



# MASTER EN AUTOMOCIÓN

## ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

### TRABAJO FIN DE MÁSTER

#### Diagnóstico y monitorizado del funcionamiento de motores de combustión alimentados con gas pobre

Autor: Juan Carlos Lucero Narváez

Tutor: Francisco Tinaut Fluixá

Valladolid, Febrero 2014

#### Escuela Ingenierías Industriales

Depto. Ing<sup>a</sup> Energética y Fluidomecánica  
Paseo del Cauce s/n  
47011 Valladolid  
(España)



#### Fundación Cidaut

Parque Tecnológico de Boecillo, 209  
47151 Boecillo (Valladolid)  
España



## RESUMEN

El presente trabajo del programa de Master en Automoción de la Universidad de Valladolid, está desarrollado en base a las prácticas empresariales realizadas en la entidad colaboradora Fundación CIDAUT, se realiza con el fin de determinar aspectos y técnicas de mantenimiento predictivo de motores estacionarios para la generación de energía eléctrica. Los motores de combustión interna alternativos (MCIA) están integrados a la tecnología de gasificación termoquímica de biomasa. La gasificación es un proceso que convierte la biomasa en un combustible gaseoso útil para la alimentación de motores MCIA, aprovechando energéticamente los residuos forestales y agrícolas.

El capítulo 1 está dedicado a la introducción y justificación del desarrollo del presente trabajo, se determina que el objetivo principal es tener una guía del estado del arte del diagnóstico y motorizado del funcionamiento de MCIA a gas pobre. En el capítulo 2 se presenta una breve descripción del proceso de gasificación, los agentes que intervienen y tipos de gasificadores, la importancia y ventajas que tiene un gasificador Downdraft. Además se expone las características que debe cumplir el gas pobre para el uso en motores de combustión interna, dando importancia a su tratamiento de limpieza y enfriamiento. Este capítulo también contiene información de las condiciones de funcionamiento de una planta de gasificación y se representa esquemáticamente el proceso de gasificado, sus sistemas y elementos. El capítulo 3 está destinado a exponer las clases de motores que usan gas como combustible e indica las características de funcionamiento de motores alimentados por gas pobre. Se da importancia al tema de combustión y al poder calorífico de una mezcla de gas pobre-aire. Estos tres primeros capítulos están dedicados a exponer varios aspectos teóricos de la tecnología de gasificación y su uso en motores de combustión.

Para los capítulos 4, 5 y 6 se hablarán de situaciones teóricos-prácticos con la identificación de procedimientos y técnicas de mantenimiento predictivo. En el capítulo 4 se recogen aspectos generales del diagnóstico y mantenimiento de motores a gas de gasificación, estableciendo conceptos de los tipos de mantenimientos, así como la importancia de diagnosticar y predecir fallos y su correlación con síntomas y anomalías. En el capítulo 5 se describe el monitorizado de las variables de funcionamiento o síntomas de un motor a gas pobre para detectar anomalías o fallas. También se describe los fallos típicos que pueden tener los motores a gas pobre. El capítulo 6 expone las características y propiedades que debe tener el lubricante del motor y la importancia del análisis de aceite dentro del mantenimiento predictivo de motores.

En resumen, el diagnóstico y monitorizado es una herramienta importante dentro del mantenimiento predictivo de motores a gas pobre, debido que las condiciones y propiedades del gas gasificado no son siempre constantes, por lo que se requiere un conocimiento específico del funcionamiento del motor y del análisis de sus variables. Para descartar y prevenir futuros fallos en el motor y en la planta de gasificación. Consiguiendo de esta manera reducir costos, tener mayor rendimiento, cumplir con normas de seguridad y de contaminación.

## Diagnosis and monitorization of the operation of combustion engines fuelled by producer gas

### ABSTRACT

This work related to Master of Automotive Engineering, University of Valladolid, is based on business practices performed in the collaborative institution CIDAUT Foundation. The purpose of work is to determine aspects and techniques of predictive maintenance of stationary engines in order to generate electric power. Alternative Internal Combustion Engines (ICE) are part of thermochemical biomass gasification technology. Gasification is a process that converts biomass into a combustible gas useful for the engine supply (ICE) taking energetically advantage of forest and agricultural residues.

Chapter 1 refers to introduction and justification of development of this work. It is defined that its main purpose is to inform about state of the art diagnostics and monitorised operation of ICE with producer gas. Chapter 2 briefly describes gasification process as well as intervening elements, types of gasificators and the advantages of a gasificator Downdraft. In addition, necessary characteristics of producer gas are analyzed in order to be used in internal combustion engines, paying attention to cleaning and cooling treatment. This chapter also provides information about operation conditions of a gasification plant, and schematically describes gasification process with its systems and elements. Chapter 3 refers to types of engines which use combustible gas and it points out the characteristics of engine operation fueled by producer gas. It also refers to the subject of combustion and calorific power mixed of producer gas and air. Those three chapters present various aspects of theory of technology of gasification and its use on combustion engines.

Chapters 4, 5 and 6 refer to theoretical and practical situations of procedures and techniques of predictive maintenance. Chapter 4 is about general aspects of diagnostics and maintenance of engines by gasification presenting concepts of the maintenance types. Moreover, it points out the significance of diagnosing and predicting mistakes, and its correlation with symptoms and defects. Chapter 5 is about monitoring operating variables or symptom of an engine with producer gas in order to detect defects or mistakes. Furthermore, it refers to possible typical mistakes of a producer gas. Chapter 6 presents characteristics and qualities of an engine lubricant and the significance of analysis of oil in predictive maintenance of engines.

In summary, diagnosis and monitorization is an important tool about predictive maintenance of lean gas engines, due to the conditions and gasified gas properties are not always constant, then is a require have a specific knowledge of engine operation and analysis of its variables, with the reason to eliminate and prevent future failure. Thereby achieving lower costs, have better performance, comply with safety standards and pollution.

## Agradecimientos

A Dios por permitirme gozar de salud y guiarme a lo largo del desarrollo de mis estudios, por ser el apoyo incondicional en los momentos de debilidad.

Agradezco inmensamente al Gobierno Ecuatoriano por haberme brindado la oportunidad de otorgarme una beca completa para realizar mis estudios en el exterior.

A mis padres Laura y Rigo por brindarme toda su confianza y apoyo en mis objetivos personales y profesionales.

De manera muy especial y sincera agradezco a mi Profesor y Tutor de TFM Francisco Tinaut, por su gran capacidad para guiar, corregir y comentar mi proceso en la realización del presente trabajo.

A la Fundación CIDAUT por permitirme entrar en su grupo de trabajo e investigación.

## Nomenclatura

|              |  |
|--------------|--|
| EFQ          | Engine Fuel Quality                      |
| F            | Dosado absoluto                          |
| Frg          | Relación de equivalencia de gasificación |
| $H_{ve,vol}$ | Poder calorífico de la mezcla volumen    |
| i            | Número de ciclos por vuelta              |
| LHV          | Poder calorífico inferior                |
| MCIA         | Motor de combustión interna alternativo  |
| MEP          | Motor de encendido provocado             |
| MEC          | Motor de encendido por compresión        |
| $N_e$        | Potencia efectiva                        |
| n            | Régimen de giro                          |
| P            | Presión                                  |
| T            | Temperatura                              |
| $V_T$        | Cilindrada total                         |
| $\eta_v$     | Rendimiento volumétrico                  |
| $\eta_e$     | Rendimiento efectivo                     |
| $\rho_{ia}$  | Densidad del aire                        |

## Índice

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | Introducción .....  | 1  |
| 1.1   | Objetivos .....   | 1  |
| 1.2   | Justificación .....   | 1  |
| 2     | Gasificación termoquímica .....   | 3  |
| 2.1   | Proceso de gasificación .....   | 3  |
| 2.2   | Agente gasificante.....   | 5  |
| 2.3   | Biomasa .....   | 5  |
| 2.4   | Gasificadores .....   | 7  |
| 2.4.1 | Updraft .....   | 8  |
| 2.4.2 | Downdraft.....  | 8  |
| 2.4.3 | Comparativa downdraft vs updraft .....  | 9  |
| 2.5   | Poder calorífico del combustible .....  | 10 |
| 2.6   | Tratamiento del gas pobre .....   | 12 |
| 2.7   | Planta de gasificación .....  | 13 |
| 2.7.1 | Condiciones de funcionamiento .....   | 13 |
| 2.7.2 | Esquema de la planta de gasificación .....                                      | 15 |
| 3     | Características de los motores a combustión interna con gas pobre. ....         | 17 |
| 3.1   | Clasificación de los motores a gas.....   | 17 |
| 3.1.1 | Motores diésel de gas .....   | 17 |
| 3.1.2 | Motor de gas de encendido por chispa y baja compresión .....                    | 17 |
| 3.1.3 | Motores duales o mixtos .....   | 18 |
| 3.1.4 | Motores de gas de alta compresión y encendido por chispa.....                   | 18 |
| 3.2   | Funcionamiento del motor a gas pobre.....                                       | 19 |
| 3.2.1 | Combustión del gas en motores de combustión interna.....                        | 19 |
| 3.2.2 | Efecto de composición de la mezcla-dosado .....                                 | 21 |
| 3.2.3 | Poder calorífico de una mezcla gas pobre-aire .....                             | 22 |
| 4     | Aspectos generales del diagnóstico y mantenimiento de motores a gas pobre ..... | 25 |
| 4.1   | Introducción .....  | 25 |
| 4.2   | Definición de términos.....   | 25 |
| 4.2.1 | Fallo y avería.....   | 25 |
| 4.2.2 | Anomalía.....   | 26 |
| 4.2.3 | Síntoma.....  | 26 |
| 4.2.4 | Diagnóstico y predicción de fallos y averías.....                               | 26 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 4.2.5 | Mantenimiento predictivo .....  | 27 |
| 4.2.6 | Mantenimiento preventivo y correctivo.....  | 29 |
| 5     | Diagnóstico y supervisión del motor para detectar anomalías de funcionamiento ..... | 31 |
| 5.1   | Correlación síntomas-fallos.....  | 31 |
| 5.2   | Variables de funcionamiento motorizadas en continuo .....                           | 31 |
| 5.2.1 | Temperaturas.....   | 32 |
| 5.2.2 | Presiones .....   | 33 |
| 5.2.3 | Otras variables de funcionamiento.....  | 35 |
| 5.3   | Origen de fallos en motores a gas pobre .....                                       | 36 |
| 5.4   | Fallos típicos en motores a gas pobre .....   | 36 |
| 5.4.1 | Culata y válvulas .....   | 38 |
| 5.4.2 | Aceite lubricante.....  | 38 |
| 5.4.3 | Corrosión .....   | 39 |
| 5.4.4 | Gripado entre pistón y camisa.....  | 39 |
| 5.4.5 | Detonación.-.....   | 40 |
| 5.4.6 | Emisiones de gases contaminantes.....   | 41 |
| 5.4.7 | Catalizador de oxidación.....   | 41 |
| 5.4.8 | Problemas generales .....   | 42 |
| 6     | Diagnóstico del estado del motor a través del análisis del lubricante. ....         | 43 |
| 6.1   | Características de los aceites .....  | 44 |
| 6.1.1 | Viscosidad.....   | 44 |
| 6.1.2 | Acidez-basicidad del aceite.....  | 45 |
| 6.1.3 | Insolubles del Aceite .....   | 46 |
| 6.1.4 | Reposiciones de aceite .....  | 47 |
| 7     | Conclusiones .....  | 49 |
| 7.1   | Generales .....   | 49 |
| 7.2   | Específicas.....  | 49 |
| 7.3   | Sugerencias para desarrollo futuros .....   | 52 |
| 8     | Bibliografía .....  | 53 |

# 1 Introducción

Los motores de combustión interna que trabajan con gas de gasificación como combustible, se los llama genéricamente motores a gas pobre debido que el gas de gasificación tiene un bajo poder calorífico que es del orden de 5 MJ/m<sup>3</sup>n, menos del 15% del poder calorífico del gas natural. La gasificación termoquímica de combustibles sólidos como el carbón mineral o la biomasa es una tecnología desarrollada desde el siglo XVIII.

## 1.1 Objetivos

El objetivo principal del presente trabajo titulado “**Diagnóstico y motorizado del funcionamiento de motores de combustión alimentados con gas pobre**” es recopilar en un documento información del estado del arte de tema y sumar las experiencias de carácter teórico-práctico sobre el mantenimiento predictivo de motores a gas pobre.

Otro objetivo de la realización del presente trabajo es que sirva de base para posibles líneas de investigación, desarrollo y aplicación de la importancia del diagnóstico y motorizado de motores estacionarios.

## 1.2 Justificación

El uso de la biomasa como recurso energético es de gran importancia para el desarrollo socioeconómico, la energía producida con biomasa puede ser usada en el sector doméstico en la calefacción y producción de agua caliente, y en zonas rurales como calor para procesos industriales y generación eléctrica. El uso de la biomasa como recurso energético, en lugar de los combustibles fósiles, supone ventajas como:

### Ventajas medioambientales

- Disminución de las emisiones de azufre.
- Disminución de las emisiones de partículas.
- Emisiones reducidas de contaminantes como CO, HC y NOX.
- Ciclo neutro de CO<sub>2</sub>, sin contribución al efecto invernadero.
- Reducción del mantenimiento y de los peligros derivados del escape de gases tóxicos y combustibles en las casas.
- Reducción de riesgos de incendios forestales y de plagas de insectos.
- Aprovechamiento de residuos agrícolas, evitando su quema en el terreno.

### Ventajas económicas

- Diversificación de fuentes de energía
- Desarrollo de tecnologías.
- Independencia de las fluctuaciones de los precios de los combustibles provenientes del exterior (no son combustibles importados).

## **Ventajas sociales**

- Mejora socioeconómica de las áreas rurales.
- Aumento de utilización de mano de obra local.
- Posibilidad de mejorar condiciones de vida de comunidades rurales.

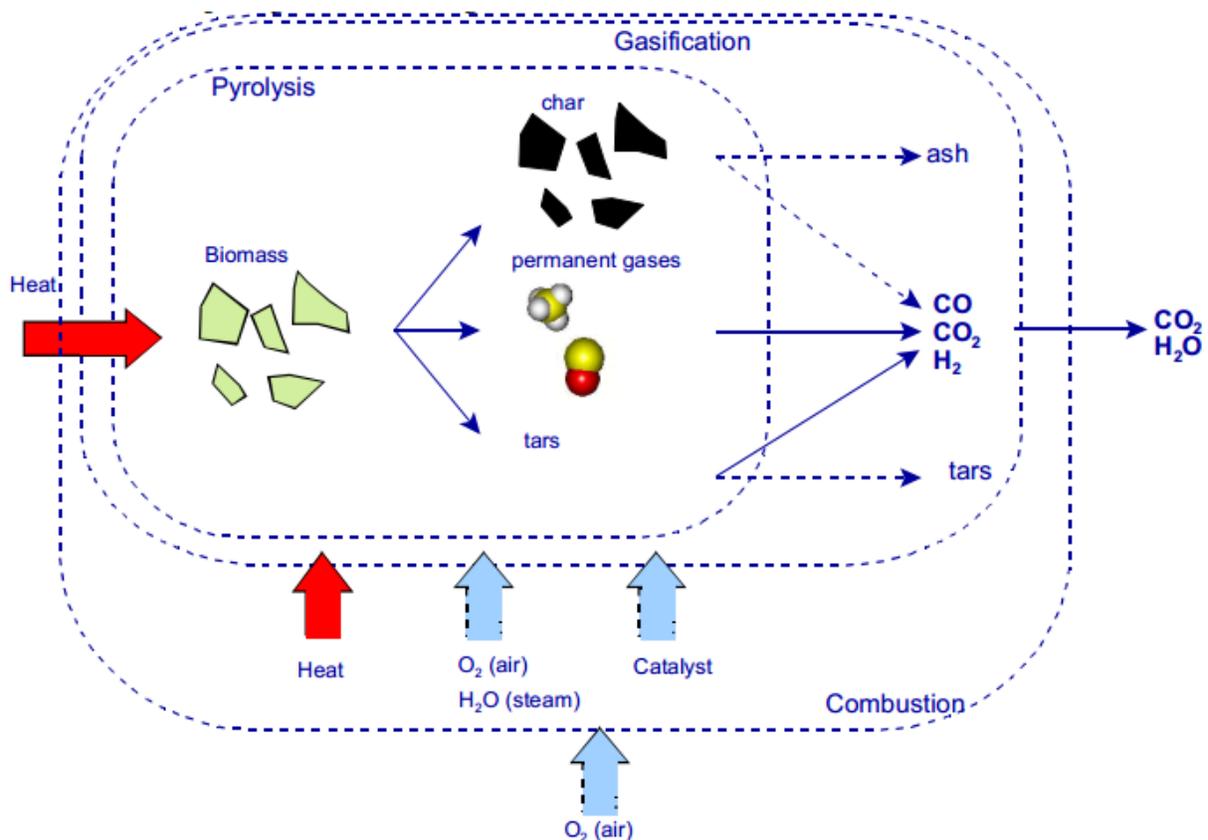
Por otro lado las desventajas del uso de la biomasa para la producción de energía eléctrica a diferencia de aplicaciones térmicas con producción de calor y agua caliente, es que precisa de sistemas más complejos y de mayor inversión. El rendimiento también se ve afectado por el bajo poder calorífico, alto porcentaje de humedad, gran contenido en volátiles y abastecimiento continuo de la biomasa, por lo que es necesario una gran inversión tecnológica para el mejor aprovechamiento energético y una mayor rentabilidad.

Estas desventajas son minimizadas al aplicar el control y monitorizado de la plantas de gasificación y de sus elementos en especial los motores de combustión interna.

## 2 Gasificación termoquímica

El gas de gasificación como su nombre lo indica se produce por medio de la gasificación termoquímica de combustibles sólidos como el carbón mineral o la biomasa. El proceso de gasificación produce componentes principales como monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H<sub>2</sub>), este gas es de bajo poder calorífico, pero puede ser usado directamente para generación térmica o como combustible de motores de combustión. El gas de gasificación tiene varias denominaciones; gas pobre, gas de madera o en inglés producer gas y wood gas. En la Gráfica 1 Esquema de la gasificación como uno de los procesos de conversión térmica (Knoef, 2007) se puede observar esquemáticamente los procesos involucrados en la gasificación de la biomasa, comparados con los de pirólisis (ausencia de oxígeno) y la combustión (exceso de oxígeno).

**Gráfica 1 Esquema de la gasificación como uno de los procesos de conversión térmica (Knoef, 2007)**



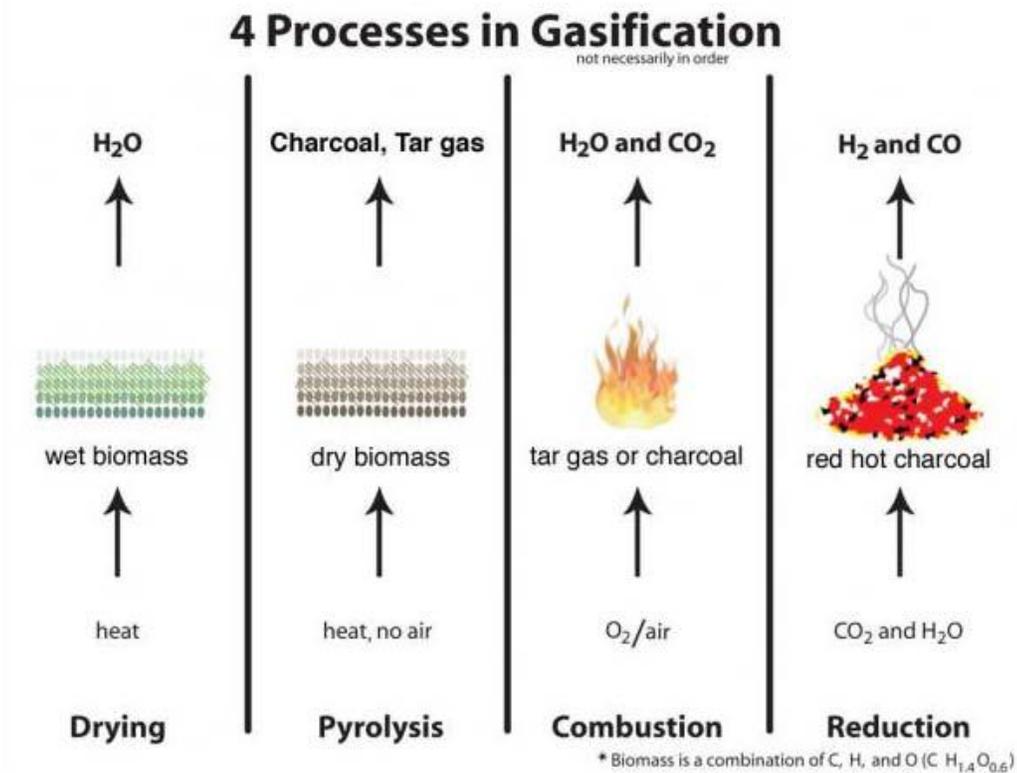
### 2.1 Proceso de gasificación

La transformación de la biomasa a un gas combustible se debe a un proceso de combustión incompleto de elevadas temperaturas en un medio de gasificación como el aire, vapor de agua e incluso hidrógeno. Independiente del tipo de gasificador, el proceso de gasificación cuenta con 4 etapas principales que son:

- Drying (secado) es la primera etapa donde se produce un calentamiento de la biomasa y hace que se evapore el agua.
- Pyrolysis (ruptura de calor) también conocida como descomposición térmica, carbonización o destilación. En esta etapa se rompen las moléculas grandes dando lugar a otras de cadena más corta, que a la temperatura del reactor están en fase gaseosa. La descomposición deja un residuo carbonoso sólido llamado char, líquidos que en su mayoría son alquitranes y vapores condensables de alto y medio peso molecular llamados alquitranes (tars) y gases formados por hidrocarburos volátiles de bajo peso molecular.
- Oxidación o combustión.- Aquí se produce contacto entre la materia carbonosa más pesada y el gasificante, mantiene la temperatura de reacción y aporta la energía que consume la reacción de la etapa de reducción.
- Reducción o gasificación.- Ocurren reacciones mayoritariamente endotérmicas solido-gas o gas-gas, estas reacciones empiezan a ocurrir cuando la temperatura de los residuos sólidos carbonosos alcanza los 973K, en esta etapa se reduce el dióxido de carbono fomentando la aparición de monóxido de carbono, así como la reacción entre el vapor de agua con el carbono (char) y con el propio monóxido de carbono para generar hidrógeno.

Este proceso de gasificación no necesariamente debe seguir ese orden, el mismo dependerá del tipo de gasificado. A continuación se presenta un esquema de lo expuesto.

**Gráfica 2 Proceso de gasificación**



## 2.2 Agente gasificante

El agente gasificante usado en el proceso de gasificación proporcionará un gas con diferentes composiciones y poderes caloríficos. (McKendry, Energy production from biomass (part 3): gasification technologies, 2001)

- Usando aire.- Gran parte de la biomasa procesada se quema con el oxígeno y otra parte se reduce. Es un gas con un bajo poder calorífico (gas pobre, 4–6 MJ/Nm<sup>3</sup>) y es el que se usa en motores de combustión interna.
- Usando vapor de agua u oxígeno.- Aumenta la producción de hidrógeno, el problema es los gastos por el oxígeno o agua. Las instalaciones con este gasificante por lo general utilizan una turbina como elemento generador de electricidad. (12–18 MJ/Nm<sup>3</sup>)
- Hidrogenación.- Se consigue un gas de síntesis, teniendo un gas con alto poder calorífico (40 MJ/Nm<sup>3</sup>)

## 2.3 Biomasa

El uso de productos obtenidos a partir de la materia orgánica para producir energía, se los conoce como “biomasa”, estos pueden ser residuos de aprovechamientos forestales y cultivos agrícolas, residuos de podas de jardines, residuos de industrias agroforestales, cultivos con fines energéticos, etc. Las características generales de la biomasa permiten que pueda gasificarse sin ningún tipo de problema.

Al ser diversos estos combustibles sólidos primarios nace un problema de uniformidad de gasificación, debido que las propiedades químicas, físicas, morfológicas y densidades son diferentes para cada biomasa y al no existir un gasificador universal que aproveche todas estas propiedades da paso a la creación de diversos tipos de gasificadores.

Es de gran importancia identificar las especificaciones de la biomasa que se va a procesar, debido que podremos conocer si el gasificador funcionará correctamente respecto a estabilidad, calidad de gas, eficiencia y pérdidas de presión. Estas especificaciones son: contenido energético, humedad, granulometría, contenido de volátiles y cenizas.

**Contenido energético.-** Para presentar el poder calorífico de un combustible sólido en gasificación se da el valor calorífico inferior, basado en la masa e incluyendo las cenizas, todo esto con referencia específica al contenido real de humedad.

**Granulometría.-** Hace referencia del tamaño del combustible sólido, el cual debe ser adecuado para el tipo de gasificador para evitar problemas tales como: aumento excesivo del contenido de alquitrán en el gas, problemas de arranque, trabas en sistemas de alimentación automáticos y transporte del combustible dentro del gasificador.

**Humedad.-** El contenido de humedad, o humedad relativa, se define como la cantidad de agua presente en la biomasa, expresada como un porcentaje del peso. Este peso se puede referir sobre base húmeda, sobre una base seca, y sobre una base seca libre de ceniza. Si el contenido de humedad es determinado sobre una base “húmeda”, el peso del agua se expresa como porcentaje de la suma del peso del agua, de la ceniza, y de la materia seca libre de ceniza. El contenido de agua en la biomasa es muy importante porque si hay un exceso de humedad disminuirá la eficiencia térmica de la gasificación.

Y cuando el contenido de humedad es superior al 30% será difícil el arranque del gasificador. Lo ideal es tener una biomasa entre 10 y 15%, aunque este depende del tipo de gasificador y del combustible usado.

Cuando se tiene una biomasa húmeda se puede secar usando el calor de los gases de escape del motor de combustión, lo cual aprovecharía de mejor manera la energía del combustible.

**Contenido de materiales volátiles.-** La materia volátil, se refiere a la parte de la biomasa que se obtiene cuando la biomasa es calentada (hasta 400 a 500°C). Durante este proceso de calentamiento, la biomasa se descompone en gases volátiles y carbón de leña sólido. La biomasa tiene típicamente un alto contenido de materia volátil (de hasta 80 por ciento). (Toscano, 2009)

**Contenido de cenizas o carbono fijo (Char).-** El componente inorgánico (contenido de ceniza) se puede expresar de la misma forma como el contenido de humedad sobre una base húmeda, seca, o seca libre de ceniza, el contenido de ceniza se expresa generalmente sobre una base seca.

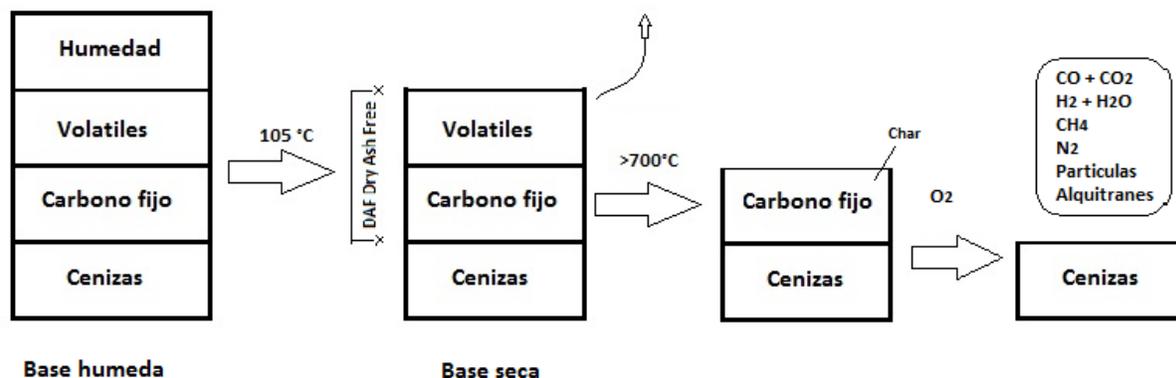
El problema con el contenido de cenizas es la formación de escoria que trae consigo alquitranes y problemas de bloqueos del gasificador. La formación de escoria no solo depende del contenido de cenizas del combustible, también de la temperatura de fusión de las cenizas y de la distribución de temperatura dentro del gasificador.

**Alquitranes (Tars).-** Son volátiles con un alto peso molecular asociados a hidrocarburos en forma de vapor. Los alquitranes a baja temperatura se condensan, tienen aspecto viscoso y pueden causar graves daños a los mores de combustión.

El problema de formación de escoria se da con mayor frecuencia en gasificadores de lecho móvil debido a su fusión y aglomeración. Como referencia (Fonseca, 2003) se tiene que no existe formación de escoria en combustibles con un contenido inferior de 5 o 6 % de contenido de cenizas y existe una mayor concentración de ella en biomásas mayores al 12%.

En el siguiente esquema se puede observar el cambio de los componentes de la biomasa en el proceso de gasificación.

**Gráfica 3 Análisis inmediato de la biomasa**



## 2.4 Gasificadores

Existe varias tecnologías y tipos de gasificadores cada uno tiene sus propiedades específicas, dependiendo de la biomasa que vamos a procesar y del resultado que se desea obtener se puede elegir el modelo más adecuado. Los reactores que podemos encontrar son:

- Lecho fijo
  - Updraft
  - Downdraft
- Lecho fluidizado
  - Burbujeante
  - Circulante
  - Arrastrado
- Rotatorios
- Reactores paralelos o dobles

En la siguiente tabla se puede observar las principales características de estos gasificadores.

**Tabla 1 Características de distintos tipos de gasificadores (CIDAUT, 2011)**

| Tipo                    | Temperatura |            | Alquitrán | Partículas | Capacidad<br>Max.(t/h) | MWe  |      |
|-------------------------|-------------|------------|-----------|------------|------------------------|------|------|
|                         | Reacción    | Gas salida |           |            |                        | Min. | Max. |
| <b>Lecho fijo</b>       |             |            |           |            |                        |      |      |
| Downdraft               | 1000        | 800        | m. bajo   | moderado   | 0,5                    | 0,1  | 1    |
| Updraft                 | 1000        | 250        | m. alto   | moderado   | 10                     | 1    | 10   |
| <b>Lecho fluidizado</b> |             |            |           |            |                        |      |      |
| Lecho circulante        | 850         | 850        | bajo      | m. alto    | 20                     | 2    | 100  |
| Lecho arrastrado        | 1000        | 1000       | bajo      | m. alto    | 20                     | 5    | 100  |
| <b>otros</b>            |             |            |           |            |                        |      |      |
| Rotatorio               | 800         | 800        | alto      | alto       | 10                     | 2    | 30   |

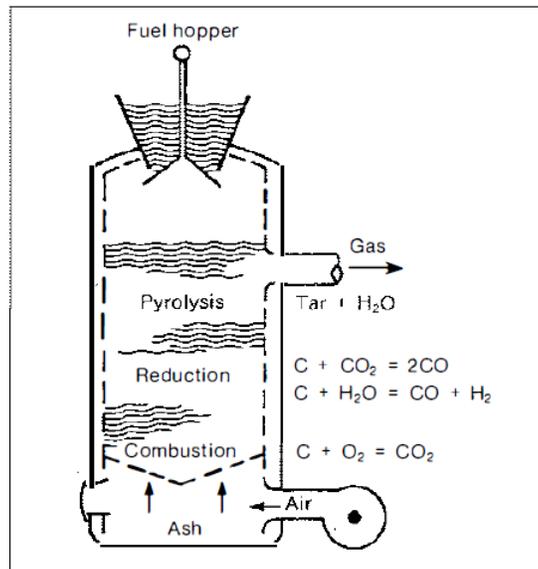
Los gasificadores de tipo de lecho fijo serán analizados brevemente por su importancia y uso en motores de combustión interna. En algunas bibliografías estos gasificadores se los nombra como lecho móvil (moving-bed) y en otras como lecho fijo (fixed-bed). Cualquiera de las denominaciones puede ser de dos tipos: downdraft y updraft, atendiendo al sentido relativo aire/biomasa.

Las mayores ventajas de usar gasificadores de lecho fijo son su versatilidad, ya que pueden usar aire, oxígeno y vapor de agua como gas gasificante. Principalmente son frecuentemente usados por su simplicidad y bajo coste de inversión y operación

## 2.4.1 Updraft

Este gasificador es también conocido como gasificador en contracorriente, countercurrent, corriente ascendente o tiro directo. Adquiere este nombre porque la entrada de aire se encuentra en el fondo y el gas producido por la parte superior. Como resultado el gas de salida es una mezcla de los gases de reducción, oxidación y pirolisis y por lo tanto el gas contiene un alto porcentaje de alquitranes y de partículas de biomasa. (Ver tabla 2)

**Gráfica 4 Gasificador Updraft (SERI, 1988)**

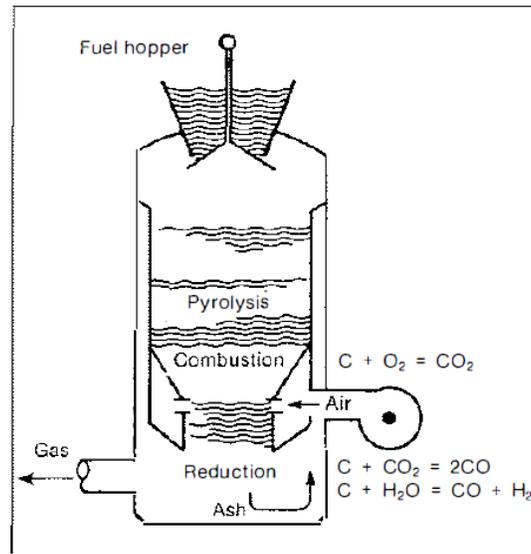


## 2.4.2 Downdraft

También llamado gasificador en corriente paralela, cocurrent, corriente descendiente o tiro invertido. Es el equipo que mejor trabaja con los motores a combustión interna debido a su bajo contenido de alquitranes y de partículas (ver tabla 2). La toma de aire se encuentra en la mitad de la altura del gasificador y el gas sale por abajo.

La temperatura de los gases de salida es de 500°C aproximadamente, lo cual disminuye el poder calorífico de estos gases.

**Gráfica 5 Gasificador Downdraft (SERI, 1988)**



### 2.4.3 Comparativa downdraft vs updraft

Se ha indicado que la principal ventaja que tienen los gasificadores downdraft son sus bajas cantidades de alquitranes producidos, pero también es importante conocer las desventajas y en especial comparar sus características con los gasificadores updraft. En la siguiente tabla se enumera las ventajas y desventajas

**Tabla 2 Ventajas y desventajas de los gasificadores a lecho fijo (CIDAUT, 2011)**

|                    | <b>Updraft</b>   | <b>Dowdraft</b>   |
|--------------------|--|---|
| <b>Ventajas</b>    | Sencillez constructiva y operativa ( bajos costes )<br>Válido amplio rango de tamaño<br>Especificaciones poco estrictas con la biomasa<br>Elevado rendimiento<br>Buena posibilidad de escalado | Válido amplio rango de tamaños<br>Baja cantidad de alquitranes producidos<br>Bajos costes de limpieza y de operación                      |
| <b>Desventajas</b> | Alta cantidad de alquitranes   | Más complejo que el flujo en contracorriente<br>Especificaciones estrictas de la biomasa<br>Menor rendimiento<br>Limitaciones en escalado |

## 2.5 Poder calorífico del combustible

Conocer el poder calorífico del gas pobre es de gran importancia, ya que obedece a sus componentes y porcentajes de gases combustibles e inertes. El valor calorífico del gas depende de las cantidades de los componentes combustibles, es decir del monóxido de carbono (NO), hidrógeno (H<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), entre otros. Este valor depende de la biomasa, gasificador, proceso de gasificación y parámetros de operación (temperatura y presión de reacción).

Para tener una representación real de los valores, es necesario traer a colación los resultados del estudio realizado por CIDAUT en una de sus plantas, con un gasificador de downdraft.

**Tabla 3 Composición del gas de salida Downdraft (CIDAUT, 2011)**

| Tipo de biomasa     | H <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | CO    | CH <sub>4</sub> -B | CO <sub>2</sub> | Etileno+Acetileno | Etano  | H <sub>2</sub> O | Ratio H <sub>2</sub> /CO |
|---------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-------|--------------------|-----------------|-------------------|--------|------------------|--------------------------|
| Palé triturado      | 16,4           | 0,510          | 48,3           | 1,95            | 22,57 | 1,87               | 9,2             | 0,460             | 0,0535 | 0,591            | 0,725                    |
| Corazón de piña     | 16,6           | 0,496          | 49,0           | 1,97            | 18,61 | 1,86               | 11,7            | 0,426             | 0,0713 | 1,195            | 0,890                    |
| Astilla pino 15%    | 17,5           | 0,639          | 47,8           | 2,19            | 18,66 | 2,18               | 12,1            | 0,547             | 0,0726 | 0,471            | 0,936                    |
| Astilla pino 28 %   | 17,7           | 0,328          | 47,7           | 1,90            | 13,72 | 2,07               | 16,0            | 0,548             | 0,0840 | 1,962            | 1,293                    |
| Astilla de pino 29% | 18,1           | 0,246          | 49,1           | 1,96            | 13,27 | 1,95               | 15,7            | 0,382             | 0,0903 | 1,059            | 1,399                    |
| Astilla de pino 47% | 9,6            | 1,782          | 63,1           | 1,63            | 9,46  | 1,54               | 12,8            | 0,520             | 0,0817 | 0,953            | 1,015                    |

Expresado en porcentaje en moles

Por otra parte se tiene como referencia en la Tabla 4 Composición y poder calorífico de los combustibles gaseosos. (Fonseca, 2003) de diferentes gases.

**Tabla 4 Composición y poder calorífico de los combustibles gaseosos. (Fonseca, 2003)**

| COMBUSTIBLE<br>GASEOSO | Composición en % por volumen |                |                 |                               |                               |                                |                |                 |                | LHV<br>(KJ/nm <sup>3</sup> ) |
|------------------------|------------------------------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|----------------|-----------------|----------------|------------------------------|
|                        | CO                           | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | O <sub>2</sub> | CO <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> |                              |
| óxido de carbono [16]  | 100                          |                |                 |                               |                               |                                |                |                 |                | 12.655,                      |
| Hidrógeno [16]         |                              | 100            |                 |                               |                               |                                |                |                 |                | 10.770,                      |
| Metano [16]            |                              |                | 100             |                               |                               |                                |                |                 |                | 35.825,                      |
| Etano                  |                              |                |                 | 100                           |                               |                                |                |                 |                | 64.385,                      |
| Propano [49]           |                              |                |                 |                               | 100                           |                                |                |                 |                | 90.435,                      |
| Butano [49]            |                              |                |                 |                               |                               | 100                            |                |                 |                | 118.905,                     |
| Gas natural [52]       |                              |                | 83,4            | 15,8                          |                               |                                |                |                 | 0,8            | 35.588,                      |
| GLP [39]               |                              |                |                 |                               | 90                            | 10                             |                |                 |                | 93.500,                      |
| Biogás [49]            |                              | 3,0            | 60,0            |                               |                               |                                |                | 32,0            | 5,0            | 21.980,                      |
| Gas de alumbrado [49]  | 14,1                         | 50,2           | 23,0            |                               |                               |                                | 0,4            | 3,1             | 9,2            | 15.490,                      |
| Gas hornos coque [49]  | 7,0                          | 55,0           | 32,0            | 1,5                           |                               |                                | 1,8            | 1,2             | 1,5            | 19.260,                      |
| GG *                   | 14,0                         | 8,0            | 4,1             | 1,5                           |                               |                                |                | 16,0            | 56,4           | 5.018,                       |

\* Composición del GG de orujillo gasificado en lecho fluidizado circulante -

El Lower heating value (LHV) es el poder calorífico inferior, para este último caso se tendría un valor de 5.018 (kJ/Nm<sup>3</sup>) procedente de la pulpa de aceituna (Orujillo). Para obtener los poderes caloríficos de las biomásas ensayadas por CIDAUT se presenta la siguiente tabla.

**Tabla 5 Poder calorífico biomasa. Elaboración propia**

|                                 |        | Orujillo | LHV          | Palé triturado | LHV          | Astilla de pino 29% | LHV          |
|---------------------------------|--------|----------|--------------|----------------|--------------|---------------------|--------------|
| Oxido de carbono                | 12.655 | 14       | 1.772        | 23             | 2.856        | 13                  | 1.679        |
| Hidrogeno                       | 10.770 | 8        | 862          | 16             | 1.766        | 18                  | 1.949        |
| Metano                          | 35.825 | 4        | 1.469        | 2              | 699          | 2                   | 702          |
| Etano                           | 64.385 | 2        | 966          | 0              | 34           | 0                   | 58           |
| LHV Total (kJ/Nm <sup>3</sup> ) |        |          | <b>5.068</b> |                | <b>5.356</b> |                     | <b>4.389</b> |

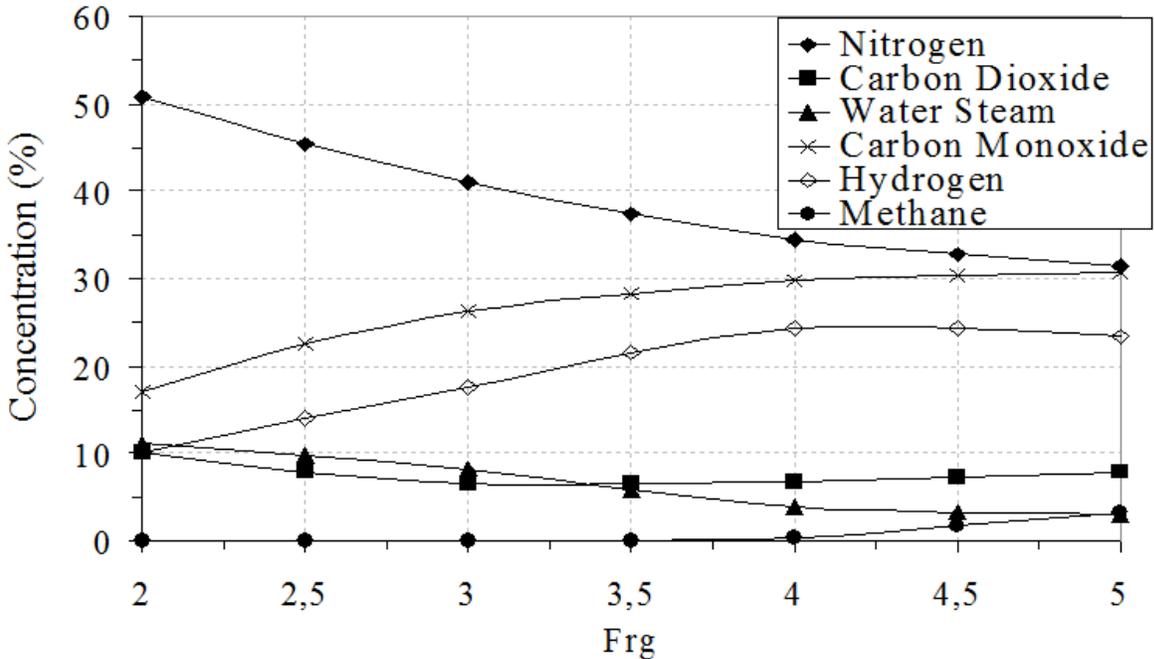
Estos valores son obtenidos en determinadas condiciones de funcionamiento del gasificador y composición inicial de la biomasa. Al ser combustibles gaseosos presentan la particularidad de que la mezcla estequiométrica puede tener propiedades muy diferentes de las del propio combustible.

La relación de F combustible/aire es la relación entre la cantidad de combustible y la cantidad de aire que entra en un dispositivo en particular, generalmente medido y expresado en términos de flujo de masa. Y para el valor de reacción estequiométrica  $F_s$  se pueden utilizar los valores de referencia.

La relación de equivalencia de gasificación,  $F_{rg}$ , es por lo general mucho más grande de uno (típicamente entre 2 y 5).

El efecto de la composición se puede ilustrar en el caso de gasificación de la biomasa. Un modelo de equilibrio químico se puede utilizar para calcular la composición del gas producido, a partir de una composición dada de biomasa (C1 H1.57 O0.78 N0.0056 S0.0001) y usando la relación de equivalencia de gasificación como parámetro de funcionamiento principal  $F_{rg}$  (Melgar, M. Lapuerta, Giménez, & Díez, 2002)

**Gráfica 6 Composición de equilibrio del gas pobre vs relación de equivalencia Gasificación Frg. (Melgar, M. Lapuerta, Giménez, & Díez, 2002)**



Sin embargo este gas deberá pasar por un tratamiento de limpieza y enfriamiento, para luego mezclarse con una cantidad apropiada de aire para conseguir la combustión en el motor.

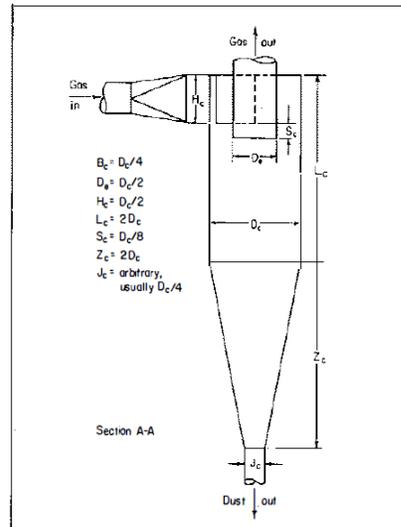
## 2.6 Tratamiento del gas pobre

El gas que sale del reactor todavía no es el apropiado para ser usado en los motores de combustión, ya que contiene impurezas y su temperatura es elevada. Por lo tanto es necesario dar un riguroso tratamiento de limpieza y refrigeración al gas, hasta conseguir las mejores características para el trabajo y cuidado de los motores.

El sistema de limpieza cuenta con tres elementos principales:

- **Ciclón.-** Por lo general es el primer elemento después del gasificador, está diseñado para retener partículas, en especial cenizas (ash) de tamaño medio superior a 10 micras. Logra capturar entre el 60 y 70% del contenido total de partículas. (McKendry, Energy production from biomass (part 3): gasification technologies, 2001).  
 Los ciclones tienen la ventaja de que pueden trabajar a alta temperatura, es decir no tienen inconveniente con los 500°C del gas de gasificación.  
 El ciclón es esencialmente un separador gravitacional que ha sido reforzado por una componente de la fuerza centrífuga.

**Gráfica 7 Ciclón (McKendry, 2001)**



- **Filtros.-** Son usados para eliminar partículas más pequeñas, pueden ser filtros de tela, cerámicos o metálicos. Estos filtros son especiales debido que deben soportar altas temperaturas.
- **Refrigeración.-** La refrigeración puede ser de dos tipos seca y húmedo. Los refrigeradores que brindan mayores ventajas son las de tipo húmedo, también son conocidos como scrubbers o lavadores de gases. Su principal ventaja es bajar la temperatura del gas y eliminar partículas (tar) y gases solubles como amoníaco y ácido clorhídrico.

El principio de funcionamiento de los scrubbers es contactar directamente el gas con un medio fluido, generalmente agua. Este efecto actúa en partículas menores a  $0,1\mu\text{m}$ , el movimiento está dominado por las colisiones moleculares, obedeciendo al principio de movimiento Browniano, las partículas se comportan más como un gas y pueden ser recogidas por difusión sobre una superficie líquida. (SERI, 1988)

## 2.7 Planta de gasificación

### 2.7.1 Condiciones de funcionamiento

La planta de Nava del Rey (Ilustración 1) propiedad de Cidaut está diseñada para la investigación y desarrollo de tecnología del proceso de gasificación y aprovechamiento energético de diferentes tipos de biomasa (forestal y agrícola). El aprovechamiento a pequeña escala se realiza en lugares de producción de residuos biomásicos para la generación de calor y/o energía mecánica o eléctrica.

Como características principales de la instalación encontramos las siguientes:

- Potencia generada: 100 kWe y 100 - 200 kWt (nivel térmico)
- Producción energética anual: 800 MWh (Sobre la base de 8000h/año)
- Consumo anual: 800-1000 Tm (en función a la humedad de la biomasa)
- Cuenta con un sistema de control para automatización completa

- Tiene un sistema integral de mantenimiento
- El sistema de gasificación consta de:
  - Gasificador de lecho fijo y de corrientes paralelas (Downdraft)
  - Sistema de agitación basado en parrilla giratoria refrigerada
  - Carga de biomasa automática con secado incorporado
- Sistema de acondicionamiento de gas pobre
  - Multiciclón para separación de partículas
  - Scrubber multietapa encargado de la refrigeración y separación de alquitranes
  - Sistema de reintroducción de alquitranes en biomasa entrante
- Sistema de generación de energía eléctrica y térmica
  - Grupos motor-generator asíncrono con motores adaptados de automoción.
  - Control en lazo cerrado basado en sonda lambda
  - Adaptación continua de carga requerida y composición del gas pobre.

**Ilustración 1 Planta de gasificación de Nava**

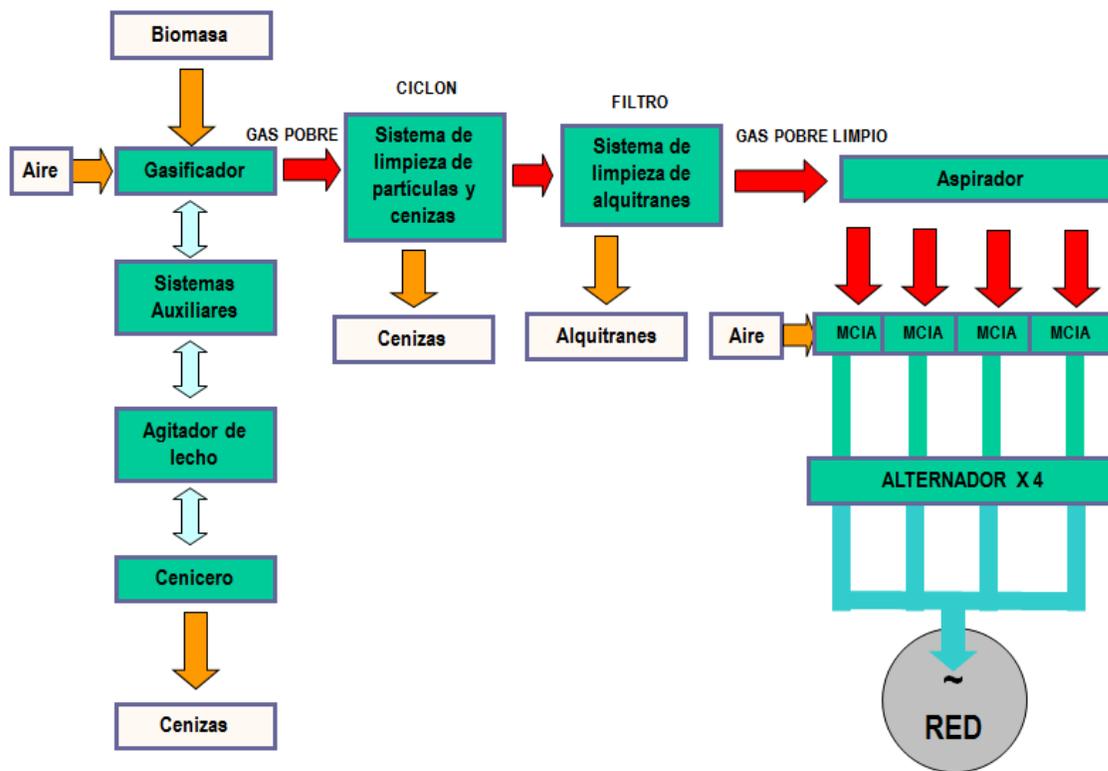


## 2.7.2 Esquema de la planta de gasificación

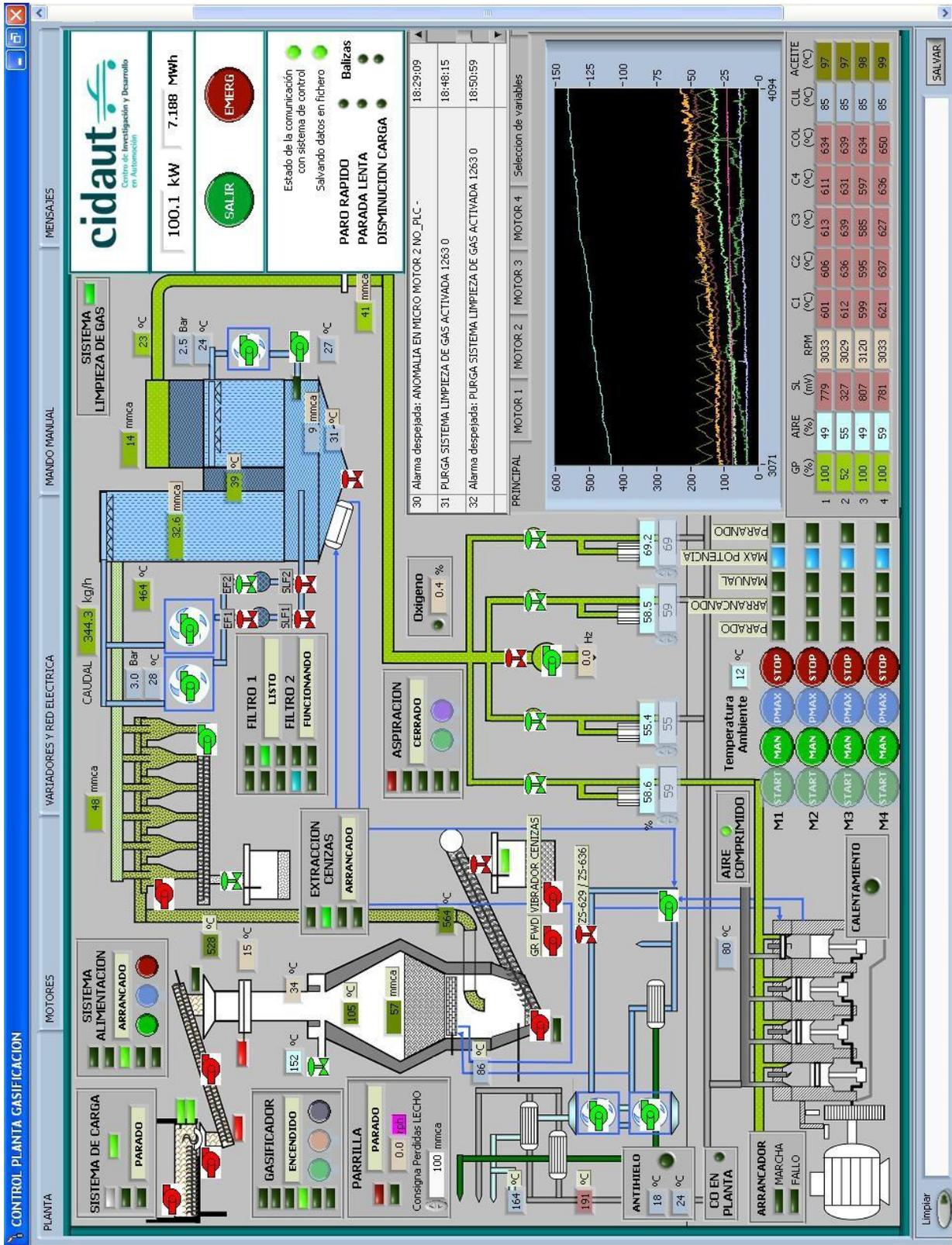
Los elementos anteriormente identificados trabajan en conjunto para obtener energía sostenible. A continuación en la Gráfica 8 se presenta un esquema de la instalación de la planta Nava del Rey (Valladolid).

La planta cuenta con un sistema de control integral para automatización. En la Gráfica 9 se puede observar la pantalla de monitorización.

**Gráfica 8 Esquema de una instalación de gasificación (Melgar, Tinaut, Horrillo, & Diez, 2005)**



Gráfica 9 Control Integral de la planta



## **3 Características de los motores a combustión interna con gas pobre.**

### **3.1 Clasificación de los motores a gas**

Los motores a gas tienen diferentes tipos de funcionamiento por tal razón es necesario conocer que características tienen y que tipo de motor puede ser el más adecuado para trabajar con el gas de gasificación.

Los motores a gas se pueden clasificar en cuatro clases:

- 1) Motores diésel de gas
- 2) Motor de gas de encendido por chispa y baja compresión
- 3) Motor duales o mixtos
- 4) Motores de gas encendido por chispa y de alta compresión.

#### **3.1.1 Motores diésel de gas**

Los motores diésel de gas funcionan de forma similar a los motores de encendido por compresión (MEC), pues comprimen aire y en el momento que debe existir la inflamación se inyecta el gas a alta presión ayudado por la inyección de una pequeña cantidad de combustible líquido para facilitar el encendido. Este combustible líquido se inyecta junto con el gas debido que los combustibles gaseosos no se autoinflaman al contacto con el aire a alta temperatura y presión como en el caso de los combustibles líquidos.

La cantidad de combustible líquido auxiliar necesario para la ignición de la mezcla y estabilizar la combustión es aproximadamente un 5% del total de combustible requerido a plena carga.

En la actualidad este tipo de motor está en desuso ya que para un mismo rendimiento térmico; en términos de los poderes caloríficos del gas y del combustible auxiliar consumido por unidad de potencia útil el costo es mayor. Esto se debe a su complejidad de diseño, se necesita un compresor para el gas, una bomba para el combustible líquido y válvulas de inyección especiales que trabajen con gas y líquido simultáneamente.

Estos motores usan mezclas pobres, con el motivo que el aceite pesado que es inyectado al final de la carrera entra en una masa de aire a temperatura mayor de la de auto ignición, en poco tiempo debe vaporizarse, buscar oxígeno y reaccionar químicamente y esto es posible solo hay gran exceso de aire.

#### **3.1.2 Motor de gas de encendido por chispa y baja compresión**

Tienen el mismo principio de funcionamiento que un motor MEP, pero exigen que la mezcla admitida sea estequiométrica o muy próxima a esta, con el motivo de que la llama se pueda propagar rápidamente y por lo tanto tiene alta tendencia a la detonación, razón por la cual se limita la relación de compresión a valores muy bajos, para evitar el preencendido y la detonación. Para el caso de motores a gas natural al tener principalmente metano, ese problema no es significativo, puesto que al tener una elevada temperatura de autoinflamación se permite usar relaciones de compresión mayores.

Estos motores aspiran y comprimen “mezclas explosivas” de gas, ya que son mezclas estequiométricas o con dosados relativos muy cercanos a 1. Si esta mezcla se usara en un motor con mayor relación de compresión tendría una alta posibilidad de autoencendido.

### **3.1.3 Motores duales o mixtos**

También llamados motores bicomcombustibles, se desarrollaron a partir del motor diésel convencional. La mezcla de gas y aire se comprime hasta una presión propia de MEC y el autoencendido se evita utilizando mezclas pobres, por lo tanto la potencia generada con un motor dual está limitada por la tendencia a la detonación del combustible gaseoso, sin embargo es igual o algo mayor que la generada en un motor diésel convencional.

Mientras la mezcla del combustible es más pobre, la velocidad de propagación de llama disminuye, pudiendo no quemar toda la mezcla, por esta razón es necesario asegurar la propagación de llama encendiendo la mezcla en varias regiones a la vez. Esto se consigue inyectando una pequeña cantidad de aceite combustible sobre la mezcla pobre a alta presión y temperatura, formando una especie de niebla que genera muchos puntos de encendido a la vez. Provocando así una combustión suave y rápida de toda la mezcla.

Es importante notar que la combustión comienza de forma similar a los motores diésel y continua mediante la propagación de la llama en una forma similar a la de motores de encendido provocado pero con varios frentes de llama. Los motores duales tienen gran ventaja frente a los simplemente de diésel ya que su rendimiento se ve mejorado al tener el gas presente en todas las partes de la cámara y en consecuencia quemará más aire.

Otra gran ventaja que tienen los motores duales es que pueden variar de forma continua la relación gas/líquido, de forma que pueden trabajar como motores a gas con encendido por inyección de combustible líquido y en otros casos si es necesario sin gas, solo con diésel. De esta forma estos motores son deseables en lugares donde el suministro de gas no sea constante, especialmente usados en plantas depuradoras de agua y en vertederos de basura donde se produce biogás.

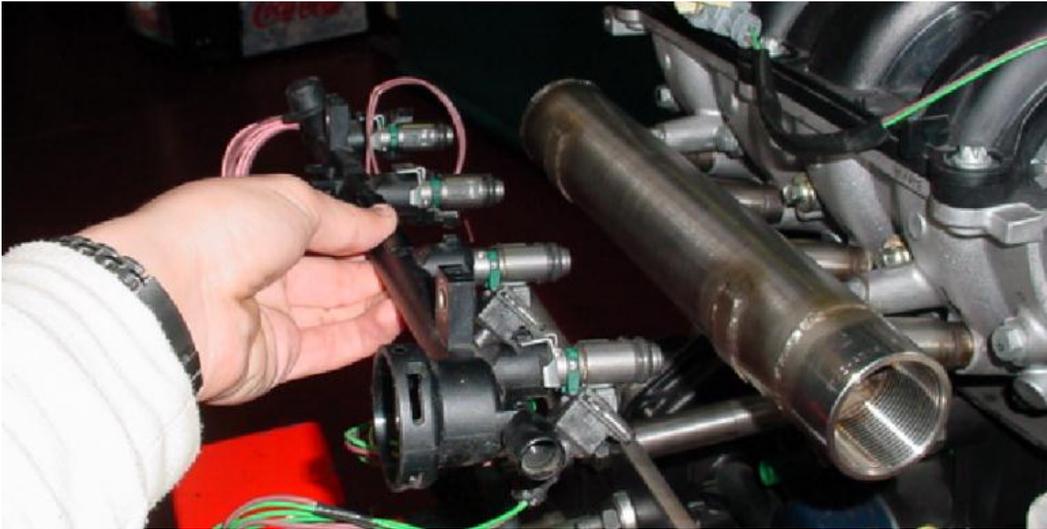
### **3.1.4 Motores de gas de alta compresión y encendido por chispa**

Este tipo de motor evolucionó a partir del motor de gas dual, ya que trabajar con un combustible auxiliar trae consigo problemas de disponibilidad y en algunos casos un elevado costo. Por lo tanto, se reemplaza la inyección piloto del combustible auxiliar por el encendido de una chispa eléctrica, de la misma forma que en un motor MEP.

A diferencia de los motores de gas de baja compresión, estos motores dependen de un sistema de encendido eléctrico de alta tensión pues requiere aportar una mayor cantidad de energía para inflamar la mezcla. Las bujías deben impedir la combustión de los electrodos y tienen que evitar el preencendido.

El ingreso del gas combustible al motor es similar al de motores duales, sin embargo es de gran importancia tener un sistema de regulación automático del caudal de aire para cargas reducidas para ayudar a la mezcla a inflamarse. Es una dosificación proporcionada del aire a través de todos los regímenes de funcionamiento, manteniendo así una relación aire/gas casi constante para todas las cargas. La regulación de la relación aire/gas es de suma importancia, para impedir el preencendido y la detonación, por otra parte que posibilite la combustión de la mezcla.

## Ilustración 2 Modificación del colector de admisión



Trabajar con mezclas pobres implica mayores relaciones de compresión y por lo tanto mayor eficiencia térmica, menor consumo, en estos motores se busca maximizar la relación aire/combustible. Esto se puede lograr aumentando la turbulencia para reaccionar de mejor manera las cantidades de combustible antes de abandonar esto sucede porque la combustión de mezclas pobres es muy lenta.

Al igual que los demás motores, es importante que la mezcla tenga una baja temperatura, ya que será mayor la potencia que pueda desarrollar sin detonación. También si la mezcla admitida se enfría suficiente es posible elevar la relación de compresión y adelantar el encendido consiguiendo una mejora en el rendimiento del motor. La mezcla puede enfriarse a través de intercambiadores de calor, o a través de agua nebulizada o en un turbo enfriador.

Estos motores son los más usados en plantas de gasificación, por cuestiones que estas instalaciones son ubicadas en lugares estratégicos y de fácil acceso a biomasa, de esta forma los costos de adquisición de combustible bajarían.

## 3.2 Funcionamiento del motor a gas pobre

### 3.2.1 Combustión del gas en motores de combustión interna

La combustión es el proceso de oxidación del combustible por el aire, que provoca la conversión de la energía química que posee el combustible en energía térmica. Este proceso tiene lugar dentro del cilindro, suponiendo un incremento de presión, que permite extraer energía mecánica mediante el movimiento del pistón.

Para el caso de los MEP la combustión normal tiene lugar mediante la propagación de un frente de llama que es la superficie que separa la zona fresca de la zona quemada.

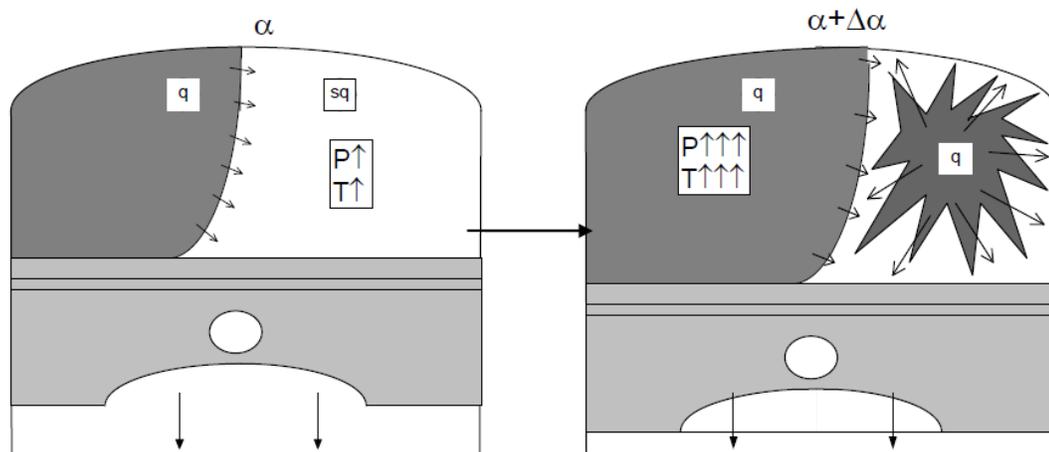
Por otro lado también existe la combustión anormal que puede tener diversos orígenes y propagaciones.

### 3.2.1.1 Combustión anormal: Autoinflamación y encendido superficial

En la **autoinflamación** la combustión se origina como consecuencia del alto estado térmico (P, T) que adquiere la zona fresca. Es una combustión brusca y rápida (descontrolada). Si la masa de mezcla autoinflamada es grande la autoinflamación es muy perjudicial para el motor hablandose de combustión detonante o picado de bielas.

La **detonación** ocurre después del salto de chispa, puede ocurrir a una presión de compresión inferior a la capaz de provocar la autoinflamación, por lo que tiene más probabilidad de presentarse. La detonación es la autoinflamación de una porción separada de la mezcla, a la que todavía no ha llegado el frente de llama y se enciende repentinamente por sí misma a causa de la influencia de la presión y temperatura de la porción de mezcla ya quemada.

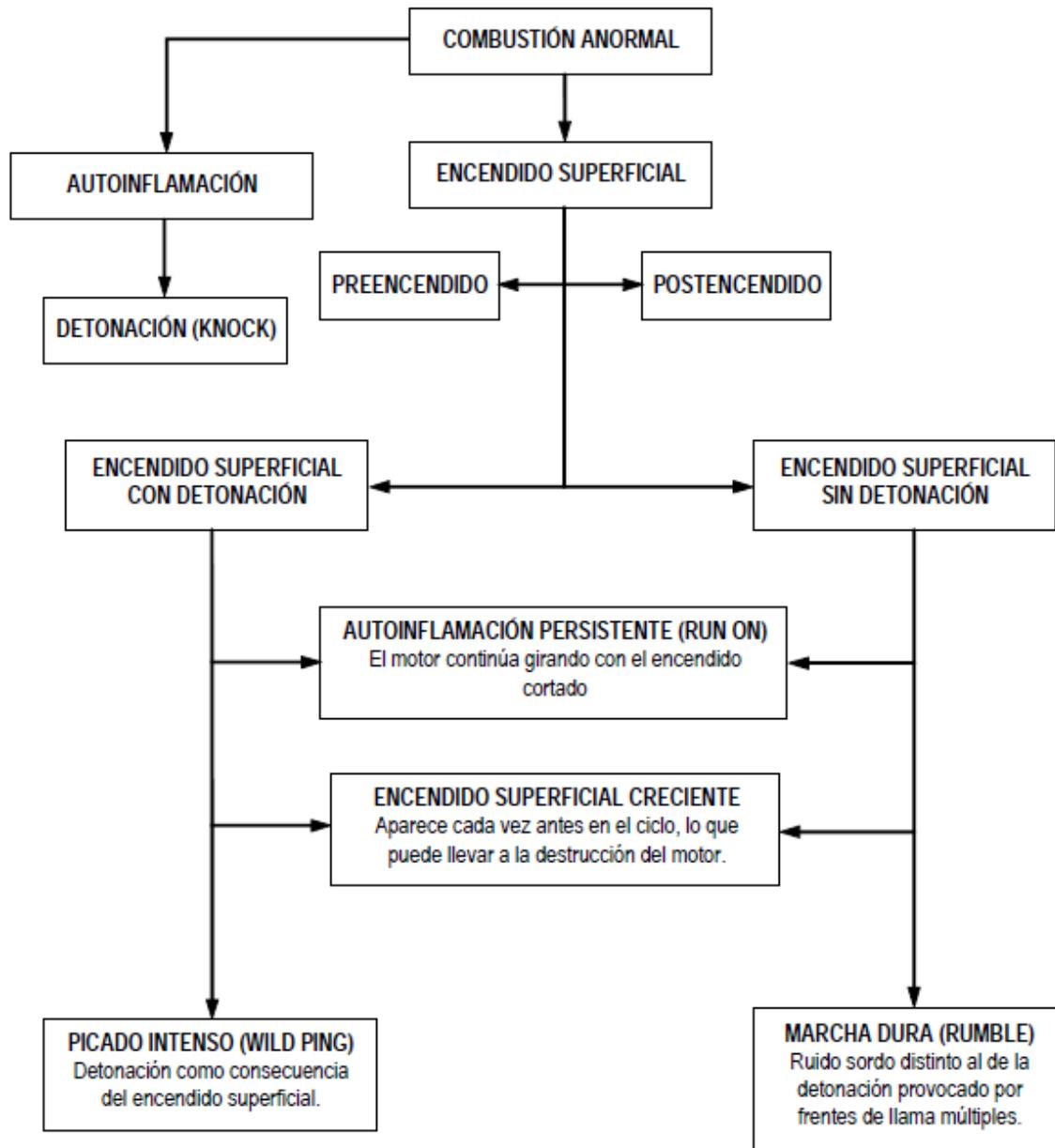
Gráfica 10 Autoinflamación en la cámara de combustión



**Encendido superficial.-** Este tipo de encendido anormal puede ser: preencendido si es antes del encendido normal y post encendido si es posterior al encendido normal.

**Preencendido** ocurre antes de que salte la chispa, se ocasiona por la aparición, en determinadas situaciones, de puntos calientes que son fuentes de encendido, generando frentes de llama en cualquier instante del ciclo. Los puntos calientes pueden ser: electrodo central de la bujía, depósitos y zonas mal refrigeradas. Existe un preencendido con detonación y sin ella. Para el primer caso es muy peligroso ya que la detonación realimenta el efecto de incremento del avance, pudiendo tener efecto destructivos (wild ping) y para el segundo solo supone una marcha dura (rumble)

Gráfica 11 Tipos de combustión anormal en MEP (Melgar A. , 2012)



### 3.2.2 Efecto de composición de la mezcla-dosado

Cuanto más alejada esté una mezcla de ser estequiométrica, sea rica o pobre, el riesgo de la autoinflamación aumenta, con mayor importancia en el caso de un dosado pobre debido que la velocidad de frente de llama disminuye y el tiempo de combustión es mayor al tiempo de retraso.

Sin embargo, por cuestiones de operatividad siempre se trabaja en mezclas estequiométricas disminuyendo de esta forma el riesgo de la autoinflamación. También es necesario indicar que el gas de gasificación tiene muchos gases inertes que son inhibidores de la autoinflamación.

### 3.2.3 Poder calorífico de una mezcla gas pobre-aire

Los poderes caloríficos de los combustibles gaseosos son muy variables si se los compara con los combustibles líquidos usados en un MEP, por tal razón es necesario establecer bases para poder estimar la potencia de un motor cuando se sustituye el combustible. Para ello se plantea cual es el valor del poder calorífico de la mezcla aire-combustible por unidad de volumen, puesto que un motor es una maquina volumétrica. Esto permite introducir un índice de calidad de la mezcla desde el punto de vista energético para comparar la potencia que puede proporcionar el motor con combustibles de diferente poderes caloríficos y relaciones estequiométricas.

Recordemos que en las instalaciones de gasificación que trabajan con un MCI se debe tener en cuenta dos dosados. Uno es el dosado relativo en el gasificador  $F_{rg}$  y otro es el dosado relativo de motor (engine)  $F_{re}$  cuando el gas pobre se mezcla con el aire. Los dosados relativos  $F_r$  pueden ser ricos, pobres o estequiométricos.  $F$  = Dosado absoluto,  $F$  = dosado estequiométrico

$$F_r = \frac{F}{F_s} \left\{ \begin{array}{ll} < 1 & \text{Lean (air excess)} \\ = 1 & \text{Stoichiometric} \\ > 1 & \text{Rich (fuel excess)} \end{array} \right\}$$

Las variables más significativas para el aprovechamiento energético de un combustible en un motor son:

- La relación estequiométrica aire-combustible, que determina la cantidad mínima de aire para una combustión completa
- El poder calorífico del combustible, que depende de la composición. Siendo más relevante el poder calorífico mezcla aire-combustible en unidad de volumen que por unidad de masa, debido a las limitaciones de volumen del cilindro.
- La velocidad de combustión de la mezcla.
- La tendencia a la detonación de la mezcla, ya que marca el mayor valor de la relación de compresión del motor.

La potencia de un motor a gas de gasificación se puede expresar como:

$$N_e = \dot{m}_f H_{ve} \eta_e = \dot{m}_a F H_{ve} \eta_e = n i V_T \rho_{ia} \eta_v C F_{re} F_{sm} H_{ve} \eta_e \text{ (kW)}$$

Los parámetros que afectan al motor pueden ser agrupados en:

- Dependiendo del diseño del motor  $KD = i V_T \eta_v \eta_e$
- Dependiendo de las condiciones de operación  $Ko = \eta \rho_{ia} F_{re}$
- Dependiendo de la composición del combustible  $EFQ = C F_{se} H_{ve}$

El parámetro C corresponde a la fracción molar del aire en la mezcla y por ello depende también del dosado en el motor  $F_r$ , pero se puede asumir que varía poco con  $F_r$ , para un cierto combustible. El parámetro EFQ (Engine Fuel Quality) (kJ/kg) puede expresarse de forma equivalente como:

$$EFQ = H_{ve, vol} / \rho_{ia} \quad \text{kJ por kg de mezcla}$$

Donde el poder calorífico de la mezcla volumen (no del combustible)  $H_{ve,vol}$  tiene unidades kJ per m<sup>3</sup>. Entonces la potencia del motor a gas se puede expresar como:

$$N_e = iV_T \eta_v \eta_e n F_{re} H_{ve,vol} = K_D n F_{re} H_{ve,vol}.$$

Se pone en evidencia que el poder calorífico relevante es el de la mezcla por unidad de volumen. Esta relación es importante puesto que el gas de gasificación que tiene un poder calorífico medio o incluso bajo por unidad de masa, pero desde el punto de vista de poder calorífico por unidad de volumen de la mezcla estequiométrica presentan valores solo algo menores que los de una mezcla aire-gasolina. (Melgar, Tinaut, Horrillo, & Diez, 2005)

Otra forma de calcular el valor calorífico de la mezcla estequiométrica (Fonseca, 2003) es teniendo en cuenta que el volumen de la mezcla es igual al volumen del gas pobre más el volumen del aire como se observa en la siguiente tabla.

**Tabla 6 Poder Calorífico de la mezcla estequiométrica. (Fonseca, 2003)**

|   |                              |                                 |                 |
|---|------------------------------|---------------------------------|-----------------|
| Poder Calorífico inferior del gas                                 | <i>H<sub>c</sub></i>         | kJ/m <sup>3</sup> N             | 5.018,03        |
| M <sup>3</sup> GG   | <i>mf</i>                    | m <sup>3</sup>                  | 1,00            |
| M <sup>3</sup> aire/ m <sup>3</sup> GG combustión estequiométrica | <i>Lo</i>                    | m <sup>3</sup> / m <sup>3</sup> | 1,14            |
| m <sup>3</sup> mezcla / m <sup>3</sup> GG estequiométrica         | <i>1+Lo</i>                  | m <sup>3</sup> / m <sup>3</sup> | 2,14            |
| <b>Potencia Calorífica de la mezcla estequiométrica</b>           | <b><i>H<sub>me</sub></i></b> | <b>kJ/m<sup>3</sup>N</b>        | <b>2.344,85</b> |



## 4 Aspectos generales del diagnóstico y mantenimiento de motores a gas pobre

### 4.1 Introducción

Los motores de combustión interna alternativos que trabajan con gas de gasificación como combustible presentan ciertos inconvenientes a diferencia de los motores a gasolina y gasoil. El principal problema en el funcionamiento de estos motores es la presencia de compuestos de alquitrán en el gas proveniente del proceso de gasificación.

Además, la presencia de partículas sólidas, la variación de componentes del gas pobre debido a las condiciones de la biomasa, el propio proceso de gasificación, el contenido de agua del gas pobre, o incluso la presencia de sales de Na y K añaden dificultades.

El proceso de gasificación y de limpieza son los principales responsables de la presencia de alquitrán en el gas combustible. Es decir, las condiciones de operación, el mantenimiento, las anomalías, que tiene el motor de combustión a gas pobre dependerán directamente de la tecnología de gasificación usada y de la biomasa procesada. Cabe indicar que incluso después de una limpieza exhaustiva del gas todavía hay ciertas cantidades de alquitrán en el gas pobre.

En el proceso de pirolisis a aproximadamente 230 ° C, los polímeros de la biomasa se descomponen, dando como resultado un gas que consiste principalmente en CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, CO, H<sub>2</sub>, alquitrán y carbón de leña. El alquitrán se compone de diversos compuestos orgánicos pesados que pueden condensarse y se descomponen en los procesos posteriores.

Una de las definiciones de alquitrán puede ser "todos los compuestos orgánicos de ebullición a temperatura por encima de la de benceno deben ser considerados como alquitrán". (punto ebullición 80°C) De acuerdo con dicha definición de alquitrán, alquitranes son hidrocarburos con un peso molecular mayor que el benceno (>78 kg / kmol).

Es de gran importancia conocer los componentes del alquitrán, dependiendo sus valores afecta de una u otra forma al funcionamiento y partes del motor.

### 4.2 Definición de términos

Antes de entrar en el tema del diagnóstico y mantenimiento de motores de combustión interna a gas pobre es conveniente identificar y precisar algunos términos que se utilizarán, debido que suele existir una tendencia a utilizarlos equivocadamente.

#### 4.2.1 Fallo y avería

Se considera fallo al evento que produce un determinado efecto sobre una máquina, siendo la condición que lo identifica lo que más interesa conocer desde el punto de vista de diagnóstico. Es decir, para fines de diagnóstico, fallo es la finalización de la habilidad de una máquina, elemento o sistema para realizar la función para la cual ha sido diseñada, sin que necesariamente el sistema deje de funcionar o lo haga en condiciones críticas.

Avería es un fallo que origina un desperfecto, rotura o mal funcionamiento de un elemento o sistema. Una avería por lo general requiere una intervención de mantenimiento correctivo (sustitución, limpieza lubricación, puesta a cero, etc.)

#### 4.2.2 Anomalía

Este término se suele confundir con el de fallo. La anomalía es la presencia de una característica o condición en un elemento, diferente a la establecida en diseño o definida como condición de estado perfecto; el fallo hace que el elemento realice su función de manera anormal. (Fygueroa, 1994)

#### 4.2.3 Síntoma

Un síntoma es una manifestación externa del estado de un sistema o del funcionamiento de sus componentes, que cambian al variar sus condiciones operativas y ante la presencia de fallos. Sin embargo los síntomas no son necesariamente manifestación de los fallos, ya que los síntomas se pueden medir y los fallos sólo aportan a que su valor sea anormal. La base fundamental de todo proceso de diagnóstico y seguimiento de motores son los síntomas, por lo tanto es de vital importancia su identificación, medición, valoración y su correlación con los fallos.

Los síntomas pueden ser modificaciones de los valores de variables físicas elementales como la temperatura, presión, velocidad del motor, etc. Se ha denominado estos síntomas como variables de funcionamiento. Dependiendo la obtención de las variables podemos clasificarlas en:

- **Variables monitorizadas en continuo.**- Obtenidas durante el funcionamiento del motor.
- **Variables monitorizadas en discontinuo.**- A partir del análisis de un componente extraído del motor, es especial análisis del lubricante. Inspecciones y desmontaje de componentes.
- **Inspecciones en discontinuo y/o con instalación parada.**- Sometido a condiciones de funcionamiento o pruebas definidas.

#### 4.2.4 Diagnóstico y predicción de fallos y averías

El diagnóstico de fallos de un motor es el proceso de detección de síntomas, evaluación de su condición actual y determinación de la causa de las anomalías en las maquinas. Este diagnóstico de los síntomas y hechos y su relación con los fallos se puede realizar de dos formas:

- Conocimiento lógico del comportamiento del motor en situaciones normales y anormales
- Mediante la experiencia en diagnóstico y mantenimiento del motor.

La predicción de fallos puede definirse como la medición sistemática y análisis de tendencias de sus parámetros de diagnóstico, con el fin de evaluar su estado actual y predecir la probabilidad futura de fallos.

Por lo tanto, la predicción comprende tanto el diagnóstico de los síntomas como el pronóstico de los fallos.

#### 4.2.5 Mantenimiento predictivo

El mantenimiento predictivo de motores es el conjunto de actividades destinadas a mantenerlos en funcionamiento, escogiendo como momento óptimo la intervención y reparación el estado más óptimo al fallo.

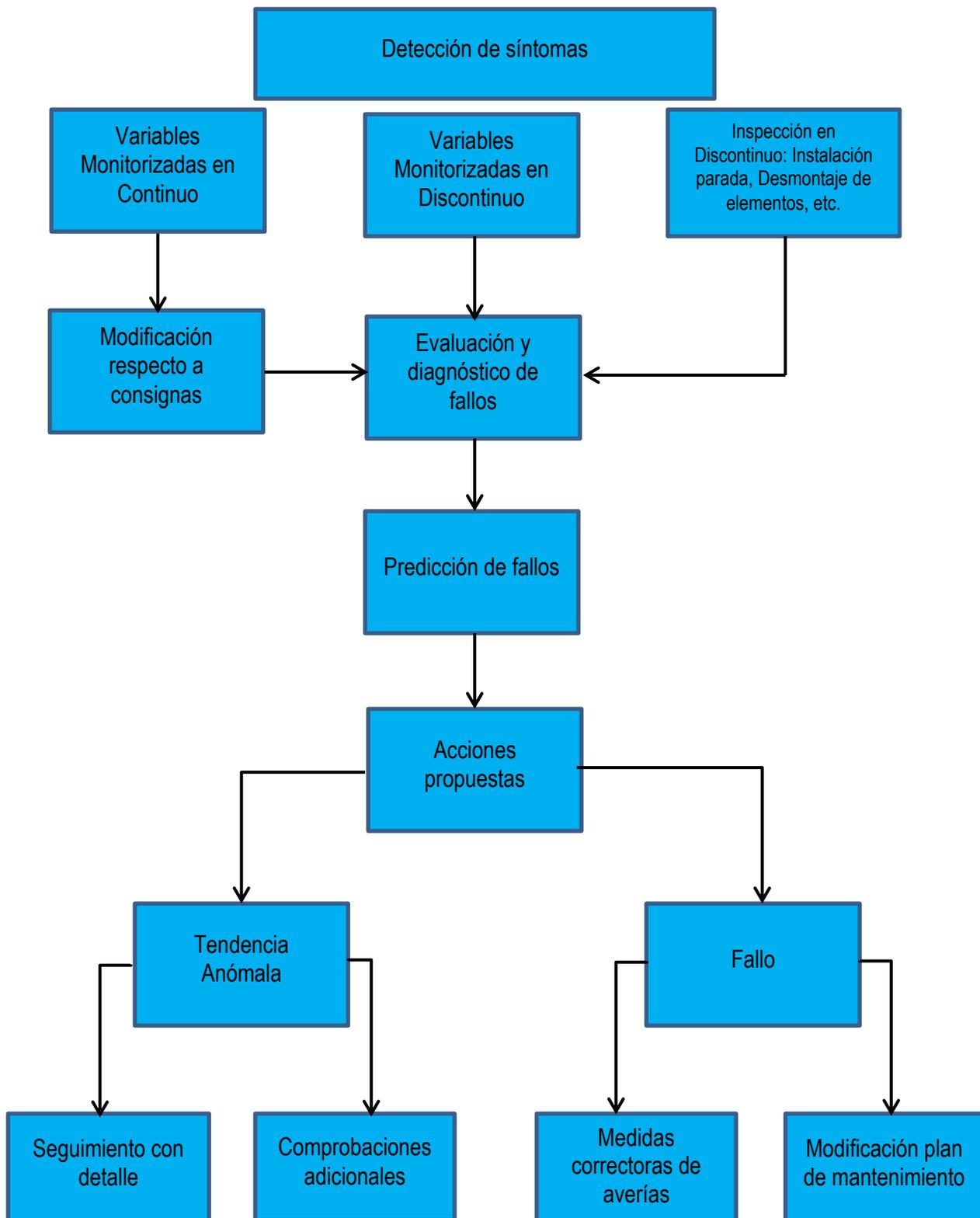
Es un seguimiento continuo de algunas variables que determinan el estado del sistema, y se comparan con patrones preestablecidos con el fin de determinar el instante óptimo en el que se ha de realizar la reparación. En otras palabras, se supervisa la máquina, se toman decisiones, se realizan acciones o se repara justo en el momento en que empieza a fallar.

El mantenimiento predictivo está basado en el monitorizado de la condición del motor (condition monitoring), que permite predecir sus fallos incipientes y el momento en que un elemento vulnerable debe remplazarse antes de que ocurra un fallo total del sistema. Se puede utilizar varias técnicas de monitorizado con fines de realizar un mantenimiento predictivo. Estas técnicas depende de factores como: tipo de motor, leyes de degradación, régimen de funcionamiento, importancia del motor, costes de reparación, tiempos, accesibilidad de medida, etc.

La estrategia de implementar mantenimientos predictivos al motor o instalación de gasificación requiere una fuerte inversión inicial en equipos de medida y formación de técnicos. Sin embargo, es la que proporciona mejores resultados, puesto que se maximiza el tiempo de vida de los equipos, garantizando la máxima calidad y seguridad del proceso productivo. También tiene la ventaja que al analizar las medidas se puede inferir cual fue la causa de la avería. Esto permite no solo sustituir el elemento defectuoso sino, que se puede, modificar las condiciones de trabajo de la máquina para evitar la aparición de nuevas averías.

La relación entre mantenimiento predictivo, predicción de fallos y diagnóstico de fallos así como las acciones inmediatas a adoptar, las comprobaciones adicionales o incluso la modificación del plan de mantenimiento para evitar futuros fallos, se puede observar en la siguiente figura.

**Gráfica 12 Detección de síntomas, predicción de fallos y acciones propuestas.**



#### **4.2.6 Mantenimiento preventivo y correctivo**

El mantenimiento preventivo es el método más conocido y usado para dar funcionalidad a los equipos. Consiste en realizar paradas planificadas de la producción o trabajo en las cuales los elementos más críticos y susceptibles a averiarse son sustituidos por unos nuevos.

Para determinar los periodos de tiempo en que se han de realizar las paradas se utilizan criterios históricos y estadísticos. Este tipo de mantenimiento aumenta la calidad y seguridad del funcionamiento de equipos. Sin embargo no aprovecha en su totalidad la vida útil de los elementos, puesto que estos suelen ser sustituidos cuando todavía se encuentran en buen estado.

El mantenimiento correctivo es conocido como las acciones y procedimientos de reparaciones, es decir se lleva a cabo cuando aparecen averías que provocan la interrupción del funcionamiento del motor o del sistema. Es un método fácil de implementar por que no necesita un estudio o control previo del sistema. Sin embargo, provoca grandes costos por el paro no programado de máquinas y personal, y además también se puede tener problemas de seguridad. Las reparaciones suelen ser de baja fiabilidad debido a la prematura de tiempo en el momento de realizarlas.



## 5 Diagnóstico y supervisión del motor para detectar anomalías de funcionamiento

### 5.1 Correlación síntomas-fallos

Para realizar un buen diagnóstico del funcionamiento del motor a gas pobre es necesario establecer una correlación entre los fallos o anomalías y manifestaciones externas del estado del motor o de del funcionamiento de sus componentes, es decir una correlación entre fallos y síntomas.

El proceso de diagnóstico requiere la detección e identificación de los síntomas originados por los fallos y por otro lado la identificación del fallo mediante una evaluación de dichos síntomas. La identificación de la relación causa efecto se conoce como correlación síntomas-fallos.

Existen algunas técnicas de correlación síntomas-fallos, la selección de la técnica depende de los objetivos ansiados y del método de diagnóstico a utilizar. Las técnicas más utilizadas son:

- **Correlación mediante tabla de síntomas.-** Consiste en asignar a un síntoma los posibles fallos causantes del mismo. En algunos casos estas tablas suelen contener posibles acciones correctivas para resolver el problema. Permite una identificación rápida y sencilla de todos los posibles fallos causantes de un síntoma. Tiene el problema de no ser muy precisa con la identificación del fallo, debido a la correlación de muchos fallos a un solo síntoma, por lo que se necesita tener experiencia y conocimiento para realizar un adecuado diagnóstico.
- **Análisis crítico de los modos y efectos del fallo.-** También conocido como **FMECA** (Failure Mode, Effects and Criticality Analysis) es un procedimiento de análisis de fallos mediante el cual cada fallo potencial del motor es analizado con el fin de determinar los efectos de estos sobre el motor, clasificándose cada fallo de acuerdo a la importancia. La importancia del fallo se mide por la consecuencia relativa del fallo sobre el motor y por su frecuencia.
- **Correlación mediante Árbol Lógico.-** Este análisis parte de un síntoma particular y señala el camino para determinar la posible causa de la anomalía siguiendo un razonamiento deductivo, es decir razonando desde lo general a lo específico.
- **Matriz de correlación síntomas fallos.-** Consiste en representar en un campo bidimensional la lista de posibles fallos y síntomas en diferentes lados. A cada nodo de la matriz se asigna un número llamado coeficiente de correlación, cuyo valor puede asignarse según diversos criterios, como la probabilidad o importancia del sistema.

### 5.2 Variables de funcionamiento motorizadas en continuo

El monitorizado o supervisión de un sistema consiste en el seguimiento de su valor o de valores de parámetros asociados a los mismos. Este seguimiento puede hacerse en forma continua o discontinua. Para el caso del monitorizado continuo o permanente existen sensores acoplados recogiendo datos permanentemente del motor e instalación. El monitorizado puede ser del estado motor o del funcionamiento.

La ventaja de monitorizado continuo es que permite localizar fallos que sólo se producen bajo determinadas condiciones de funcionamiento del motor, así como las averías intermitentes que se presentan sin causas aparentes. Este tipo de monitorizado se conoce como “performance monitoring”, a continuación se listan las variables de funcionamiento relacionadas con las averías.

## 5.2.1 Temperaturas

### Temperatura de Refrigerante

La temperatura de trabajo del motor tiene que ser entre 82°C y 93°C para la mayoría de motores a gasolina. Este mismo rango se mantiene para motores a gas pobre, esta variación depende de cada marca de motor, debido que cada fabricante tiene sus recomendaciones por su diseño. Por ejemplo en un estudio realizado en motores grandes de CAT® se demostró el doble de nitración con termostatos de 86°C que termostatos de 88°C. El fabricante CAT recomienda una temperatura operacional entre 88°C y 93°C, mientras Waukesha® recomienda una temperatura entre 82°C y 85°C. Se debería mantener el termostato de fábrica, a no ser que tenga nitración antes de tiempo con la mezcla en el punto óptimo. La nitración es la acumulación de óxidos de nitrógeno causado por la degradación de aceite al trabajar a bajas temperaturas, estos son depósitos son blancos o amarillos ubicados generalmente en los cilindros, pistones válvulas o escape.

### Temperatura de aceite

La temperatura de aceite, al igual que su viscosidad, determinara la calidad del lubricación, por lo que es necesario que en su tiempo de operación este próximo a los 85°C. En motores no estacionarios la refrigeración de aceite está en función del paso por el cárter, temperatura de ambiente y velocidad del vehículo. Para el caso de motores estacionarios es recomendable acudir a la instalación de intercambiadores de calor, en especial uno de agua-aceite. Este tipo de refrigerador los conductos de aceite están rodeados de cámaras donde circula el refrigerante del motor.

El sistema de refrigeración de aceite permite elevar con rapidez la temperatura del aceite, siendo de gran ayuda para arranques fríos. Una vez alcanzada la temperatura ideal de funcionamiento el intercambiador tratara de mantener dicha temperatura con la ayuda de una válvula termostática.

### Temperatura del gasificador

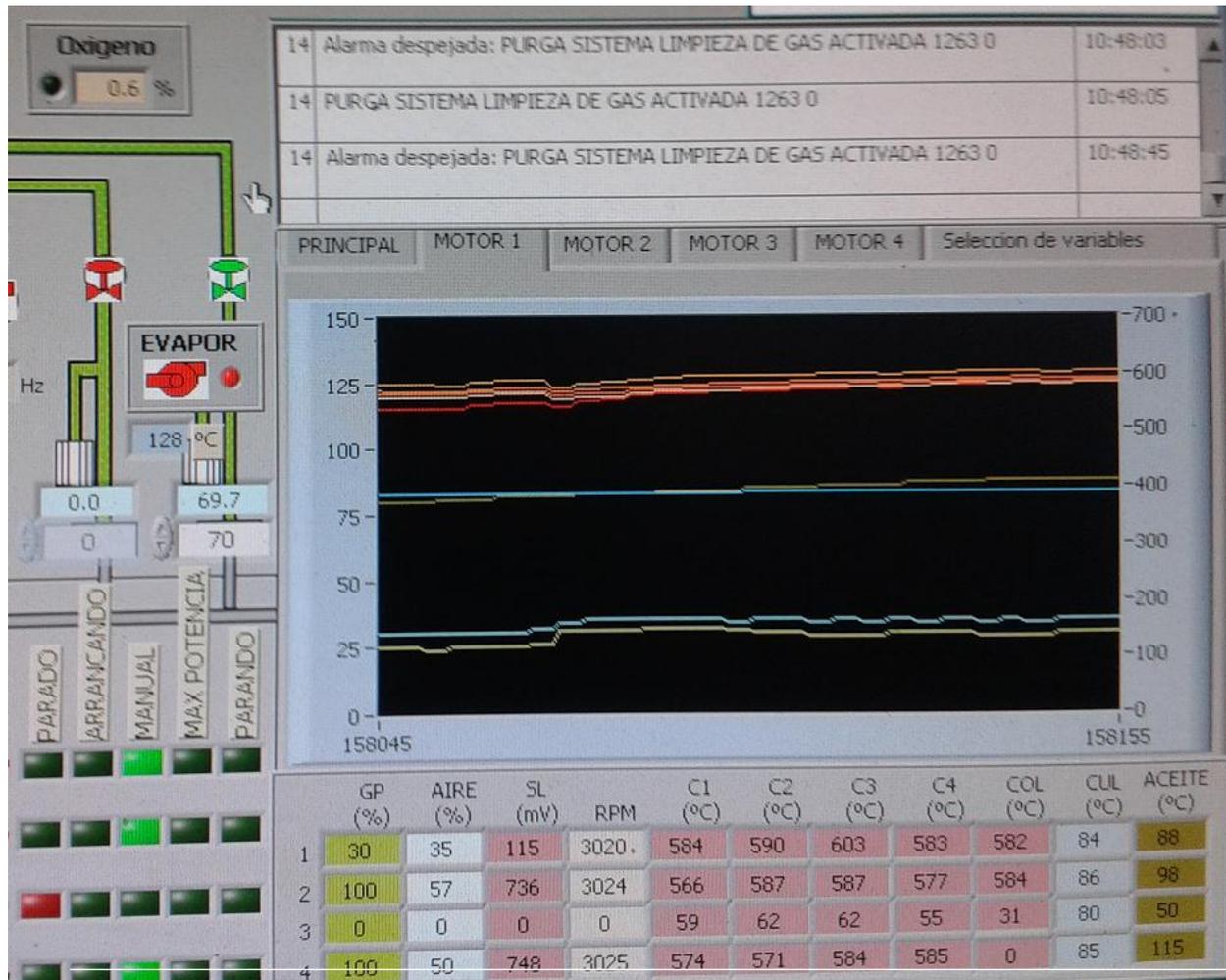
Los sensores usados son termopares que deben medir diversas temperaturas de gasificación, especialmente por debajo de la rejilla, como un chequeo del funcionamiento normal o anormal. Las temperaturas en la rejilla deben estar en un rango de 500 y 700°C, las temperaturas más altas indican un funcionamiento anormal. En consecuencia, la señal del termopar puede ser utilizado por un sistema de control o un sistema de alarma.

### Temperatura de gases de escape

Se puede tomar la medida por cada cilindro del motor, esto ayudara a determinar si la combustión dentro de cada cilindro se está realizando correctamente si se compara con los demás cilindros o motores.

En la siguiente ilustración se puede observar como las variables de funcionamiento son motorizadas en un sistema de control automático.

**Ilustración 3 Monitorizado de variables de funcionamiento**



## 5.2.2 Presiones

### Presión de líquido refrigerante

Uno de los valores que se monitorea en el motor y/o instalación es el sistema de refrigeración, debido que al ser motores estacionarios algunos elementos de refrigeración son eliminados o ya no cumplen su función de forma adecuada. La presión y velocidad del circuito está relacionada con la circulación forzada del líquido refrigerante a través de una bomba.

Para el caso de estudio de la planta de gasificación en Nava de Cidaut, se tiene una bomba de agua propulsada por energía eléctrica, la misma que hace circular el líquido refrigerante para los cuatro motores de combustión y para la parrilla del gasificador. La elevada velocidad del líquido sumado el volumen del circuito permite evacuar una gran cantidad de calor.

En el sistema de refrigeración al ser un circuito cerrado y forzado por bomba se genera en el interior una presión superior a la atmosférica, de forma que la temperatura de ebullición del líquido refrigerante puede ascender hasta los 130 C°, valor que supera la temperatura óptima del funcionamiento del motor. Sin embargo el valor máximo de la presión en el circuito está controlado o limitado por una válvula que permite la salida del vapor del circuito, este valor máximo es próximo a 1,5 bar. Esta válvula normalmente está situada en el tapón de llenado del radiador o del depósito de expansión.

Por lo tanto la variable de presión del refrigerante debe ser monitoreada para controlar la operatividad de termostatos, bomba, válvulas limitadoras de presión, conducciones, etc. Existe la posibilidad de caídas de presión sobre todo en sistemas que cuentan con filtros de agua como sucede en la planta de Nava, por lo que es necesario medir las presiones en diferentes puntos del circuito. La medición se hace a través de presostatos, uno ubicado después de la bomba y otro cerca del vaso de expansión.

### **Presión del sistema de lubricación**

Los valores de presión del sistema de lubricación para cada motor los indica el fabricante, pero como referencia general la presión de aceite en ralentí debe superar los 2 bar, con un régimen de giro de 2000 rpm debería alcanzar los 4,5 bar y en altas revoluciones no debe sobrepasar los 6 bar.

La presión de aceite debe ser monitoreada continuamente debido que el sistema de lubricación puede presentar presiones inferiores, superiores o irregulares. Lo más común en motores que trabajan con gas pobre es la caída de presión en el circuito y las posibles causas son las siguientes: La válvula limitadora de presión se bloquea debido a la suciedad, o el elemento de refrigeración de aceite se obstruye. A pesar que la mayoría de intercambiadores de calor de aceite cuentan con una válvula termostática y de sobrepresión, estos tienden a bloquearse por alquitranes condensados limitando el caudal de aceite.

La presión de aceite también puede variar a una presión superior de la nominal y puede ser provocado por un mal funcionamiento de la válvula limitadora de presión, al bloquearse el elemento en posición de cierre, o también obstrucción de un canal principal. Esto se debe a la acumulación de depósitos en dichos elementos, por la contaminación de aceite con alquitranes.

Otra causa de una elevada presión es la utilización de aceite con viscosidad demasiado alta, o a su vez el aceite contiene partículas de alquitrán que hacen más viscoso el aceite, generando un exceso de presión que afecta a componentes como los taques hidráulicos que pueden provocar un desplazamiento de las válvulas mayor del previsto.

El control de presión del circuito de lubricación, al igual que en los vehículos, da aviso del estado del funcionamiento del sistema de lubricación Si el control es sencillo puede contar con un presostato situado en el canal principal del circuito y en el caso que querer monitorear los diversos estados de presión del circuito: mínima, máxima, dinámica; normalmente se utiliza un sensor piezoeléctrico cuya señal es tratada electrónicamente.

Para la comprobación de la presión y diagnóstico del estado de funcionamiento del circuito de lubricación, es indispensable medir la presión de trabajo. Este valor se obtiene desconectando el sensor de presión e

instalando un manómetro en el roscado del sensor. Se puede utilizar un manómetro que permita verificar simultáneamente el valor de tarado del sensor de presión.

### **Presiones en gasificador**

Durante el funcionamiento del gasificador las caídas de presión se pueden medir de forma rutinaria a través del lecho del gasificador y en el sistema de limpieza de gas y componentes. En especial los componentes que son propensos al taponamiento. La presión total con respecto a la presión atmosférica también se puede medir en la salida del gasificador, salida de limpieza, y (si el gasificador funciona a una presión por encima de la presión atmosférica) la entrada de aire.

Se pueden usar manómetros para medir la caída de presión a través del lecho, ciclones, filtros y otros componentes. Estos pueden ser equipados para sonar una alarma o para avisar cuando los niveles de flujo preestablecidos han sido violados, y / o activar las válvulas de control para regular esos flujos.

## **5.2.3 Otras variables de funcionamiento**

### **Composición del gas pobre (contenido de O<sub>2</sub>)**

El nivel de oxígeno se monitoriza en continuo a la salida del gasificador, ya que si su porcentaje es alto es peligroso para la operación de la planta por riesgo de inflamación. También es monitorizado para manifestar si el proceso de gasificación está trabajando adecuadamente.

El porcentaje no deberá ser mayor de 2%. En el caso que supere este valor la planta dejará de operar por cuestiones de seguridad. Las anomalías que pueden producir la elevación de oxígeno son entradas de aire por el mal estado de juntas o falta de estanquidad.

### **Sonda lambda**

La sonda lambda es un sensor de concentración de oxígeno de los gases quemados. Está ubicada en el colector de escape del motor permitiendo un control preciso del dosado. La respuesta del sistema no es lineal con el dosado del motor, sino que se produce un salto brusco al pasar de dosados pobres (exceso de oxígeno) a ricos. Esta respuesta lo hace conveniente para el control de mezcla estequiométrica.

Para dosados pobres el sensor da una tensión de salida baja entre 50-200mV y para dosados ricos entre 800-1000mV.

### **Posición de válvulas aire y gas pobre**

La posición de las válvulas o mariposas de ingreso de aire y gas también son monitorizadas. Las válvulas están ubicadas en el colector de admisión y son actuadores que regulan la mezcla aire/gas pobre, dependiendo la señal de mando. La posición de la válvula es medida por el porcentaje de su apertura, es decir 0% cuando está cerrada y 100% cuando está abierta.

### **Niveles de fluidos, cenizas y biomasa.**

Para los motores es necesario monitorizar los niveles de fluidos tales como aceite y refrigerante. Para los dos casos son relacionados con las presiones de los circuitos.

Por otro lado se tiene un sensor de nivel de cenizas en el cenicero del reactor y también un sensor de partículas en el ciclón. Los valores de estos sensores son útiles para planificar la realización de mantenimiento preventivo y para evitar atascamientos.

Una de las variables más importantes de un gasificador es el nivel de biomasa dentro del gasificador debido que si un gasificador continúa funcionando después de que la biomasa se ha consumido, existe el peligro de dañar la región de reducción del gasificador a causa de altas temperaturas generadas durante la gasificación de carbón y de combustión. Por lo tanto, los controles de nivel deben ser instalados en las diferentes tolvas de combustible y en el gasificador en sí para advertir cuando el nivel de biomasa se está agotando.

### **5.3 Origen de fallos en motores a gas pobre**

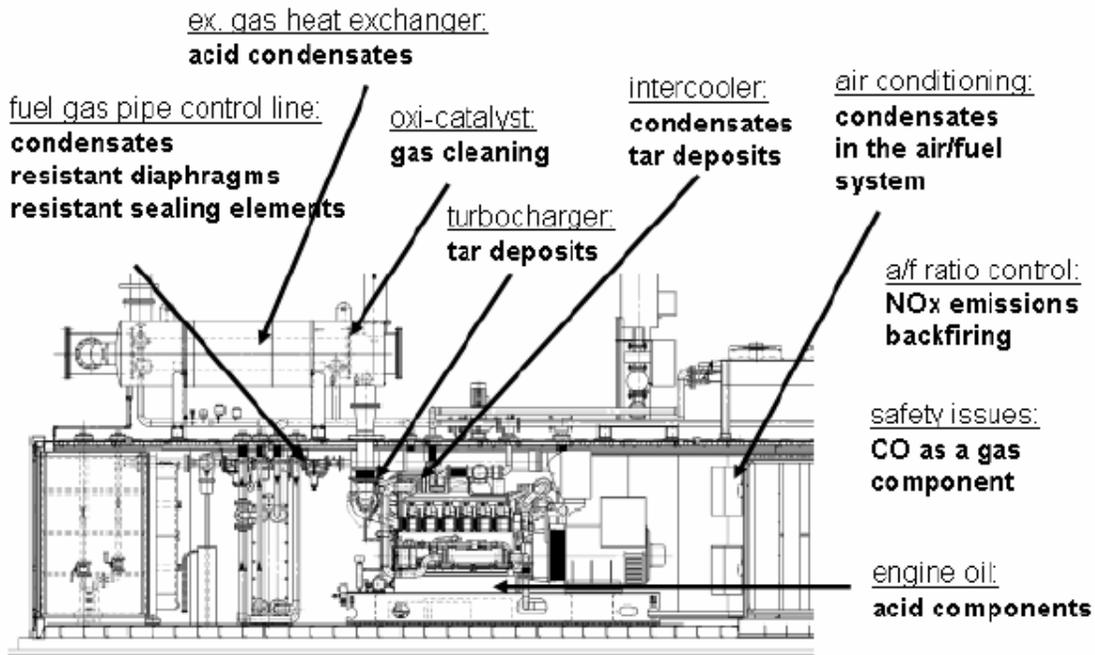
La mayor parte de fallos y anomalías en los motores a gas pobre se deben a las siguientes razones:

- a) Fallos de diseño. La mayor parte de motores a gas pobre han sido inicialmente diseñados para trabajar con gasolina o diésel, por lo cual se realiza una adaptación para funcionar con otro tipo de combustible y en otras condiciones, por lo tanto son motores que no están suficientemente desarrollados o experimentados. La resistencia de algunos materiales, y componentes no ha sido suficientemente calculada, las condiciones de experimentación y prueba no corresponden con las condiciones reales de trabajo (condiciones de refrigeración, calidad de gas, temperatura exterior, etc.). Siendo de esta manera el origen de fallos el no tener una idea exacta de la vida de determinadas piezas.
- b) Duras condiciones de uso. Estos equipos están obligados a trabajar durante largos periodos de tiempo y en plena capacidad. Sumado a esto las paradas y arranques constantes, los motores tienen que resistir grandes esfuerzos.
- c) Negligencias de operación.

### **5.4 Fallos típicos en motores a gas pobre**

Para el monitorizado del estado del motor “Condition Monitoring” se hace una evaluación de cambios o deterioro del estado de los componentes debido al desgaste, ensuciamiento, corrosión, etc. El conocimiento de las fallas más comunes de motores a gas de gasificación y de la planta es una constante recopilación de know-how acompañado de estudios e investigaciones tecnológicas. La siguiente Gráfica 13 representa una recopilación de las posibles áreas problemáticas relacionadas con el rendimiento del motor.

**Gráfica 13 Puntos problemáticos de un motor de gas de gasificación (Herdin, Robitschko, Klausner, & Wagner, 2003)**



Se enlistan los fallos o anomalías más comunes en los motores a gas. (Renovetec, 2011)

- 1) Gripado entre pistón y camisa
- 2) Gripado del cigüeñal
- 3) Sobrepresión en el cárter
- 4) Detonaciones
- 5) Alta temperatura del agua de refrigeración
- 6) Baja presión de aceite del circuito de lubricación
- 7) Alta temperatura de aceite de lubricación
- 8) Altas vibraciones en cigüeñal
- 9) Altas vibraciones en turbocompresor
- 10) Fallos de encendido
- 11) Bajo rendimiento (Mayor consumo de combustible)
- 12) Alta temperatura en cámaras de combustión
- 13) Corrosión interior
- 14) Fallos en equipos de control
- 15) Fallos en la alimentación a equipos de control

De estas anomalías se tratarán los más relevantes en los siguientes apartados.

### 5.4.1 Culata y válvulas

El principal problema que puede tener un motor que trabaja a gas pobre es el de formación de depósitos de alquitrán en la parte interna del motor como es en la culata, los cuales se endurecen al condensar. La niebla de alquitrán y polvo forman un depósito como asfalto alrededor de los vástagos de las válvulas de admisión, generando adhesión entre los componentes. El pegado de válvulas es más un problema de los depósitos acumulados que del desgaste del motor. El problema de pegado de válvulas repercute en un cierre de válvula lento, reduciendo la alimentación del gas y hasta una pérdida de compresión del cilindro.

Los vástagos de válvula pueden presentar desgastes y eventualmente deformaciones. En el primer caso el límite lo marca la holgura existente con respecto a la guía de válvula, que de superarse, obliga a sustituir la válvula y según el caso también la guía. La deformación del vástago normalmente se produce por la colisión de la válvula con el pistón, situación posible en muchos motores cuando la distribución se desfasa accidentalmente un determinado número de grados. (Villar, 2007) Esta colisión de componentes móviles como es el pistón y las válvulas pueden también ocurrir en el encendido en frío de un motor a gas pobre, si las válvulas se encuentran pegadas.

Para evitar el pegado de los vástagos de las válvulas en sus guías cuando se realiza una parada programada de larga duración se recomienda depositar una pequeña cantidad de líquido disolvente en dichas partes. Además, antes de una puesta en marcha tras una parada prolongada y especialmente si no se aplicó líquido disolvente, se recomienda girar el motor manualmente para comprobar si las válvulas están pegadas.

Las válvulas pueden ser reacondicionadas o limpiadas, y el motor puesto en servicio sin serios daños en los anillos y cojinetes. Es decir el agarrotamiento de las válvulas de admisión puede ser corregida sin una revisión completa del motor. Sin embargo, cuando las válvulas se pegan es una señal clara de la necesidad de mejorar el sistema de limpieza, o rediseñar el gasificador para reducir la producción de alquitrán.

De los principales componentes de alquitrán en el gas son los fenoles. Altas cantidades de fenoles en el gas son sospechosos de causar la formación de depósitos en la cámara de combustión (CCD) y por lo tanto aumentar el desgaste del motor.

### 5.4.2 Aceite lubricante

En los motores a gasolina, los vapores que escapan de la combustión a través de las paredes del cilindro, tienden a reducir la viscosidad del lubricante con el tiempo. En el caso de motores a gas y en especial en el gas pobre limpio, las fracciones volátiles de aceite de motor se evaporan, haciendo que el aceite se espese naturalmente. El aumento de viscosidad mejora la capacidad de lubricación del aceite, pero también aumenta las necesidades en el arranque.

En el caso de un gas sucio, se puede introducir partículas de alquitrán y corrosivos en el aceite a través de las fugas de gases de combustión entre cilindro y pistón. Las partículas en el aceite, ceniza y acumulación de carbón en el cárter pueden aumentar el desgaste del motor. Si existen partículas duras y más gruesas que la película de aceite, puede rayar superficies de apoyo. Sin embargo, partículas como las de carbón de leña y cenizas tienden a ser fácilmente aplastadas, pasando a ser partículas más pequeñas, reduciendo al mínimo este problema.

Si se produce formación de escoria de ceniza, las partículas son más abrasivas y podría causar un severo desgaste. En especial cenizas con pequeñas cantidades de sodio, que lleguen al aceite lubricante y al gas

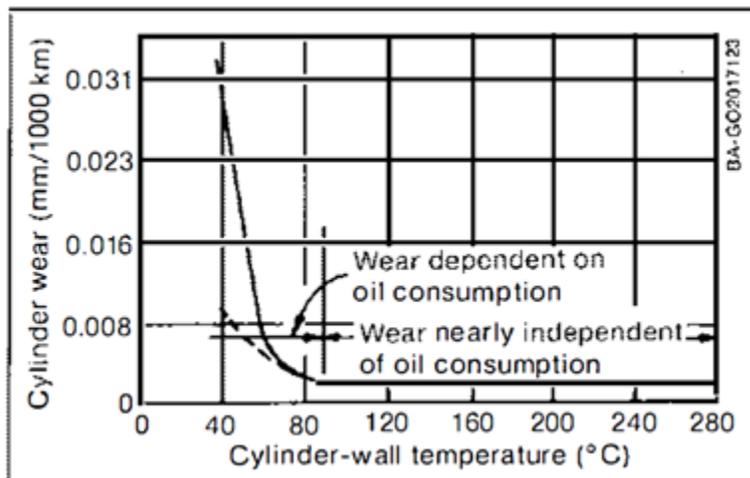
combustible puede provocar la corrosión de válvulas del motor. Es evidente que la eliminación de partículas es muy importante para la vida del motor.

Es importante mantener la calidad y características del aceite, también realizar un diagnóstico de su estado. Este tema se trata en el Capítulo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

### 5.4.3 Corrosión

La corrosión en los cilindros aumenta el desgaste a bajas temperaturas de funcionamiento, como se muestra en la Gráfica 14. Por debajo de los 50°C, el desgaste del cilindro y del segmento aumentan rápidamente con el aumento de la condensación de agua y de productos de hidrólisis corrosivos debido al ácido carbónico.

**Gráfica 14 Daño en el cilindro vs. Temperatura. (SERI, 1988)**



Por debajo de 85°C, el desgaste del cilindro y segmento depende del consumo y espesor de película de aceite. Por encima de 85°C el desgaste es mínimo e independiente del espesor de película de aceite.

Cuando el motor está operando muy frío, se forma depósitos en los cilindros, los pistones, las válvulas y el escape. Esto se puede observar fácilmente en la parte interna del colector de escape. Algunos de estos depósitos son de la nitración del aceite.

Como se ha dicho, la corrosión en los motores a gas pobre es causada por vapores alcalinos (Na, K y Ca) que suelen estar presentes en pequeñas cantidades.

### 5.4.4 Gripado entre pistón y camisa

El gripado es la avería que se produce cuando dos piezas que deslizan una sobre otra, una de ellas fija y otra móvil, se agarrotan o sueldan entre sí. (Renovetec, 2011). Esta avería es considerada una de las más graves del motor debido que significa la destrucción del motor. Sucede con poca frecuencia, debido que en la mayoría de casos es evitable con la realización de mantenimientos programado y con diagnóstico de las variables de funcionamiento. El gripado pistón-camisa puede tener origen a tres causas:

- 1) Fallo en la lubricación. El aceite no llega con el caudal suficiente y a la presión necesaria para lubricar. También la aparición de partículas extrañas y la pérdida de capacidad lubricante afecta la capacidad de lubricar. El rozamiento de las piezas con fallos en la lubricación produce una cantidad de calor que finalmente agarrota las piezas, o raya las paredes del cilindro y del pistón. Otro fallo en la lubricación es la distribución del aceite dentro del cilindro, si el estado del bruñido de las paredes y los segmentos están en mal estado puede causar un roce exagerado entre los elementos móviles metálicos, produciendo así una avería grave.
- 2) Fallo en la refrigeración. Relacionado con la presión y temperatura del refrigerante o algún problema en el sistema de refrigeración, el cual es incapaz de evacuar el calor generado dentro del cilindro.
- 3) Desequilibrio de la biela. Cuando el cigüeñal no está equilibrado.

Existe instrumentación, parámetros y alarmas que permiten evitar esta avería, impidiendo el funcionamiento de motor en las condiciones expuestas. Por lo tanto es necesario conocer que instrumentación que debería tener los motores:

- Medición de temperatura en la cámara de combustión
- Medición de temperatura, presión y caudal de aceite
- Medición de temperatura, presión y caudal de líquido refrigerante
- Sistema anti detonación
- Detección de niebla del cárter.

Los sistemas de medición de temperatura y presiones ya se han caracterizado por lo que a continuación se describe lo relacionado con detonación.

### **5.4.5 Detonación.-**

Como se vio en la sección 3.2.1.1, la detonación es la autoinflamación de una porción separada de la mezcla que todavía no ha llegado la llama de la chispa del encendido. La característica propia de la detonación es la formación de una onda de choque en el interior de cilindro produciendo un ruido excesivo y grandes pérdidas caloríficas.

La detonación o knocking es uno de los fallos más comunes en los motores a gas pobre, las consecuencias de este fenómeno es la degradación acelerada del pistón, cilindro y válvulas, pérdida de potencia.

Los factores que intervienen en esta anomalía son:

- Sobrecargas del motor, desigual repartición de carga entre los cilindros, relación de compresión excesiva, gran avance de encendido.
- Temperaturas.- Exceso de temperatura del aire de admisión y en el sistema de refrigeración. Una temperatura de encendido del combustible gaseoso demasiado baja. Es decir, si la composición del gas, el número de metano es bajo tiene una capacidad detonante mayor que uno de metano mayor. También si el contenido de hidrógeno en el gas es excesivo.
- Instrumentación. Como cualquier otro tipo de instrumentación puede estar fallando y estar indicando problemas que en realidad no existen.
- Detector inductivo (pick-up). Este sensor indica la posición del volante para determinar el momento exacto que debe saltar la chispa, si la posición es errónea es probable que exista una detonación.

- Camisas o cilindro. Si la rugosidad del bruñido en las camisas es muy lisa, perderá la capacidad de retención de aceite, provocando puntos calientes.
- Bujías. La combustión detonante puede conducir a una elevación anormal de la temperatura de los electrodos de la bujía, pudiendo llegarse a producir un preencendido de avance. Este fenómeno se conoce como wild pind.

Para identificar y corregir el problema se puede realizar las siguientes comprobaciones.

- Comprobar número de metano del gas o composición de biomasa.
- Revisar y/o sustituir instrumentación anti detonación.
- Revisar, limpiar, comprobar y/o sustituir sensor de posición del volante de inercia
- Revisar, limpiar, comprobar y/o sustituir bujías.
- Realizar una boroscopia del cilindro que esta detonando.
- Rebajar la temperatura en la cámara de combustión.
- Modificar ligeramente el avance de encendido.

#### **5.4.6 Emisiones de gases contaminantes.**

Un problema importante es que variación de las condiciones y composición del gas de gasificación que alimenta los motores, originada por la variación de la biomasa (humedad, tamaño de astillas, composición), los funcionamientos de las válvulas de carga (alimentación de biomasa, aire) y descarga (de cenizas, de char), así como la inestabilidad del lecho que se origina con la formación de bóvedas (con posibles caminos preferentes para que el aire alcance la salida de gases sin reaccionar) y la posible ruptura de las bóvedas (con aumento transitorio de volátiles o de partículas).

Este funcionamiento no estrictamente estacionario del gasificador y de sus sistemas asociados (alimentación de biomasa, extracción de cenizas, limpieza de gases) y de los propios sistemas de control de los motores (regulación de dosado por sonda lambda, temperatura de refrigerante y de lubricante) origina que el motor en su conjunto se vea sometido a variación de la condiciones, que se traduce en pequeñas variaciones de la potencia producida (debidas a la variación de poder calorífico y de velocidad de combustión), pero sobre todo en variaciones de las emisiones contaminantes gaseosas (NO<sub>x</sub>, CO, HC).

Los sistemas de control de la planta de gasificación, en su conjunto: gasificador, limpieza, motor, generador eléctrico, deben ser capaces de identificar estas variaciones y actuar sobre las variables de funcionamiento para adaptarse a las condiciones variables con el tiempo y reducir sus efectos.

Un elemento de particular importancia para las emisiones de NO<sub>x</sub> es la presencia de compuesto de nitrógeno en la biomasa, que se pueden detectar en forma de NH<sub>3</sub> en el gas de gasificación y que tienen un efecto directo sobre las citadas emisiones de NO<sub>x</sub>.

#### **5.4.7 Catalizador de oxidación.**

Debido a las regulaciones de emisiones de cada país, es necesario desarrollar conceptos y tecnologías adecuadas que reduzcan las emisiones de CO. De acuerdo con Jenbacher (Herdin, Robitschko, Klausner, & Wagner, 2003), se ha realizado pruebas iniciales con oxi-catalizadores para la reducción de CO pero en un tiempo relativamente corto ha fracasado. La razón es siempre la misma, síntomas de envenenamiento del catalizador. Para algunas plantas el catalizador en el bypass tuvo una efectividad del 50 % después de aproximadamente 30 h. Un análisis final de la capa superficial del catalizador mostró no sólo venenos

catalíticos de plomo y zinc, también potasio, que junto con el calcio causa una vitrificación de la activa superficie.

El catalizador pierde efectividad si hay potasio en los gases de gasificación, por lo que le da mucha importancia a la presencia de K en el aceite lubricante, porque es un indicador de la capacidad del sistema de limpieza de gases (scrubber o similar) para eliminar el K pero también el resto de sustancias (partículas, Li, Na, etc.)

#### **5.4.8 Problemas generales**

**Condensación de líquidos con importante contenido en agua** (especialmente por funcionamiento a temperaturas inferiores a las nominales, por ejemplo en los procesos de arranque y calentamiento). Estos condensados son fuertemente ácidos (bajo pH) y por ello corrosivos. Problemas en puntos bajos de conductos. Requiere un diseño cuidadoso de las geometrías y las inclinaciones de los conductos. Ejemplo: deterioro de catalizador de oxidación por condensados en escape del motor.

**Deposición de partículas y condensación de alquitranes**, tanto en condiciones nominales como por temperaturas inferiores. Problema que puede presentarse en cualquier punto donde la temperatura o la velocidad del flujo se reduzcan: válvulas, ensanchamientos, filtros, intercambiadores,

**Intercambiador de calor para aprovechamiento térmico**, los problemas de condensados ácidos se agudizan en este elemento, sobre todo con bajas temperaturas de los gases o del fluido secundario.

## 6 Diagnóstico del estado del motor a través del análisis del lubricante.

El aceite extraído del motor sirve como variable motorizada en discontinuo, debe ser analizado mediante un test de laboratorio, esta herramienta ayuda a identificar las características y propiedades del aceite utilizado, así como algunos síntomas del motor.

Las funciones principales del aceite lubricante dentro del motor es el de lubricar, proteger, limpiar, refrigerar y sellar, cuando existe alguna alteración de sus propiedades físicas o químicas estamos hablando de una degradación del aceite. Las variaciones de las propiedades se deben a las diferentes condiciones a las que trabaja el aceite como elevadas temperaturas, velocidades de cizallamiento, ambiente, etc.

La velocidad de degradación del aceite depende de estado y mantenimiento del motor, de la calidad del aceite, del tipo de combustible y el tipo de trabajo. Es decir, este parámetro nos dará información para establecer los plazos de cambio de aceite de motor.

Sin embargo, la velocidad y nivel de degradación del aceite aumenta cuando se producen fallos o condiciones en el motor que introducen contaminantes o deterioran los componentes del aceite por ejemplo, temperaturas elevadas, presiones extremas en los elementos lubricados, baja compresión, filtro de aire roto, etc. (Espinoza, 1990)

Antes de realizar cualquier tipo de análisis de aceite es necesario conocer que elementos o materias extrañas que vamos encontrar en el aceite. La contaminación del aceite puede ser por cuatro causas principales: En la fabricación o reparación de componentes, contaminación externa, origen interno y por acciones de mantenimiento. Un programa analítico de rutina de aceite de motor a gas pobre debe incluir por lo menos los siguientes parámetros:

- Viscosidad cinemática
- Índice de basicidad
- Índice de acidad
- pH
- Óxidos metálicos.- Del desgaste metálico y oxidación (Fe, Cr, Sn, Al, Ni, Cu, Pb, Mo)
- Contenido en aditivos (Ca, Mg, B, Zn, P)
- Impureza y polvo atmosférico.- Se introducen a través de la admisión, por filtros en mal estado o conductos con fugas.
- Productos carbonosos.- Resultado del paso de la combustión del aceite.
- Nitración/Oxidación
- Gases de la combustión
- Contaminación por agua
- Contaminación por glicol
- Alquitrán.
- Ácidos y productos varios.

La degradación y contaminación del aceite produce partículas sólidas no salubres en el aceite y facilita los procesos de desgaste.

## 6.1 Características de los aceites

Las características o propiedades de los lubricantes determinan la calidad y capacidad del aceite, garantizando el cumplimiento de sus funciones durante el mayor tiempo posible soportando las condiciones de temperatura y presión. Las características de los aceites pueden clasificarse en los siguientes grupos:

- 1) Físicas: Viscosidad, adherencia, punto de congelación, punto de inflamación
- 2) Químicas: Estabilidad química, extrema presión, fuerza de cohesión, grado de acidez, grado de cenizas.
- 3) Fisicoquímicas: Antidesgaste, antiespumante, detergente, dispersante, antioxidante.

### 6.1.1 Viscosidad

Es la característica más importante del aceite, debido que es la resistencia que opone un líquido a desplazarse o a fluir por un conducto, existiendo un rozamiento de moléculas entre sí. Este rozamiento está en función a la temperatura y presión en que estén sometidos: A mayor temperatura menor viscosidad, y a mayor presión mayor viscosidad. La viscosidad consolidada las pérdidas por fricción y la capacidad de carga de los cojinetes.

Para medir la viscosidad se puede utilizar un viscosímetro, por lo general son aparatos simples donde se compara la capacidad de “fluir” midiendo en tiempo o espacio. Para el caso de análisis de aceite de los motores de Cidaut se utilizó el método de comparar aceite usado (aprox 260 horas de uso) con el aceite nuevo. El test debe realizarse a una temperatura ambiente de aproximadamente 20C° y las muestras deben tener la misma temperatura. Con el procedimiento y técnica aconsejada se obtuvieron los siguientes datos.

Ilustración 4 Viscosímetro



**Tabla 7 Viscosidad motores Nava**

| Nº MUESTRA | FECHA      | PLANTA | MOTOR | HORAS MOTOR | HORAS ACEITE | VISCOSIDAD MARCAS |                  |
|------------|------------|--------|-------|-------------|--------------|-------------------|------------------|
|            |            |        |       |             |              | MAYOR VISCOSIDAD  | MENOR VISCOSIDAD |
| 11         | 03/10/2013 | NAVA   | 1     | 548,8       | 251,5        | 10                |                  |
| 12         | 03/10/2013 | NAVA   | 2     | 552,3       | 250,2        | 8                 |                  |
| 13         | 03/10/2013 | NAVA   | 3     | 472,7       | 172,6        | 3                 |                  |
| 14         | 03/10/2013 | NAVA   | 4     | 558,4       | 260,6        | 5                 |                  |

Como se puede observar en la tabla, el aceite usado que más se asemeja a la viscosidad del aceite nuevo es el de motor con menos horas de uso, en este caso es el número 3. El aumento de viscosidad en el aceite de los demás motores se debe a un aceite degradado y contaminado. La contaminación del aceite puede ser a través del conducto de la admisión es decir por la presencia de alquitrán en el gas pobre.

### 6.1.2 Acidez-basicidad del aceite

El grado de acidez o alcalinidad puede expresarse por el número de neutralización respectivo, el cual se define como la cantidad de álcali o ácido expresado en miligramos de hidróxido de potasio (KOH) que se requiere para neutralizar el contenido ácido o base de un gramo en condiciones normalizadas. Es decir si a partir de la combustión del combustible se producen cantidades de ácido sulfúrico.

Para monitorizar la acidez del aceite se puede tomar en cuenta el número de ácido total (TAN) quien representa los miligramos de KOH necesarios para neutralizar a todos los constituyentes ácidos presentes en la muestra de aceite incluyendo débiles y fuertes. Su medida depende de los aditivos, y experimentalmente se ha demostrado que no existe una relación entre la reducción del número de base total y el número del TAN, por lo tanto no se considera una medida para evaluar el aceite.

Para monitorizar la basicidad del aceite se toma en cuenta el número de base total (TBN) el cual representa los miligramos equivalentes de KOH necesarios para neutralizar solo a los constituyentes alcalinos existentes en un gramo de muestra.

Se realizó el test de TBN de los aceites usados de los motores de la planta de Nava de Cidaut y se obtuvo los siguientes resultados.

**Tabla 8 Numero de base total TBN (elaboración propia)**

| Nº MUESTRA | FECHA      | PLANTA | MOTOR | HORAS MOTOR | HORAS ACEITE | MARCA Y TIPO | TBN   |       |       |
|------------|------------|--------|-------|-------------|--------------|--------------|-------|-------|-------|
|            |            |        |       |             |              |              | NUEVO | USADO | TBN % |
| 11         | 03/10/2013 | NAVA   | 1     | 548,8       | 251,5        | SHELL 5W30   | 1,8   | 0,4   | 22    |
| 12         | 03/10/2013 | NAVA   | 2     | 552,3       | 250,2        | SHELL 5W30   | 1,8   | 0,7   | 39    |
| 13         | 03/10/2013 | NAVA   | 3     | 472,7       | 172,6        | SHELL 5W30   | 1,8   | 0,8   | 44    |
| 14         | 03/10/2013 | NAVA   | 4     | 558,4       | 260,6        | SHELL 5W30   | 1,8   | 0,6   | 33    |

Al igual que en la viscosidad el aceite del motor número 1 es el que mayor variación de TBN tiene respecto al aceite nuevo. Los fallos que producen un aumento de la acidez del aceite producen simultáneamente una reducción de la basicidad propia del aceite. Entre los fallos pueden ser:

- Filtro de aire o conducto de admisión obstruido
- Aceite degradado
- Aceite contaminado por combustible con contenido de azufre
- Fallo en el sistema de refrigeración con sobrecalentamiento
- Filtro de aceite obstruido

Mantener la calidad del aceite adecuado es muy importante para la vida útil del motor, aquí se debe prestar mucha atención en la sobre-acidificación relación (TBN/ TAN). Dependiendo de la calidad de la madera utilizada y el concepto de la variable planta / influencia. Por ejemplo, material de pre - recubrimiento del gas proceso, la limpieza, el gas de madera puede en parte ser considerado muy " amargo " (valor de pH del condensado < 3,5) . En tal caso, el aceite debe cambiarse con relativa frecuencia para evitar que el motor de la exposición a un ataque ácido.

### 6.1.3 Insolubles del Aceite

Varios de los productos de la degradación del aceite son sólidos e insolubles en el aceite base. De estos insolubles una parte se deposita como lacas y barnices en los alojamientos de los segmentos, faldas de los pistones y otras superficies del motor. Otra parte, se deposita en el interior del cárter y de los conductos de lubricación como lodos (slugge) con el riesgo de taponarlos. El resto queda disuelto en el aceite aumentando su viscosidad. (Espinoza, 1990)

Conocer el contenido y composición de los insolubles en el aceite se lo puede relacionar con la degradación del aceite, la eficacia de los filtros, el desgaste y la capacidad dispersante.

#### **6.1.4 Reposiciones de aceite**

Los añadidos de aceite retardan el proceso de degradación de aceite debido a su efecto de dilución sobre los contaminantes y la recuperación parcial de aditivos. Lo importante es conocer la causa de la falta de nivel de aceite. Este puede ser por consumo propio de la máquina, derrames, etc. En el caso de consumo de aceite es necesario conocer la referencia de cada fabricante de motor. Los añadidos de aceite es una causa de la contaminación externa del aceite.



## 7 Conclusiones

### 7.1 Generales

Con carácter general, al realizar el presente trabajo cuyo objetivo ha sido recopilar información del estado del arte de tema y sumar las experiencias de carácter teórico-práctico sobre el mantenimiento predictivo de motores a gas pobre, se han identificado las siguientes conclusiones generales:

- El uso de la biomasa como recurso energético es de gran importancia para el desarrollo socioeconómico, la energía producida con biomasa puede ser usada calefacción y producción de agua caliente, calor para procesos industriales y generación eléctrica.
- Las desventajas de la inversión y del rendimiento de una planta de gasificación son minimizadas al aplicar un correcto control y monitorizado de funcionamiento de la planta y de motores de combustión interna.
- La transformación de la biomasa a un gas combustible se debe a un proceso de combustión incompleto de elevadas temperaturas en un medio de gasificación como el aire, como resultado se tiene un gas de bajo poder calorífico que es del orden de  $5 \text{ MJ/m}^3$ , conocido como gas de gasificación o pobre.
- El gas a la salida del gasificador tiene que ser depurado y enfriado para ser usado en MCIA, es de suma importancia capturar los alquitranes debido que este elemento es perjudicial para la vida y funcionamiento del motor.
- Implementar mantenimientos predictivos al motor o instalación de gasificación requiere una fuerte inversión inicial en equipos de medida y formación de técnicos. Sin embargo, es la que proporciona mejores resultados, puesto que se maximiza el tiempo de vida de los equipos, garantizando la máxima calidad y seguridad del proceso productivo
- El proceso de diagnóstico requiere la detección e identificación de los síntomas originados por los fallos y por otro lado la identificación del fallo mediante una evaluación de dichos síntomas.
- En el monitorizado del estado del motor "Condition Monitoring" se hace una evaluación de cambios o deterioro del estado de los componentes debido al desgaste, ensuciamiento, corrosión, etc. El conocimiento de los fallos más comunes de motores a gas de gasificación y de la planta es una constante recopilación de know-how acompañado de estudios e investigaciones tecnológicas.
- La velocidad y nivel de degradación del aceite aumenta cuando se producen fallos o condiciones en el motor que introducen contaminantes o deterioran los componentes del aceite, por tal razón es importante contar con la herramienta y conocimiento del análisis de lubricante.

### 7.2 Específicas

Con carácter más específico, se pueden indicar las siguientes conclusiones que hacen referencia a valores concretos, tendencias observadas o bien recomendaciones para el mantenimiento mediante monitorizado de motores alimentados con gas de gasificación:

## **Sobre la gasificación de biomasa y la depuración del gas**

- La gasificación es una conversión termoquímica versátil proceso que produce una mezcla de gas de CH<sub>4</sub>, CO y H<sub>2</sub>, las proporciones se determina por el uso de aire, oxígeno o vapor como medio de gasificación, con rangos de poderes caloríficos bajo (4-6 MJ/Nm<sup>3</sup>), medio (12-18 MJ/Nm<sup>3</sup>) y alto (40 MJ/Nm<sup>3</sup>)
- Es de gran importancia identificar las especificaciones de la biomasa que se va a procesar, debido que podremos conocer si el gasificador funcionará correctamente respecto a estabilidad, calidad de gas, eficiencia y pérdidas de presión.
- El gasificador de tipo Downdraft es el equipo más óptimo para trabajar con motores a combustión interna debido a su gas con bajo contenido de alquitranes y de partículas.
- En el sistema de depuración tenemos el ciclón, que está diseñado para retener partículas, en especial cenizas (ash) de tamaño medio superior a 10 micras. Logra capturar entre el 60 y 70% del contenido total de partículas. Luego el gas pasa por scrubbers, su función es contactar directamente el gas con agua pulverizada, este efecto actúa en partículas menores a 0,1 μm.

## **Sobre el diagnóstico y monitorizado de los motores alimentados con gas de gasificación**

- Las condiciones de operación, el mantenimiento, las anomalías, que tiene el motor de combustión a gas pobre dependen directamente de la tecnología de gasificación usada y de la biomasa procesada.
- Fallo es la finalización de la habilidad de una máquina, sin que necesariamente el sistema deje de funcionar o lo haga en condiciones críticas. Avería es un fallo que origina un desperfecto y que por lo general necesita una intervención de mantenimiento.
- La anomalía es la presencia de una característica o condición en un elemento, diferente a la establecida en diseño. Un síntoma es una manifestación externa del estado de un sistema o del funcionamiento de sus componentes, que cambian al variar sus condiciones operativas y ante la presencia de fallos.
- Existen algunas técnicas de correlación síntomas-fallos, la selección de la técnica depende de los objetivos ansiados y del método de diagnóstico a utilizar. La técnica más utilizada es la correlación mediante tabla de síntomas, consistente en asignar a un síntoma los posibles fallos causantes del mismo.
- La ventaja de monitorizado continuo es que permite localizar fallos que sólo se producen bajo determinadas condiciones de funcionamiento del motor, así como las averías intermitentes que se presentan sin causas aparentes. Las principales variables que se monitorizan son: presiones y temperaturas de lubricante, refrigerante, del gas de gasificación y del aire, posición de válvulas de alimentación, niveles de fluidos, cenizas y biomasa, y por último el contenido de oxígeno del gas.
- Las variables monitorizadas en discontinuo requieren de una inspección y análisis del componente extraído del motor, es especial el análisis del estado del lubricante y su directa relación con el estado del motor.

## **Problemas de funcionamiento de los motores con gas pobre y sus causas**

- El principal problema que puede tener un motor que trabaja a gas pobre es el de formación de depósitos de alquitrán en la parte interna del motor como es en la culata, los cuales se endurecen al

condensar. La niebla de alquitrán y polvo forman un depósito como asfalto alrededor de los vástagos de las válvulas de admisión, generando adhesión entre los componentes.

- Para evitar el pegado de los vástagos de las válvulas en sus guías cuando se realiza una parada programada de larga duración se recomienda depositar una pequeña cantidad de líquido disolvente en dichas partes. También se recomienda un arranque manual para sentir si el motor tiene algún atascamiento.
- En motores con gas pobre limpio, las fracciones volátiles de aceite de motor se evaporan, haciendo que el aceite se espese naturalmente. El aumento de viscosidad mejora la capacidad de lubricación del aceite, pero también aumenta las necesidades en el arranque.
- El gripado entre pistón y camisa es una avería considerada como la más grave del motor debido que significa la destrucción del motor. Sucede con poca frecuencia, debido que en la mayoría de casos es evitable con la realización de mantenimientos programado y con diagnóstico de las variables de funcionamiento.
- La detonación o knocking es uno de los fallos más comunes en los motores a gas pobre, cuando las condiciones de operación y funcionamiento varían (T, P, dosados, etc.) las consecuencias de este fenómeno es la degradación acelerada del pistón, cilindro y válvulas, pérdida de potencia.
- Por cuestiones de operatividad y obtener más potencia, con una ligera pérdida de rendimiento, siempre se intenta trabajar en el motor con mezclas estequiométricas, disminuyendo de esta forma el riesgo de la autoinflamación, a esto se suma que el gas de gasificación tiene muchos gases inertes que son inhibidores de la autoinflamación. El control de dosado para conseguir la mezcla estequiométrica se basa en la señal de una sonda lambda.
- El poder calorífico relevante de un combustible gaseoso como es el gas pobre es el de la mezcla estequiométrica por unidad de volumen. Esta relación es importante puesto que el gas de gasificación que tiene un poder calorífico medio o incluso bajo por unidad de masa, pero desde el punto de vista de poder calorífico por unidad de volumen de la mezcla estequiométrica presentan valores solo algo menores que los de una mezcla aire-gasolina.
- Se demostró en el test de análisis de aceite que el aumento de viscosidad en el aceite se debe a la degradación y contaminación. La contaminación del aceite puede ser a través del conducto de la admisión es decir por la presencia de alquitrán en el gas pobre.
- Si hay potasio en los gases de gasificación, se verá reflejado en el análisis de contaminantes del aceite lubricante, siendo un indicador de la capacidad del sistema de limpieza de gases (scrubber o similar) para eliminar el K. El problema del K y Na es que son contaminantes corrosivos.
- Se debe prestar mucha atención en la sobre-acidificación relación (TBN/ TAN). Dependiendo de la calidad de la biomasa utilizada y el concepto de la variable planta / influencia. Si el gas es muy " amargo (valor de pH del condensado < 3,5), el aceite debe cambiarse con relativa frecuencia para evitar que el motor de la exposición a un ataque ácido.
- Condensación de líquidos con importante contenido en agua, especialmente en el arranque y calentamiento, son fuertemente ácidos (bajo pH) y por ello corrosivos
- La presión de aceite debe ser monitoreada continuamente. Los valores de los indica el fabricante, pero como referencia general la presión de aceite en ralentí debe superar los 2 bar y con un régimen de giro de 2000 rpm debería alcanzar los 4,5 bar.

- Finalmente, y especialmente por cuestiones de seguridad, el nivel de oxígeno se monitoriza en continuo a la salida del gasificador, ya que si su porcentaje es alto es peligroso para la operación de la planta por riesgo de inflamación. El porcentaje no deberá ser mayor de 2%.

### **7.3 Sugerencias para desarrollo futuros**

- Desarrollar sistemas integrados de mantenimiento predictivo, preventivo y correctivo. Que permita adquirir y manejar la información del funcionamiento del motor y canalizarlas para tomar correctas decisiones.
- Investigar de forma profunda el comportamiento del motor a gas pobre, respecto a su combustión y como mejorar.
- Asemejar los resultados del análisis en laboratorio del aceite utilizado, para identificar los contaminantes del aceite y su influencia daños en motor.
- Realizar estudios económicos y de viabilidad para la implementación de la tecnología de gasificación en zonas rurales de países en vías de desarrollo como Ecuador.

## 8 Bibliografía

- Ahrenfeldt, J. (2007). *Characterization of biomass producer gas as fuel for stationary gas engines in combined heat and power production*. Technical University of Denmark.
- CIDAUT. (2011). *Revisión teórica gasificación*.
- Demirbas, A. (2005). Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues. *ELSEVIER*, 22.
- Dr. G. Herdin, D. M. (2007). *Economic Considerations of Biomass Electrification*. GE Jenbacher.
- E. Porpatham, A. R. (2007). Investigation on the effect of concentration of methane in biogas. *Science Direct*, 9. Obtenido de Elsevier.
- EPA Environmental Protection Agency. (2007). *Biomass Combined Heat and Power*.
- Espinoza, H. (1990). *Diagnostico de motores de encendido por compresión mediante análisis de aceite*. Valencia: Universidad Politecnica de Valencia.
- Estudio FAO Montes 72. (1993). FAO. Recuperado el 2013, de El gas de madera como combustible para motores: <http://www.fao.org/docrep/T0512s/t0512s00.htm#Contents>
- FAN Fundacion Asturiana de Energia. (s.f.). *Instalación Térmica con la Biomasa*.
- Fonseca, N. (2003). *Estado del arte del uso del gas de gasificación termoquímica de biomasa en motores de combustion interna*. Bogota: Ciemat.
- Fygueroa, S. (1994). *Diagnostico del Desgaste y el estado de MEC*. Valencia: Universidad Politecnica de Valencia.
- Ginés, Ó. G. (2011). *Mejora del plan de mantenimiento de motores a combustión interna de gas natural ROLLS-ROYCE KVGS-18G4*. Barcelona.
- H.Hofbauer, R. (2001). *Stoichiometric Water Consumption of Steam Gasification by the FICFB-Gasification Process*. Viena: Institute of Chemical Engineering.
- Herdin, D. G. (2007). *Advantages Of The Biogas Otto Engine Compared With Other Technologies*. Jenbacher.
- Herdin, D. G. (s.f.). *Gas Engines - Potentials and Future*. Jenbacher, Achenseestraße.
- Herdin, G., Robitschko, R., Klausner, J., & Wagner, M. (2003). *GEJ Experience with Wood Gas Plants*. GE Jenbacher.
- Hofbauer Hermann, R. R. (2002). *Biomass CHP Plant Güssing – A Success Story*. Güssing.
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (2007). *Energía de la biomasa*. Madrid.
- Keith R Cummer, R. C. (2002). Ancillary equipment for biomass gasification. *ELSEVIER*, 16.
- Knoef. (2007). *Handbook on biomass gasification*. Enschede: BTG Biomass TEchnology Group .
- McKendry, P. (2001). Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *ELSEVIER*, 10.
- McKendry, P. (2001). Energy production from biomass (part 2): conversion technologies. *ELSEVIER*, 8.
- McKendry, P. (2001). Energy production from biomass (part 3): gasification technologies. *ELSEVIER*, 9.
- Melgar, A. (2012). *Apuntes de curso Motores de Combustión Interna Alternativos*. Valladolid.
- Melgar, A., M. Lapuerta, B., Giménez, & Díez, A. (2002). *Gasification of Lignocellulosic Residues for Energy Production in S.I. Engines*.

- Melgar, A., Tinaut, F., Horrillo, A., & Diez, A. (2005). *Prediction of the performance of spark ignition engines working with alternative gaseous fuels*. Valladolid: Universidad de Valladolid.
- Mun Roy Yap, T. W. (2007). Simulation of Producer Gas Fired Power Plants with Inlet Fog Cooling and Steam Injection. *Engineering for Gas Turbines and Power*, 11.
- Packham, K. (s.f.). *The case for waste to energy: Utilizing low-Btu reciprocating gas engine generators*. Cummins Power Generation, 5.
- Pantaleo, A., S.M., C., & Shah, N. (2013). Thermo-economic assessment of externally fired micro-gas turbine fired by natural gas and biomass: Applications in Italy. *ELSEIVER*, 12.
- Payri, F., & Desantes, J. (Edits.). (2011). *Motores de combustión interna alternativos*. Valencia: Reverté.
- Pedrajas, J. I. (s.f.). *Uso de la biomasa como combustible alternativo en instalaciones de secado térmico*. Prodesa.
- Renewable Energy Training Center. (2006). *Wood Gasification*.
- Renovetec. (2011). Motores de gas principales averías. *Energiza.org*, 5-15.
- SERI. (1988). *Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems*. Colorado.
- Terradillos, J. (2004). *Lubricacion y mantenimiento de Motores a Gas*. WearcheckIberica.
- Toscano, L. (2009). *Análisis de los parámetros y Selección de hornos para la*. Guayaquil: Tesis de grado. Universidad Politécnica del Litoral.
- Villar, A. S. (2007). *Motores Mantenimiento de Vehículos Autopropulsados*. Madrid: Thomson Paraninfo.

## ANEXOS

### 1.- Cuadro de anomalías y fallos de motores de combustión de gas pobre

|                          | Anomalías y Fallos  | Posibles Causas  | Comprobaciones Adicionales  | Acciones                   | Propuesta de modificación de mantenimiento        |  |
|--------------------------|---|--|---|----------------------------|---|--|
| Sistema de refrigeración | Aumento de temperatura en el circuito de refrigeración    | Nivel bajo de líquido refrigerante del circuito de refrigeración.        | Chequeo de depósito de líquido refrigerante en frío                   | Completar nivel            |   |  |
|                          |   | Fugas de refrigerante en el circuito                                     | Prueba de estanquidad   | Ajuste de manguitos        |   |  |
|                          |   | Presencia de aire en el circuito   |   |                            |   |  |
|                          |   | Funcionamiento anómalo de la bomba                                       |   |                            |   |  |
|                          |   | Mal funcionamiento de intercambiador de calor                            | Medir diferencia de temperatura antes y después de un intercambiador. | Limpieza de obstrucciones  |   |  |
|                          | Aumento de presión en el circuito de refrigeración        | Insuficiente circulación debido a incrustaciones en los conductos        | Chequeo de obstrucciones en cañerías metálicas                        | Cambio de cañerías         |   |  |
|                          |   | Filtros de agua obstruidos   | Chequeo caída de presión  | Cambio de filtro           | Si existe caída de presión cambiar filtro de agua |  |
|                          | Falta de estanquidad                                      | Daños en manguitos, tubos, etc.  | Prueba de estanquidad   |                            |   |  |
|                          |   | Elementos de fijación flojos o mal montados                              |   |                            |   |  |
|                          |   | Bomba de agua con fugas  | Chequeo de retenes, juntas, etc.                                      |                            |   |  |
|                          |   | Falta de estanquidad en la junta de culata                               |   |                            |   |  |
|                          |   | Avería de la válvula de cierre   | Comprobación de la válvula del tapón de llenado                       | Cambiar tapón o recipiente |   |  |
|                          | Tiempo de calentamiento de motor excesivo                 | Termostato permanece abierto   | Comprobación de termostato  | Cambio de termostato       |   |  |
|                          |   | Sistema de calentamiento eléctrico averiado                              | Medir consumos de resistencia   |                            |   |  |
| Corrosión                | Líquido refrigerante no reúne características adecuadas   | Chequeo de mezcla agua-refrigerante y de características de refrigerante | Cambio de refrigerante  |                            |   |  |
|                          | Formación y acumulación de impurezas en el líquido        | Chequeo de filtros de agua   | Revisar color de líquido refrigerante                                 |                            |   |  |
|                          | Conexiones a masa defectuosas, que provoquen electrólisis |  |   |                            |   |  |

|  | Anomalías y Fallos                          | Posibles Causas   | Comprobaciones Adicionales  | Acciones   | Propuesta de modificación de mantenimiento                                  |
|--|---|---|---|--|---|
| Sistema de lubricación                 | Presión Incorrecta de aceite. Baja presión. | Válvula limitadora de presión permanece abierta               | Comprobación de la presión, instalando un manómetro.<br>Chequeo de suciedades y de muelle |  |   |
|  |   | Bomba genera poco caudal                                      | Comprobación de holguras entre flancos  | Cambio de bomba y válvula limitadora                                 | Si se realiza limpieza de bomba. Chequear límite de desgaste.               |
|  |   | Aceite con grado de viscosidad muy bajo                       |   |  | Realizar análisis de aceite cada 2 cambios de aceite.                       |
|  |   | Aceite diluido por la presencia de agua                       | Ver estado de junta de culata.<br>Chequeo intercambiadores de calor                       |  |   |
|  | Presión Incorrecta de aceite. Alta presión  | Bloqueo del elemento de cierre en posición de cierre          | Comprobación de la presión, instalando un manómetro                                       |  |   |
|  |   | Obstrucción de un canal principal                             | Chequeo de acumulación de depósitos   | Limpieza de conductos principales                                    |   |
|  |   | Intercambiador de calor obstruido                             |   |  | Limpieza. Cada dos cambios de aceite  |
|  | Presión irregular de aceite.                | Obturación parcial de la toma de bomba o desgaste de la misma | Medir presión en ralentí y en altas revoluciones  | Limpieza de filtro metálico de cárter                                |   |
|  |   | Nivel bajo de aceite, filtro sucio, o viscosidad inadecuada   |   | Cambio de aceite y filtro  | Cambio de aceite 2 veces al año si no cumple con las horas de mantenimiento |
|  | Temperatura de aceite elevada               | Nivel bajo de aceite  | Chequeo de nivel en frío. Entre máx. y min  | Completar  |   |
| Filtro de aceite sucio                 |   |   | Cambio de filtro  |  |   |
| Intercambiador de aceite en mal estado |   | Chequeo de acumulación de depósitos                           | Limpieza de intercambiador  |  |   |
| Sistema de admisión                    | Reducción de potencia de motor              | Mala calidad del gas combustible                              |   | Revisión de reactor  |   |
|  |   | Filtro de entrada de gas sucio                                |   | Cambio de filtro   | No limpiar con aire a presión   |
|  |   | Filtro de entrada de aire sucio                               |   | Cambio de filtro   |   |
|  |   | Fallo en el cuerpo de mariposa                                |   | Realizar un calibrado electrónico en el potenciómetro de la mariposa |   |
|  | Caída de presión en colector de admisión    | Filtro de entrada de gas sucio                                | Chequeo de incremento de diferencia depresión entre ambas partes del filtro               | Cambio de filtro   | No limpiar con aire a presión   |
|  |   | Acumulación de depósitos en el colector                       | Chequeo visual de colector  | Limpieza sistema de admisión   |   |

|                      | Anomalías y Fallos                               | Posibles Causas  | Comprobaciones Adicionales  | Acciones   | Propuesta de modificación de mantenimiento   |
|----------------------|--|--|---|--|--|
| Sistema de escape    | Perdida de potencia                              | Falta de estanqueidad antes del catalizador                          | Chequeo de juntas, bridas, corrosión.   | Cambio de junta de escape, reapriete de bridas.      |  |
|                      | Excesivo ruido                                   | Componentes de la instalación de escape con fugas                    | Inspección visual, medición de ruido.   |  |  |
|                      | Fuga de gases de escape por colector de escape   | Junta de escape deteriorada  |   | Cambio de junta de escape, reapriete de bridas.      |  |
| Sistema de encendido | Perdida de potencia. Desequilibrio de cilindros. | Cable de alimentación bujía pelado, con cortocircuito, mal conectado | Inspección visual. Medición de resistencia en ohmios  | Reapriete del circuito, o cambio de cables.          | Si el daño es por pre ignición (bujía aparece como quemada o con puntas de ampollas o venteaduras de aislador y electrodos desgastados y fundidos). Cambiar bujía. |
|                      |  | Bujías en mal estado   | Comprobar si bujías tienen aceite, ceniza, daños de pre ignición o incrustaciones de carbón | Limpieza y calibración de electrodo. Cambio de bujía |  |
|                      | Detonaciones en una cámara de combustión         | Bujía en mal estado  | Comprobar si bujías tienen aceite, ceniza, daños de pre ignición o incrustaciones de carbón |  |  |
|                      | Baja temperatura de combustión en una cámara     | Bujía en mal estado  | Comprobar si bujías tienen aceite, ceniza, daños de pre ignición o incrustaciones de carbón |  |  |