aspiració i la ignició es crea amb una guspira al final de la carrera de compressió. D'aquesta manera, gràcies a la guspira, el motor de gasolina pot funcionar amb el gas produït sense l'aportació de cap altre combustible. Aquest fet és bastant convenient si el que es busca és independència d'altres combustibles per generar electricitat de manera sostenible. Tot i això, els motors de benzina no són tant robustos com els dièsel, el seu rendiment tèrmic és inferior i la potència elèctrica dels grups electrògens comercialitzats a Europa és inferior als 10 kWe, tenint en compte que es volen produir uns 20 kWe i que el rendiment del motor funcionant amb gas pobre disminueix, s'haurà de buscar un motor capaç de produir més de la potència elèctrica desitjada i modificar-lo per a poder funcionar amb gas pobre, aquest motor haurà de ser de cicle Dièsel convertit a cicle Otto.

5.2. Motor dièsel

5.2.1. Principi de funcionament

De motors dièsel n'hi ha de dos i de quatre temps, el funcionament convencional és de 4 temps: admissió, compressió, expansió i expulsió.

Un motor dièsel funciona mitjançant la ignició del combustible al ser injectat molt polvoritzat i amb alta pressió en la càmera de combustió, que conté aire a una temperatura suficientment alta com per

a què el líquid combustioni i que així no hi hagi la necessitat d'espurna com en els motors de benzina. En la següent figura es pot observar l'interior d'un motor dièsel i les peces de les que està compost:

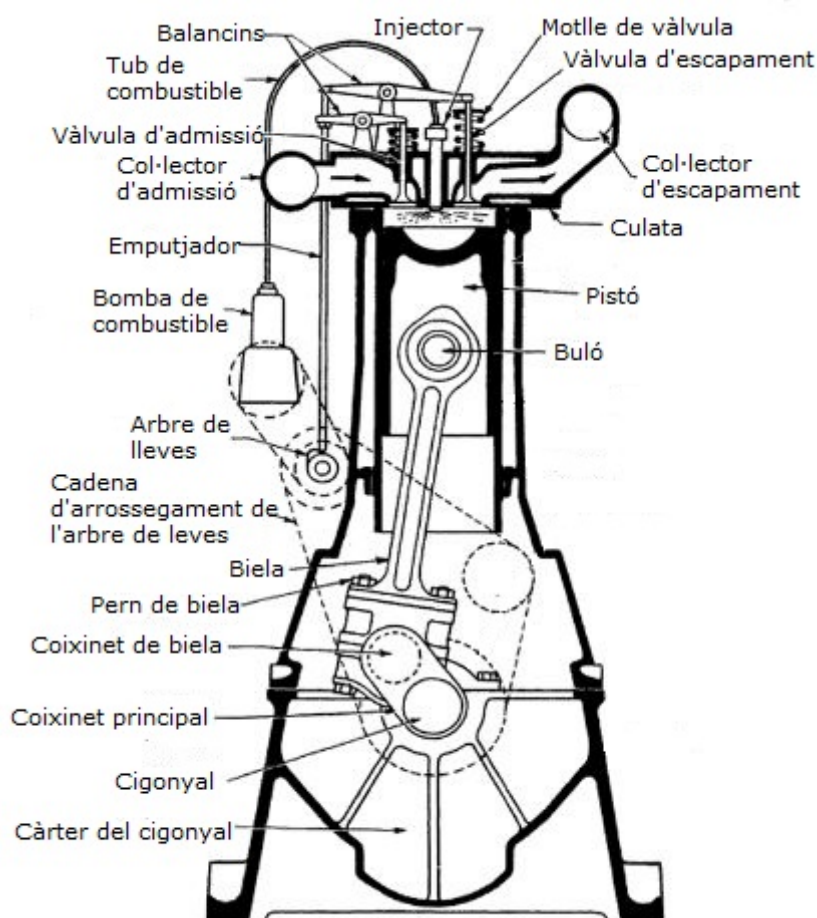


Figura 5.3. Aspecte d'un motor dièsel (Font: Edgar J. Kates i William E. Luck [11])

L'aire entra a la cambra de combustió durant el primer temps, admissió. La temperatura que inicia la combustió procedeix de la elevació de temperatura que es produeix durant el segon temps del motor, la compressió, en la que l'aire contingut en la cambra de combustió és comprimit. El combustible s'injecta durant el tercer temps, explosió, a la part superior de la càmera de combustió a alta pressió des d'uns orificis molt petits que té l'injector de manera que es polvoritza i es mescla amb l'aire a alta temperatura i alta pressió. Com a resultat, la mescla s'inflama molt ràpidament. Aquesta combustió ocasiona que, durant el tercer temps, el gas contingut en la càmera s'expandeixi impulsant el pistó cap enfora.

Aquesta expansió, a diferència del motor de gasolina, es adiabàtica és a dir, que no intercanvia calor, i genera un moviment rectilini a través de la carrera del pistó. La biela transmet aquest moviment al cigonyal, al que fa girar, transformant el moviment rectilini del pistó en un moviment de rotació.

Gràcies a la inèrcia d'aquest moviment giratori, el motor no es para i el pistó torna a empènyer el gas, expulsant-lo per la vàlvula d'escapament durant el quart temps, expulsió. Finalment, el pistó retrocedeix de nou permetent l'entrada d'una nova barreja gas-aire.

5.2.2. Característiques que s'esperen del motor dièsel

Des d'un punt de vista termodinàmic, els motors de combustió accionats per un gas pobre com és el cas, degut a que aquest té un PCI inferior al del dièsel, han de treballar amb un volum constant de combustible i amb un dispositiu especial d'ignició que ajudi a la combustió del gas, com per exemple, una bugia, és per això que el motor dièsel haurà de ser modificat.

La composició química i humitat que es troba en el gas produït depèn de la magnitud de la càrrega específica o també anomenada hearth load, es tracta de la producció específica màxima capaç de produir el gasificador (apartat 6.3.1), així com de les propietats del combustible utilitzat. Per tant, els motors que operen amb constància i el disseny dels quals estigui caracteritzat per una gran cilindrada, una baixa velocitat de rotació i vàlvules amb secció gran, és a dir, motors amb un bon rendiment volumètric, generalment son més idonis per al funcionament amb biogàs que els motors petits i compactes d'alta velocitat amb diverses condicions d'operació [13].

Per altra banda, interessa que el motor sigui capaç de funcionar amb continuïtat per cobrir la demanda energètica en tot moment.

La potència elèctrica que es pretén aconseguir és de 20 kWe, tenint en compte que el rendiment del motor disminuirà, s'haurà de buscar un motor de potència superior a la desitjada.

5.3. Potència del motor

5.3.1. Disminució del rendiment en operar amb gas pobre

L'eficiència tèrmica dels motors dièsel sota bones condicions es considera que és d'entre el 30 i el 40% [10]. El fet que aquest treballi amb un gas pobre produeix que la seva eficiència decaigui. Teòricament, el motor de gasolina treballant amb el gas produït pateix una pèrdua de potència tèrmica del 30% [3], és a dir, la seva eficiència tèrmica és el 70% de la obtinguda amb gasolina. Les causes que provoquen una pèrdua de potència s'exposen a continuació:

- Baixa densitat de la mescla.
- El poder calorífic de la mescla gas-aire és inferior al de la mescla dièsel-aire.
- Temperatura massa elevada de la mescla pot produir també pèrdues; segons el llibre "The Swedish Experience 1939-1945", a una temperatura de l'aire de 25°C, una temperatura del

gas de 40°C i a 1bar de pressió es poden generar unes pèrdues de fins al 23% [3]. És per això que és tant important el refredament del gas abans d'entrar al motor.

- El contingut d'humitat a la mescla també genera pèrdues de potència. Si la biomassa conté un 20% d'humitat, es formarà aproximadament entre 0,3 i 0,4 kg d'aigua per cada kg de biomassa [3]; part d'aquesta aigua acompanyarà al gas de síntesi en forma de vapor, quan aquest es mescli amb l'aire de la barreja, que es troba a una temperatura inferior, cap la possibilitat de que el vapor d'aigua es condensi. L'efecte d'aquestes gotes d'aigua pel motor pot ser semblant al del quitrà.

5.3.2. Adaptació del motor dièsel per a l'operació amb gas pobre

Bàsicament, tots els motors de combustió poden ser modificats per operar amb gas pobre per tal d'augmentar la potència i la fiabilitat d'operació ja que les dues disminueixen degut a les propietats d'aquest. El cost de la conversió, però, variarà en funció el disseny original del motor i les seves condicions d'operació.

L'adaptació dels motors dièsel per al funcionament amb gas pobre es basa en fer-ne la conversió de motor dièsel a motor de cicle Otto modificant l'índex de compressió i instal·lant un sistema d'encesa per espurna.

L'índex de compressió és el numero que permet mesurar la proporció en volum de mescla que s'ha comprimit en la cambra de combustió. Es defineix per la següent equació:

$$RC = \frac{\pi/4 * d^2 * s + V_c}{V_c} \quad \text{(Eq. 5.1)}$$

On:

- V_c = volum de la cambra de combustió
- d = diàmetre cilindre
- s = carrera del pistó

Tal com s'observa a la Figura 5.4 l'índex de compressió va estretament lligat a l'eficiència tèrmica del motor:

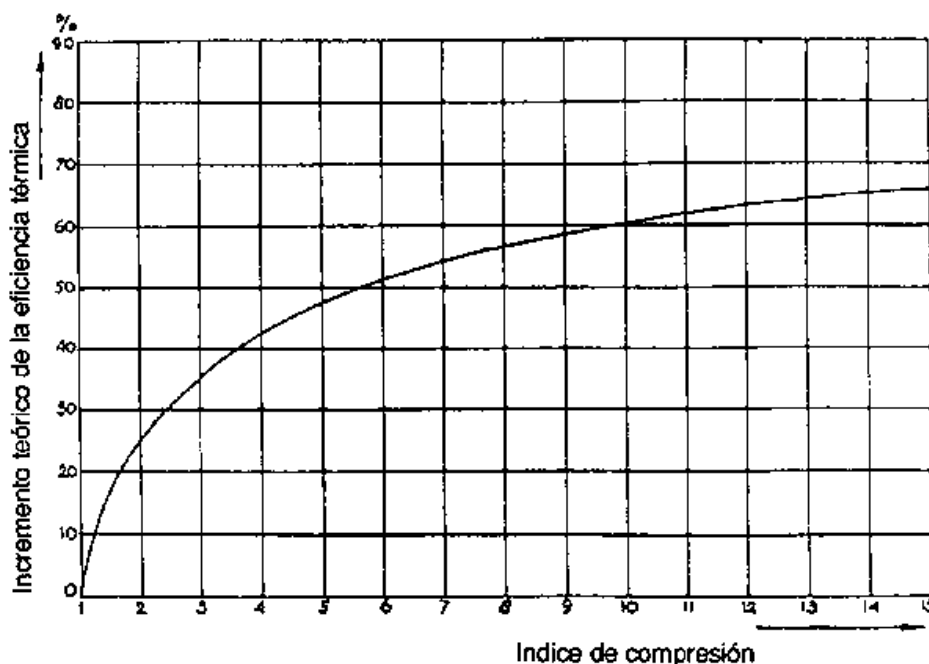


Figura 5.4. Relació entre l'índex de compressió i eficiència tèrmica d'un motor (Font: FAO [1])

L'índex possible de compressió està limitat pel número d'octans que té el combustible, que és una mesura de a quin índex de compressió esdevé la detonació del combustible, si l'índex de compressió és superior al permès pel combustible pot perjudicar el motor. Els ratis de compressió dels motors de cycle dièsel, normalment sobre l'ordre de 20:1, solen ser d'un rang doble als del motor de cycle Otto, que són sobre l'ordre de 10:1 [10]. La mescla de gas pobre i aire permet funcionar amb un índex de compressió superior de fins a 11:1 [1]. És per això que al transformar el motor de cycle dièsel a cycle Otto s'ha de disminuir l'índex de compressió. Aquest canvi no suposarà cap problema pel funcionament del motor ja que les peces d'aquest estaran acostumades a funcionar amb l'estrès mecànic corresponent al seu rati de compressió original. És més, farà que el motor sigui més robust i a més a més deixarà espai per a la bugia a la cambra de combustió.

Pel que fa al mètode d'ignició, com que el gas pobre no té un poder calorífic suficient per combustiona mitjançant la compressió, s'haurà d'instal·lar una bugia al conducte d'injecció.

Una altra possibilitat seria fer funcionar el motor dièsel amb el seu cycle normal, sense ser transformat a cycle Otto, tot fent-lo funcionar amb el sistema de "doble combustible" [1], mitjançant el qual el motor proporciona del 0 al 90% de la potència a base de gas pobre i afegint part de combustible líquid per a l'encesa de la mescla gas-aire. L'avantatge d'aquest sistema és que permet treballar només amb dièsel en cas que el gasificador no funcioni o hi hagi manca de biomassa. Per altra banda, no permet treballar sola i únicament amb el gas pobre, a diferència de si es fa la conversió a cycle Otto. És per això que, ja que l'objectiu d'aquest projecte és generar electricitat de la

manera més sostenible i eficient possible mitjançant la biomassa, que es decideix fer la conversió del motor dièsel a cicle Otto.

També s'hauria de substituir o modificar el tub d'admissió, ja que, originalment, aquest està dissenyat per aspirar només aire, en el cas d'operació amb gas combustible aquest ha d'aspirar aire barrejat amb gas, això s'aconsegueix instal·lant un carburador que creï la mescla abans d'aquesta ser introduïda a la cambra de combustió. Es podria controlar la quantitat d'aire i gas en la mescla mitjançant una vàlvula operada a mà a l'entrada d'aire a la cambra de combustió i fent-la funcionar de forma regular per obtenir la màxima potència de sortida del motor. No obstant, s'ha d'anar molt en compte a l'hora d'usar nous ratis per la mescla en comptes de l'estequíomètric, degut a que l'excés d'aire podria causar major disminució de l'eficiència; per exemple, un 20% d'aire en excés correspon a unes pèrdues aproximades del 10% [3].

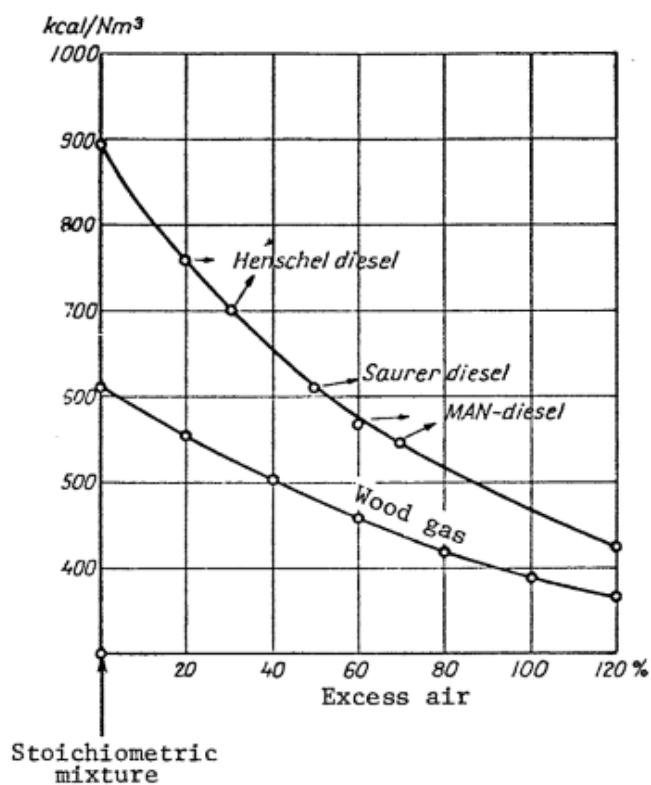


Figura 5.5. Poder calorífic de la mescla aire-combustible en funció de l'aire en excés a la mescla (Font: U.Blomquist, E.Bohr [3])

Per altra banda, per a l'operació s'hauria de controlar el temps d'ignició ja que degut a la baixa velocitat de combustió de la mescla de gas i aire, és a dir, degut a l'elevat octanatge, s'ha d'avançar el temps d'ignició. S'ha trobat que quan el motor de benzina opera amb la mescla gas-aire, quan millor funciona és quan el temps d'ignició està avançat entre 5 i 15° més respecte a l'avançament durant

l'operació amb gasolina [1], fet que comporta avançaments d'encesa d'entre 30 i 40° abans del Punt Mort Superior (PMS).

5.3.3. Tria del motor en funció de la seva cilindrada

Com s'ha explicat en els apartats anteriors d'aquest capítol, la potència del motor haurà de ser superior a la desitjada degut a la disminució del rendiment del motor al operar amb gas pobre. Per escollir exactament el motor idoni pel obtenir 20 kWe es procedeix a calcular la cilindrada necessària. Per a tal objectiu, s'haurà d'obtenir el cabal volumètric de mescla aire-gas necessari per produir la potència elèctrica desitjada. Primer de tot s'haurà de calcular la proporció d'aire necessària per a la combustió dels gasos combustibles del gas pobre. La FAO proporciona els valors de les quantitats d'oxigen necessàries per a la combustió completa dels components del combustible. Com que el gas que s'utilitzarà per fer la mescla que s'injectarà a la cambra de combustió del motor és l'aire, es treballarà sempre amb la demanda estequiomètrica d'aire. Tenint en compte que la quantitat d'oxigen a l'aire és d'aproximadament del 20 %, queda que la demanda estequiomètrica és la que es mostra a la Taula 5.2.:

Taula 5.2. Demanda estequiomètrica d'oxigen i aire dels components combustibles del gas (Font: FAO [1])

Gas	Dosat estequiomètric d'oxigen [m ³ _{oxigen} /m ³ _{combustible}]	Dosat estequiomètric d'aire [m ³ _{aire} /m ³ _{combustible}]
Metà (CH ₄)	2	10
Hidrogen (H ₂)	0,5	5
Monòxid de carboni (CO)	0,5	5

És important destacar que al llarg del procés de combustió duta a terme al MACI es creen uns gasos perjudicials anomenats gasos NOx. Tot i això, el % en volum d'aquests en el gas és tant baix que no es té en compte en els càlculs. El fet que del procés de combustió en resultin tants pocs gasos és gràcies a que la biomassa utilitzada conté una proporció molt baixa de nitrogen, a més a més, aquests gasos NOx es produeixen quan la temperatura de combustió és molt elevada, i en el cas de combustió amb gas pobre la temperatura no és tant elevada com en el cas dels motors dièsel.

Per altra banda, també es necessita el poder calorífic, les densitats i les proporcions dels components del gas de síntesi. A la Taula 5.3 es troben els paràmetres necessaris per al càlcul del cabal que ha d'entrar al cilindre del MACI per generar 20 kWe:

Taula 5.3. Característiques dels components del gas pobre (Font: elaboració pròpia)

Component	Densitat [kg/m ³]	% vol al gas pobre	Dosat estequiomètric [kg _{aire} /kg _{combustible}]	Poder calorífic [kW/kg]
CH ₄	0,78	2%	15,24	13,94
H ₂	0,09	19%	32,89	33,33
CO	1,14	21%	2,60	2,33
CO ₂	1,98	12%	-	-
N ₂	1,25	46%	-	-
C	-	-	-	-

La densitat del gas pobre es calcula mitjançant les proporcions de cadascun dels components:

$$\text{Densitat gas} \left[\frac{\text{kg}_{\text{gas}}}{\text{m}^3_{\text{gas}}} \right] = \sum \text{Massa combustible per } 1\text{m}^3 \text{ de gas} \left[\frac{\text{kg}_{\text{comb}}}{\text{m}^3_{\text{gas}}} \right] = \text{densitat} \left[\frac{\text{kg}_{\text{comb}}}{\text{m}^3_{\text{comb}}} \right] \cdot \text{vol } \% \quad (\text{Eq. 5.2})$$

Mitjançant el dosat estequiomètric, es pot saber la quantitat d'aire requerida per a 1m³ de gas pobre:

$$\text{Massa aire per } 1\text{m}^3 \text{ de gas} \left[\frac{\text{kg}_{\text{aire}}}{\text{m}^3_{\text{gas}}} \right] = \sum \text{Massa combustible per } 1\text{m}^3 \text{ de gas} \left[\frac{\text{kg}_{\text{comb}}}{\text{m}^3_{\text{gas}}} \right] \cdot \text{Dosat estequiomètric} \left[\frac{\text{kg}_{\text{aire}}}{\text{kg}_{\text{comb}}} \right] \quad (\text{Eq. 5.3})$$

El poder calorífic de la mescla es calcularà mitjançant la massa de cada component del gas pobre i el seu respectiu poder calorífic:

$$\text{PC combustible} \left[\frac{\text{kW}}{\text{m}^3_{\text{gas}}} \right] = \sum \text{Massa per } 1\text{m}^3 \text{ de gas} \left[\frac{\text{kg}_{\text{comb}}}{\text{m}^3_{\text{gas}}} \right] \cdot \text{PC combustible} \left[\frac{\text{kW}}{\text{kg}_{\text{comb}}} \right] \quad (\text{Eq. 5.4})$$

Mitjançant la densitat del gas es pot passar el poder calorífic de kW/m³ a kW/kg. A la Taula 5.4 es poden veure els valors obtinguts a partir de les equacions descrites:

Taula 5.4. Valors per al càlcul de la cilindrada del MACI (Font: elaboració pròpia)

Component	Massa combustible per 1m ³ de gas [kg _{comb} /m ³ _{gas}]	Massa aire per 1m ³ de gas [kg _{aire} /m ³ _{gas}]	Poder cal 1m ³ de gas [kW/m ³ _{gas}]
CH4	0,02	0,24	0,22
H2	0,02	0,56	0,57
CO	0,24	0,62	0,56
CO2	0,24	-	-
N2	0,58	-	-
C	-	-	-
Σ	1,08	1,42	1,35

Es té doncs, que el poder calorífic del gas pobre és de 1,35 kW/m³, que són 4,86 MJ/m³. Es comprova així que el poder calorífic es troba dins el rang estipulat a la Taula 2.5 i que, tal com s'ha explicat en l'apartat anterior, el poder calorífic és bastant inferior al del dièsel.

Així doncs, es té que la massa d'aire per 1m³ de gas són 1,42 kg. Aquest valor es pot expressar com m³_{aire}/m³_{gas} mitjançant la densitat de l'aire (1,18 kg/m³) i també com a kg_{aire}/kg_{gas} mitjançant la densitat del gas pobre que, segons la Taula 5.4 és 1,08 kg/m³:

$$1,42 \frac{\text{kg}_{\text{aire}}}{\text{m}^3_{\text{gas}}} \cdot \frac{\text{m}^3_{\text{aire}}}{1,18 \text{kg}_{\text{aire}}} = 1,20 \frac{\text{m}^3_{\text{aire}}}{\text{m}^3_{\text{gas}}} \quad (\text{Eq. 5.5})$$

$$1,42 \frac{\text{kg}_{\text{aire}}}{\text{m}^3_{\text{gas}}} \cdot \frac{\text{m}^3_{\text{gas}}}{1,08 \text{kg}_{\text{gas}}} = 1,31 \frac{\text{kg}_{\text{aire}}}{\text{kg}_{\text{gas}}} \quad (\text{Eq. 5.6})$$

Tenint en compte que es vol produir una potència de 20 kWe, que el rendiment del generador elèctric és del 92% [12] i que el rendiment tèrmic és del 35% [11], la potència tèrmica que es pretén obtenir mitjançant la combustió del gas és:

$$\frac{20 \text{kWe}}{0,92 \cdot 0,35} = 62,11 \text{kWt} \quad (\text{Eq. 5.7})$$

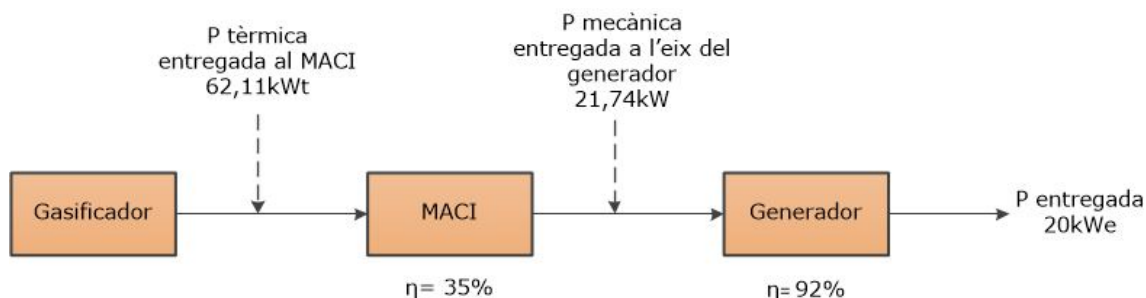


Figura 5.6. Esquema de la instal·lació completa i els rendiments que afecten a la sortida d'aquesta (Font: elaboració pròpia)

Un cop sabuda la potència tèrmica requerida i el poder calorífic del gas pobre (Taula 5.4), es pot saber la quantitat de gas que ha de combustionar per obtenir la potència desitjada:

$$62,11kWt * \frac{m_{gas}^3}{1,35kW} = 46,17 m_{gas}^3 \quad (\text{Eq. 5.8})$$

Mitjançant el dosat estequiomètric es pot calcular la quantitat d'aire requerida per a la combustió del volum requerit de gas:

$$46,17 m_{gas}^3 * 1,20 \frac{m_{aire}^3}{m_{gas}^3} = 55,40m_{aire}^3 \quad (\text{Eq. 5.9})$$

Així doncs, s'arriba a la conclusió que el motor ha d'absorbir la suma dels volums d'aire i gas, és a dir, 101,17m³ de mescla en 1h:

$$\text{Cabal de mescla gas - aire} = 55,40m_{aire}^3 + 46,17 m_{gas}^3 = 101,7 m_{mescla}^3 \quad (\text{Eq. 5.10})$$

La cilindrada del motor és la quantitat de combustible capaç d'absorbir en una revolució en cm³, per calcular-la es tindrà en compte que els grups electrògens de la potència buscada tenen generadors de 4 pols (1500rpm) i motors de 4 temps (s'absorbeix mescla cada dues revolucions):

$$101,7 \frac{m_{mescla}^3}{h} \cdot \frac{1cm^3}{1000000m^3} * \frac{1h}{60min} * \frac{1min}{1500rev} * 2 = 2257,16cm^3 \quad (\text{Eq. 5.11})$$

Tenint en compte que el rendiment volumètric és del 80% [11] i que la quantitat real de gas combustible que s'introduirà al cilindre serà del 65% al 80% [1] el valor màxim teòric degut a les pèrdues de pressió en el recorregut fins al cilindre del motor, és a dir, durant el procés de neteja del gas:

$$\frac{2257,16cm^3}{0,80 \cdot 0,80} = 3526,82 cm^3 \quad (\text{Eq. 5.12})$$

La cilindrada del motor haurà de ser de 3526,82 cm³.

5.4. Grup electrogen escollit

Finalment, un cop calculada la cilindrada necessària per a la potència desitjada es pot procedir a escollir el grup electrogen en funció d'aquesta; el grup electrogen escollit és el model D40B distribuït per Tecnoplus, la fitxa tècnica del grup electrogen es pot trobar a l'apartat 1A1 de l'Annex A.

5.4.1. MACI

El requisit per escollir un motor tèrmic era que pogués funcionar unes 7h diàries i que la seva cilindrada sigués superior a 3526,82 cm³. Així doncs, el motor tèrmic escollit ha estat aquell comercialitzat amb una cilindrada immediatament superior de la calculada, que en aquest cas és el model F4L912 de la marca DEUTZ, amb capacitat volumètrica de 3770 cm³. A la Taula 5.5 es poden observar les característiques principals del MACI del grup electrogen escollit:

Taula 5.5. Característiques del MACI escollit (Font: Deutz [18], Tecnoplus [17])

Model	DEUTZ F4L912
Nº cilindres	4
Velocitat [rpm]	1500
Freqüència [Hz]	50
Capacitat volumètrica [cm³]	3770
Tipus de refredament	aire
Bateria d'arrencada [V]	12

La fitxa tècnica del motor es pot consultar a l'apartat 1A2 de l'Annex A.

5.4.2. Generador elèctric

El generador elèctric del grup electrogen escollit és de la marca Meccalte, model 28 VL/2A. Es tracta d'un generador trifàsic de 400/231 V i amb un factor de potència igual a 0,8. És capaç de subministrar una potència en règim continu de 40 kVA, és a dir, 32 kW. D'aquesta manera es té que, per a obtenir 20 kWe, s'ha d'operar amb un grup electrogen de 32 kWe de potència en servei continu, aquest fet és degut a les pèrdues explicades en els apartats anteriors d'aquest capítol que impliquen l'ús d'un gas amb un poder calorífic inferior al del dièsel.

L'alternador del generador elèctric té 12 terminals de sortida de bobines induïdes i té un debanat amortidor, que proporciona el mateix efecte que la gàbia d'esquirol; consta d'una sèrie de barres

metàl·liques disposades paral·lelament les unes a les altres, aquestes barres uneixen els pols del generador i es tanquen pels extrems mitjançant anells metàl·lics de curtcircuit. Serveix per ajudar al generador en el moment d'engegada. El debanat amortidor serveix per:

- Arrencada de la màquina síncrona: quan la màquina síncrona es posa en marxa, abans aquesta no assoleixi la velocitat de sincronisme, es crea un moviment relatiu entre el rotor i l'estator. En aquest moment, en el debanat d'amortiment es crea un flux magnètic com una màquina d'inducció que ajuda al rotor a assolir la velocitat de sincronisme. D'aquesta manera, l'esforç de torsió és menor i, per tant, l'arrencada és també més suau. Quan la màquina ja ha assolit la velocitat de sincronisme, deixa d'haver moviment relatiu entre el rotor i l'estator i, per tant, deixa d'haver corrent al debanat d'amortiment, és aquí doncs quan el debanat d'amortiment acaba la seva funció en l'arrencada.
- Compensació oscil·lacions: durant el funcionament de la màquina síncrona poden produir-se variacions en la velocitat provocades per variacions en la càrrega, parell, etc. Sempre que la velocitat deixi de ser síncrona, es produirà un moviment relatiu entre el rotor i l'estator i el debanat amortidor proporcionarà un flux que compensarà aquestes oscil·lacions i ajudarà al rotor a tornar a girar a la velocitat de sincronisme.

A la Taula 5.6 es mostren les característiques principals del generador del grup electrogen escollit:

Taula 5.6. *Característiques del generador elèctric escollit (Font: Meccalte [19], TecnoPlus [17])*

Model	ECP 28-VL/2 A
Tensió [V]	400/231
Potència aparent [kVA]	40
Potència activa [kW]	32
Freqüència [Hz]	50
Tipus d'aïllament	H
Rotor	Amb debanat d'amortiment
Execució	Brushless

La fitxa tècnica del generador elèctric es pot consultar a l'apartat 1A3 de l'Annex A.

6. Dimensionat del gasificador

Els gasificadors són dispositius relativament simples, tant la mecànica del seu funcionament com l'alimentació i neteja del gas. Tot i això, l'èxit del seu funcionament no és tant simple. No existeixen regles determinades que indiquin la temperatura, subministrament d'aire o altres variables que influeixen en l'operació del reactor degut a que la termodinàmica dels gasificadors encara no està del tot desenvolupada. No obstant això, molts dels coneixements adquirits en altres camps d'estudi, com ara la combustió de l'oli, gas o carbó, poden ser aplicats per entendre i millorar els coneixements dels processos de gasificació.

6.1. Aspectes generals

Per a dimensionar el cos d'un gasificador és imprescindible conèixer els següents aspectes:

- Motor tèrmic que es vol utilitzar i les seves propietats (capacitat volumètrica, rendiment tèrmic i volumètric)
- Rendiment del generador elèctric que es vol utilitzar
- Poder Calorífic Inferior del gas de síntesi
- Biomassa a utilitzar i les seves propietats (densitat, mida, humitat...)
- Model de gasificador que es pretén obtenir

Les part a dimensionar del cos del gasificador són les esmenades a continuació:

- Tremuja de biomassa
- Reactor del gasificador
- Graella

6.2. Tremuja de biomassa

A la tremuja de biomassa, és a dir, el dipòsit de biomassa del gasificador, és on es duen a terme les etapes d'assecat i piròlisi. Aquesta pot ser de dues modalitats: per una banda, hi ha el disseny més simples, que són els que inclouen la tremuja sobre el reactor; i per altra, estan els dissenys en el quals aquesta se situa a part i amb un mecanisme d'alimentació automatitzat. Amb l'objectiu de dissenyar un gasificador robust, interessa que el sistema estigui com menys automatitzat i simple millor, és per això que s'opta per situar la tremuja per sobre del reactor.

Per al dimensionat de la tremuja s'ha de tenir en compte: la capacitat d'emmagatzematge, el millor disseny del cos de la tremuja i el sistema de tancament de la tapa.

6.2.1. Cos de la tremuja

Segons Vesa Mikkonen [13], els dipòsits de biomassa més alts i prims són els que treballen sempre amb millor fiabilitat que els plans i amples, ja que aquests faciliten el flux de biomassa. La capacitat s'ha de determinar en funció de la freqüència amb la que es vulgui anar recarregant la tremuja de la biomassa, la viabilitat de la seva construcció i la velocitat de consum d'aquesta. Per motius de prevenció de riscos, la reposició de biomassa no s'ha de fer quan ja quasi no en quedi al dipòsit; sinó que és important fer-ho quan encara queda com a mínim una quarta part d'aquesta en la tremuja. Això es deu a que, gràcies a la densitat d'aquesta, s'evita que en obrir la tapa del cos s'emanin gasos inflamables i que explosionin degut al contacte amb la zona de combustió.

6.2.2. Forma cònica de la tremuja

La tremuja sol tenir forma de tronc de con invertit amb l'objectiu de funcionar com un embut. Com més gran l'angle de l'estrangulament de la tremuja, menys taponaments hi haurà, però per altra banda, també hi haurà major pressió de biomassa sobre el reactor. Com que no interessa que la pressió sobre el reactor sigui elevada, es triarà l'angle més petit possible que no produeixi taponaments. Segons Vesa Mikkonen, el millor angle d'inclinació està entre el rang de 60° i 70° [13].

6.2.3. Sistema d'assecatge

Com s'ha explicat en apartats anteriors, quant menys percentatge d'humitat tingui la biomassa, millor qualitat tindrà el gas i menys quitrans es formaran. És per això que, tot i contenir poca quantitat d'humitat la biomassa escollida, en la tremuja aquesta se sotmet a un procés d'assecatge dut a terme gràcies a la calor que puja del reactor. Quan la temperatura arriba als 100°C [4], l'aigua continguda en la biomassa comença a desprendre's d'aquesta, ja que s'evapora. L'aigua extreta de la biomassa es condensa a les parets i tapa superior de la tremuja. És per aquest motiu, que es necessiten uns forats en aquesta zona per evacuar l'aigua. Aquest condensat estarà compost principalment per aigua, però també pot contenir quitrans en petites quantitats. En el cas que s'estigués treballant amb un combustible molt humit, els condensats podrien contenir també àcids orgànics a més de quitrans, que son corrosius per alguns tipus d'acer. Però aquest no és el cas d'estudi del present treball. A la Figura 6.1. es pot observar el disseny de la tremuja:

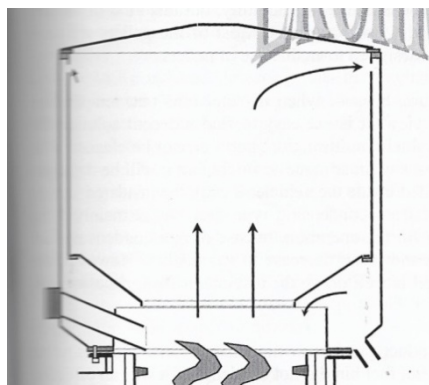


Figura 6.1. Esquema de l'aspecte de la tremuja de biomassa i per on surt l'aigua condensada (Font: Vesa Mikkonen [13])

6.3. Reactor

Al reactor és on es duen a terme les etapes de combustió i reducció. És on les temperatures són més altes al llarg de tot el procés de gasificació. Per aconseguir aquestes temperatures s'utilitzen dos mètodes:

- Fer una reducció del diàmetre de pas a una certa alçada del reactor. A aquesta reducció se l'anomena estrangulament o hearth (apartat 6.3.1.).
- Introduir aire (agent gasificant) a la zona de l'estrangulament en proporcions insuficients per a la combustió completa però suficients per facilitar les reaccions exotèrmiques, que necessiten oxigen. Aquestes reaccions són les que ajuden a augmentar la temperatura ja que alliberen energia en forma de calor.

Ja s'ha explicat al Capítol 3 que el tipus de gasificador que es dissenyarà serà de tir invertit o Downdraft. Venselaar [14] ha classificat uns quants tipus d'aquests gasificadors en funció del seu tipus d'estrangulament. Aquests es poden observar a la Figura 6.2.

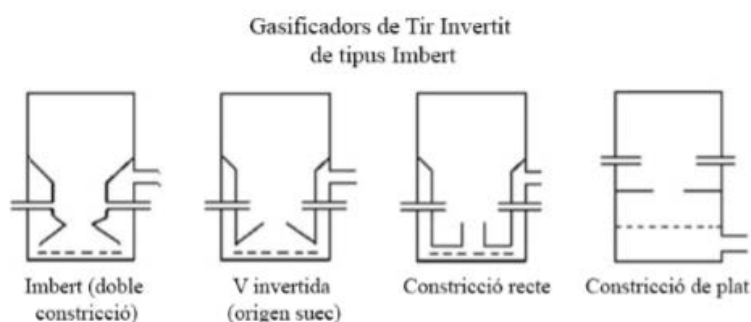


Figura 6.2. Classificació de tipus d'estrangulaments (Font: Venselaar [14], Lladó Jaume [15])

El disseny proposat tant per la Food and Agriculture Organisation of the United Nations [1] com pel Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems, de B. Reed i A. Das [6] és el de V invertida. A la Figura 6.3. es mostren les parts del reactor que es dimensionaran i la nomenclatura utilitzada:

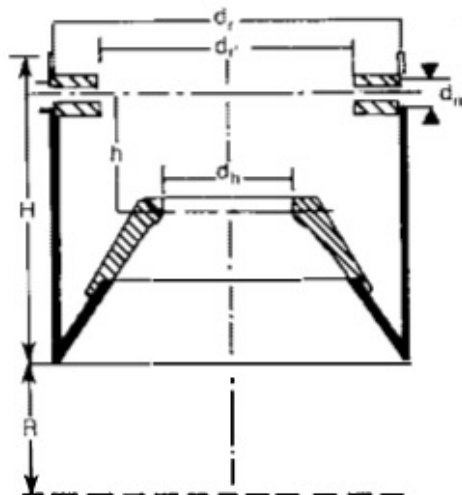


Figura 6.3. Parts a dimensionar del reactor i la seva respectiva nomenclatura (Font: Reed and Das [6])

On:

d_r = diàmetre gran del reactor

d_r' = diàmetre de la circumferència que formen els extrems dels injectors

d_m = diàmetre dels injectors

n = número de toveres

d_h = diàmetre de l'estrangulament

h = alçada a la que s'han de trobar les toveres respecte l'estrangulament

H = alçada total del reactor

R = alçada del llit

β = Inclinació estrangulament

6.3.1. Càrrega específica o hearth load

A l'hora de dimensionar un gasificador es té en compte un concepte anomenat hearth load, B_{hr} , o càrrega específica i s'expressa en unitats de volum dividides per unitats d'hora i àrea per la qual passa el gas: $Nm^3/cm^2 \cdot h$, on la N vol dir que està en condicions normals (1atm i 0°C). El que aquest paràmetre indica és la producció específica màxima capaç de produir un gasificador.

També es pot expressar en unitat d'espai entre unitats de temps: m/s. En aquest cas, doncs, s'anomenaria velocitat superficial, V_s , i expressaria la velocitat del gas quan passa per la part més estreta del gasificador, l'estrangulament. La relació entre V_s i B_h és de $B_h = 2.8V_s$.

Els valors mínims de B_h depenen fonamentalment de l'aïllament tèrmic que s'aconsegueix a la zona de combustió i estanqueïtat (capacitat de mantenir la temperatura). Quan el gasificador treballa per sota del valor mínim de la càrrega específica, 0,23 [6], la temperatura al reactor disminueix molt i acaba per produir quitrans amb un factor d'entre 2,5 i 3 [1], és a dir, que acaba subministrant una potència d'entre 2,5 i 3 vegades més petita. És per aquest motiu, doncs, que sempre es dimensionarà el gasificador amb el valor màxim de la càrrega específica. Aquest pot ser limitat per molts factors, com ara la integritat mecànica de l'estructura de la graella dins el gasificador, grau d'agitació i temps disponible de conversió. Però basant-se en l'experiència sueca, s'ha realitzat un anàlisi de les característiques de disseny del gasificador downdraft i s'ha obtingut un valor màxim normalitzat de hearth load de $0,9 \text{ Nm}^3/\text{cm}^2\cdot\text{h}$ [6], és a dir, en 1h passaran $0,9\text{m}^3$ de gas per cada cm^2 . Expressat en velocitat superficial, es tindria que el valor màxim de V_s és de :

$$V_s = \frac{0,9 \text{ m}^3}{\text{cm}^2 \cdot \text{h}} \cdot \frac{100^2 \text{ cm}^2}{1 \text{ m}^2} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = 2,5 \text{ m/s} \quad (\text{Eq. 6.1})$$

A partir de la càrrega específica B_h i el cabal volumètric del gas que s'injecta al MACI es pot extreure el diàmetre de l'estrangulament D_h mitjançant la següent equació:

$$\text{Area estrangulament } [\text{cm}^2] = \text{cabal volumètric} \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} \right] \cdot \text{Hearth load}^{-1} \left[\frac{\text{cm}^2 \cdot \text{h}}{\text{m}^3} \right] \quad (\text{Eq. 6.2})$$

$$d_h [\text{cm}] = \sqrt{\frac{A_{\text{estrangulament}} \cdot 4}{\pi}} \quad (\text{Eq. 6.3})$$

A continuació es descriuen dos mètodes a seguir per al dimensionat del gasificador, un proposat per la Food and Agriculture Organisation of the United Nations (FAO)[1] i l'altre pe Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems, de B. Reed i A. Das [6].

6.3.2. FAO

Com s'ha explicat en els apartats anteriors, es necessita el cabal volumètric per obtenir el diàmetre de l'estrangulament i, a partir d'aquest, obtenir la resta.

Cabal volumètric

Per calcular el cabal volumètric que entra al cilindre del motor la FAO proposa fer-ho a partir del volum del cilindre, el número de revolucions per minut i l'eficiència volumètrica del MACI, valors que apareixen a la fitxa de característiques del motor.

El volum del cilindre i les revolucions per minut són un valor constant que es pot extreure del full de característiques del motor. L'eficiència volumètrica del motor es defineix com la relació entre la pressió real del gas al cilindre i la pressió normal (1 atm.), normalment, quan els motors funcionen a les velocitats de disseny, mostren eficiències volumètriques que varien entre 0,7 i 0,9. En aquest estudi s'utilitzarà el valor mig que és el que proposen Edgar J. Kates i William E. Luck, és a dir, del 80% [11].

Segons la FAO, la quantitat real de gas combustible que s'introduirà al cilindre serà del 0,65 al 0,8 el valor màxim teòric degut a les pèrdues de pressió en el recorregut (procés de neteja i refredament) fins al cilindre que fan caure la pressió real del gas al cilindre. En el cas d'estudi, com que el gas creat pel gasificador ja és de bastanta qualitat, el recorregut de neteja abans d'arribar al motor no caldrà que estigui format per molt aparells. És per això que el cabal volumètric calculat es multiplicarà per 0,8 [1].

Així doncs, al cilindre del motor altern de combustió interna hi entrarà una mescla de gas pobre i aire el cabal volumètric de la qual s'obté amb la següent equació:

$$Cab\ vol\ m\ e\ s\ c\ l\ a \left[\frac{m^3}{h} \right] = \frac{2}{T} \cdot n [min^{-1}] \cdot \frac{60 \text{ min}}{1 h} \cdot vol\ um \text{ cilindre} [m^3] \cdot \eta_v \cdot 0,8 \quad (\text{Eq. 6.4})$$

On:

T = numero de temps del motor

n= numero de revolucions per minut

η_v = rendiment volumètric

Taula 6.1. *Valors extrets del full de característiques del grup electrogen escollit (Font: Tecnoplus [17])*

<i>T</i>	4
<i>n</i>	1500
<i>Capacitat volumètrica [cm³]</i>	3770

Així doncs, s'obté que el cabal volumètric de la mescla gas-aire és:

$$\frac{2}{4} \cdot 1500 \text{ min}^{-1} \cdot \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} \cdot \frac{3770}{10^6} \text{ m}^3 \cdot 0,8 \cdot 0,8 = 108,57 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \quad (\text{Eq. 6.5})$$

La relació de m³ d'aire necessaris per cada m³ de gas s'ha obtingut al capítol 5, aquest valor és de 1,2 m³ d'aire per cada m³ e gas, així doncs, la relació gas-mescla és de 1:2,2. Per obtenir el cabal volumètric de gas de síntesi es fa el següent factor de conversió:

$$\text{Cabla volumètric}_{\text{gas}} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right] = \text{Cabla volumètric}_{\text{mescla}} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right] \cdot \frac{\text{m}^3_{\text{gas}}}{\text{m}^3_{\text{mescla}}} \quad (\text{Eq. 6.6})$$

$$108,57 \frac{\text{m}^3_{\text{mescla}}}{\text{h}} \cdot \frac{1 \text{ m}^3_{\text{gas}}}{2,2 \text{ m}^3_{\text{mescla}}} = 49,35 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \quad (\text{Eq. 6.7})$$

D'aquesta manera s'ha obtingut que el cabal volumètric de gas pobre que ha de produir el gasificador és de $49,35 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Nm}^3}{\text{h}}$

Càlcul del diàmetre de l'estrangulament

Així doncs, es té la càrrega específica B_h expressada en $\text{Nm}^3/\text{cm}^2 \cdot \text{h}$ i igual a 0,9 i el cabal volumètric en m^3/h . Amb un factor de conversió s'extreu l'àrea de l'estrangulament i de l'àrea es pot extreure el diàmetre:

$$49,35 \frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} \cdot \frac{\text{cm}^2 \cdot \text{h}}{0,9 \text{ m}^3} = 54,83 \text{ cm}^2 \quad (\text{Eq. 6.8})$$

$$d_h = \sqrt{\frac{A \cdot 4}{\pi}} = \sqrt{\frac{54,83 \cdot 4}{\pi}} = 8,35 \text{ cm} = 83,35 \text{ mm} \quad (\text{Eq. 6.9})$$

La resta de paràmetres a dimensionar s'obtenen en funció del diàmetre de l'estrangulament mitjançant taules i gràfics que proporciona la FAO[1].

Càlcul de la resta de paràmetres

Taula 6.2. Numero de injectors apropiats per a motors de quatre temps i el seu respectiu diàmetre[mm] en funció del diàmetre de l'estrangulament (Font: FAO [1])

d_h	70	80	90	100	120	130	150	170	190	220	270	300
d_m	10,5	9	10	11	12,7	13,5	15	14,3	16	18	22	24
n	3	5	5	5	5	5	5	7	7	7	7	7

S'obté, doncs, que per a un diàmetre de l'estrangulament de 83,35 mm el gasificador ha de tenir 5 injectors d'aire. El diàmetre dels injectors s'obté interpolant, el valor numèric obtingut és de 9,89 mm de diàmetre. Mitjançant la Figura 6.4 es pot obtenir l'altura a la que han d'estar els injectors respecte l'estrangulament:

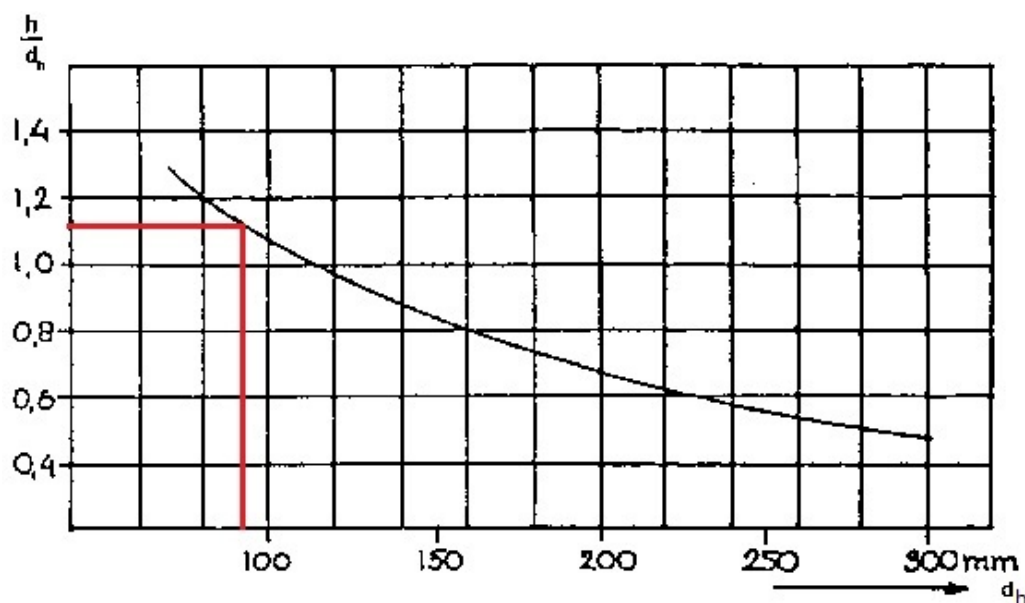


Figura 6.4. Altura del pla dels injectors sobre l'estrangulament del reactor en funció del diàmetre de l'estrangulament (Font: FAO [1]).

La relació h/d_h és 1,15. Així doncs, l'alçada del pla dels injectors sobre l'estrangulament del reactor en funció del diàmetre de l'estrangulament és de:

$$\frac{h}{d_h} = 1,15 \rightarrow h = 1,15 \cdot 83,35 \text{ mm} = 95,85 \text{ mm} = 9,6 \text{ cm} \quad (\text{Eq. 6.10})$$

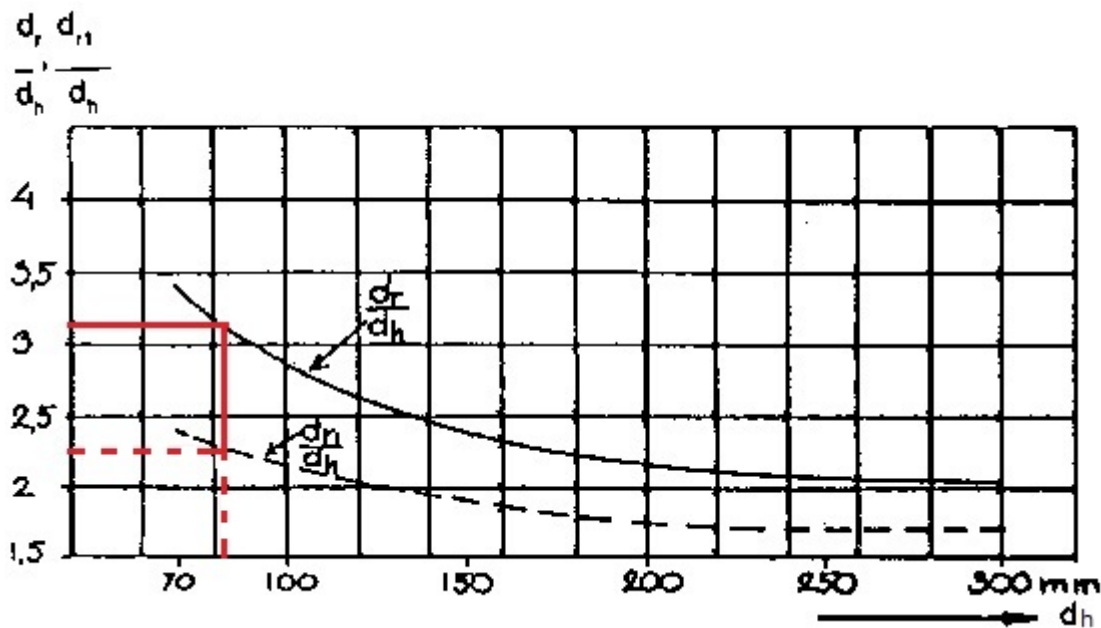


Figura 6.5. Diàmetre gran del reactor i diàmetre toveres en funció del diàmetre de l'estrangulament (Font: FAO [1]).

De la Figura 4.3. se'n poden extreure els valor de d_r , diàmetre gran del reactor (línia contínua), i d_r' , diàmetre que han de fer els injectors entre ells injectors (línia discontinua). Es té doncs:

$$\frac{d_r}{d_h} = 3,15 \rightarrow d_r = 3,15 \cdot 83,35 \text{ mm} = 262,55 \text{ mm} = 26,3 \text{ cm} \quad (\text{Eq. 6.11})$$

$$\frac{d_r'}{d_h} = 2,25 \rightarrow d_r' = 2,25 \cdot 83,35 \text{ mm} = 187,54 \text{ mm} = 18,7 \text{ cm} \quad (\text{Eq. 6.12})$$

Per altra banda, també es proposen les restriccions anomenades a continuació:

- La inclinació de l'estrangulament, β , ha d'estar entre els 45° i els 60° .
- El diàmetre del reactor a l'alçada de l'entrada d'aire ha de ser 10 cm major que el diàmetre de l'estrangulament en cas d'estrangulament simple com és el del gasificador que s'està dimensionant.
- L'alçada de la zona de reducció ha de ser superior a 20cm (l'alçada mitja de la zona de reducció per als gasificadors analitzats era de 32cm [1]).

Totes aquestes normes de disseny són empíriques i estan basades en experiències amb gasògens alimentats amb trossos de fusta d'una mida que varia de 3 a 5 x 6 a 8 cm.

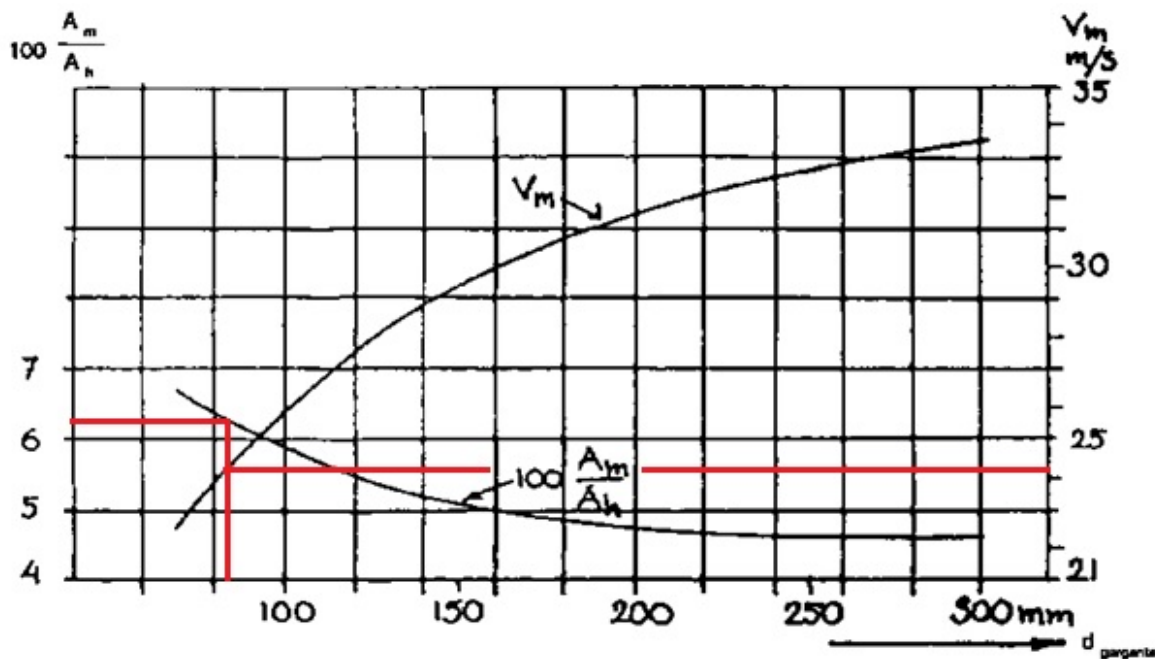


Figura 6.6. Velocitat d'aire als injectors pel funcionament de motors de quatre temps amb varis cilindres(Font: FAO [1]).

On:

V_m = Velocitat aire als injectors

V_h = Velocitat per l'estrangulament (B_h)

A_m = Àrea nozzles

A_h = Àrea estrangulament

$$V_m = 23 \text{ m/s} \quad (\text{Eq. 6.13})$$

$$100 \cdot \frac{A_m}{A_h} = 6,2 \quad (\text{Eq. 6.14})$$

$$A_m = \pi \cdot \frac{D^2}{4} = \pi \cdot \frac{(0,99 \cdot 10^{-2})^2}{4} = 7,69 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \quad (\text{Eq. 6.15})$$

$$A_h = \pi \cdot \frac{D^2}{4} = \pi \cdot \frac{(8,34 \cdot 10^{-2})^2}{4} = 5,46 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \quad (\text{Eq. 6.16})$$

Per a produir un gas net de quitrans, és imprescindible que les reaccions de combustió es donin per tota la zona de combustió. Per aconseguir això s'ha de dimensionar correctament la quantitat d'injectors, el seu diàmetre i el diàmetre que formen els seus extrems. A més a més, és també molt important que per a què l'aire es pugui distribuir uniformement per tot el reactor la velocitat de l'aire als injectors sigui la obtinguda a la Figura 6.6. Com més gran sigui el gasificador, a més velocitat haurà

de ser injectat l'aire per poder arribar a la zona central del reactor. La injecció d'aire dins del reactor es fa per la succió que crea el MACI, no es disposa de cap element que impulsi l'aire. És per això que és tant important tenir les dades del motor abans de dimensionar el gasificador. A la Figura 6.7. es pot observar l'efecte del mal dimensionat dels injectors:

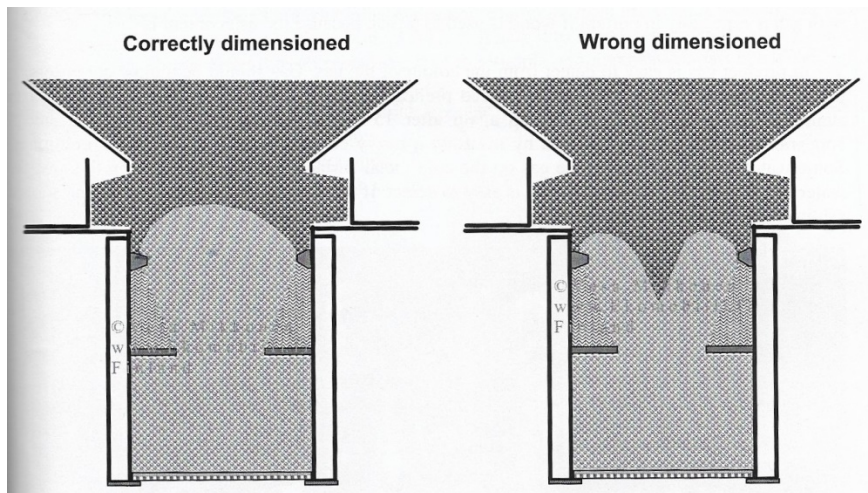


Figura 6.7. Esquema de les conseqüències del mal dimensionat dels injectors (Font: Vesa Mikkonen [13])

6.3.3. Segons Reed and Das

En el llibre de Reed and Das "Handbook of biomass Downdraft Gasifier Engine Systems" es proposa una altra metodologia tant per obtenir el cabal de gas necessari com per obtenir la resta de paràmetres a dimensionar.

Cabal volumètric

En aquesta metodologia es proposa obtenir el cabal d'aire a partir de la potència tèrmica necessària i el poder calorífic inferior (PCI) del gas. La potència tèrmica desitjada s'obté mitjançant la potència elèctrica que es vol generar i el rendiment tèrmic del motor; si la potència elèctrica són 20 kWe i el rendiment tèrmic del motor és del 35% [11]:

$$\left. \begin{array}{l} P_e = 20 \text{ kWe} \\ \eta_t = 35\% \end{array} \right\} P_t = \frac{20}{0,35} = 57,14 \text{ kWt} \quad (\text{Eq. 6.17})$$

Tot seguit et pot obtenir el cabal de gas que produirà el gasificador amb el PCI del gas obtingut en el Capítol 4, que és de $1,35 \text{ kW/m}^3_{\text{gas}}$ per hora:

$$\left. \begin{array}{l} P_t = 57,14 \text{ kWt} \\ \text{PCI} = 1,35 \frac{\text{kWt}}{\text{m}^3_{\text{gas}}/\text{h}} \end{array} \right\} \dot{V}_{\text{gas}} = \frac{57,14}{1,35} = 42,32 \frac{\text{m}^3_{\text{gas}}}{\text{h}} \quad (\text{Eq. 6.18})$$

Càlcul del diàmetre de l'estrangulament

Així doncs, es té la càrrega específica B_h expressada en $Nm^3/cm^2 \cdot h$ i igual a 0,9 i el cabal volumètric en m^3/h . Amb un factor de conversió s'extreu l'àrea de l'estrangulament i de l'àrea es pot extreure el diàmetre:

$$42,32 \frac{Nm^3}{h} \cdot \frac{cm^2 \cdot h}{0,9m^3} = 47,02 cm^2 \quad (\text{Eq. 6.19})$$

$$d_h = \sqrt{\frac{A \cdot 4}{\pi}} = \sqrt{\frac{47,02 \cdot 4}{\pi}} = 7,74 cm = 77,73 mm \quad (\text{Eq. 6.20})$$

La resta de paràmetres a dimensionar s'obtenen en funció del diàmetre de l'estrangulament mitjançant una taula que proporciona el manual de Reed and Das.

Obtenció de la resta de paràmetres

El manual proporciona una taula amb la que s'obtenen la resta de valors en funció del diàmetre de l'estrangulament. Entre els valors de diàmetre d'estrangulament pel quals dona informació de la resta de paràmetres no hi és el valor de diàmetre que s'ha obtingut en aquest treball, és per això que s'interpolerà entre els dos valors superiors i inferiors de diàmetre d'estrangulament, aquests són 60 i 80. Així doncs, per exemple, per obtenir el valor numèric de l'alçada a la que s'han de trobar les toveres respecte l'estrangulament:

$$h_{77,7} = h_{60} + (d_{h77,7} - d_{h60}) \cdot \frac{(h_{80} - h_{60})}{(d_{h80} - d_{h60})} \quad (\text{Eq. 6.21})$$

On:

$h_{77,7}$ = alçada a la que s'han de trobar les toveres respecte l'estrangulament per a un diàmetre de 77,7 mm.

h_{80} = alçada a la que s'han de trobar les toveres respecte l'estrangulament per a un diàmetre de 80 mm.

$d_{h77,7}$ = diàmetre de l'estrangulament de 77,7 mm.

d_{h80} = diàmetre de l'estrangulament de 80 mm.

Taula 6.3. Taula a partir de la qual s'extreuen la resta de paràmetres a dimensionar (Font: Reed and Das [6])

d_r/d_h	d_h mm	d_r mm	d_r' mm	h mm	H mm	R mm	A Num.	d_m mm	$\frac{A_m \cdot 100}{A_h}$	$\frac{d_r}{d_h}$	$\frac{h}{d_h}$	Rang de cabal de gas		Consum màxim biomassa	Velocitat aire injectors
												Max. Nm ³ /h	Min. Nm ³ /h	Kg/h	V_m m/s
268/60	60	268	150	80	256	100	5	7,5	7,8	4,5	1,33	30	4	14	22,4
268/78	78	268	173	93,3	256	100	5	8,8	6,6	3,4	1,21	42,5	4,8	20,2	22,9
268/80	80	268	176	95	256	100	5	9,0	6,4	3,3	1,19	44	5	21	23,0
268/100	100	268	202	100	256	100	5	10,5	5,5	2,7	1,00	63	8	30	24,2
268/120	120	268	216	110	256	110	5	12,5	5,0	2,2	0,92	90	12	42	26,0
300/100	100	300	208	100	275	115	5	10,5	5,5	3,0	1,00	77	10	36	29,4
300/115	115	300	228	105	275	115	5	11,5	5,0	2,6	0,92	95	12	45	30,3
300/130	130	300	248	110	275	115	5	12,5	4,6	2,3	0,85	115	15	55	31,5
300/150	150	300	258	120	275	115	5	14,0	4,4	2,0	0,80	140	18	67	30,0
400/130	130	400	258	110	370	155	7	10,5	4,6	3,1	0,85	120	17	57	32,6
400/150	135	400	258	120	370	155	7	12,0	4,5	2,7	0,80	150	21	71	32,6
400/175	175	400	308	130	370	155	7	13,5	4,2	2,3	0,74	190	26	90	31,4
400/200	200	400	318	145	370	153	7	16,0	3,9	2,0	0,73	230	33	110	31,2

6.3.4. Anàlisi dels resultats

Un cop obtinguts els valors numèrics del dimensionat del gasificador. És important comparar les dues metodologies proposades i els resultats d'aquestes per decidir les dimensions definitives. Així doncs, els valors obtinguts amb cadascuna de les metodologies són els següents:

Taula 6.4. Taula resum dels valors de dimensionat obtinguts a partir de les dues metodologies i comparació d'aquestes. Dimensions en cm.

	FAO	Reed and Das	Coincideixen \pm 0,5 cm
\dot{V} [m ³ /h]	49,35	42,32	
d_h	8,34	7,77	✓
d_r	26,30	26,80	✓
d_r'	18,75	17,30	
d_m	0,99	0,88	✓
n	5	5	✓
h	9,56	9,33	✓
H	$\geq 29,58$	25,60	
R		10	
V_m [m/s]	23,00	22,93	✓
$100 \cdot (A_m/A_h)$	6,20	6,60	✓
β	40°-65°		

Es pot comprovar com molts dels valors obtinguts amb les dues metodologies són pràcticament els mateixos i que els que difereixen, difereixen molt poc els uns dels altres. Un dels motius pels quals els valors no acaben de coincidir és per què ja s'ha començat amb el dimensionat obtenint el cabal màssic de maneres diferents, obtenint així cabals màssics i diàmetres de l'estrangulament diferents.

El procediment proposat per la FAO [1] per obtenir un valor de cabal màssic és més aconsellable que el proposat pel manual de Reed and Das [6] per què, tal com s'ha indicat a l'apartat 6.3.1., s'ha d'evitar que el gasificador treballi per sota del valor mínim de càrrega específica per què, en cas contrari, la temperatura al reactor disminueix molt, fet molt perjudicial en la qualitat del gas de sortida ja que es produeixen molts quitrans. Així doncs, s'ha de dimensionar el gasificador per assolir la potència màxima capaç de generar. Mentre que el procediment proposat pel manual de Reed and Das [6] només té en compte la potència elèctrica que es pretén obtenir, el rendiment tèrmic del

motor i el PCI del gas pobre, la FAO [1] té en compte les pèrdues de pressió al llarg del recorregut de neteja del gas, el rendiment volumètric del motor, la quantitat estequiomètrica necessària d'aire per a la combustió dels gasos combustibles del gas i, el més important, la capacitat volumètrica màxima del cilindre del motor, així que es tracta d'un càlcul més personalitzat al cas real. A més a més, el motor escollit s'ha triat a partir del cabal mínim necessari per produir 20 kWe, però la cilindrada del motor escollit pot absorbir inclòs més cabal per produir més potència en cas de ser necessari. És per això que interessa també tenir en compte la capacitat cilíndrica màxima del motor.

Per altra banda, s'han obtingut les dimensions mitjançant la taula facilitada pel manual de Reed and Das [6] amb el cabal volumètric obtingut mitjançant el procediment proposat per la FAO [1] per comprovar que els resultats no difereixen si s'obtenen per al mateix diàmetre d'estrangulament del reactor:

Taula 6.5. *Dimensions obtingudes amb les dues metodologies a partir del mateix cabal màssic. Dimensions en cm.*

	FAO	Reed and Das	Coincideixen \pm 0,5 cm
\dot{V}_{gas} [m ³ /h]	49,35	49,35	✓
d_h	8,34	8,34	✓
d_r	26,30	26,80	✓
d_r'	18,75	18,36	✓
d_m	0,99	0,96	✓
n	5	5	✓
h	9,58	9,58	✓
H	$\geq 29,58$	25,60	
R		10	
V_m [m/s]	23,00	23,2	✓
$100 \cdot (A_m/A_h)$	6,20	6,25	✓
β	40°-65°		

Es conclou que les dues metodologies porten a mateixos resultats sempre i quan es treballi amb el mateix valor d'entrada (cabal volumètric) i per tant, es decideix utilitzar les dimensions proposades per la FAO [1] i comprovades amb el manual de Reed and Das [6].

6.4. La graella

Hi ha dos tipus principals de graelles, les de barres i les de forats. Les de barres tenen algunes limitacions, com ara que poden arribar a encorbar-se degut a l'alta temperatura, pel que la graella deixaria de fer la seva funció, que és la de deixar passar la cendra i el gas generat, però no el carbó en l'etapa de reducció. En quan la graella es deformats, aquests trossos de carbó podrien colar-se per les seves irregularitats. És per aquest motiu, que la graella que s'utilitzarà serà de forats. El disseny (distribució i mides dels forats) es farà en funció del cabal volumètric. Mikkonen [13] proposa tres mides de graella segons el consum de gas, Taula 6.6. El consum de gas utilitzat pel dimensionat de la graella és el mateix que s'ha utilitzat pel dimensionat del reactor:

$$49,35 \frac{m^3}{h} \cdot 1000 \frac{l}{m^3} \cdot \frac{1h}{3600s} = 13,7 \frac{l}{s} \quad (\text{Eq. 6.22})$$

Taula 6.6. Dimensionat de la graella en funció del consum de gas (Font: Mikkonen [13])

\dot{V}_{gas} [l/s]	Graella			
	\varnothing ext. del plat [mm]	nº de forats	\varnothing forats [mm]	Distància entre els forats [mm]
Baix (19-28)	290	104	11	21
Mitjà (27-55)	340	144	11	21
Alt (40-80)	390	184	12	21

Així doncs, les propietats de la graella seran les pròpies d'un consum d'aire baix.

7. Neteja i refredament del gas

El gas que surt de la graella del gasificador està a una temperatura molt elevada i conté impureses sòlides i vaporoses que són perjudicials pel motor. A més a més, aquestes impureses també poden provocar efectes perjudicials en el medi ambient i en l'ésser humà. És per això que s'ha de sotmetre el gas pobre obtingut a un seguit de tractaments des de que surt de la graella del gasificador fins que arriba al grup electrogen.

7.1. Mètodes per a la neteja del gas

El gas que ha estat netejat està lliure de quitrans i substàncies que poden ser perjudicials pel motor. Així doncs, la funció de la neteja del gas és separar mecànicament les partícules sòlides de pols del gas. A més a més, la major quantitat possible d'aigua ha de ser condensada mitjançant el refredament.

L'extracció de partícules sòlides del gas generat es duu a terme principalment mitjançant els mètodes descrits a continuació. A l'hora de la pràctica, l'extracció de la pols del gas es du a terme usant diferents mecanismes de neteja a la vegada.

7.1.1. Mitjançant el propi pes de les partícules

A una velocitat baixa del gas, les partícules més grans i pesades no són arrossegades pel flux del gas i es queden retingudes al fons de la graella pel seu pes.

7.1.2. Mitjançant efectes d'inèrcia

En el cas de rotació o canvi de direcció del flux del gas, algunes partícules de pols poden ser separades del gas mitjançant l'efecte de forces inercials. Els ciclons netegen d'acord amb aquest principi.

7.1.3. Mitjançant adhesió i humitejant

L'adhesió de partícules de pols a superfícies immòbils, com ara les superfícies d'un filtre, o entre elles mateixes per a que en resultin de més grans i pesades. Com més gran sigui la força de fricció o superfície de contacte amb el flux del gas, més quantitat de partícules sòlides seran separades. Les cendres seques per si soles tenen poca capacitat d'adhesió, per aquest motiu, humitejar-les amb aigua o oli fa més efectiu el procés de neteja. Així doncs, és convenient ruixar de tant en tant les

parets del filtre amb oli o aigua per facilitar el procés d'adhesió. A més a més, d'aquesta manera també s'augmenta la capacitat d'intercanvi de calor.

Per altra banda, el fet que el flux sigui lent també afavoreix a que les partícules de pols més fines tinguin temps suficient per a perdre la seva càrrega elèctrica, cosa que fa possible la seva combinació per formar grans de pols que són més fàcils de precipitar mecànicament.

Els Scrubbers, també anomenats depuradors, depuren la contaminació de l'aire eliminant les partícules mitjançant l'adhesió i humitejant.

7.1.4. Condensació

L'intercanviador de calor empra aquest mètode. El vapor d'aigua del gas és, en gran mesura, condensat amb les partícules de pols com a nucli de condensació. La pols és aleshores precipitada juntament amb l'aigua i forma fang. Amb la finalitat d'aconseguir un bon efecte de neteja, es requereix una alta temperatura del gas abans d'entrar al intercanviador de calor i un intens refredament un cop dins el intercanviador de calor.

7.1.5. Filtratge mitjançant teles o material orgànic

Mitjançant aquest mètode s'obté una separació directa a través de la malla del filtre, que només deixa passar partícules per sota una certa mesura. Com a regla general, s'utilitzen teles de cotó, lli, etc., però també es pot usar cel·lulosa.

7.1.6. Separació en un camp d'alt voltatge

Aquest procediment, anomenat mètode de Cottrell, està basat amb el fet que les partícules de pols en un camp d'alt voltatge van de l'elèctrode negatiu al positiu, on són dipositades. El mètode original requereix de molt alt voltatge, entre 40 i 60kV, actualment, amb 15kV és suficient [3]. Aquest dispositiu implica consum elèctric i els aparells s'anomenen precipitadors electrostàtics.

A la Taula 7.1. es poden observar els contaminants que es pretenen separar del gas i quins mètodes s'utilitzen per a la neteja:

Taula 7.1. Contaminants del gas i mètodes per anul·lar-los (Font: INERCO, Divisió d'Enginyeria [7])

Contaminant	Sistemes d'eliminació
Quitrans	Craqueig tèrmic Scrubbers (Depuradors)
Partícules	Ciclons Precipitadors electrostàtics Filtre Scrubbers
Alcalins/ amoníac/ Clor	Refredament + Filtre Scrubbers
Sofre (H ₂ S, COS)	Scrubbers

El craqueig tèrmic és el procés químic pel qual es trenquen les molècules d'un comport químic per a produir així compostos més simples. Es denomina craqueig tèrmic a una temperatura de 850-900 °C [4].

7.2. Dissenys de neteja empleats i recorregut del gas escollits

El recorregut explicat a continuació que segueix el gas va des de que surt de la graella del gasificador fins que arriba al grup electrogen, passant per les següents parts en el següent ordre:

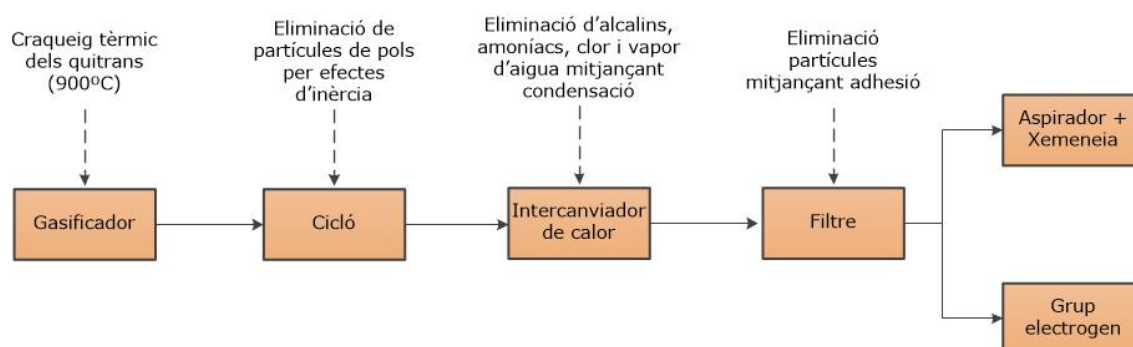


Figura 7.1. Esquema del recorregut del gas des de la sortida del gasificador fins a l'entrada al grup electrogen (Font: elaboració pròpia).

Aquest recorregut es mostra a la Figura 7.2:

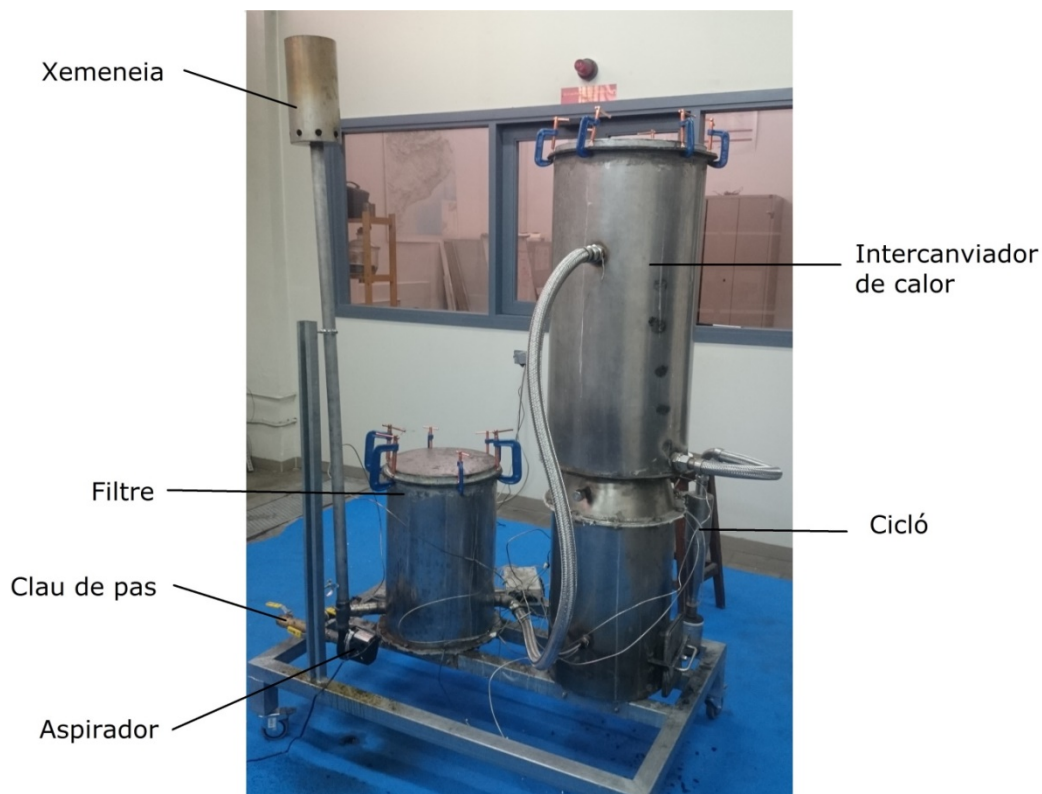


Figura 7.2. Recorregut del gas des de la sortida del gasificador fins l'entrada al grup electrogen (Font: elaboració pròpia)

En quant el gas es de prou qualitat, en comptes de ser enviat a la xemeneia, es enviat al grup electrogen. Els procediments a seguir per a l'avaluació de la qualitat del gas s'especifiquen en l'apartat 2.3.

La corrosió, desgast, i embrutiment del motor es prevenen en la mesura del possible mitjançant la neteja del gas (cicló i filtre). Per altra banda, el refredament del gas té la funció de condensar el vapor d'aigua present al gas i, a la vegada, precipitar partícules sòlides de pols.

Degut a que el dimensionat del reactor del gasificador es fa en funció del cabal de gas que necessita el motor, és molt important que el sistema de refredament i neteja del gas no oposin resistència al pas del flux, ja sigui per la seva construcció com la seva funció. Per això, totes les impureses que es vagin extraient del gas hauran de ser recollides en algun recipient d'on es puguin anar extraient periòdicament amb facilitat sense necessitat d'obstruir el pas del flux.

7.2.1. Cicló

Es tracta d'una càmera de sedimentació on l'acceleració gravitacional és substituïda per l'acceleració centrífuga.

Els ciclons constitueixen un dels medis menys costosos de recollida de partícules de pols, tant des del punt de vista d'operació com de la inversió. Són bàsicament construccions simples que no contenen parts mòbils, cosa que facilita les operacions de manteniment; poden ser fets d'una ampla gamma de materials i poden ser dissenyats per a altes temperatures, fins a 1000 °C [16], i pressions d'operació. Tenen forma cilíndrica vertical acabada en con, a la Figura 7.3 es pot veure l'aspecte d'un cicló.

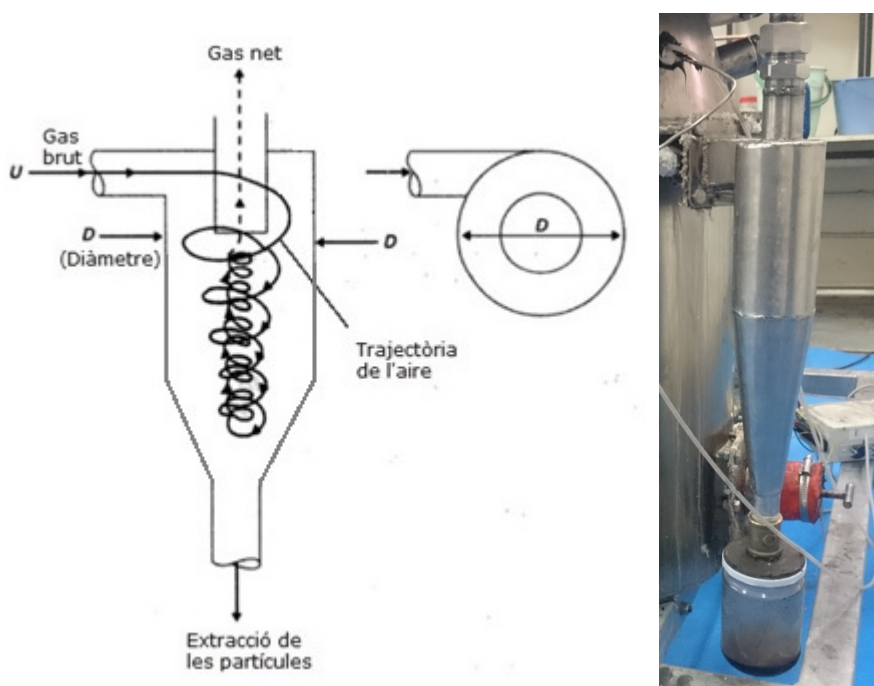


Figura 7.3. Aspecte d'un cicló (Font: *The Swedish experience* [3], elaboració pròpia)

L'aire carregat de partícules entra de manera tangencial per la part superior del cilindre i baixa per aquest degut a la força de la gravetat seguint una trajectòria en espiral fins que arriba al fons del tronc del cilindre, on les partícules més pesades queden dipositades en un contenidor que es troba a la part inferior del con. Aquest corrent en espiral del gas canvia de direcció al arribar a la part inferior del recipient i surt pel conducte situat en l'eix del cicló.

Els ciclons són adequats per a separar partícules amb diàmetres majors de $5\mu\text{m}$ [16]; tot i que també poden arribar a separar partícules encara més petites. Presenten eficiències majors que la càmera de sedimentació gravitacional, però menors que els filtres, rentadors i precipitadors electrostàtics. És

per això que s'utilitza a la sortida del gasificador, per a que extregui les partícules més grans i enviar el gas a altres sistemes més eficaços.

El disseny d'un cicló es basa normalment en famílies de ciclons que tenen ja unes proporcions definides. Les principals famílies de ciclons d'entrada tangencial són: ciclons d'alta eficiència, ciclons convencionals i ciclons d'alta capacitat. En la següent Taula es poden diferenciar les tres famílies en funció de la seva eficiència de remoció:

Taula 7.2. *Característiques dels components del gas pobre (Font: C. A. Echeverri Londoño [16])*

Família de ciclons	Eficiència de remoció (%)		
	PST	PM10	PM2,5
Convencionals	70-90	30-90	0-40
Alta eficiència	80-99	60-95	20-70
Alta capacitat	80-99	10-40	0-10

On:

PST= Partícules Suspeses Totals

PM10= Partícules Majors a 10 µm

PM2,5= Partícules Majors a 2,5 µm

Els ciclons d'alta eficiència estan dissenyats per aconseguir major remoció, és a dir, major nivell d'eficiència en quant a l'extracció de càrrega contaminant del gas, amb partícules més petites que els ciclons convencionals. Els ciclons d'alta eficiència poden remoure partícules de 5 µm amb eficiències de fins el 90%, podent assolir eficiències majors amb partícules més grans. Per altra banda, els ciclons d'alta capacitat estan dissenyats tan sols per remoure partícules majors de 20 µm, tot i que també puguin arribar a remoure partícules més petites.

Degut a que les partícules del gas creat són molt petites, es requerirà d'un cicló d'alta eficiència. El dimensionat dels ciclons ve donat per unes taules en les que es presenta la relació entre el diàmetre del cilindre del cicló i la resta de dimensions per a cada família de ciclons. En la següent Figura s'identifiquen les principals dimensions dels ciclons d'entrada tangencial:

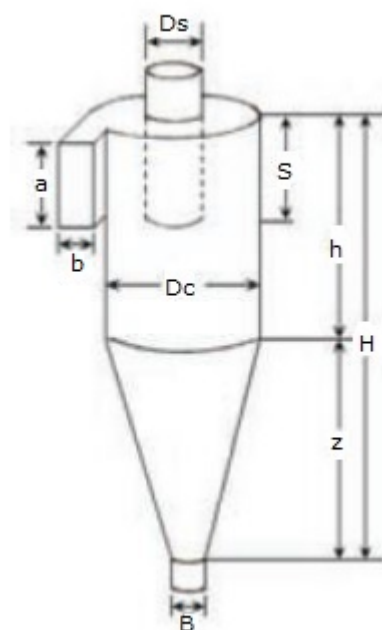


Figura 7.4. Dimensions principals d'un cicló (Font: C. A. Echeverri Londoño [16])

En la següent Taula es presenta un resum de les proporcions de les dimensions de les característiques dels ciclons d'alta eficiència en funció del seu diàmetre:

Taula 7.3. Dimensions dels ciclons d'alta eficiència. (Font: C. A. Echeverri Londoño [16])

	Nomenclatura	Relació
Diàmetre del cicló	D_c/D_c	1
Altura d'entrada	a/D_c	0,5
Ample d'entrada	b/D_c	0,2
Altura de sortida	S/D_c	0,5
Diàmetre de sortida	D_s/D_c	0,5
Altura part cilíndrica	h/D_c	1,5
Altura part cònica	z/D_c	2,5
Altura total del cicló	H/D_c	4,0
Diàmetre de sortida de les partícules	B/D_c	0,375

Per calcular les dimensions del cicló es necessita el diàmetre d'aquest, per obtenir el diàmetre del cicló s'ha de calcular l'àrea del conducte d'entrada mitjançant el cabal volumètric d'aire i la velocitat a la que aquest va; el cabal és un paràmetre conegut ($49,35\text{m}^3/\text{h}$), mentre que el valor de la velocitat és variable i ronda en l'interval de 15,2 a 27,4 m/s [16], s'agafarà un valor de 22 m/s. Així doncs:

$$\text{Cabal volumètric} = 49,35 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot \frac{1\text{h}}{3600\text{s}} = 0,0137 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad (\text{Eq. 7.1})$$

$$\text{Àrea} = \frac{\dot{V}}{v_{\text{entrada}}} = \frac{0,0137}{22} = 6,22 \cdot 10^{-4} \text{m}^2 = 6,22 \text{cm}^2 \quad (\text{Eq. 7.2})$$

$$\text{Àrea} = a \cdot b = 0,5D_c \cdot 0,2D_c = 6,22 \text{cm}^2 \rightarrow D_c = 7,88 \text{cm} \quad (\text{Eq. 7.3})$$

Mitjançant els valors donats a la Taula 7.3 es poden calcular la resta de dimensions, que es poden consultar en la següent Taula:

Taula 7.4. Dimensions dels ciclons d'alta eficiència. (Font: elaboració pròpia)

	Nomenclatura	Dimensió [cm]
Diàmetre del cicló	Dc/Dc	7,88
Altura d'entrada	a/Dc	3,94
Ample d'entrada	b/Dc	1,58
Altura de sortida	S/Dc	3,94
Diàmetre de sortida	Ds/Dc	3,94
Altura part cilíndrica	h/Dc	11,82
Altura part cònica	z/Dc	19,70
Altura total del cicló	H/Dc	31,52
Diàmetre de sortida de les partícules	B/Dc	2,96

7.2.2. Intercanviador de calor

Un cop el gas surt del cicló, encara està massa calent per ser enviat al filtre i s'ha de refredar. La principal funció del refredament del gas és evitar que l'eficiència volumètrica i la potència del motor decreixin en excés degut a l'alta temperatura. Per a tal objectiu, se sol fer passar per un tub llarg anomenat "cooler" com el de la Figura 7.3.



Figura 7.5. Aspecte d'un intercanviador de calor de gas, també anomenat "cooler" (Font: elaboració pròpia).

Amb l'objectiu d'aprofitar tota l'energia que proporciona el gasificador es decideix fer passar el intercanviador de calor al voltant de la tremuja per tal d'afavorir el procés de piròlisi mitjançant l'intercanvi de calor entre el gas del intercanviador de calor i la biomassa del dipòsit.

7.2.3. Filtre

En el filtre, el pes de les partícules de pols i les seves forces inercials determinades per la velocitat, pes i direcció del moviment actuen conjuntament amb altres forces externes de resistència.

El resultat de la fricció contra les superfícies i cantonades és la separació de les partícules de pols respecte el flux de gas. Per emmagatzemar les partícules separades del cabal, els dipòsits de pols tenen una capa de filtratge feta de peces d'una mida i forma homogènia de carbó, còdols, suro, fusta, acer, etc., a través del qual ha de passar el gas. Al llarg d'aquest procés de filtratge, el gas es veu sotmès a forces de fricció, canvis de direcció, canvis de velocitat, etc. En aquest cas, una mica d'humitat ajuda a la retenció de pols.

En un gasificador de biomassa, s'obté suficient humitat mitjançant la condensació de l'aigua del gas. En aquests casos, una aixeta de drenatge en el contenidor del filtre seria necessària. Aquests tipus de netejadors necessiten una neteja periòdica, que es podria fer ruixant el filtre amb aigua.

8. Estudi d'implantació en una microxarxa

Com s'ha explicat a l'inici d'aquest document, aquest treball consta de dues parts, la primera és la continguda en els capítols anteriors on es duu a terme el dimensionat del gasificador de biomassa. La segona, es la que es duu a terme en aquest capítol on, després d'haver estudiat la creació de gas pobre mitjançant un gasificador de biomassa i justificat el dimensionat final del gasificador, es fa l'estudi d'implantació en una microxarxa mitjançant Matpower, una eina de simulació formada per un paquet d'arxius de MATLAB tipus M-file per a la solució de fluxos de potència.

Una microxarxa es un fragment de la xarxa elèctrica amb capacitat de generar, transportar i fins i tot emmagatzemar energia elèctrica que està dissenyat i gestionat per poder mantenir el servei elèctric en desconexió amb la resta de la xarxa elèctrica.

8.1. Introducció

Per a fer l'estudi d'implantació dels gasificadors a la microxarxa, serà necessari calcular el flux de càrrega mitjançant l'eina de càlcul Matpower. El càlcul de flux de càrrega consisteix en determinar l'estat operatiu d'un sistema elèctric davant un determinat nivell de càrrega. La determinació de l'estat operatiu del sistema permet calcular si un element de la xarxa està sobrecarregat, el flux de potència activa i reactiva, el rendiment de la xarxa o si hi ha problemes de tensió als nodes. D'aquesta manera, l'analista podrà identificar el problema si és que n'hi ha i prendre una decisió que li permetrà solucionar-lo. Per a l'anàlisi del sistema es realitza un model matemàtic que té les següents suposicions sobre l'estat del sistema:

- Model estacionari. És a dir, ignora el temps, es pot representar com a conjunt d'equacions algebraiques no lineals.
- Que la xarxa es troba en equilibri. Per tant, es pot usar un equivalent monofàsic de tots els elements de la xarxa
- Es resol solament per a un estat de càrrega. És a dir, per a un sol valor dins de la corba de càrrega horària. En el cas d'estudi present, es farà l'estudi sobre el nivell de màxima demanda és a dir, el més restrictiu. Per tant, els generadors es poden modelar com a injeccions de potència activa a tensió constant (PV) i les demandes es poden modelar com ejeccions de potència activa i reactiva (PQ).

8.1.1. Generadors i càrregues

Es poden classificar els nusos d'una xarxa elèctrica en tres tipologies:

- Nusos de consum (nusos PQ): són aquells que tenen un consum conegut de potència activa i reactiva i una potència de generació nul·la activa.
- Nusos de generació (nusos PV): són els que tenen un consum conegut de potència activa i una generació coneguda de potència activa, a més a més d'un mòdul de tensió conegut.
- Nus de referència (també anomenat Slack): és l'únic nus que té un consum conegut de potència activa i se li assigna un angle de tensió que es pren de referència ($\varphi=0$).

Així doncs, com s'ha explicat en l'apartat anterior, els generadors, es modelen com injeccions de potència i seran busos PV. Per altra banda, les càrregues es modelaran com ejeccions de potència, per tant, seran busos PQ. A la Taula 8.1. es defineixen els 3 tipus de busos i per quin codi queden definits al MATPOWER:

Taula 8.1. Tipus de busos en funció dels paràmetres coneguts (Font: apunts Sistemes Elèctrics de Potència)

Tipus de bus	Codi identificatiu	Potència activa (P)	Potència reactiva (Q)	Voltatge (V)	Angle de fase (φ)
PQ/ Càrrega	1	X	X		
PV/ Generador	2	X		X	
Slack/ Referència	3			X	X

8.1.2. Línies de transmissió

Aquestes es representaran en el seu equivalent monofàsic, el qual consisteix en un model tipus π . En el que la branca sèrie presenta l'efecte resistiu i inductiu de la línia i dues branques shon que representen l'efecte capacitiu de la línia.

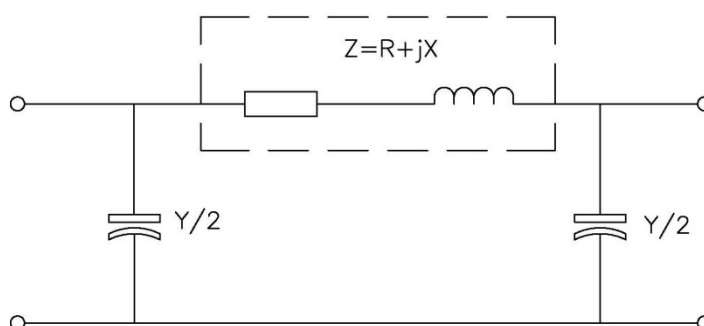


Figura 8.1. Model tipus π que imita el comportament d'una línia llarga (Font: elaboració pròpia)

8.1.3. Transformadors

S'utilitza el model equivalent monofàsic. Aquest model inclou l'efecte del nucli i el de les bobines, Malgrat tot, degut a que en el sistema de transmissió l'efecte del nucli és bastant petit comparat amb l'efecte de la bobina, aquest no es té en compte. El transformador, aleshores, es modelarà com un transformador ideal en sèrie amb una admitància, la qual inclou l'efecte i les pèrdues d'energia degut al coure i l'efecte inductiu del transformador.

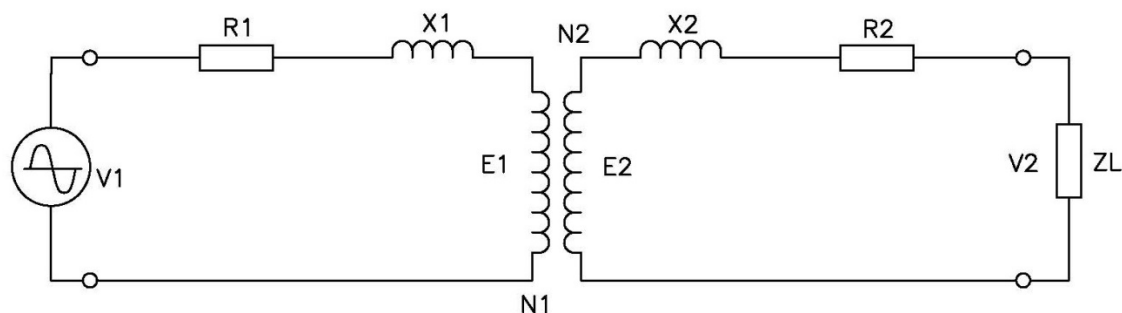


Figura 8.2. Model monofàsic que imita el comportament d'un transformador. (Font: elaboració pròpia)

8.2. Casos d'estudi

Per a fer l'estudi d'implantació dels gasificadors a la microxarxa, primer s'ha de saber quina és la màxima demanda de potència que aquesta microxarxa pot consumir de la xarxa general sense que aquesta pateixi problemes de sobretensió als busos, sobresaturació als transformadors i que les branques puguin suportar el corrent que transporten. Per a tal objectiu, primer es farà l'estudi per al cas més restrictiu: sense generació i per al moment de màxima demanda. Un cop es tingui la potència màxima consumida permesa, es procedirà a fer l'estudi del segon cas: amb generació. Durant l'estudi del segon cas s'esbrinarà en quins busos caldrà connectar els gasificadors, en quina quantitat i durant quins períodes diaris.

Per treballar amb el MATPOWER el programa exigeix que es defineixin els valors de les branques de la xarxa en pu's. A continuació es mostren les bases escollides i l'esquema de la xarxa sobre la que es farà l'estudi:

$$V_B = 50/25/0,4 \text{ kV}$$

$$S_B = 10 \text{ MVA}$$

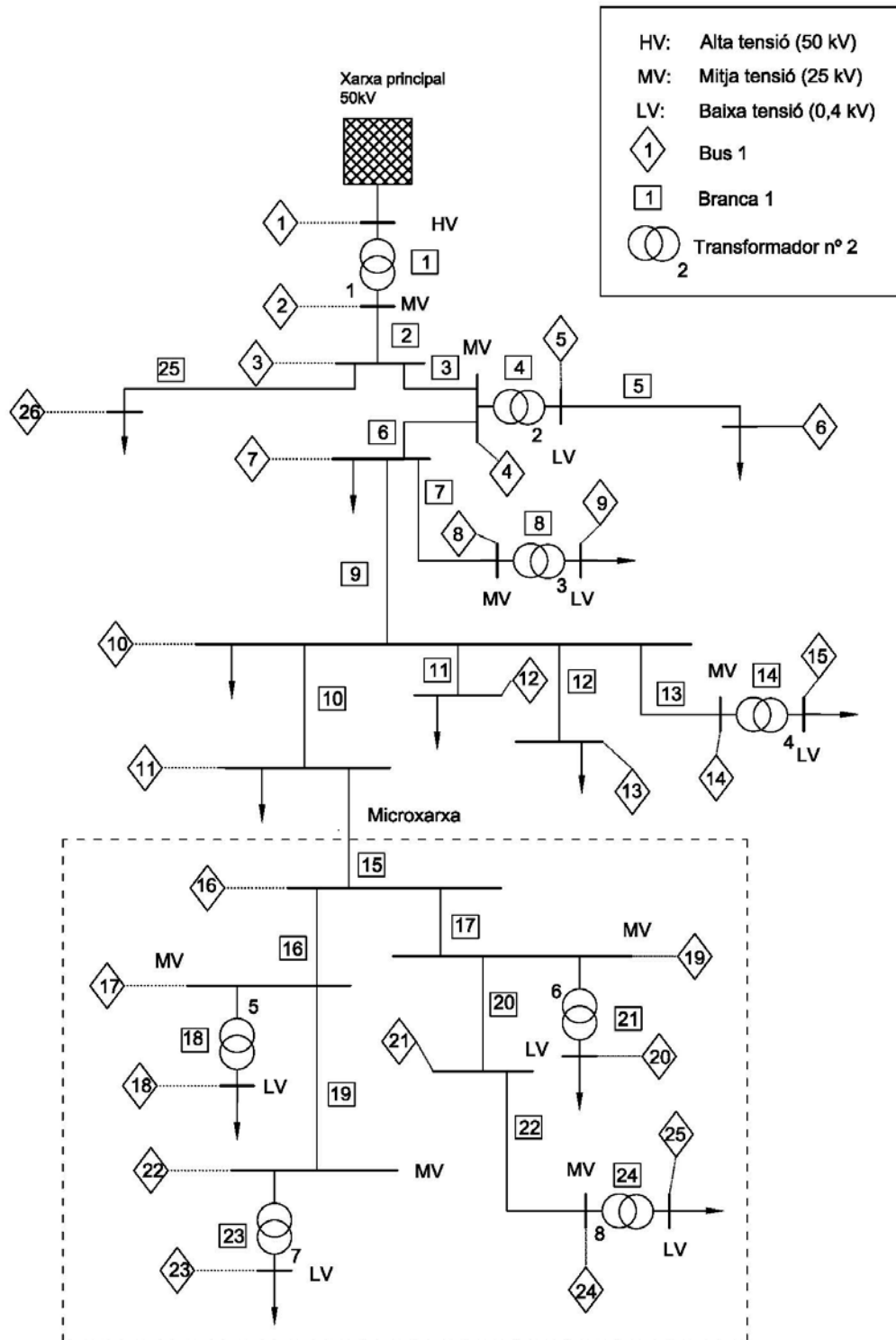


Figura 8.3. Esquema de la xarxa i la microxarxa (Font: elaboració pròpia)

Un cop escollides les tensions d'alta, baixa i mitja tensió i potència base, es poden calcular les corrents base i les resistències base:

$$Z_{B1} = \frac{V_{B1}^2}{S_B} = \frac{(50 \cdot 10^3)^2}{10^7} = 250 \Omega \quad (\text{Eq. 8.1})$$

$$I_{B1} = \frac{S_B}{\sqrt{3} \cdot V_{B1}} = \frac{10^7}{\sqrt{3} \cdot (50 \cdot 10^3)} = 115,47 \text{ A} \quad (\text{Eq. 8.2})$$

$$Z_{B2} = \frac{V_{B2}^2}{S_B} = \frac{(25 \cdot 10^3)^2}{10^7} = 62,5 \Omega \quad (\text{Eq. 8.3})$$

$$I_{B2} = \frac{S_B}{\sqrt{3} \cdot V_{B2}} = \frac{10^7}{\sqrt{3} \cdot (25 \cdot 10^3)} = 230,94 \text{ A} \quad (\text{Eq. 8.4})$$

$$Z_{B3} = \frac{V_{B3}^2}{S_B} = \frac{(0,4 \cdot 10^3)^2}{10^7} = 0,016 \Omega \quad (\text{Eq. 8.5})$$

$$I_{B3} = \frac{S_B}{\sqrt{3} \cdot V_{B3}} = \frac{10^7}{\sqrt{3} \cdot (0,4 \cdot 10^3)} = 14433,77 \text{ A} \quad (\text{Eq. 8.6})$$

Taula 8.2. Recull de les bases per a cada fragment de la xarxa (Alta, baixa i mitja tensió) (Font: elaboració pròpia).

	S_B [MVA]	V_B [kV]	Z_B [Ω]	I_B [A]
Alta tensió	10	50	250	115,47
Mitja tensió	10	25	62,5	230,94
Baixa tensió	10	0,4	0,016	14433,77

Els valors expressats en el sistema per unitat (pu) es defineixen com la relació entre el valor i la base, i s'expressen com un decimal. S'obtenen de la següent manera:

$$\text{Magnitud p. u. (per unitat)} = \frac{\text{Magnitud original}}{\text{Magnitud de referència (base)}} \quad (\text{Eq. 8.7})$$

Per a la definició dels busos, s'ha de donar la potència activa [MW] i reactiva [MVAR]. Per al càlcul de la potència reactiva s'empra un factor de potència de 0,9 i la següent equació:

$$Q = \frac{P \cdot \sin(\varphi)}{\cos(\varphi)} \quad (\text{Eq. 8.8})$$

Per trobar la tensió i potència activa als busos de la xarxa el programa utilitza el mètode de Newton Raphson. El mètode Newton Raphson és un mètode iteratiu que va obtenint valors de solució de les equacions no lineals d'una manera successiva fins a trobar el valor d'error màxim permès, en el cas de ser un sistema resoluble. Per a cada nus es defineix la diferència entre la potència especificada inicialment i la calculada en cada iteració:

$$\Delta P_i = P_i^{esp} - V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \varphi_{ij} + B_{ij} \sin \varphi_{ij}) \quad (\text{Eq. 8.9})$$

Per a $i=1,2,\dots,n_D + n_G$

On n_D és el número de busos PQ i n_G és el número de busos PV

$$Q_i = Q_i^{esp} - V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \varphi_{ij} + B_{ij} \cos \varphi_{ij}) \quad (\text{Eq. 8.10})$$

Per a $i=1,2,\dots,n_D$

On n_D és el número de busos PQ

8.2.1. Sense generació

Per a obtenir la potència activa consumida que entra pel bus on es connecta la microxarxa, el bus 11, per a totes les hores diàries s'ha creat un nou programa que avalua la potència consumida per a cada període:

```
function mpc = PowerFlowCase2

%% Bucle per calcular el flux de càrregues per a cada hora
clear all; clc;
%carreguem dades de taules excel
programa_carregar_dades;
mpopt=mpoption('out.all',2);
tmax=24;
inputflow=zeros(tmax,1);

for t=1:1:tmax
    save('time','t')
    mpc=loadcase('c033');
    results{t}=runpf(mpc,mpopt);
    save('results','results');
end

for m=1:1:24; %numero de periodes
    PotActiva(m)=results{1,m}.branch(16,14); %Potència consumida
    PotDemanda(m)=sum(DemandaMicro(m,:))/1000; %Potència demandada
end

plot(PotActiva,'r')
hold on
plot(PotDemanda,'g')
title('Potència consumida i demandada a la microxarxa')
ylabel('Potència(MW)')
xlabel('Hores (h)')
legend('Potència consumida','Potència demandada')
```

D'aquest programa s'extreu la següent Figura:

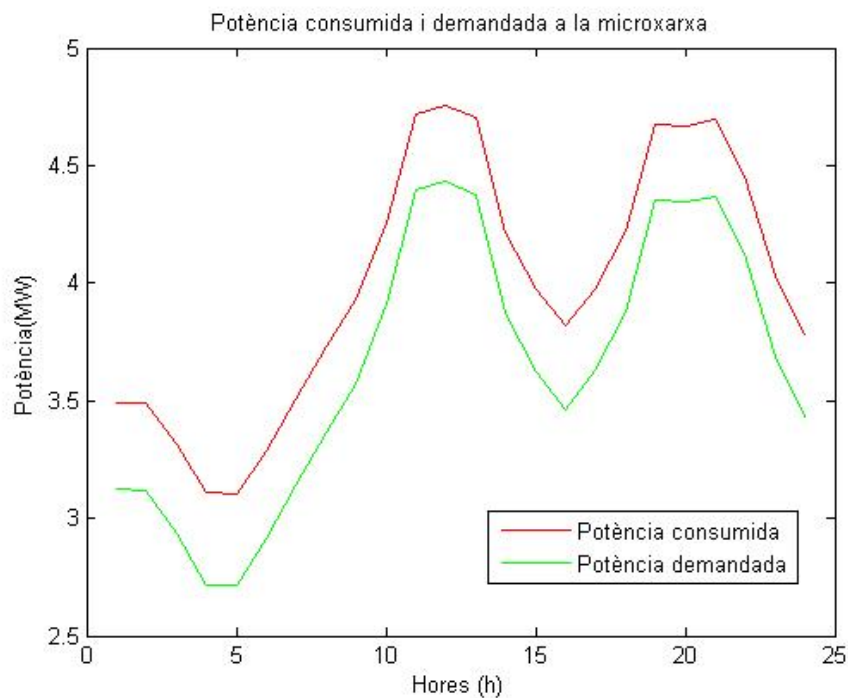


Figura 8.4. Potència demandada i consumida mesurada al punt de connexió, bus 11 (Font: elaboració pròpia).

Així doncs, en el moment de màxima demanda el sumatori de potència activa demandada per a tots els busos de la microxarxa és igual a 4,475 MW. Mentre que la potència activa consumida per al moment de màxima demanda és de 4,880 MW. Així doncs, el rendiment de la xarxa per aquell moment és de:

$$\eta = \frac{\text{Potència demandada}}{\text{Potència consumida}} \cdot 100 = \frac{4,475}{4,880} \cdot 100 = 91,70 \% \quad (\text{Eq. 8.11})$$

En aquest cas es fa l'estudi per al moment de màxima demanda sense generació. El primer que es fa amb el MATPOWER és crear un script que defineixi la xarxa per al moment de màxima demanda. A les Taules 8.1 i 8.2 es pot comprovar que el moment de màxima demanda tant per a la xarxa elèctrica general com per a la microxarxa és a les 13h. En aquest script, el primer que apareixerà serà el nom de la funció i la potència base:

```
function mpc = Definicio_xarxa_13h

%% system MVA base
mpc.baseMVA = 10;
```

Tot seguit es defineixen els busos que formen la xarxa, tot indicant el tipus de bus i la potència activa i reactiva, en MW i MVA_r, en aquest punt de la xarxa.

```

%% bus data
% bus_i type Pd Qd Gs Bs area Vm Va baseKV zone Vmax
% Vmin
mpc.bus = [
    1 3 0.0000 0.0000 0 0 1 1 0 50 1 1.1 0.9;
    2 1 0.0000 0.0000 0 0 1 1 0 25 1 1.1 0.9;
    3 1 0.0000 0.0000 0 0 1 1 0 25 1 1.1 0.9;
    4 1 0.0000 0.0000 0 0 1 1 0 25 1 1.1 0.9;
    5 1 0.0000 0.0000 0 0 1 1 0 0.4 1 1.1 0.9;
    6 1 0.2191 0.1061 0 0 1 1 0 0.4 1 1.1 0.9;
    7 1 1.0636 0.5151 0 0 1 1 0 25 1 1.1 0.9;
    8 1 0.0000 0.0000 0 0 1 1 0 25 1 1.1 0.9;
    9 1 0.5473 0.2651 0 0 1 1 0 0.4 1 1.1 0.9;
    10 1 0.9440 0.4572 0 0 1 1 0 25 1 1.1 0.9;
    11 1 0.1946 0.0943 0 0 1 1 0 25 1 1.1 0.9;
    12 1 0.7932 0.3842 0 0 1 1 0 25 1 1.1 0.9;
    13 1 0.8073 0.3910 0 0 1 1 0 25 1 1.1 0.9;
    14 1 0.0000 0.0000 0 0 1 1 0 25 1 1.1 0.9;
    15 1 0.5709 0.2765 0 0 1 1 0 0.4 1 1.1 0.9;
    16 1 0.0000 0.0000 0 0 1 1 0 25 1 1.1 0.9;
    17 1 0.0000 0.0000 0 0 1 1 0 25 1 1.1 0.9;
    18 1 0.7953 0.3852 0 0 1 1 0 0.4 1 1.1 0.9;
    19 1 0.0000 0.0000 0 0 1 1 0 25 1 1.1 0.9;
    20 1 1.0653 0.5160 0 0 1 1 0 0.4 1 1.1 0.9;
    21 1 0.0000 0.0000 0 0 1 1 0 25 1 1.1 0.9;
    22 1 0.0000 0.0000 0 0 1 1 0 25 1 1.1 0.9;
    23 1 0.8596 0.4163 0 0 1 1 0 0.4 1 1.1 0.9;
    24 1 0.0000 0.0000 0 0 1 1 0 25 1 1.1 0.9;
    25 1 1.4610 0.7076 0 0 1 1 0 0.4 1 1.1 0.9;
    26 1 0.9585 0.4642 0 0 1 1 0 25 1 1.1 0.9;
];
    
```

Tot seguit es procedeix a definir els generadors de la xarxa. En aquest cas, com que es fa sense generació i només amb demanda s'escriu com a generador de referència, Slack, la connexió a la xarxa principal d'alta tensió al bus 1.

```

%% generador data
% bus Pg Qg Qmax Qmin Vg mBase status Pmax Pmin Pc1 Pc2 Qc1min Qc1max
Qc2min Qc2max
mpc.gen = [
    1 1 0 1000 -1000 1 100 1 100 0 0 0 0 0 0 0;
];
    
```

Finalment, es defineixen les branques que componen la xarxa indicant de quin bus a quin bus van, i la seva resistència i reactància en pu's.

```

%% branch data
% fbus tbus r x b rateA rateB rateC ratio angle
status
mpc.branch = [
    1 2 0.0000 0.1000 0 150 150 150 0 0 1 -360 360;
    2 3 0.0264 0.0142 0 150 150 150 0 0 1 -360 360;
    3 4 0.0013 0.0007 0 150 150 150 0 0 1 -360 360;
    4 5 0.0000 0.2500 0 150 150 150 0 0 1 -360 360;
    5 6 0.6250 0.6250 0 150 150 150 0 0 1 -360 360;
    4 7 0.0061 0.0023 0 150 150 150 0 0 1 -360 360;
    7 8 0.0046 0.0010 0 150 150 150 0 0 1 -360 360;
    8 9 0.0000 0.2500 0 150 150 150 0 0 1 -360 360;
    7 10 0.0036 0.0013 0 150 150 150 0 0 1 -360 360;
    10 11 0.0041 0.0009 0 150 150 150 0 0 1 -360 360;
    10 12 0.0080 0.0017 0 150 150 150 0 0 1 -360 360;
    10 13 0.0082 0.0017 0 150 150 150 0 0 1 -360 360;
    10 14 0.0054 0.0011 0 150 150 150 0 0 1 -360 360;
    14 15 0.0000 0.2500 0 150 150 150 0 0 1 -360 360;
    11 16 0.0277 0.0057 0 150 150 150 0 0 1 -360 360;
    16 17 0.0065 0.0013 0 150 150 150 0 0 1 -360 360;
    16 19 0.0065 0.0013 0 150 150 150 0 0 1 -360 360;
    17 18 0.0000 0.2500 0 150 150 150 0 0 1 -360 360;
    17 22 0.0073 0.0015 0 150 150 150 0 0 1 -360 360;
    19 21 0.0058 0.0012 0 150 150 150 0 0 1 -360 360;
    19 20 0.0000 0.2500 0 150 150 150 0 0 1 -360 360;
    21 24 0.0041 0.0009 0 150 150 150 0 0 1 -360 360;
    22 23 0.0000 0.2500 0 150 150 150 0 0 1 -360 360;
    24 25 0.0000 0.2500 0 150 150 150 0 0 1 -360 360;
    3 26 0.0168 0.0091 0 150 150 150 0 0 1 -360 360;
];

return;

```

Un cop definida la xarxa al programa, es pot obtenir el flux de càrrega de la xarxa en el moment de màxima demanda.

La informació que dona el programa és la tensió per a cada bus, quins busos tenen generació i quins busos tenen càrrega i quant generen i produeixen cadascun, també dona la potència injectada i de sortida en cada branca i les pèrdues que hi ha en elles. De tota aquesta informació el que s'analitza és la tensió en pu's que hi ha en cada bus i el corrent que circula per cada branca. Per a tal objectiu, s'ha creat un programa que analitza en quins busos la caiguda de tensió és superior a 0,1 pu's (superior al 10%) posant el requisit de que la tensió mínima a cada bus ha de ser de 0,9 pu's. El programa també analitza en quines branques el corrent que hi circula és superior al permès pel material del qual estan fets els cables. Primer de tot es calcula la tensió a cada bus en forma complexa polar per que després serà necessària per al càlcul de intensitats:

```
function mpc = PowerFlowCase1

%% Càlcul de les conseqüències de la connexió de la microxarxa

programa_carregar_dades;
microxarxa = runpf('Definicio_xarxa_13h');

%Càlcul de la tensió a cada bus
for n = 1:1:26 %busos
    voltatge(n) = (microxarxa.bus(n,8)); % pu
    angle(n) = (microxarxa.bus(n,9))*(pi/180); %rad
    v(n) = (voltatge(n)*cos(angle(n)) + li*voltatge(n)*sin(angle(n)));
end

Vfinal=abs(voltatge);
```

Tot seguit, es calcula la corrent a les branques de la xarxa. Per a tal objectiu, s'utilitza la funció "makeYbus", que retorna la matriu d'admitàncies per a tots els busos de la línia i les matrius YF i YT que, multiplicades pel vector de voltatge complex, crea el vector de corrents injectades a cada branca que va des del bus "from" (YF) fins al bus "to" (YT) respectius de cada branca. També fa la conversió apropiada a p.u.:

```
%Càlcul dels corrents a les branques

mpc = loadcase('Definicio_xarxa_13h ');
[a,YF,YT] = makeYbus(mpc);
I=max(YF*transpose(v), YT*transpose(v)); % pu
Ireal = I.*Ibase;
Ifinal= abs(Ireal);
```

El que fa el programa escrit anteriorment és la matriu d'admitàncies de la xarxa, Y, com la següent i la multiplica pel vector voltatge de cada bus transposat per així obtenir el vector de corrents:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{11} & -\underline{Y}_{12} & \dots & -\underline{Y}_{1n} \\ -\underline{Y}_{21} & \underline{Y}_{22} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & -\underline{Y}_{(n-1)n} \\ -\underline{Y}_{n1} & \dots & -\underline{Y}_{n(n-1)} & \underline{Y}_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 8.12})$$

Després ho passa a Ampers multiplicant el resultat pel seu valor base.

A continuació, es mostra la part del programa que avalua els resultats obtinguts. Primerament es demana que indiqui en quins busos la caiguda de tensió és superior al 10% i en quina tensió es troben en aquelles condicions de demanda; tot seguit, es demana que indiqui en quines branques el corrent

és superior a l'admès pel material del que estan fets els cables i en quin percentatge s'excedeixen del corrent màxim permès:

```
%Bucle que evalua els resultats

for n=1:1:26 %num busos
    if Vfinal(n)-0.9<0
        disp(['Error al bus ',num2str(n),' amb tensió=
',num2str(Vfinal(n)),' pu'])
    end
end

for m=1:1:27 %num branques
    Irelativa(m)=(Ifinal(m)/Imaterial(m))*100;
    if Irelativa(m)-100>0
        disp(['Error a la branca ',num2str(m), ' sent el corrent un ',
num2str(Irelativa(m)-100), '% major del permès.'])
    end
end
```

D'aquesta manera, es pot comprovar d'una manera molt ràpida i visual com pot arribar a afectar la connexió de la microxarxa a la xarxa general per així anar disminuint la demanda d'aquesta fins al punt en que no hi hagi més problemes a la xarxa principal. Aleshores se sabrà quina és la potència màxima que la microxarxa pot demanar a la xarxa principal sense provocar problemes a la xarxa. A continuació es pot observar el que s'obté en quant s'executa el programa amb les dades de demanda originals:

```
Error al bus 25 amb tensió= 0.895 pu.
Error a la branca 2 sent el corrent un 28.534% major del permès.
Error a la branca 3 sent el corrent un 16.699% major del permès.
Error a la branca 5 sent el corrent un 0.418% major del permès.
Error a la branca 6 sent el corrent un 28.234% major del permès.
Error a la branca 9 sent el corrent un 5.746% major del permès.
Error a la branca 14 sent el corrent un 0.319% major del permès.
Error a la branca 19 sent el corrent un 40.833% major del permès.
Error a la branca 22 sent el corrent un 89.473% major del permès.
Error a la branca 25 sent el corrent un 52.406% major del permès.
Error a la branca 26 sent el corrent un 161.656% major del permès.
```

Es pot observar doncs, que hi ha problemes de sobreesaturació a tots els transformadors de la microxarxa i a certes branques de la xarxa principal. Això és degut a que la xarxa de distribució no està dimensionada per subministrar tota la potència demandada. La generació local és una possible solució per evitar el reforç de la xarxa de distribució, és a dir, haver de canviar els transformadors i seccions dels cables.

La potència demandada en el punt de connexió, bus 11, en el moment de màxima demanda és de 4,475 MW. La funció del programa creat és que, per cada cert nivell de demanda, indiqui quines branques, busos i transformadors es troben saturats.

Tot disminuint el valor de la demanda, es troba per a quina potència demandada deixen d'aparèixer saturacions en les línies, transformadors i busos de la xarxa. S'ha provat de disminuir la potència demandada en tots els busos de la microxarxa proporcionalment fins al punt que s'ha comprovat que quan la potència que circula pel bus de connexió amb la xarxa aigües a munt és de 3,7 MW, deixa d'haver saturacions als equips de la xarxa de distribució.

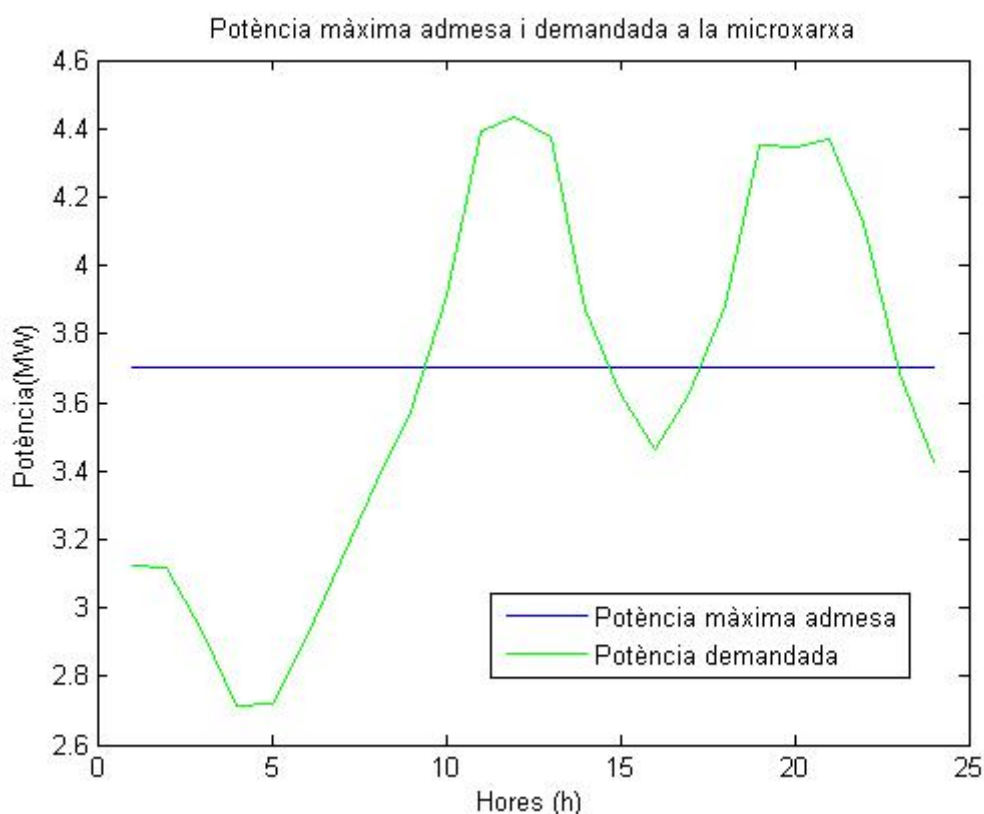


Figura 8.5. Potència en el punt de connexió (bus 11) demandada per la microxarxa i màxima admesa per la xarxa de distribució.

8.2.2. Amb generació

Un cop sabuda la potència necessària a generar per part dels gasificadors connectats a la microxarxa, gràcies a la Figura 8.5 es pot conèixer entre quins períodes serà necessari posar en marxa els gasificadors i la potència mínima necessària a generar per a cada període de temps:

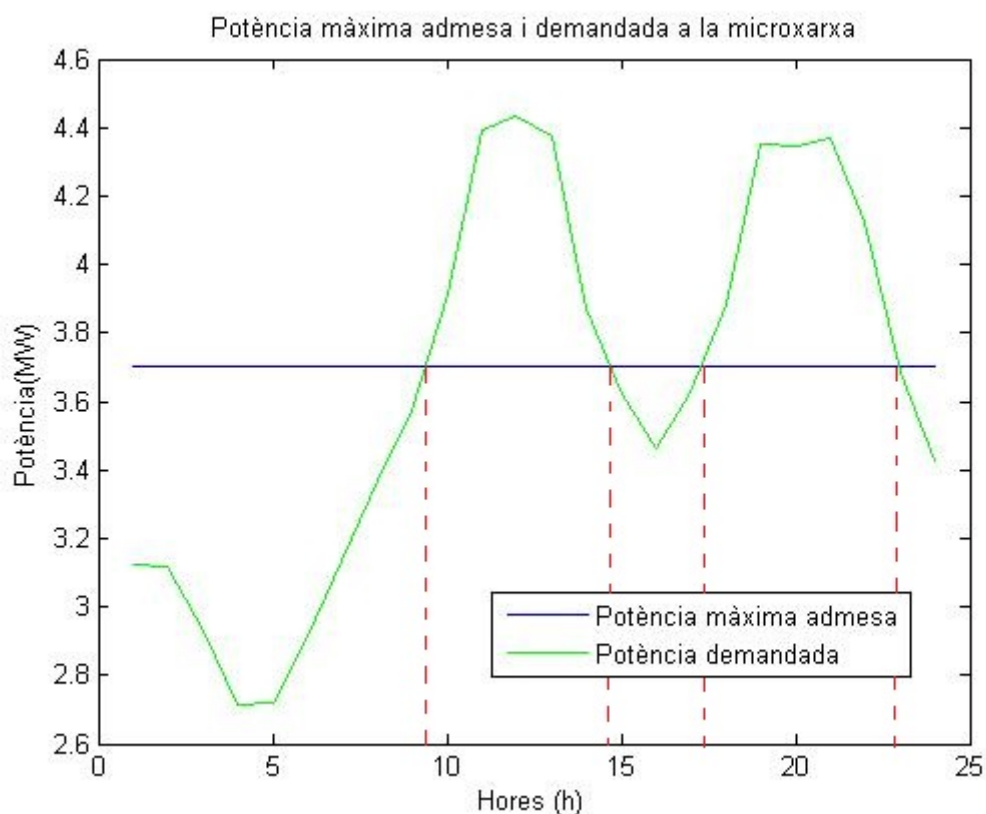


Figura 8.6. Períodes en els quals s'ha de posar en funcionament els gasificadors. Potència calculada al bus 11. (Font: elaboració pròpia)

Així doncs, s'obté que els gasificadors hauran d'estar en marxa des de les 10h fins les 15h i després des de les 19h fins les 24h.

Un cop coneguda la potència màxima que pot demandar la microxarxa de la xarxa de distribució, se sap que la quantitat de potència demandada que s'ha de reduir és la diferència entre la potència màxima demandada i admesa, és a dir, 775 kW.

Tenint en compte que la potència demandada sumada al punt de connexió, bus 11, sempre serà inferior a la potència total que circula pel bus de connexió amb la xarxa aigües a munt degut a que la xarxa de distribució tindrà pèrdues. Així doncs, a partir del rendiment de la xarxa pel moment de màxima demanda, es pot saber la potència màxima que hauran de generar els gasificadors:

$$Potència\ generada = \frac{Potència\ demandada}{\eta} \cdot 100 = \frac{775\ kW}{91,70} \cdot 100 = 845,14\ kW \quad (\text{Eq. 8.13})$$

Tenint en compte que el gasificador dimensionat ha estat dissenyat pensant una potència màxima de 20 kW, s'arriba a la conclusió que es necessiten 43 gasificadors, tot i que no caldrà que estiguin en funcionament continu ni que tampoc produeixin la màxima potència en tot moment.

Per escollir la distribució que tindran per la microxarxa s'ha decidit connectar-los en funció del percentatge en el qual s'excedeix el corrent del cas sense generació respecte el màxim permès. A la Taula 8.7 es troba un resum de quines eren les branques de la microxarxa que tenien problemes de sobresaturació i en quin percentatge s'excedia el corrent:

Taula 8.3. *Recull de problemes de sobresaturació obtinguts a la microxarxa en el cas de només demanda i numero de gasificadors que s'hi instal·laran (Font: elaboració pròpia)*

Branca	Bus from	Bus to	Transformador	% corrent	N° gasificadors
19	17	18	5	40,83	5
22	19	20	6	89,47	11
25	22	23	7	52,41	7
26	24	25	8	161,66	20

Gràcies a la potència mínima a produir pels gasificadors i la potència màxima capaç de generar cada gasificador, s'obté el numero de gasificadors necessaris a connectar a la microxarxa. Tot seguit, gràcies a la proporció del corrent que s'excedeix del permès en cada branca, es pot conèixer la distribució més adient per tota la microxarxa. I gràcies a la corba horària de potència demandada, es pot conèixer en quins períodes s'han de connectar els gasificadors i quina potència s'ha de generar, aquesta sí que es repartirà de manera proporcional per cada bus. Així doncs, la corba de potència demandada haurà d'acabar quedant com la de la Figura 8.7.:

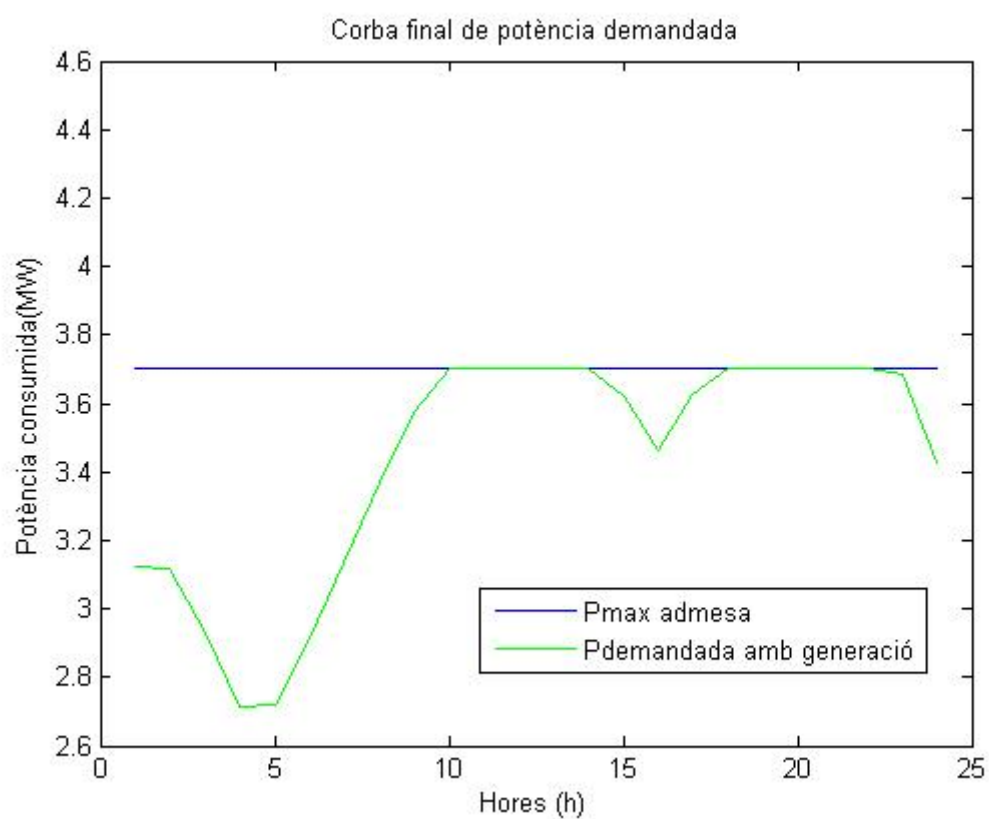


Figura 8.7. Corba de potència demandada al bus 11 després d'haver instal·lat els gasificadors (Font: elaboració pròpia).

A la Taula 8.4 es fa una proposta de potències generades a cada bus:

Taula 8.4. Dades de generació per a cada bus de la microxarxa [kW/h] (Font: elaboració pròpia)

Hora\Bus	11	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Suma
1:00	0,00	0,00	0,00	89,72	0,00	122,40	0,00	0,00	101,46	0,00	154,76	468,35
2:00	0,00	0,00	0,00	88,64	0,00	126,23	0,00	0,00	102,85	0,00	150,50	468,22
3:00	0,00	0,00	0,00	84,40	0,00	120,95	0,00	0,00	96,24	0,00	139,34	440,93
4:00	0,00	0,00	0,00	76,48	0,00	109,50	0,00	0,00	89,53	0,00	132,90	408,41
5:00	0,00	0,00	0,00	74,84	0,00	108,48	0,00	0,00	92,24	0,00	132,24	407,79
6:00	0,00	0,00	0,00	82,38	0,00	116,55	0,00	0,00	94,89	0,00	142,63	436,45
7:00	0,00	0,00	0,00	89,35	0,00	125,10	0,00	0,00	103,79	0,00	152,43	470,67
8:00	0,00	0,00	0,00	97,22	0,00	132,43	0,00	0,00	110,27	0,00	165,57	505,48
9:00	0,00	0,00	0,00	100,04	0,00	140,44	0,00	0,00	120,68	0,00	175,03	536,19
10:00	0,00	0,00	0,00	110,37	0,00	152,01	0,00	0,00	129,22	0,00	196,18	587,78
11:00	0,00	0,00	0,00	122,64	0,00	174,50	0,00	0,00	136,96	0,00	200,82	634,91
12:00	0,00	0,00	0,00	118,07	0,00	170,16	0,00	0,00	134,55	0,00	215,89	638,67
13:00	0,00	0,00	0,00	124,82	0,00	167,21	0,00	0,00	134,92	0,00	229,31	656,25
14:00	0,00	0,00	0,00	106,21	0,00	143,45	0,00	0,00	122,24	0,00	208,75	580,65
15:00	0,00	0,00	0,00	105,63	0,00	132,41	0,00	0,00	112,88	0,00	191,74	542,66
16:00	0,00	0,00	0,00	100,57	0,00	129,38	0,00	0,00	108,60	0,00	180,85	519,39
17:00	0,00	0,00	0,00	100,01	0,00	137,89	0,00	0,00	114,29	0,00	190,90	543,08
18:00	0,00	0,00	0,00	111,98	0,00	142,87	0,00	0,00	123,93	0,00	203,31	582,09
19:00	0,00	0,00	0,00	125,29	0,00	159,59	0,00	0,00	137,66	0,00	229,51	652,05
20:00	0,00	0,00	0,00	115,29	0,00	164,10	0,00	0,00	142,65	0,00	229,44	651,48
21:00	0,00	0,00	0,00	122,02	0,00	163,27	0,00	0,00	142,44	0,00	227,65	655,39
22:00	0,00	0,00	0,00	115,46	0,00	151,31	0,00	0,00	134,77	0,00	216,44	617,99
23:00	0,00	0,00	0,00	102,84	0,00	138,14	0,00	0,00	119,48	0,00	191,85	552,32
24:00	0,00	0,00	0,00	96,25	0,00	131,15	0,00	0,00	112,01	0,00	174,51	513,92

Un cop decidides les potències generades a cada bus, s'escriu a la descripció de la xarxa del programa per comprovar que no hi ha errors de sobrecàrrega ni a la xarxa ni a la microxarxa:

```

%% generador data
% bus Pg Qg Qmax Qmin Vg mBase status Pmax Pmin Pc1 Pc2 Qc1min Qc1max Qc2min
Qc2max
mpc.gen = [
1      1      0 1000 -1000 1 100 1 100 0 0 0 0 0 0 0;
18 0.1248 0.6045 1000 -1000 1 100 1 100 0 0 0 0 0 0 0;
20 0.1672 0.0801 1000 -1000 1 100 1 100 0 0 0 0 0 0 0;
23 0.1349 0.0653 1000 -1000 1 100 1 100 0 0 0 0 0 0 0;
25 0.2293 0.1111 1000 -1000 1 100 1 100 0 0 0 0 0 0 0;
];

```

Per altra banda, en la definició dels nusos aquells que tinguessin generació passarien a ser PV (codi:2) i deixarien de ser PQ (codi:1).

A la Figura 8.8 es pot apreciar l'esquema unifilar de la microxarxa amb els gasificadors instal·lats:

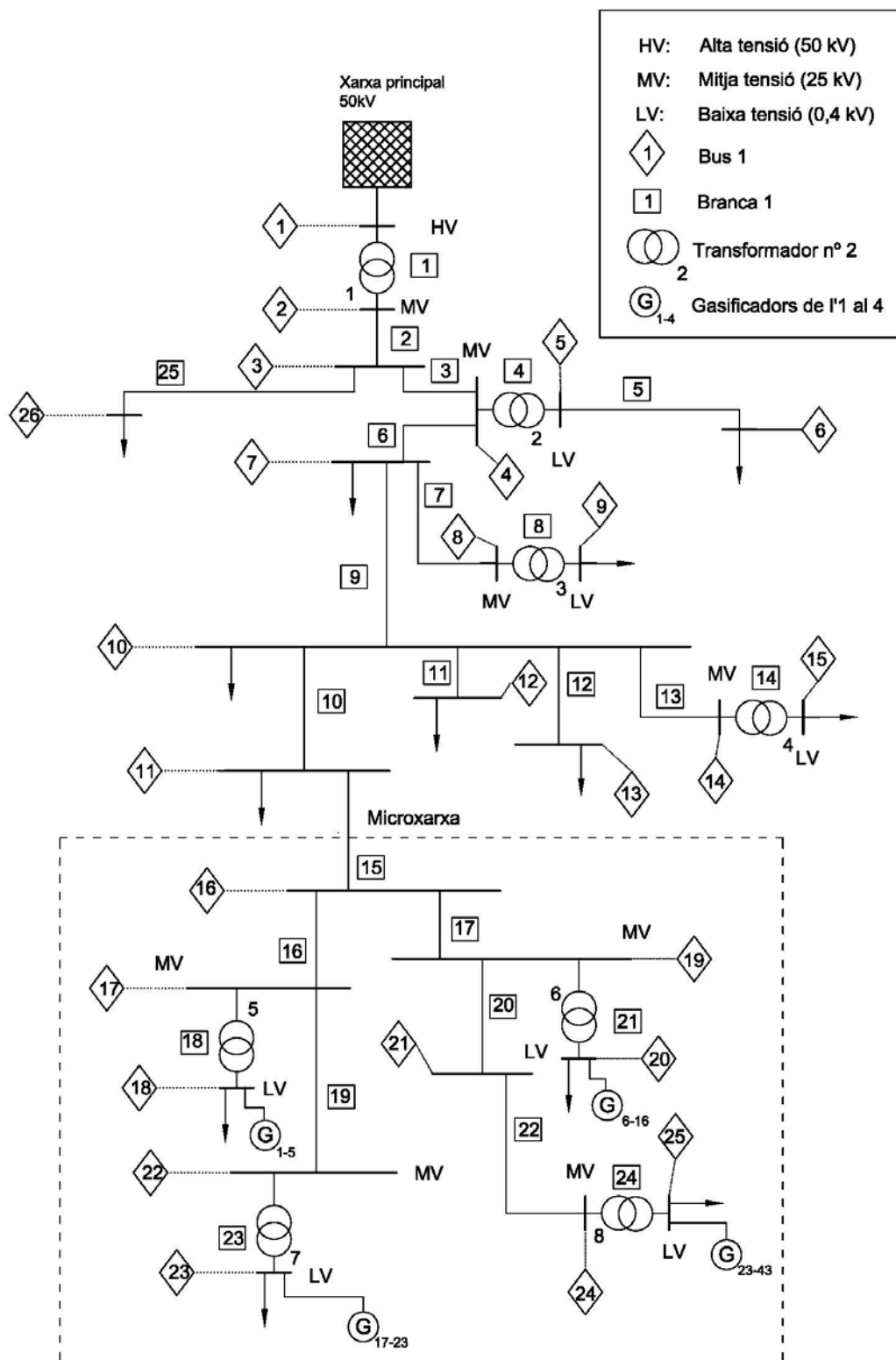


Figura 8.8. Esquema de la xarxa i microxarxa amb els gasificadors instal·lats (Font: elaboració pròpia).

9. Anàlisi de l'impacte ambiental

És molt important a l'hora de planificar estratègies i projectes d'abastiment energètic fer un anàlisi d'impacte ambiental detallat dels avantatges i inconvenients que la gasificació de biomassa pot tenir abans de decantar-se pel seu us.

9.1. Avantatges ambientals

L'ús de gas pobre obtingut com a producte de la gasificació de biomassa com a combustible en motors de combustió interna incrementa el potencial d'ús de la biomassa com a font renovable d'energia creant així noves oportunitats d'aprovisionament energètic alternatiu als combustibles fòssils, cosa que comporta importants beneficis mediambientals tals com els descrits a continuació.

9.1.1. Reducció d'emissions de CO₂ i de CH₄

El diòxid de carboni (CO₂) i el metà (CH₄) són dos dels principals gasos causants de l'efecte hivernacle. El diòxid de carboni, malgrat ser una emissió normal en qualsevol procés de combustió, només es considera com emissió contaminant quan el combustible és d'origen fòssil, ja que el contingut net del carboni sobre la superfície terrestre augmenta per ser el combustible extret de l'interior de l'escorça terrestre. En el cas de la biomassa, el diòxid de carboni generat en el procés de combustió es torna a l'atmosfera, des d'on va ser pres per la formació d'aquesta (fotosíntesi), quedant el cicle a zero. Es redueix, també, les emissions de metà, ja que al utilitzar les podes d'arbres i altres residus agrícoles per crear la biomassa amb la que es genera el gas combustible, s'evita la descomposició natural d'aquests residus i, amb això, l'emissió no controlada de metà a l'atmosfera. En la següent figura es pot observar un esquema del cicle del diòxid de carboni:

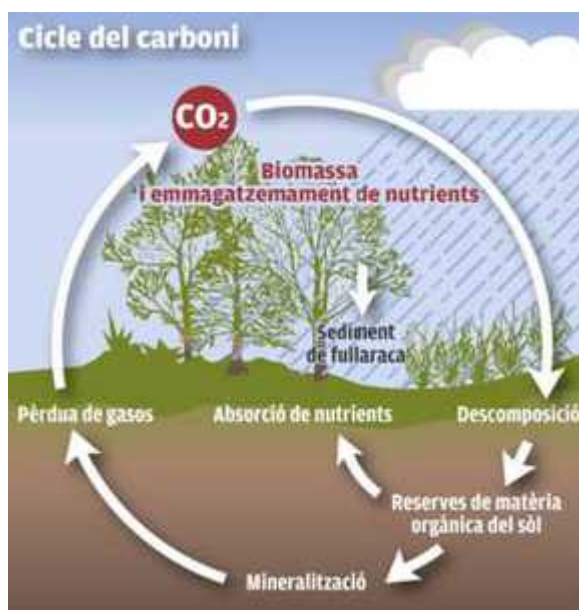


Figura 9.1. Cicle del CO₂ (Font: L'Econòmic [22]).

9.1.2. Ajuda en el maneig i disposició de deixalles

L'aprofitament de residus orgànics (agrícoles, ramaders, domèstics o industrials) com a combustible presenta diverses avantatges associades al fet que s'evita la deposició incontrolada d'aquests en la naturalesa. En primer lloc, evitant incendis, plagues, malalties vegetals, etc., que repercuteixen negativament sobre l'economia. En segon lloc, evitant també la proliferació d'agents patògens, que repercuteixen negativament sobre la salut.

9.1.3. Reducció i quasi eliminació de les emissions d'òxids de sofre

Aquestes emissions normalment es formen durant la combustió, els òxids de sofre al convertir-se en àcid sulfúric contribueixen en les pluges àcides. Aquesta reducció és degut a que la biomassa no sol tenir sofre o, si el té, es en petites quantitats, pel que el seu impacte com a causant de la pluja àcida és mínim.

9.1.4. Reducció de l'emissió d'òxids de nitrogen

Els òxids de nitrogen són un altre dels components que causen la pluja àcida, es formen durant el procés de combustió per l'oxidació a alta temperatura del nitrogen contingut a l'aire. A la biomassa es redueixen aquestes emissions degut a que les temperatures normals de combustió assolides són inferiors a les assolides amb els combustibles fòssils convencionals.

9.2. Inconvenients mediambientals

Malgrat tot, no tot són avantatges en la utilització de la biomassa i s'han de valorar tant els aspectes positius com els negatius. Els esmenats a continuació són algun dels inconvenients mediambientals que comporta la gasificació de biomassa, tant des del punt de recol·lecció de biomassa com el d'operació amb el MACI i com prevenir-los

9.2.1. Humitat en la biomassa

Un dels principals inconvenients en l'aprofitament dels recursos vegetals naturals és que la matèria humida té una baixa densitat energètica i és necessari, a més a més de recol·lectar-la, condicionar-la, transportar-la i emmagatzemar-la. En cas contrari, la gasificació no portaria als resultats esperats i el gas creat seria de molt baixa qualitat i es formarien molts quitrans, cosa que comportaria emissions de CO₂ no desitjades i perjudicaria el MACI.

9.2.2. Agrocombustibles

També tenen associats certs inconvenients els agrocombustibles, o productes agrícoles cultivats i collits expressament per al seu ús energètic ja que per a tal objectiu es requereix d'una gran extensió de terreny que no es pot destinar a cultivar aliments o farratges. Aquest procés a gran escala i sobretot en països en vies de desenvolupament pot tenir associats problemes de sobirania alimentaria, volatilitat dels preus, desforestació i altres impactes ambientals i socials. És per això que només s'ha de treballar amb agrocombustibles en casos molt extrems i en cas de utilitzar-los, anar molt en compte de no caure en cap dels problemes esmenats.

9.2.3. Riscos tòxics

Un component important del gas pobre és el monòxid de carboni, gas extremadament tòxic i perillós quan és respirat ja que es mescla amb components de la sang i impedeix l'absorció i distribució de l'oxigen. En la següent Taula es fa un recull del efectes ocasionats per diferents concentracions del monòxid de carboni en l'aire:

Taula 9.1. Conseqüències de la inhalació de monòxid de carboni per a diferents concentracions a l'aire (Font: FAO [1])

Nivell de CO a l'aire [ppm]	Efectes
50	Sense efectes importants
200	Possiblement un lleuger mal de cap durant 2 o 3 h
400	Mal de cap i nàusees
800	Mal de cap, marejos i nàusees en 45 minuts; possible inconsciència en 2 h
1600	Mal de cap, marejos i nàusees en 20 minuts; possible inconsciència en 2 h
3200	Mal de cap i marejos de 5 a 10 minuts; inconsciència i perill de mort en 30 minuts
6400	Mal de cap i marejos de 1 a 2 minuts; inconsciència i perill de mort de 10 a 15 minuts
12800	Efecte immediat; inconsciència i perill de mort d'1 a 3 minuts

Les instal·lacions normals de gas com és la dissenyada en aquest treball, treballen per succió, de manera que, encara que es produeixi alguna fuga en la instal·lació, no s'escapen de l'equip gasos perillosos durant el seu funcionament. No obstant això, la situació canvia durant la posta en marxa i l'apagat de la instal·lació; durant la posta en marxa, se li dona sortida al gas abans que aquest no sigui de suficient qualitat per ser enviat al MACI, és per això, doncs, que els gasos produïts no es retenen en una habitació tancada, com a norma, una xemeneia apropiada proporciona suficient seguretat. Per altra banda, durant l'apagat de la instal·lació es produeix un augment de pressió al gasificador, ocasionada per la temperatura a la que es troba el combustible, com a resultat d'aquest augment de pressió, s'alliberen gasos que contenen monòxid de carboni. Es recomana, doncs, que el gasificador es situï a l'aire lliure.

9.2.4. Riscos d'incendi

És normal pensar que, al treballar a temperatures molt elevades, puguin haver riscos d'incendi. Aquests poden ser causats per una temperatura massa elevada a l'exterior de l'equip, per l'existència de possibles espurnes al recarregar el combustible, flames en l'entrada d'aire del gasificador o a la tapa de recàrrega. Per prevenir aquests riscos, seria convenient aïllar les parts més calentes del sistema, instal·lar un dispositiu de recàrrega de doble comporta o carregar el combustible quan la tremuja de biomassa encara està aproximadament una tercera part plena, i instal·lar una vàlvula de retorn de la flama a l'entrada del gasificador.

9.2.5. Riscos d'explosió

Quan el gas es mescla amb el suficient aire, pot formar-se una mescla explosiva. Aquesta mescla es pot generar per varies raons:

- Filtració d'aire en el reactor. En cas de filtrar-se l'aire, aquest ho faria per la part inferior del gasificador, és a dir, per la graella, cosa que produiria una combustió parcial del gas, fet que implica que la temperatura d'aquest incrementi i, per tant, disminueixi la seva qualitat. No obstant això, generalment la mescla que es crea en aquests casos no dona lloc a explosions.
- Penetració d'aire al repostar el combustible. La mescla d'aire i els gasos pirolítics és explosiva, per evitar el contacte de l'aire amb aquests gasos caldria repostar el combustible quan la tremuja de biomassa encara està aproximadament un terç omplerta o, si s'arriba massa tard pel repostatge, també seria una opció cremar els gasos que es troben a la tremuja abans d'introduir la biomassa tot introduint un tros de paper encès just després d'obrir la comporta de la tremuja. Una altra possibilitat seria la esmenada en l'apartat anterior, que seria instal·lar un sistema de recàrrega de doble comporta.
- Filtració d'aire en un gasificador ja fred. Quan s'apaga el gasificador, és molt important deixar que es refredi i es ventili, del contrari, podrien romandre gasos combustibles en ell, cosa que podria provocar una explosió al voler-lo tornar a posar en marxa.

9.2.6. Eliminació dels residus del procés de gasificació

Del procés de gasificació de biomassa en surten cendres i líquid condensat, que pot estar contaminat per resines fenòliques i quitrans. L'eliminació de les cendres no implica cap risc ambiental, però pel que fa al líquid condensat, no es disposa de dades definitives sobre la biodegradació dels components fenòlics i els quitrans d'aquests líquids, per tant, és necessari estudiar la seva eliminació.

Conclusions

Després d'haver estudiat la tecnologia de gasificació de biomassa integrada a motors alterns de combustió interna per a la generació d'energia elèctrica, s'ha pogut dimensionar el gasificador seguint la metodologia descrita a la introducció del treball. També s'ha observat que hi ha un ampli rang de d'agents implicats en la gasificació a escollir: des del tipus de gasificador, biomassa, agent gasificant, MACI i sistema de refrigeració i neteja. Després d'estudiar detalladament cadascuna de les possibilitats, aplicar i comprovar coneixements adquirits mitjançant les proves que s'han dut a terme amb el prototip de gasificador tipus downdraft que es té al CITCEA, s'han pogut prendre decisions i modelat un gasogen amb les propietats idònies per a produir 20 kWe.

En quant al tipus de gasificador, s'ha decidit dimensionar un gasificador de tipus downdraft degut a que és el tipus de gasificador que produeix un gas més nèt, és a dir, amb menys olis i quitrans, per tant, més idoni per al funcionament amb MACI. A més a més, s'adapta al rang de potència tèrmica desitjada i treballa amb un rang bastant ampli de tipus de biomassa.

Mitjançant les proves fetes amb el prototip, s'ha comprovat la importància de la mida i forma de la biomassa, ja que en alguns casos, al treballar amb estella de fusta de pi s'ha obstruït el reactor del gasificador, cosa que ha impedit el funcionament correcte del gasificador. És per aquest motiu que s'ha triat el pèl·let de biomassa, per la seva forma i mida, i per la facilitat d'obtenció d'aquesta i les dades de la seva composició.

L'agent gasificant escollit i utilitzat durant les proves d'entre tots els possibles (oxigen, vapor d'aigua i aire) ha estat l'aire, ja que en tota la literatura consultada s'ha utilitzat sempre aire per al procés de gasificació i, per tant, totes les dades empíriques de les que es disposava eren a partir d'aire com a agent gasificant. A més a més, es volia modelar un sistema robust i econòmic, per tant, l'aire era l'agent gasificant més adient.

Pel que fa al grup electrogen, s'ha estudiat en detall tant els de cicle Otto com els de cicle Dièsel i s'ha optat per un motor de cicle Dièsel adaptat per funcionar amb gas de síntesi d'un baix poder calorífic. S'ha escollit un motor de cicle Dièsel degut a que no existeixen grups electrògens de benzina comercialitzats a Europa d'una potència elèctrica de 20 kWe. A més a més, els motors de cicle Dièsel són més robustos per què treballen amb ratis de compressió elevats als de gasolina i, per tant, tenen també una eficiència volumètrica superior i produeixen més potència amb menys combustible. Les adaptacions necessàries per operar amb gas de síntesi consisteixen en disminuir el rati de compressió a la que aquest treballa, instal·lar un sistema d'ignició que faciliti la combustió de la mescla de gas i aire, i avançar el temps d'encesa.

Per altra banda, també s'ha fet especial èmfasi en la importància del dimensionat del reactor en funció del cabal volumètric de gas de síntesi màxim que aquest és capaç de generar i el control d'aquest a l'hora d'encendre el gasificador, ja sigui per assolir la temperatura requerida per les reaccions de combustió i oxidació necessàries per produir gas de síntesi com per evitar possibles incendis i explosions. Un altre aspecte que afecta en la temperatura al reactor és l'estanqueïtat del sistema; durant les proves s'ha observat que el sistema assoleix la temperatura desitjada quan aquest té les juntes segellades correctament, evitant així les fuites.

Finalment, durant les proves en les que el gasificador no ha assumit la temperatura de craqueig (1100 °C [4]), s'ha pogut comprovar que, com més baixa la temperatura al reactor, major la proporció de líquids condensats compostos d'oli i quitrans en el gas (apartat 2.1.2).

En quant als sistemes de neteja, s'han analitzat els diferents mètodes que es poden utilitzar per depurar el gas de partícules i quitrans. D'entre totes les possibilitats, s'ha optat pels sistemes més robustos i econòmics tals com: el cicló, instal·lat a la sortida de la graella ja que tolera temperatures molt elevades i elimina les partícules més grans; l'intercanviador de calor, que s'ha dissenyat de manera que aquest rodeja la tremuja de biomassa, de manera que a la vegada que es refreda el gas també s'asseca la biomassa que està encara per ser gasificada; i el filtre, que fins ara s'ha omplert amb carbó degut a la seva porositat.

Després de dimensionar el sistema de gasificació, s'ha pogut complir l'objectiu d'estudiar la implantació del gasificador en una microxarxa. En primer lloc s'ha analitzat la potència pic que pot consumir la microxarxa de la xarxa general sense provocar problemes de sobresaturació ni a les línies ni als transformadors per avaluar la quantitat de potència que ha de ser generada pels gasificadors en el moment de màxima demanda. Tot seguit, s'ha estudiat en quines línies i transformadors sorgeixen problemes quan la microxarxa es connecta sense cap tipus de generació per avaluar en quins punts de la microxarxa s'ha de connectar els gasificadors. S'ha pogut aplicar el control de flux de potència que permet el sistema de gasificació, a diferència d'altres tipus d'energia renovable com ara la fotovoltaica i la eòlica.

Pressupost

Tots els codis i preus s'han extret de la base de dades de l'Institut Tècnic d'Edificació de Catalunya

Quadre descompost

Grup electrogen

EGC16041	u	Grup electrogen, insonoritzat automàtic,40kVA,trifàsic,400V,dièsel		
		Grup electrogen insonoritzat automàtic, de 40 kVA de potència en servei continu, trifàsic, de 400 V de tensió, accionament amb motor dièsel modificat per al seu funcionament amb gas pobre, amb quadre de control i quadre de commutació automàtica, instal·lat.		
		Marca TECNOPLUS, Model D40B.		
		Inclou totes les modificacions necessàries per a operar amb gas pobre.		
A012H000	0,900 h	Oficial 1a electricista	23,26	20,93
A013H000	0,900 h	Ajudant electricista	19,96	17,96
BGC16040	1,000 u	Grup electrogen insonoritzat automàtic, 30kVA,trifàsic,400V,dièsel	14.500,00	14.500,00
BGWC1000	1,000 u	P.p.accessoris p/gr.electrog.	74,00	74,00
A%AUX00250	2,500 %	Medis auxiliars	38,90	0,97
			TOTAL PARTIDA	14.613,86

Puja el preu total de la partida a l'esmentada quantitat de CATORZE MIL SIS-CENTS TRETZE EUROS amb VUITANTA-SIS CÈNTIMS

Equip de transport del gas

EJ2ZN42K	u	Maniguet flex.,malla met.,preu alt,2unions 1" - 0,5m		
		Maniguet flexible, de malla metàl·lica amb ànima interior sintètica, preu alt, amb dues unions roscades de 1"		
A012J000	0,300 h	Oficial 1a lampista	23,26	6,98
A013J000	0,075 h	Ajudant lampista	19,96	1,50
BJ2ZN42K	0,500 u	Maniguet flex.,malla met.,preu alt,2 unions 1"	3,07	1,54
A%AUX00150	1,500 %	Medis auxiliars	8,50	0,13
		TOTAL PARTIDA	10,15	

Puja el preu total de la partida a l'esmentada quantitat de DEU EUROS amb QUINZE CÈNTIMS

EJ2ZN42K-15	u	Maniguet flex.,malla met.,preu alt,2unions 1" - 1,5m		
		Maniguet flexible, de malla metàl·lica amb ànima interior sintètica, preu alt, amb dues unions roscades de 1"		
A012J000	0,300 h	Oficial 1a lampista	23,26	6,98
A013J000	0,075 h	Ajudant lampista	19,96	1,50
BJ2ZN42K	1,500 u	Maniguet flex.,malla met.,preu alt,2 unions 1"	3,07	4,61
A%AUX00150	1,500 %	Medis auxiliars	8,50	0,13
		TOTAL PARTIDA	13,22	

Puja el preu total de la partida a l'esmentada quantitat de TRETZE EUROS amb VINT-I-DOS CÈNTIMS

EJ2ZN42K-25	u	Maniguet flex.,malla met.,preu alt,2unions 1" - 2,5m		
		Maniguet flexible, de malla metàl·lica amb ànima interior sintètica, preu alt, amb dues unions roscades de 1"		
A012J000	0,300 h	Oficial 1a lampista	23,26	6,98
A013J000	0,075 h	Ajudant lampista	19,96	1,50
BJ2ZN42K	2,500 u	Maniguet flex.,malla met.,preu alt,2 unions 1"	3,07	7,68
A%AUX00150	1,500 %	Medis auxiliars	8,50	0,13
		TOTAL PARTIDA	16,29	

Puja el preu total de la partida a l'esmentada quantitat de SETZE EUROS amb VINT-I-NOU CÈNTIMS

EN316727	u	Vàlvula bola manual rosca,2peces,pas tot.,llautó, DN=1", PN=25bar,		
		Vàlvula de bola manual amb rosca, de dues peces amb pas total, de llautó, de diàmetre nominal 1", de 25 bar de PN i preu alt, muntada superficialment		
A012M000	0,200 h	Oficial 1a muntador	23,26	4,65
A013M000	0,200 h	Ajudant muntador	19,99	4,00
BN316720	1,000 u	Vàlvula bola manual+rosca, 2peces, pas tot.,llautó, DN=1", PN=25bar	7,31	7,31
A%AUX00150	1,500 %	Medis auxiliars	8,70	0,13
		TOTAL PARTIDA	16,09	

Puja el preu total de la partida a l'esmentada quantitat de SETZE EUROS amb NOU CÈNTIMS

Aspirador i xemeneia

EE41XXC7	m	Xemeneia circ.helic. ac.inox+fibra+ac.inox.,d=100mm,munt.superf.		
		Xemeneia circular helicoïdal d'acer inoxidable+fibra+acer inoxidable, de 100 mm de diàmetre, muntada superficialment		
A012G000	1,000 h	Oficial 1a calefactor	23,26	23,26
A013G000	1,000 h	Ajudant calefactor	19,96	19,96
BE41XXC7	1,000 m	Xemeneia circ.helic. ac.inox+fibra+ac.inox.,d=100mm	51,66	51,66
BEW48000	1,000 u	Suport estàndard p/conducte circ.D=100mm	6,03	6,03
A%AUX00250	2,500 %	Medis auxiliars	43,20	1,08
TOTAL PARTIDA			101,99	

Puja el preu total de la partida a l'esmentada quantitat de CENT UN EUROS amb NORANTA-NOU CÈNTIMS

EEM94371	u	Ventil.línia circul.,extr.,mat.xapa acer,D=100mm,monof.,2 veloc.		
		Ventilador en línia per a conducte circular amb cos extraïble de material de xapa d'acer per a un diàmetre de 100 mm, motor monofàsic de dos velocitats, IP X4, 60 W de potència absorbida per a un cabal màxim de 260 m ³ /h, nivell de pressió sonora de 30 a 35 dB(A), muntat en el conducte		
A012G000	0,300 h	Oficial 1a calefactor	23,26	6,98
A013G000	0,300 h	Ajudant calefactor	19,96	5,99
BEM94371	1,000 u	Ventil.línia circul.,extr.,mat.xapa acer, D=100mm,monof.,2 veloc.	104,32	104,32
A%AUX00250	2,500 %	Medis auxiliars	13,00	0,33
TOTAL PARTIDA			117,62	

Puja el preu total de la partida a l'esmentada quantitat de CENT DISSET EUROS amb SEIXANTA-DOS CÈNTIMS

Cos gasificador i equips de neteja

E4425025

u Cos gasificador i equips de neteja

Gasificador tipus Downdraft per a la creació de gas combustible a partir de biomassa. Inclou: fabricació del cos del gasificador, graella, injectors d'aire amb tancament amb vàlvula i port d'encesa.

Equips de neteja del gas. Inclou: fabricació del cicló i del filtre.

Elements d'assemblatge per als equips de transport de gas.

A0125000	80,000 h	Oficial 1a soldador	22,88	1.830,40
A0135000	80,000 h	Ajudant soldador	20,07	1.605,60
C200P000	10,000 h	Equip+elem.aux.p/soldadura	3,12	31,20
A%AUX00250	2,500 %	Medis auxiliars	3.436,00	85,90
B0CHLQ0B	5,000 m ²	Planxa +relleu acer galv.,g=4mm	42,10	210,50
B0CHQ162	1,000 m ²	Planxa perf.acer galv.g=1mm,perforacions circulars portell,15-25	17,95	17,95
BF22L800	1,200 m	Tub acer galv.sold.(W),1/2"	4,48	5,38
BN314420	5,000 u	Vàlvula bola manual+rosca,2peces,pas tot.,bronze,DN=1/2",PN=16ba	10,48	52,40
TOTAL PARTIDA				3.839,33

Puja el preu total de la partida a l'esmentada quantitat de TRES MIL VUIT-CENTS TRENTA-NOU EUROS amb TRENTA-TRES CÈNTIMS

Honoraris enginyeria

C1101200-1 u Estudi de dimensionat del Gasificador

Estudi dimensionat del gasificador. Inclou: honoraris de l'enginyer/a i seguiment de la fabricació.

A012H000ENG	240,0 h	Enginyer	35,00	8.400,00
C200P000LIC	0,050 u	Llicències Informàtiques	1.500,00	75,00
C200P000PUB	50,00 %	Publicacions científiques	500,00	250,00
TOTAL PARTIDA				8.725,00

Puja el preu total de la partida a l'esmentada quantitat de VUIT MIL SET-CENTS VINT-I-CINC EUROS

C1101200-2 u Estudi de l'adaptació del motor dièsel

Estudi de l'adaptació del motor dièsel del grup electrogen per al funcionament amb gas pobre. Inclou: honoraris de l'enginyer/a i seguiment de les tasques.

A012H000ENG	160,0 h	Enginyer	35,00	5.600,00
C200P000LIC	0,050 u	Llicències Informàtiques	1.500,00	75,00
C200P000PUB	20,00 %	Publicacions científiques	500,00	100,00
TOTAL PARTIDA				5.775,00

Puja el preu total de la partida a l'esmentada quantitat de CINC MIL SET-CENTS SETANTA-CINC EUROS

C1101200-3 u Estudi d'implantació en una microxarxa

Estudi d'implantació en una microxarxa. Inclou: honoraris de l'enginyer/a.

A012H000ENG	200,0 h	Enginyer	35,00	7.000,00
C200P000LIC	0,050 u	Llicències Informàtiques	1.500,00	75,00
C200P000PUB	10,00 %	Publicacions científiques	500,00	50,00
TOTAL PARTIDA				7.125,00

Puja el preu total de la partida a l'esmentada quantitat de SET MIL CENT VINT-I-CINC EUROS

C1101200-4 u Estudi d'impacte mediambiental

Estudi d'impacte mediambiental. Inclou: honoraris de l'enginyer/a.

A012H000ENG	40,0 h	Enginyer	35,00	1.400,00
C200P000LIC	0,050 u	Llicències Informàtiques	1.500,00	75,00
C200P000PUB	10,00 %	Publicacions científiques	500,00	50,00
			TOTAL PARTIDA	1.525,00

Puja el preu total de la partida a l'esmentada quantitat de MIL CINQ-CENTS VINT-I-CINC EUROS

Resum de pressupost

EGC1_01	GRUP ELECTROGEN	14.613,86
EJ2Z_03	EQUIP DE TRANSPORT DEL GAS.....	87,93
EE41_02	ASPIRADOR I XEMENEIA	270,61
E442_01	COS GASIFICADOR I EQUPS DE NETEJA	3.839,33
C110_01	HONORARIS ENGINYERIA.....	23.150,00
	TOTAL EXECUCIO MATERIAL	41.961,73
	2 % DE SEURETAT I SALUT	839,23
	SUBTOTAL	42.800,96
	13,00 % Despeses Generals.....	5.564,13
	6,00 % Benefici industrial	2.568,06
	SUMA DE G.G. y B.I.....	8.132,19
	21,00 % I.V.A.	10.695,96
	TOTAL PRESSUPOST CONTRATA	61.629,11

TOTAL PRESSUPOST GENERAL 61.629,11

Puja el pressupost general a l'esmerada quantitat de SEIXANTA-UN MIL SIS-CENTS VINT-I-NOU EUROS amb ONZE CÉNTIMS

, a GENER de 2017.

L'enginyera industrial elèctrica

Bibliografia

Referències bibliogràfiques

- [1] FAO, Food and Agriculture Organisation of the United Nations. *El gas de madera como combustible para motores*. Forestry department, 1986.
- [2] S. Chopra & A. Jain. *A Review of Fixed Bed Gasification Systems for Biomass*. Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal. Invited Overview No. 5. Vol. IX. Abril, 2007.
- [3] SERI, Solar Energy Research Institute. *Generator gas, The Swedish experience 1939-1945*. U.S. Department of Energy. 3a Edició.
- [4] Prabir Basu. *Biomass gasification and pyrolysis. Practical design and theory*. Burlington, USA, Elsevier: 2010
- [5] J. P. Diebold & A. V. Bridgwater. *Overview of fast pyrolysis of biomass for the production of liquid fuels*. London, 1997.
- [6] T. B. Reed & A. Das. *Handbook of biomass downdraft gasifier engine systems*. Solar Energy Research Institute, 1988.
- [7] Schlapfer, P. and J. Tobler. *Theoretische und Praktische Untersuchungen Über den Betrieb von Motorfahrzeugen mit Holzgas, Schweizerische Gesellschaft für das studium der Motobrennstoffe*. Bern Switzerland, 1937.
- [8] P. Rodríguez Muñoz. *Tecnología de gasificación de biomassa*. INERCO Ingeniería, tecnología y consultoría. Sevilla.
- [9] Tienda Biomasa, 2016.

[<http://tiendabiomasa.com/pellets.html>, 12 de desembre de 2016]
- [10] J. A. Álvarez & I. Callejón. *Máquinas térmicas y motores*. Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, SL. Barcelona, 2002.
- [11] E. J. Kates i W. E. Luck. *Motores diesel y de gas de alta compresión*. Segona edició, editorial Reverté, S. A. 2009.

- [12] José Roldan Vilorio. *Energías renovables, lo que hay que saber*. Ediciones Paraninfo S.A., 2013. p. 159.
- [13] Vesa Mikkonen. *Wood gas for Mobile Applications*. 2012
- [14] J. Venselaar. *Design rules for downdraft wood gasifiers*. Institut Teknologi Bandung, Indonesia. 1982.
- [15] A. Lladó Jaume. *Estudi i dimensionat d'un sistema de gasificació de biomassa per una població del Txad, Àfrica*. Barcelona, 2013.
- [16] C. A. Echeverri Londoño. *Diseño óptimo de ciclones*. Universidad de Medellín.
- [17] TECNOPLUS, 2016
[http://www.tecnoplus.es/castellano/ge_1500_1800.html, 28 d'octubre de 2016]
- [18] DEUTZ, 2016
- [19] MecCalte, 2016
[<http://www.meccalte.com/index.php?s=43&page=10>, 4 de novembre de 2016]
- [20] Energetica xxi. *Energía tèrmica a partir de biomassa para su uso domestico e industrial*. 2016
- [21] Prysmian, 2016
- [22] L'Econòmic. *El sòl forestal evita l'emissió de 190 milions de tones de carboni*. 2016

Bibliografia complementària

Com a bibliografia complementària a aquest treball és de gran rellevància el manual del MATLAB:

- [23] Ray D. Zimmerman & Carlos E. Murillo-Sánchez. *Matpower 6.0 User's Manual*. PSERC Power Systems Engineering Research Center, 2016.

Annex A

A continuació es poden observar les fitxes tècniques del grup electrogen escollit i l'alternador elèctric del grup electrogen.

A1. Fitxa tècnica del grup electrogen [17]



ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL GRUPO ELECTRÓGENO

MODELO: D40B



POTENCIA EN SERVICIO CONTINUO (P.R.P.)

Es la potencia máxima disponible para cargas variables durante un número ilimitado de horas por año entre los intervalos de mantenimiento prescritos. La potencia media consumible no debe sobrepasar el 80% de la potencia Prime PRP por un período de 24 horas. Se admite una sobrecarga del 10% durante una hora en períodos de 12 de horas de funcionamiento.

POTENCIA EN SERVICIO DE EMERGENCIA (L.T.P.)

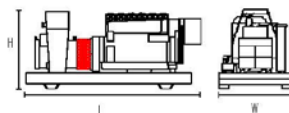
Es la potencia máxima disponible en el caso de que falle la red por un período máximo de 500 horas por año y un factor de carga medio del 90% de la potencia LTP. No está admitida ninguna sobrecarga para este uso.

CONDICIONES AMBIENTALES DE REFERENCIA

Temperatura ambiente de 25°C, altitud de hasta 1000 mt sobre el nivel del mar, humedad relativa del 30%. Los valores de potencia indicados están de acuerdo con la norma ISO 8528-1.

TIPO DE GRUPO	Estático fijo - abierto	
FRECUENCIA - HZ	50	60
POTENCIA GRUPO ELECTRÓGENO (P.R.P.) - KVA	40,0	48,0
POTENCIA GRUPO ELECTRÓGENO (P.R.P.) - KW	32,0	38,4
POTENCIA GRUPO ELECTRÓGENO (L.T.P.) - KVA	42,0	50,0
POTENCIA GRUPO ELECTRÓGENO (L.T.P.) - KW	33,6	40,0
VOLTAJE - VOLTS	400/231	220/127
FACTOR DE POTENCIA - COSφ	0,8	
MOTOR - MARCA Y MODELO	DEUTZ F41912	
NORMATIVA EMISIONES DE GASES DE ESCAPE	N/D	
NÚMERO DE CILINDROS	4	
ASPIRACIÓN	NATURAL	
CAPACIDAD DEL MOTOR - cm ³	3770	
TIPO DE ENFRIAMIENTO	AIRE	
POTENCIA MÁXIMA (LTP) EN EL VOLANTE - KWm	38	44,5
VELOCIDAD - RPM	1500	1800
BATERÍA DE ARRANQUE - Vdc	12	
CAPACIDAD DEPÓSITO DE COMBUSTIBLE - LITROS	52	
CONSUMO DE COMBUSTIBLE AL 100% CARGA PRP	9,7 l/h	11,9 l/h
CONSUMO DE COMBUSTIBLE AL 75% CARGA PRP	7,2 l/h	8,9 l/h
CONSUMO DE COMBUSTIBLE AL 50% CARGA PRP	5,2 l/h	6,4 l/h
ALTERNADOR - REGULACIÓN	Meccalte o Stamford (AVR)	
MODELO CUADRO DE CONTROL	CAM-109	
DIMENSIONES:		
LARGO "L" - mm	1550	
ANCHO "W" - mm	680	
ALTURA "H" - mm	970	
PESO - Kg	760	

TecnoPlus se reserva el derecho de modificar los datos sin previo aviso



TecnoPlus, S.A. (CIF: A-58508565)

Calle Galileo 2, naves 1-2, Término Polígono Industrial Sector Autopista, 08150 - Parets del Vallés (Barcelona), España

Tel: +34 935444250 - Fax: +34 935444422

web: www.tecnoPlus.es - email: comercial@tecnoPlus.es



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

A2. Fitxa tècnica del MACI [18]



Gen Motor

Datasheet FL912 (1500 min⁻¹ / 50 Hz)



Engine										
Type		▼			▼			▼		
F3L912		▼			▼			▼		
F4L912		▼			▼			▼		
F6L912		▼			▼			▼		
Speed	[min ⁻¹]	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	
Net frequency	[Hz]	50	50	50	50	50	50	50	50	
Power standard		COP			PRP			LTP		
Power level		--	--	--	--	--	--	--	--	
Exhaust emission standard		--	--	--	--	--	--	--	--	
General										
Aspiration		natural			natural			natural		
No of cylinders		3	4	6	3	4	6	3	4	6
Configuration		in-line			in-line			in-line		
Injection system		direct			direct			direct		
Displacement	[l]	2.83	3.77	5.65	2.83	3.77	5.65	2.83	3.77	5.65
Bore	[mm]	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Stroke	[mm]	120	120	120	120	120	120	120	120	120
Compression ratio		20	20	20	20	20	20	20	20	20
Mean effective pressure	[bar]	7.5	7.4	7.5	7.8	7.9	7.8	7.9	8.1	7.9
Piston speed	[m/s]	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Rotation (looking at flywheel)		counter clock wise			counter clock wise			counter clock wise		
No of teeth on flywheel ring gear		129	129	129	129	129	129	129	129	129
Governor performance										
Speed droop (static) mech. gov.	[%]	5 - 6			5 - 6			5 - 6		
Speed droop (static) electr. gov. (EMR/GAC)	[%]	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Governing standards										
to ISO 8528 Parts 1 and 5		G 2			G 2			G 2		
Moment of inertia										
Engine without flywheel	[kg m ²]	0.16	0.18	0.28	0.16	0.18	0.28	0.16	0.18	0.28
Flywheel (standard genset spec.)	[kg m ²]	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02
Max. step load acceptance, 1 st step	[%]	100	100	100	100	100	100	95	95	95
Sound power at full load, incl. cooling system ²	[dB(A)]	103	104	106.5	103	104	106.5	103	104	106.5
Sound press. (1m average, full load), incl. cool. syst.	[dB(A)]	90	91	93	90	91	93	90	91	93
Weight										
Engine dry, w/o cooling system	[kg]	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Engine with cooling system	[kg]	351	402	541	351	402	541	351	402	541
Lubrication system										
Oil specification		see operation manual			see operation manual			see operation manual		
Oil consumption (as % of fuel consumption)		0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Oil capacity (sump)	[l]	9	11	13.5	9	11	13.5	9	11	13.5
Mn. oil pressure (warning)	[bar]	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Mn. oil pressure (shut down)	[bar]	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Max. permissible oil temperature (oil pan)	[°C]	130	130	130	130	130	130	130	130	130
Output										
Gross output ¹	[kW]	27.0	35.5	54.0	28.0	37.5	56.0	28.5	38.5	57.0
Fan reduction	[kW]	0.5	0.5	1.0	0.5	0.5	1.0	0.5	0.5	1.0
Net flywheel ¹	[kW]	26.5	35.0	53.0	27.5	37.0	55.0	28.0	38.0	56.0
Electrical output ²	[kVA]	28	38	58	29	41	61	30	42	62
Fuel System										
Fuel consumption										
25% load ³	[l/h]	2.8	3.7	5.5	2.8	3.8	5.7	2.8	3.8	5.6
50% load ³	[l/h]	3.8	5.0	7.6	3.9	5.2	7.8	3.9	5.3	7.8
75% load ³	[l/h]	5.2	6.9	10.5	5.4	7.2	10.8	5.4	7.4	10.9
100% load ³	[l/h]	6.9	9.1	13.8	7.2	9.7	14.5	7.4	10.0	15.0
25% load	[g/kWh]	342	346	342	337	334	337	331	331	326
50% load	[g/kWh]	234	235	234	233	232	233	231	231	230
75% load	[g/kWh]	216	216	216	214	214	214	213	213	213
100% load	[g/kWh]	214	214	214	216	217	216	218	218	220
Max. suction head of fuel feed pump	[m]	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5



Gen Motor

Datasheet FL912 (1500 min⁻¹ / 50 Hz)

Engine										
Type										
F3L912										
F4L912										
F6L912										
Speed	[min ⁻¹]	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500
Net frequency	[Hz]	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Power standard			COP			PRP			LTP	
Power level		--	--	--	--	--	--	--	--	--
Exhaust emission standard		--	--	--	--	--	--	--	--	--
Cooling System										
General engine cooling data										
Max. perm. coolant outlet temperature	[°C]	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Max. perm. flow resistance (cool. syst. and piping)	[bar]	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Max. temperature of coolant (warning)	[°C]	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Max. temperature of coolant (shutdown)	[°C]	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Temperature at which thermostat starts to open	[°C]	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Temperature at which thermostat is fully open	[°C]	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Delivery of coolant pump	[m ³ /h]	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Min. pressure before coolant pump	[bar]	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Temperature at CAC outlet at standard conditions	[°C]	--	--	--	--	--	--	--	--	--
DEUTZ cooling system										
Coolant capacity (engine)	[l]	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Coolant capacity (incl. cooling unit)	[l]	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Air to boil (max. permissible cool. air temp. at fan)	[°C]	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Fan power consumption ¹	[kW]	0.5	0.5	1.0	0.5	0.5	1.0	0.5	0.5	1.0
Cooling air flow	[m ³ /h]	1565	1810	2610	1565	1810	2610	1565	1810	2610
Air pressure loss		10	10	10	10	10	10	10	10	10
Heat Balance										
Heat dissipation (engine radiator) ²	[kW]	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Heat dissipation (CAC) ³	[kW]	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Heat dissipation (convection)	[kW]	23	29	45	23	29	45	23	29	45
Inlet / Exhaust Data										
Max. intake depression (Switch setting)	[mbar]	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Combustion air volume	[m ³ /h]	108	144	216	108	144	216	108	144	216
Max. exhaust back pressure	[mbar]	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Max. exhaust gas temperature	[°C]	460	455	460	485	490	485	510	510	530
Exhaust gas flow (at above temp)	[m ³ /h]	256	336	509	264	353	527	273	362	558
Exhaust flange / pipe diameter	[mm]	66	66	66	66	66	66	66	66	66
Electrical System										
Voltage	[V]	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Starter	[kW]	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Alternator output	[A]	55	55	55	55	55	55	55	55	55
Batteries (minimum capacity, cold start limit -5°C)	[Ah]		1 x 110			1 x 110			1 x 110	

¹ Data under examination

² Ratings in accordance with ISO 3046.

³ Ratings in accordance with ISO 8528, based on alternator efficiency of 85% to 89%.

⁴ At caloric value 42700 kJ/kg + 5 %, density 0.835 kg/dm³, temperature 280 K.

⁵ Technical data and max. permissible torque for fan drive see data sheet.

⁶ Sound power values measured in accordance with ISO 9736.

⁷ The heat quantiles are valid for the dimensioning of the cooling system. They are given for the engine with the highest fuel consumption.

For further information see ELTAB / Pocket book.

For further application guidance see DEUTZ Installation Manual.

All data are provided for informational purposes only and are subject to amendment.

A3. Fitxa tècnica de l'alternador elèctric [19]

meccalte		GENERATOR TYPE ECP 28-VL/2 A				Document : DS285A/1 issue 000 date 16/09/2013				
Electrical Characteristics										
Frequency	Hz	50				60				
Voltage (star)	V	380	400	415	440	415	440	460	480	
Rated power class H	kVA	40	40	40	34	40	45	48	48	
	kW	32	32	32	27,2	32,0	36	38,4	38,4	
Rated power class F	kVA	37	37	37	31,5	37,5	41,5	44	44	
	kW	29,6	29,6	29,6	25,2	30	33,2	35,2	35,2	
Regulation with	DSR	±1 % with any power factor and speed variations between -5% +30%								
Insulation class		H								
Execution		Brushless								
Stator winding		12 ends								
Rotor		with clamping cage								
Efficiencies class H	4/4	%	87,4	87,8	88,1	84,2	88,8	89,1	89,3	89,7
(see graph. for details)	3/4	%	88	88,3	88,4	84,6	89,5	89,7	89,9	90,1
	2/4	%	85,9	86	86	82,4	87,7	87,8	87,9	88
	1/4	%	82,8	82,6	82,6	79,8	83,8	83,8	83,8	83,6
Reactances (f. l.c.l. F)	Xd	%	260,4	235	218,3	165,1	262,0	262,2	255,9	235
	Xd'	%	8,08	7,3	6,78	5,1	8,14	8,14	7,95	7,3
	Xd''	%	4,21	3,8	3,53	2,7	4,24	4,24	4,14	3,8
	Xq	%	145,2	131	121,7	92,0	146,0	146,2	142,6	131
	Xq'	%	145,2	131	121,7	92,0	146,0	146,2	142,6	131
	Xq''	%	22,7	20,5	19,0	14,4	22,9	22,9	22,3	20,5
	X ₂	%	13,85	12,5	11,61	8,8	13,94	13,95	13,61	12,5
	X ₀	%	4,54	4,1	3,81	2,9	4,57	4,57	4,46	4,1
Short Circuit Ratio	Kcc		0,8	0,9	1,1	1,2	0,68	0,73	0,8	0,9
Time Constants	Td'	sec.	0,042							
	Td''	sec.	0,015							
	Td ₀ '	sec.	0,74							
	T _α	sec.	0,049							
Short Circuit Current Capacity		%	>300				>350			
Excitation at no load	Amp.		0,35	0,4	0,6	0,75	0,2	0,25	0,3	0,35
Excitation at full load	Amp.		1,2	1,3	1,4	1,5	1,3	1,4	1,3	1,2
Overload (long-term)	%	1 hour in a 6 hours period 110% rated load								
Overload per 20 sec.	%	300								
Stator Winding Resistance (20 °C)	Ω	0,056								
Rotor Winding Resistance (20 °C)	Ω	6,5								
Exciter Resistance (20 °C)	Ω	Rotor : 0,417				Stator : 10,60				
Heat dissipation at f.l.c.l.H	W	4613	4446	4322	5104	4036	4404	4601	4409	
Telephone Interference		THF < 2%				TIF < 45				
Radio interference		EN61000-6-3, EN61000-6-1. For others standards apply to factory								
Waveform Distors.(THD) at f. load	LL/LN %	2,9 / 3,1								
Waveform Distors.(THD) at no load	LL/LN %	2,8 / 3								
Mechanical characteristics										
Protection		IP 23 (other protection on request)								
DE bearing		6309-2RS								
NDE bearing		6207-2RS								
Weight of wound stator assembly	kg	57								
Weight of wound rotor assembly	kg	30,2								
Weight of complete generator	kg	156								
Maximun overspeed	rpm	4500								
Unbalanced magnetic pull at f.l.c.l.F	kN/mm	3,6								
Cooling air requirement	m³/min	9,7				11				
Inertia Constant (H)	sec.	0,178				0,213				
Noise level at 1m/7m	dB(A)	86 / 74				90,5 / 78				

All technical data are to be considered as a reference and they can be modified without any notice
This document is a propriety of Mecc Alte S.p.a. All rights reserved.



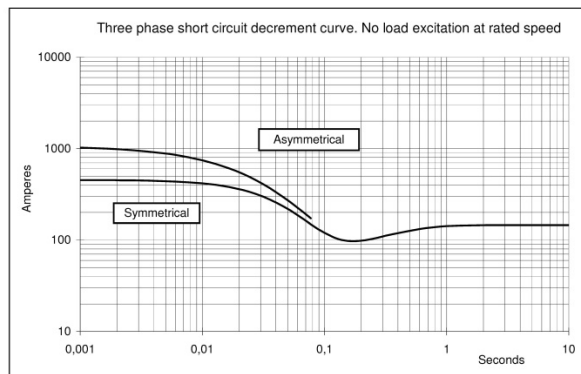
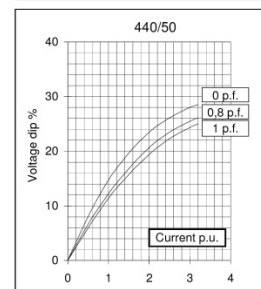
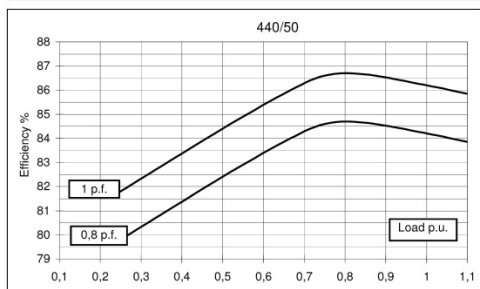
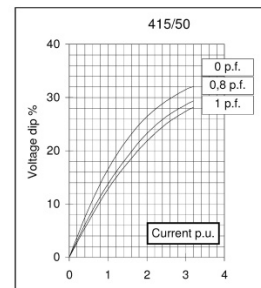
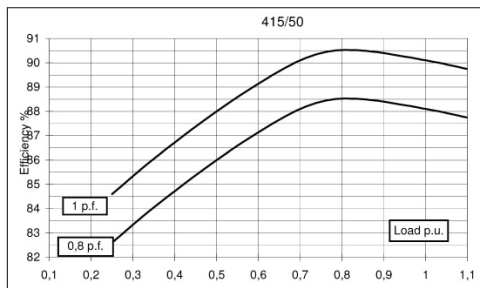
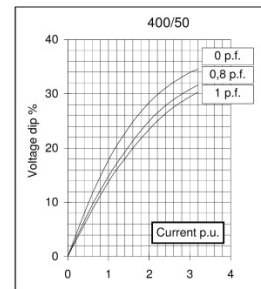
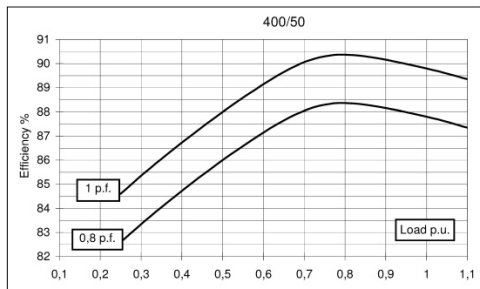
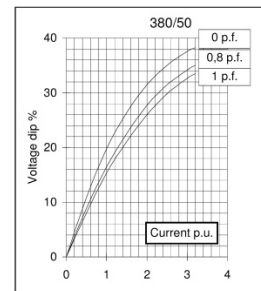
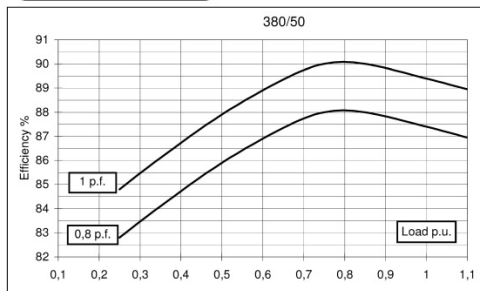


GENERATOR TYPE ECP 28-VL/2 A

Document : DS285A/2

issue 000 date : 16/09/2013

50 Hz



This document is a propriety of Mecc Alle S.p.a.. All rights reserved.



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

Annex B

A continuació, s'hi troben les fitxes tècniques dels cables i transformadors escollits per a la modelació de la microxarxa i la xarxa de distribució.

B1. Cables de baixa tensió [21]

Cables para redes subterráneas y aéreas

Baja Tensión

AL VOLTALENE FLAMEX (S)

Tensión nominal: 0,6/1 kV
 Norma diseño: HD 603-5X-1
 Designación genérica: AL XZ1 (S)



CARACTERÍSTICAS CABLE



No propagación de la llama
 UNE-EN 60332-1-2



Baja emisión de humos opacos
 UNE-EN 61034-2



Libre de halógenos
 UNE-EN 50267-2-1



Nula emisión de gases corrosivos
 UNE-EN 50267-2-2



Resistencia a la absorción del agua



Resistencia al frío



Resistencia a los rayos ultravioleta



Resistencia a los agentes químicos



Resistencia a las grasas y aceites



Resistencia a los golpes

RESISTENTE A LOS ACEITES, ÁCIDOS Y ALCALIS

- Norma de diseño: UNE-HD 603-5X-1 (aplica a las secciones que proceda), IEC-60502.
- Temperatura de servicio (instalación fija): -25 °C, +90 °C. (Cable termoestable).
- Tensión nominal: 0,6/1 kV.
- Ensayo de tensión alterna durante 5 minutos: 3500 V.

Ensayos de fuego:

- No propagación de la llama: UNE EN 60332-1-2; IEC 60332-1-2; NFC 32070-C2.
- Libre de halógenos: UNE EN 50267-2-1; IEC 60754-1; BS 6425-1.
- Baja emisión de humos opacos: UNE EN 61034-2; IEC 61034-2.
- Nula emisión de gases corrosivos: UNE EN 50267-2-2; IEC 60754-2; NFC 20453; BS 6425-2; pH \geq 4,3; C \leq 10 μ S/mm

DESCRIPCIÓN

CONDUCTOR

Metal: Aluminio.

Flexibilidad: Rígido, clase 2, según UNE EN 60228.

Temperatura máxima en el conductor: 90 °C en servicio permanente, 250 °C en cortocircuito.

AISLAMIENTO

Material: Mezcla de polietileno reticulado (XLPE), tipo DIX3, según HD 603-1.

CUBIERTA

Material: Mezcla especial cero halógenos, tipo Flamex DMO1, según UNE HD 603-5.

Color: Negro.

APLICACIONES

- Redes de distribución, acometidas, instalaciones al aire o enterradas.
 - Redes subterráneas de distribución e instalaciones subterráneas (ITC-BT 07).
 - Instalaciones interiores o receptoras (ITC-BT 20); salvo obligación de Afumex (AS) (ver ITC-BT 28 y R.D. 2267/2004).

NOTA IMPORTANTE: Inadecuado para ser instalado en locales de pública concurrencia, líneas generales de alimentación, derivaciones individuales y en general toda instalación donde se requiera Afumex (AS). Ver apartado M.



Cables para redes subterráneas y aéreas

Baja Tensión

AL VOLTALENE FLAMEX (S)

Tensión nominal: 0,6/1 kV
 Norma diseño: HD 603-5X-1
 Designación genérica: AL XZ1 (S)



CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

DIMENSIONES, PESOS Y RESISTENCIAS (aproximados)

Número de conductores x sección mm ²	Espesor de aislamiento mm	Diámetro sobre aislamiento mm	Diámetro exterior mm	Peso total kg/km	Resistencia del conductor a 20°C Ω/km	Intensidad admisible al aire (1) A	Intensidad admisible enterrado (2) A	Caída de tensión V/A km (2)	
								cos φ = 1	cos φ = 0,8
1x16	0,7	6,1	8,3	85	1,91	70	58	4,15	3,42
1x25	0,9	7,7	9,9	124	1,2	88	74	2,62	2,19
1x35	0,9	8,6	10,8	153	0,868	109	90	1,89	1,6
1x50	1	10,1	12,5	200	0,641	133	107	1,39	1,21
1x70	1,1	11,9	14,5	265	0,443	170	132	0,97	0,86
1x95	1,1	13,8	15,8	340	0,32	207	157	0,7	0,65
1x120	1,2	15,3	17,4	420	0,253	239	178	0,55	0,53
1x150	1,4	17	19,3	515	0,206	277	201	0,45	0,45
1x185	1,6	19,4	21,4	645	0,164	316	226	0,36	0,37
1x240	1,7	22,1	24,2	825	0,125	372	261	0,27	0,3
1x300	1,8	24,3	26,7	1035	0,1	462	295	0,22	0,26

(1) Instalación en bandeja al aire (40 °C).
 → XLPE3 con instalación tipo F (A1) → columna 11 (unipolares trifásica).

(2) Instalación enterrada, directamente o bajo tubo con resistividad térmica del terreno estándar de 2,5 K·m/W.
 → XLPE3 con instalación tipo Método D (A1)

(Ver página 28).

CÁLCULOS

Intensidades máximas admisibles: Ver apartado A) para instalaciones interiores o receptoras. Para redes de distribución subterráneas ver apartado C o C bis).

Caídas de tensión: Ver tabla E.2.

Intensidades de cortocircuito máximas admisibles: Ver tabla F.2.

B2. Cables de mitja tensió [21]

Anexo A

Media Tensió

CABLES UNIPOLARES AISLADOS REUNIDOS EN HAZ AL VOLTARRET HACES

CARACTERÍSTICAS DIMENSIONALES

12/20 kV			18/30 kV		
Formación (mm ²)	Ø exterior envolvente (mm)	Peso (kg/km)	Formación (mm ²)	Ø exterior envolvente (mm)	Peso (kg/km)
3x(1x35/16)+50	69,2	3220	3x(1x35/16)+50	79,7	3950
3x(1x50/16)+50	71,9	3470	3x(1x50/16)+50	81,9	4230
3x(1x95/16)+50	78,1	4140	3x(1x95/16)+50	89,4	5145
3x(1x150/16)+50	85,2	5030	3x(1x150/16)+50	95,2	5940

Valores aproximados.

CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS

	12/20 kV	18/30 kV
Tensión nominal simple, U ₀ (kV)	12	18
Tensión nominal entre fases, U (kV)	20	30
Tensión máxima entre fases, U _m (kV)	24	36
Tensión a impulsos, U _p (kV)	125	170
Temperatura máxima admisible en el conductor en servicio permanente (°C)	90	
Temperatura máxima admisible en el conductor en régimen de cortocircuito (°C)	250	
Intensidad máxima de cortocircuito en la pantalla durante 1 seg (kA)	2,9	

Formación (mm ²)	Intensidad admisible (temperatura ambiente 40 °C)* (A)	Intensidad de cortocircuito en el conductor durante 1 s (A)	Resistencia del conductor a 20 °C (Ω/km)	Reactancia inductiva (Ω/km)		Capacidad (μF/km)	
				12/20 kV	18/30 kV	12/20 kV	18/30 kV
3(1x35/16)+50	135	3290	0,868	0,158	0,142	0,161	0,125
3(1x50/16)+50	160	4700	0,641	0,151	0,133	0,177	0,138
3(1x95/16)+50	245	8930	0,32	0,135	0,120	0,217	0,167
3(1x150/16)+50	320	14100	0,206	0,125	0,111	0,254	0,193

* Multiplicar por 0,9 si el cable está expuesto al sol.

NOTA: todos los valores son aproximados.

Ensayos

Los ensayos a realizar a cable terminado son los estipulados en la norma IEC 60502-2. Para otras secciones y/o tensiones consultar.

Anexo A

Media Tensión

CABLES UNIPOLARES AISLADOS REUNIDOS EN HAZ AL VOLTARRET HACES

DESCRIPCIÓN

Norma: RU 3309, IEC 60502-2

Tipos: RHVS

COMPOSICIÓN:



CARACTERÍSTICAS DEL FIADOR

Carga de rotura mínima, daN/mm ²	6400
Módulo de elasticidad mínimo, daN/mm ²	15000
Coefficiente de dilatación lineal, por °C	11 · 10 ⁻⁶



Annex C

A l'annex C s'hi troben les dades de demanda tant de la xarxa de distribució com de la microxarxa:

Taula 8.1. Dades de demanda diàries de la xarxa elèctrica per a cada bus [kW/h]

Hora\Bus	1	2	3	4	5	6	7	8	9	12	13	14	15	10	26	Suma
1:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	167,44	767,81	0,00	381,43	504,14	562,64	0,00	417,42	595,41	652,14	4048,43
2:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	161,65	777,53	0,00	374,17	488,43	551,93	0,00	407,02	581,23	641,22	3983,18
3:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	154,03	753,03	0,00	343,01	467,52	505,97	0,00	387,57	541,81	613,02	3765,96
4:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	138,97	675,11	0,00	323,46	428,10	477,12	0,00	350,02	496,22	522,67	3411,67
5:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	144,47	682,57	0,00	312,14	425,83	460,43	0,00	352,02	494,59	521,75	3393,79
6:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	157,60	729,82	0,00	330,67	490,14	487,76	0,00	376,19	531,87	594,45	3698,49
7:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	166,36	787,04	0,00	363,42	518,46	536,07	0,00	398,25	586,82	606,39	3962,82
8:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	181,22	859,80	0,00	392,01	576,55	578,25	0,00	434,36	634,33	631,04	4287,58
9:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	185,68	899,89	0,00	416,98	617,14	615,07	0,00	454,67	681,40	712,15	4582,98
10:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	201,61	953,17	0,00	449,01	668,36	662,33	0,00	500,09	765,60	726,84	4927,02
11:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	220,96	1022,90	0,00	526,39	751,75	776,47	0,00	567,76	861,56	801,10	5528,89
12:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	224,54	1010,29	0,00	548,31	784,66	808,80	0,00	582,64	906,75	831,84	5697,83
13:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	219,11	1063,58	0,00	547,27	793,23	807,26	0,00	570,90	944,02	958,47	5903,84
14:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	197,77	947,66	0,00	496,68	687,06	732,64	0,00	510,75	829,46	937,87	5339,89
15:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	192,01	917,72	0,00	457,76	655,70	675,23	0,00	467,28	763,74	898,95	5028,39
16:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	178,44	871,92	0,00	419,19	621,20	618,33	0,00	427,07	730,56	659,98	4526,70
17:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	180,28	911,93	0,00	458,26	659,67	675,97	0,00	474,24	759,36	736,19	4855,91
18:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	203,01	992,32	0,00	493,53	705,16	727,99	0,00	502,23	845,55	746,83	5216,63
19:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	220,42	1065,35	0,00	528,98	765,30	780,29	0,00	563,91	906,85	872,25	5703,35
20:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	217,74	1104,91	0,00	532,07	764,75	784,84	0,00	547,26	888,26	894,74	5734,56
21:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	214,01	1091,02	0,00	548,82	740,88	809,55	0,00	575,78	870,57	894,50	5745,15
22:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	205,02	1011,91	0,00	521,35	703,11	769,03	0,00	541,31	813,32	816,21	5381,27
23:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	189,15	918,51	0,00	452,87	610,07	668,01	0,00	488,54	733,88	755,34	4816,37
24:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	175,09	855,38	0,00	420,75	560,26	620,64	0,00	450,71	672,12	703,10	4458,06

Taula 8.2. Dades de demanda diàries de la microxarxa per a cada bus [kW/h]

Hora\Bus	11	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Suma
1:00	137,42	0,00	0,00	571,65	0,00	779,88	0,00	0,00	646,46	0,00	986,03	3121,44
2:00	134,16	0,00	0,00	564,73	0,00	804,24	0,00	0,00	655,31	0,00	958,88	3117,32
3:00	122,97	0,00	0,00	537,75	0,00	770,60	0,00	0,00	613,17	0,00	887,80	2932,29
4:00	114,77	0,00	0,00	487,30	0,00	697,67	0,00	0,00	570,41	0,00	846,74	2716,88
5:00	120,08	0,00	0,00	476,80	0,00	691,14	0,00	0,00	587,66	0,00	842,54	2718,21
6:00	133,59	0,00	0,00	524,88	0,00	742,57	0,00	0,00	604,57	0,00	908,72	2914,33
7:00	138,76	0,00	0,00	569,29	0,00	797,03	0,00	0,00	661,30	0,00	971,17	3137,55
8:00	147,73	0,00	0,00	619,44	0,00	843,75	0,00	0,00	702,53	0,00	1054,87	3368,33
9:00	157,09	0,00	0,00	637,42	0,00	894,76	0,00	0,00	768,90	0,00	1115,14	3573,31
10:00	168,27	0,00	0,00	703,22	0,00	968,49	0,00	0,00	823,31	0,00	1249,93	3913,21
11:00	194,00	0,00	0,00	781,35	0,00	1111,78	0,00	0,00	872,64	0,00	1434,40	4394,17
12:00	195,49	0,00	0,00	752,28	0,00	1084,11	0,00	0,00	857,28	0,00	1542,10	4431,26
13:00	194,61	0,00	0,00	795,26	0,00	1065,33	0,00	0,00	859,61	0,00	1460,98	4375,78
14:00	171,35	0,00	0,00	676,67	0,00	913,97	0,00	0,00	778,85	0,00	1330,02	3870,86
15:00	162,05	0,00	0,00	673,00	0,00	843,63	0,00	0,00	719,18	0,00	1221,63	3619,50
16:00	152,03	0,00	0,00	640,74	0,00	824,30	0,00	0,00	691,92	0,00	1152,24	3461,22
17:00	167,24	0,00	0,00	637,18	0,00	878,54	0,00	0,00	728,17	0,00	1216,27	3627,40
18:00	172,50	0,00	0,00	713,47	0,00	910,30	0,00	0,00	789,58	0,00	1295,34	3881,19
19:00	197,25	0,00	0,00	798,27	0,00	1016,83	0,00	0,00	877,06	0,00	1462,25	4351,67
20:00	194,88	0,00	0,00	734,52	0,00	1045,52	0,00	0,00	908,89	0,00	1461,83	4345,64
21:00	192,38	0,00	0,00	777,44	0,00	1040,28	0,00	0,00	907,53	0,00	1450,46	4368,09
22:00	185,87	0,00	0,00	735,65	0,00	964,05	0,00	0,00	858,66	0,00	1379,04	4123,26
23:00	167,24	0,00	0,00	655,24	0,00	880,15	0,00	0,00	761,27	0,00	1222,33	3686,23
24:00	155,89	0,00	0,00	613,23	0,00	835,60	0,00	0,00	713,64	0,00	1111,86	3430,23

Annex D

En l'annex D s'hi pot trobar un resum de les proves experimentals fetes amb el prototip del gasificador. Durant aquestes proves s'han analitzat la pressió i temperatura en les diferents parts del gasificador mitjançant un sistema de motorització. També es mesura la concentració de CO en PPM que hi ha a l'aire de la sala on es fa la prova per avaluar la qualitat del gas sortint de la xemeneia.

D1. Primera prova experimental

El 14 d'abril de 2016 es va dur a terme la primera prova experimental

Objectiu de la prova

Posar en marxa el gasificador amb estella de pi com a combustible. Per posar en marxa el gasificador, com que l'estella de pi no té un PCI elevat, es decideix posar carbó triturat al principi per a que el reactor assoleixi la temperatura desitjada per la gasificació (1100 °C). El carbó es tritura per evitar l'obstrucció de pols.



Figura D.1. Aspecte del gasificador muntat i preparat per a la prova.

Descripció de la prova

Al gasificador li costa molt arrencar i assolir una temperatura elevada. El sistema arrenca però no és capaç de superar els 600 °C a l'estrangulament i els 250 °C a la graella.

Hi ha alguns moments determinats de la prova en què quan es sacseja la graella el reactor es comporta de millor forma i augmenta la temperatura de forma sobtada.

Per la xemeneia del sistema cremador només s'extreu fum.

La concentració a la sala on es troba el gasificador assoleix nivells de 80 ppm de CO.

El bufador utilitzat en aquesta prova s'obstrueix degut als quitrans i després de la prova la quantitat de quitrans és tan elevada que ja no funciona.

Anàlisi post-prova experimental

L'endemà, divendres 15 d'abril es decideix desmuntar el gasificador per veure quin és l'estat del gasificador després de la prova. Es desmunten les següents parts del gasificador i s'observa que:

- Graella: del port de recollida de cendres que hi ha sota la graella se'n treu un cubell ple de carbó i biomassa.
- Cicló: hi ha 1 dit aproximadament d'olis i una petita quantitat de cendres i quitrans formats a la base del pot.
- Filtre: a la base del filtre es veu com hi ha una quantitat de quitrans que supuren a través de les juntes del filtre.
- Tremuja de biomassa: en aixecar la tapa del dipòsit es pot veure vapor condensat a la tapa; això indica que la biomassa de la part superior del dipòsit estava humida. S'observa també que el llit fix ha descendit uns 15cm. Es desconeix però si és degut a que s'ha consumit biomassa o que l'alçada descendida és deguda al sacseig de la graella.

Per facilitar el buidatge del dipòsit es decideix empènyer la biomassa i extreure-la per la part inferior a través del port de recollida de cendres. Al fer passar la biomassa pel reactor s'observa que aquest s'obstrueix amb molta facilitat; en molts casos, la biomassa introduïda és clarament més gran que el diàmetre de l'estrangulament, facilitant-ne l'obstrucció.



Figura D.2. Mida d'alguns trossos d'estella de pi.

Conclusions

Després d'haver observat els resultats de la prova es conclou que:

- S'està generant una quantitat massa elevada de quitrans; aquest fet pot ser degut a que el gasificador no ha assolit la temperatura necessària per la gasificació.
- Alguns dels trossos de biomassa són clarament massa grans per la mida actual del reactor. A més a més posseeixen una geometria molt poc uniforme, fet que afavoreix l'obstrucció del reactor. Es planteja fer la prova amb pèl·lets.
- Cal pensar una alternativa al nou sistema de bufador que hi ha actualment. Es planteja posar-ne un de major potència i que sigui més fàcil de netejar.
- Hi ha la sospita que el comportament no adequat del gasificador podria ser degut a la poca estanqueïtat del sistema. Es planteja la possibilitat de segellar-lo amb silicona.

D2. Segona prova experimental

El 28 d'abril es va dur a terme la segona prova experimental.

Objectiu de la prova

Després de comprovar que l'estella de pi és massa humida per la temperatura que assoleix el gasificador i que algunes estelles són massa grans, es decideix utilitzar pèl·lets de biomassa de les següents característiques:

- Diàmetre (mm): 6 ± 1
- Longitud (mm): $3,15 \leq L \leq 40$
- Densitat (Kg/m^3): ≥ 650
- Durabilitat mecànica (%): $\geq 97,5$
- Humitat (% massa): < 10
- Cendres (% massa): $< 0,7$
- Poder calorífic (Kcal/Kg): 4600
- Nitrogen (% massa): $\leq 0,3$
- Sofre (% massa): $\leq 0,3$



Figura D.3. Aspecte dels pèl·lets de biomassa utilitzats

L'objectiu de la prova és posar el gasificador en marxa amb la nova biomassa.

Descripció de la prova

El sistema arrenca i als 20 min assoleix 400 °C, temperatura que es manté i que no s'és capaç de superar. Se sospita que és degut a que el sistema pot no ser estanc.

Anàlisi post-prova experimental

L'endemà, 29 d'abril es decideix desmuntar el gasificador per veure quin és l'estat del gasificador després de la prova. Es desmunten les següents parts del gasificador i s'observa que:

- Graella: del port de recollida de cendres que hi ha sota la graella se'n treuen cendres.
- Cicló: hi ha 1 dit aproximadament d'olis i una petita quantitat de cendres i quitrans formats a la base del pot.
- Filtre: a la base del filtre es veu com hi ha una quantitat de quitrans que supuren a través de les juntes del filtre.

Conclusions

En buidar el gasificador s'observa que ja no s'obstrueix. Tot i això, la prova no ha sortit satisfactòria ja que no s'ha assolit la temperatura desitjada i s'ha tornat a formar una quantitat molt elevada de quitrans. Alguns dels motius poden ser:

- Poca potència de l'aspirador
- Poca estanqueïtat del sistema
- Reactor massa petit; el reactor del gasificador amb el que es fan les proves està dimensionat per generar una potència de 10 kWt.

D3. Tercera prova experimental

El dimecres 30 de novembre es fa la tercera prova experimental amb el gasificador.

Objectiu

Després de la última prova, s'observa que el sistema està soldat per punts, fet que comporta fuites i fa que el sistema no sigui estanc; es decideix fer la prova amb les juntes segellades amb silicona per fer el sistema més estanc i s'utilitza un altre cop els pèl·lets de biomassa com a combustible, ja que la seva mida evita que s'obturi l'estrangulament del gasificador.

Descripció de la prova

El gasificador s'encén a les 10:20h, la temperatura inicial és de 22,5 °C. Mitjançant les dades del sistema de monitorització es pot veure la temperatura i la pressió a les diferents parts del sistema de gasificació de forma més detallada. El sistema arrenca i als 10 min es produeix una petita explosió que provoca que surti una flama pel port d'encesa i incrementi ràpidament la temperatura (Tmax=800°C); es tapa el port d'encesa i disminueix la temperatura fins als 400 °C. Després de 15 min d'encendre el gasificador s'arriba als 925 °C.

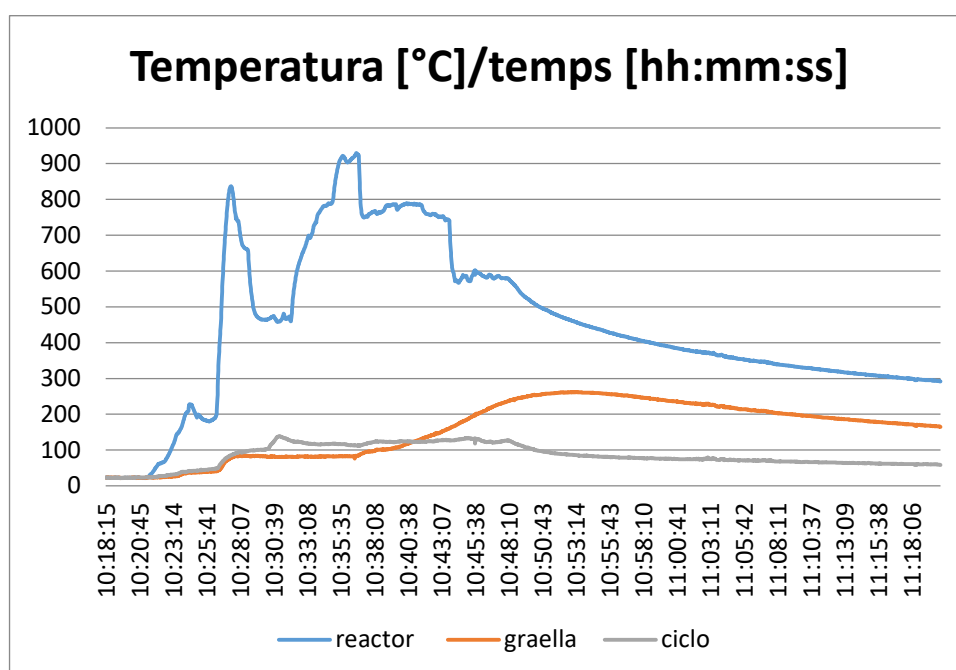


Figura D.4. Gràfic de temperatures respecte al temps en els diferents punts del gasificador.

Es comprova que el gas sigui combustible cremant el gas que surt per la xemeneia, però la flama no surt blava; per tant, no és combustible. Al cap d'una estona el bufador comença a fer soroll, s'espalla i deixa de funcionar. Es decideix apagar el gasificador. Es tanquen les entrades d'aire i es deixa refredar i que el sistema d'extracció buidi la sala de fum abans de recollir.

Anàlisi post-prova experimental

El següent divendres 2 de novembre es desmunta el sistema de gasificació per observar-ne els resultats:

- **Aspirador:** S'ha desfet la unió entre l'eix del motor i les pales. Aquest fet deu poder ser provocat per l'alta temperatura del gas a la xemeneia, la poca qualitat del bufador i els quitrans del gas que arriba al bufador.
- **Pot de condensats del cicló.** No s'han dipositat olis com si passava altres vegades.

Conclusions

Es valora que els resultats son prometedors i que el no haver pogut continuar la prova obliga a tornar a fer-la per poder reafirmar la hipòtesi de l'estanqueïtat. Per tant, es tornarà a provar en les mateixes condicions quan s'obtingui un nou aspirador.

Annex E

A l'Annex E s'hi pot trobar el programa dissenyat per obtenir els fluxos de càrrega:

```

%% Descripció de la xarxa pel moment de màxima demanda
function mpc = c03
%% system MVA base
mpc.baseMVA = 10;

%% bus data
% bus_i type Pd Qd Gs Bs area Vm Va baseKV zone Vmax
% Vmin
mpc.bus = [
1 3 0.0000 0.0000 0 0 1 1 0 50 1 1.1 0.9;
2 1 0.0000 0.0000 0 0 1 1 0 25 1 1.1 0.9;
3 1 0.0000 0.0000 0 0 1 1 0 25 1 1.1 0.9;
4 1 0.0000 0.0000 0 0 1 1 0 25 1 1.1 0.9;
5 1 0.0000 0.0000 0 0 1 1 0 0.4 1 1.1 0.9;
6 1 0.2191 0.1061 0 0 1 1 0 0.4 1 1.1 0.9;
7 1 1.0636 0.5151 0 0 1 1 0 25 1 1.1 0.9;
8 1 0.0000 0.0000 0 0 1 1 0 25 1 1.1 0.9;
9 1 0.5473 0.2651 0 0 1 1 0 0.4 1 1.1 0.9;
10 1 0.9440 0.4572 0 0 1 1 0 25 1 1.1 0.9;
11 1 0.1946 0.0943 0 0 1 1 0 25 1 1.1 0.9;
12 1 0.7932 0.3842 0 0 1 1 0 25 1 1.1 0.9;
13 1 0.8073 0.3910 0 0 1 1 0 25 1 1.1 0.9;
14 1 0.0000 0.0000 0 0 1 1 0 25 1 1.1 0.9;
15 1 0.5709 0.2765 0 0 1 1 0 0.4 1 1.1 0.9;
16 1 0.0000 0.0000 0 0 1 1 0 25 1 1.1 0.9;
17 1 0.0000 0.0000 0 0 1 1 0 25 1 1.1 0.9;
18 1 0.7953 0.3852 0 0 1 1 0 0.4 1 1.1 0.9;
19 1 0.0000 0.0000 0 0 1 1 0 25 1 1.1 0.9;
20 1 1.0653 0.5160 0 0 1 1 0 0.4 1 1.1 0.9;
21 1 0.0000 0.0000 0 0 1 1 0 25 1 1.1 0.9;
22 1 0.0000 0.0000 0 0 1 1 0 25 1 1.1 0.9;
23 1 0.8596 0.4163 0 0 1 1 0 0.4 1 1.1 0.9;
24 1 0.0000 0.0000 0 0 1 1 0 25 1 1.1 0.9;
25 1 1.4610 0.7076 0 0 1 1 0 0.4 1 1.1 0.9;
26 1 0.9585 0.4642 0 0 1 1 0 25 1 1.1 0.9;

];

%% generador data
% bus Pg Qg Qmax Qmin Vg mBase status Pmax Pmin Pc1 Pc2 Qc1min Qc1max
Qc2min Qc2max
mpc.gen = [
1 1 0 1000 -1000 1 100 1 100 0 0 0 0 0 0
0;
];

%% branch data

```

```

% fbus tbus r x b rateA rateB rateC ratio angle
status
mpc.branch = [

    1  2  0.00000 0.10000 0  150 150 150 0  0  1  -360  360;
    2  3  0.01040 0.00320 0  150 150 150 0  0  1  -360  360;
    3  4  0.00052 0.00016 0  150 150 150 0  0  1  -360  360;
    4  5  0.00000 0.25000 0  150 150 150 0  0  1  -360  360;
    5  6  0.00010 0.00011 0  150 150 150 0  0  1  -360  360;
    4  7  0.00197 0.00050 0  150 150 150 0  0  1  -360  360;
    7  8  0.00102 0.00020 0  150 150 150 0  0  1  -360  360;
    8  9  0.00000 0.25000 0  150 150 150 0  0  1  -360  360;
    7 10  0.00115 0.00029 0  150 150 150 0  0  1  -360  360;
    10 11 0.00091 0.00018 0  150 150 150 0  0  1  -360  360;
    10 12 0.00177 0.00034 0  150 150 150 0  0  1  -360  360;
    10 13 0.00182 0.00035 0  150 150 150 0  0  1  -360  360;
    10 14 0.00120 0.00023 0  150 150 150 0  0  1  -360  360;
    14 15 0.00000 0.25000 0  150 150 150 0  0  1  -360  360;
    12 13 0.00125 0.00024 0  150 150 150 0  0  1  -360  360;
    11 16 0.00613 0.00119 0  150 150 150 0  0  1  -360  360;
    16 17 0.00143 0.00028 0  150 150 150 0  0  1  -360  360;
    16 19 0.00143 0.00028 0  150 150 150 0  0  1  -360  360;
    17 18  0.00000 0.25000 0  150 150 150 0  0  1  -360  360;
    17 22 0.00161 0.00031 0  150 150 150 0  0  1  -360  360;
    19 21 0.00130 0.00025 0  150 150 150 0  0  1  -360  360;
    19 20 0.00000 0.25000 0  150 150 150 0  0  1  -360  360;
    21 22 0.00143 0.00028 0  150 150 150 0  0  1  -360  360;
    21 24 0.00091 0.00018 0  150 150 150 0  0  1  -360  360;
    22 23 0.00000 0.25000 0  150 150 150 0  0  1  -360  360;
    24 25 0.00000 0.25000 0  150 150 150 0  0  1  -360  360;
    3  26 0.00663 0.00204 0  150 150 150 0  0  1  -360  360;

];

return;

```

```

function mpc = correntsc03
% Càlcul de les conseqüències de la connexió de la microxarxa

programa_carregar_dades;
microxarxa = runpf('c03');

% Càlcul de la tensió a cada bus
for n = 1:1:26 %busos
    voltatge(n) = (microxarxa.bus(n,8)); % pu
    angle(n) = (microxarxa.bus(n,9))*(pi/180); %rad
    v(n) = (voltatge(n)*cos(angle(n)) + li*voltatge(n)*sin(angle(n))); %
v
end

% Càlcul dels corrents a les branques
mpc = loadcase('c03');
[a,YF,YT] = makeYbus(mpc);
I=max(YF*transpose(v), YT*transpose(v)); % pu
Ireal = I.*Ibase;

```

```

Ifinal= abs(Ireal);
Vfinal=abs(voltatge);

%Bucle que evalua els resultats

for n=1:1:26 %num busos
    if Vfinal(n)-0.9<0
        disp(['Error al bus ',num2str(n),'amb tensió=
',num2str(Vfinal(n)),' pu'])
    end
end

for m=1:1:27 %num branques
    Irelativa(m)=(Ifinal(m)/Imaterial(m))*100;
    if Irelativa(m)-100>0
        disp(['Error a la branca ',num2str(m), ' sent el corrent un ',
num2str(Irelativa(m)-100), '% major del permès pel cable'])
    end
end

%% Descripció de la xarxa per a les 24h del dia
function mpc = c033
%% system MVA base
mpc.baseMVA = 10;

%% demanda per hora

clear Demand
load('time');
programa_carregar_dades;

Demand(:,1)=transpose(Demanda(t,:)/1e3); %[MW]i transposa el vector
demanda (Potència activa)
CT_MAX=size(Demand,1);
PF=0.9;
for n=1:1:CT_MAX
    Demand(n,2)=Demand(n,1)*tan(acos(PF)); %[MVar] Q=P*tan(Fi)
end

%% bus data
% bus_i type Pd Qd Gs Bs area Vm Va baseKV zone Vmax
% Vmin
mpc.bus = [

    1 3 Demand(1,1) Demand(1,2) 0 0 1 1 0 50 1 1.1 0.9;
    2 1 Demand(2,1) Demand(2,2) 0 0 1 1 0 25 1 1.1 0.9;
    3 1 Demand(3,1) Demand(3,2) 0 0 1 1 0 25 1 1.1 0.9;
    4 1 Demand(4,1) Demand(4,2) 0 0 1 1 0 25 1 1.1 0.9;
    5 1 Demand(5,1) Demand(5,2) 0 0 1 1 0 0.4 1 1.1 0.9;
    6 1 Demand(6,1) Demand(6,2) 0 0 1 1 0 0.4 1 1.1 0.9;

```

```

7 1 Demand(7,1) Demand(7,2) 0 0 1 1 0 25 1 1.1 0.9;
8 1 Demand(8,1) Demand(8,2) 0 0 1 1 0 25 1 1.1 0.9;
9 1 Demand(9,1) Demand(9,2) 0 0 1 1 0 0.4 1 1.1 0.9;
10 1 Demand(10,1) Demand(10,2) 0 0 1 1 0 25 1
1.1 0.9;
11 1 Demand(11,1) Demand(11,2) 0 0 1 1 0 25 1
1.1 0.9;
12 1 Demand(12,1) Demand(12,2) 0 0 1 1 0 25 1
1.1 0.9;
13 1 Demand(13,1) Demand(13,2) 0 0 1 1 0 25 1
1.1 0.9;
14 1 Demand(14,1) Demand(14,2) 0 0 1 1 0 25 1
1.1 0.9;
15 1 Demand(15,1) Demand(15,2) 0 0 1 1 0 0.4 1
1.1 0.9;
16 1 Demand(16,1) Demand(16,2) 0 0 1 1 0 25 1
1.1 0.9;
17 1 Demand(17,1) Demand(17,2) 0 0 1 1 0 25 1
1.1 0.9;
18 1 Demand(18,1) Demand(18,2) 0 0 1 1 0 0.4 1
1.1 0.9;
19 1 Demand(19,1) Demand(19,2) 0 0 1 1 0 25 1
1.1 0.9;
20 1 Demand(20,1) Demand(20,2) 0 0 1 1 0 0.4 1
1.1 0.9;
21 1 Demand(21,1) Demand(21,2) 0 0 1 1 0 25 1
1.1 0.9;
22 1 Demand(22,1) Demand(22,2) 0 0 1 1 0 25 1
1.1 0.9;
23 1 Demand(23,1) Demand(23,2) 0 0 1 1 0 0.4 1
1.1 0.9;
24 1 Demand(24,1) Demand(24,2) 0 0 1 1 0 25 1
1.1 0.9;
25 1 Demand(25,1) Demand(25,2) 0 0 1 1 0 0.4 1
1.1 0.9;
26 1 Demand(26,1) Demand(26,2) 0 0 1 1 0 25 1
1.1 0.9;

];

%% generador data
% bus Pg Qg Qmax Qmin Vg mBase status Pmax Pmin Pc1 Pc2 Qc1min Qc1max
Qc2min Qc2max
mpc.gen = [
1 1 0 1000 -1000 1 100 1 100 0 0 0 0 0 0
0;
];

%% branch data
% fbus tbus r x b rateA rateB rateC ratio angle
status
mpc.branch = [
1 2 0.00000 0.10000 0 150 150 150 0 0 1 -360 360;
2 3 0.01040 0.00320 0 150 150 150 0 0 1 -360 360;
3 4 0.00052 0.00016 0 150 150 150 0 0 1 -360 360;
4 5 0.00000 0.25000 0 150 150 150 0 0 1 -360 360;

```



```

5 6 0.00010 0.00011 0 150 150 150 0 0 1 -360 360;
4 7 0.00197 0.00050 0 150 150 150 0 0 1 -360 360;
7 8 0.00102 0.00020 0 150 150 150 0 0 1 -360 360;
8 9 0.00000 0.25000 0 150 150 150 0 0 1 -360 360;
7 10 0.00115 0.00029 0 150 150 150 0 0 1 -360 360;
10 11 0.00091 0.00018 0 150 150 150 0 0 1 -360 360;
10 12 0.00177 0.00034 0 150 150 150 0 0 1 -360 360;
10 13 0.00182 0.00035 0 150 150 150 0 0 1 -360 360;
10 14 0.00120 0.00023 0 150 150 150 0 0 1 -360 360;
14 15 0.00000 0.25000 0 150 150 150 0 0 1 -360 360;
12 13 0.00125 0.00024 0 150 150 150 0 0 1 -360 360;
11 16 0.00613 0.00119 0 150 150 150 0 0 1 -360 360;
16 17 0.00143 0.00028 0 150 150 150 0 0 1 -360 360;
16 19 0.00143 0.00028 0 150 150 150 0 0 1 -360 360;
17 18 0.00000 0.25000 0 150 150 150 0 0 1 -360 360;
17 22 0.00161 0.00031 0 150 150 150 0 0 1 -360 360;
19 21 0.00130 0.00025 0 150 150 150 0 0 1 -360 360;
19 20 0.00000 0.25000 0 150 150 150 0 0 1 -360 360;
21 22 0.00143 0.00028 0 150 150 150 0 0 1 -360 360;
21 24 0.00091 0.00018 0 150 150 150 0 0 1 -360 360;
22 23 0.00000 0.25000 0 150 150 150 0 0 1 -360 360;
24 25 0.00000 0.25000 0 150 150 150 0 0 1 -360 360;
3 26 0.00663 0.00204 0 150 150 150 0 0 1 -360 360;

];

return;

%% Càlcul del flux de potència
function mpc = c044
%% Bucle per calcular el flux de càrregues per a cada hora
clear all; clc;
% carreguem dades de taules excel
programa_carregar_dades;

mpopt=mpoption('out.all',2);

tmax=24;
inputflow=zeros(tmax,1);

% disp(['TENSIONS ALS BUSOS'])
for t=1:1:tmax
    save('time','t');
    % disp(['Periode',num2str(t)])
    mpc=loadcase('c033');
    results{t}=runpf(mpc,mpopt);
end;
for t=1:1:tmax
    for n=1:1:26; %num busos
        v(t,n) = (results{t}.bus(n,8));% pu
        angle(t,n) = (results{t}.bus(n,9))*(pi/180); %rad
        voltage(t,n) = (v(n)*cos(angle(n)) + li*v(n)*sin(angle(n))); % V

        %disp(['Bus ',num2str(n),' ',num2str(voltage(t,n))])
    end ;
end
end

```

```

%currents calculation

[Ybus,Yf,Yt]=makeYbus(results{t});
Ifrom=Yf*transpose(voltage);
Ito=Yt*transpose(voltage);
I=max(Ifrom,Ito)
% disp(['CORRENTS A LES BRANQUES'])
for t=1:1:24; %num de periodes
%   disp(['Periode',num2str(t)])
  for n=1:1:27;%num de branques
    Ireal(n,t)=Ibase(n)*I(n,t);
    %disp(['Branca ',num2str(n),' ','=' ,num2str(Ireal(n,t))])
  end;
end;

  Ifinal=abs(Ireal);
  Vfinal=abs(voltage);

%bucle que evalua resultats

for t=1:1:24 %num periodes
  for n=1:1:26 %num busos
    if Vfinal(t,n)-0.9<0
      disp(['Error al bus ',num2str(n),' , durant el periode: ',num2str(t), ' amb valor=', num2str(Vfinal(t,n))])
    end
  end
  for m=1:1:27 %num branques
    Irelativa(m,t)=(Ifinal(m,t)/Imaterial(m))*100;
    if Irelativa(m,t)-100>0
      %   disp(['Error a la branca ',num2str(m),' , durant el
periode: ',num2str(t), ' sent ', num2str(Irelativa(m,t)-100), '% major'])
    end
  end
end

for m=1:1:24; %numero de periodes
  PotActiva(m)=results{1,m}.branch(1,14);
  PotDemanda(m)=sum(Demanda(m,:))/1000;
  for q=1:1:26; %numero de busos
    Pot_TO(q,m)=results{1,m}.branch(q,16);
    Pot_FROM(q,m)=results{1,m}.branch(q,14);
  end
end

plot(PotActiva,'r')
hold on
plot(PotDemanda,'g')
title('Potència consumida xarxa - Potència demandada')
ylabel('Potència(MW)')
xlabel('Hores (h)')
legend('Xarxa','Demanda')

```