

Electrificación rural en la República del Chad por gasificación de corazones de mazorcas de maíz

Rural electrification in Chad with corn-cob gasification

Oriol Pujoldevall, Marta Romay, Jordi Giral, Àngel Lladó, Víctor Depoorter, Pol Olivella y Antoni Sudrià

El propósito del siguiente artículo es presentar el trabajo que está realizando el centro de innovación tecnológica CITCEA-UPC en el proyecto Pôle Goundi. El objetivo principal del proyecto es la revitalización social y económica de Goundi, una pequeña población al sur de la República del Chad. Para ello se ha decidido instalar una pequeña central de generación eléctrica mediante la gasificación de mazorcas de maíz de 20 kW. El sistema estará gestionado por la población local y con la máxima autonomía en materia prima y reparaciones. En este artículo también se analiza la posibilidad de, en un futuro cercano, incorporar otras tecnologías de generación eléctrica que ayuden al desarrollo de la población chadiana.

The purpose of this paper is to present the work being done by the Technology Research Center CITCEA-UPC within the Pôle Goundi project. The main goal of the project is the social and economic improvement in Goundi, a small village at the south of the Republic of Chad. In order to do so, a small gasification power plant of 20 kW will be installed, which will work on corn-cobs. The whole system will be operated and maintained by the local population with the maximum autonomy in terms of raw material and repairs. This paper also analyzes the possibility that in the near future, other power generation technologies to foster the development of the Chadian population can be included.

Descriptores / Keywords

Electrificación rural, Gasificación, Desarrollo sostenible, Desarrollo social, Energías renovables / Rural electrification, Gasification, Sustainable development, Social development, Renewable energies.

Electrificación rural en la República del Chad por gasificación de corazones de mazorcas de maíz

Rural electrification in Chad with corn-cob gasification

Oriol Pujoldevall: CITCEA-UPC, EUETIB, oriol.pujoldevall@gmail.com

Marta Romay: CITCEA-UPC, ETSEIB, mromay91@gmail.com

Jordi Giral: CITCEA-UPC: jordi.giral.guardia@citcea.upc.edu

Àngel Lladó: CITCEA-UPC, EUETIB, angel.llado.j@gmail.com

Victor Depoorter: CITCEA-UPC, EUETIB victor.depoorter@gmail.com

Pol Olivella: CITCEA-UPC, pol.olivella@citcea.upc.edu

Antoni Sudrià: CITCEA-UPC, ETSEIB, sudria@citcea.upc.edu

Introducción - Proyecto Pôle Goundi

Goundi es una población perteneciente a la República del Chad, situada a 500 km de la capital N'Djamena y con una economía de subsistencia. Su principal actividad es la agricultura, basada en el cultivo del maíz, el algodón, el cacahuete y el mijo. Este país, se halla en África subsahariana, limitando al sur con la República Centroafricana y al oeste con Camerún. El Chad es uno de los países más pobre del mundo, con el 55% de la población por debajo del umbral de la pobreza nacional, y el cuarto con un índice de desarrollo humano menor (Informe ONU 2013). Estos niveles de pobreza, combinados con el elevado porcentaje de población que habita en zonas rurales y el bajo consumo de energía *per cápita*, han hecho que la mayoría de la población no tenga acceso a formas modernas de energía. En la Figura 1 se puede mostrar la localización de la República del Chad y de la población de Goundi.



Figura 1. República del Chad – Localización de N'Djamena y Goundi.

La infraestructura eléctrica se limita a tres pequeñas redes no interconectadas que abastecen las principales ciudades del país. Sólo el 2,2% de los hogares chadianos tienen electricidad. Además, el precio de la electricidad es de los más elevados del mundo, en 2005 el precio del kWh (baja tensión) era de 125 francos CFA. Un sector energético tan subdesarrollado supone un enorme obstáculo para el desarrollo económico del país.

En Goundi se encuentra uno de los hospitales de referencia del centro de África, ya que dispone de más de 200 camas. La motivación inicial del proyecto Pôle Goundi fue el suministro eléctrico para el hospital, de una forma económica y técnicamente viable. Hasta el momento el hospital funciona con generadores diésel pero en la región es complicado obtener combustible y año tras año se va encareciendo su coste.

Por eso, el centro de innovación tecnológica CITCEA-UPC ha puesto todos sus conocimientos técnicos al servicio de la ONG Misión y Desarrollo para Goundi y, con el soporte del Centro de Cooperación y Desarrollo de la UPC (CCD-UPC), se ha emprendido el proyecto Pôle Goundi. Este proyecto tiene como objetivo dotar a la población de Goundi de infraestructuras que incentiven su actividad tecnológica, económica y social. Entre las infraestructuras del proyecto se encuentra la construcción de una instalación de producción eléctrica que combine diferentes energías renovables y la implantación de una red de distribución que lleve dicha electricidad a los consumidores.

El objetivo del proyecto Pôle es construir la planta de producción eléctrica por etapas hasta alcanzar los 200 kVA de potencia instalada en un plazo máximo de diez años. Esto va a permitir ir ampliando la potencia en función del financiamiento del proyecto, de los resultados obtenidos por las distintas tecnologías y de la aceptación de la población. Durante la primera etapa la potencia instalada va a ser de 25 kVA.

La fase inicial del proyecto ha consistido en un estudio de alternativas para determinar la vía óptima de generación eléctrica. Finalmente se ha optado por la gasificación de biomasa residual, concretamente corazones de mazorcas de maíz, mientras que energías como la eólica y la solar han sido descartadas por las extremas condiciones del terreno (nula orografía, perfiles de viento irregulares) y otras por no encajar adecuadamente con los objetivos principales del proyecto. Estos objetivos persiguen estimular la participación de la población local, contribuyendo al desarrollo económico y social de la zona. Por un lado, la venta de los desechos agrícolas para generar electricidad incentivaría la producción agrícola de la región, actualmente de subsistencia, aumentando la disponibilidad de comida para la población. Por otro lado, el cultivo de biomasa y los procesos de acondicionamiento de la materia prima y de operación de la planta generarían puestos de trabajo que reducirían la tasa de desempleo. Además, se priorizará a dos de los colectivos más desfavorecidos en Goundi:

las mujeres y las personas discapacitadas. En este sentido, la *Association des Handicapés Physiques à Goundi* colaborará en la inversión económica, la selección de personal y en su formación.

2. La gasificación

El gasificador para obtener electricidad es el primer proyecto dentro del Pôle Goundi. Previamente se han realizado los trabajos de acondicionamiento y delimitación del terreno. Seguidamente se exponen las características de la gasificación y los gasificadores así como las decisiones que se han tomado en el proyecto.

2.1 Principios de la gasificación

La gasificación es un proceso termoquímico que permite transformar un combustible sólido carbonoso en una mezcla de gases, conocidas como gas de síntesis o syngas, que puede ser usada en una caldera, una turbina o un motor de combustión tras ser debidamente acondicionados. El gas de síntesis obtenido en el proceso está compuesto de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), hidrógeno (H₂), metano (CH₄), agua (H₂O), nitrógeno (N₂) ya que el agente oxidante utilizado es aire, y trazas de hidrocarburos pesados. La composición exacta y el poder calorífico del gas dependen de las condiciones en las que se realiza el proceso de gasificación, del tipo de biomasa y agente oxidante utilizados y del tipo de gasificador.

Conceptualmente se podría decir que, independientemente del tipo de gasificador empleado, el proceso de gasificación se desarrolla en cuatro etapas diferenciadas: el secado, la pirólisis, la oxidación y la reducción. Esta separación de zonas del gasificador permite explicar más fácilmente su funcionamiento, pero hay que tener en cuenta que éste no es un enfoque del todo preciso, ya que las reacciones ocurren simultáneamente en las diferentes partes del gasificador.

Típicamente, el contenido en agua de la biomasa fresca (ya sean residuos de origen forestal, cultivos energéticos...) está entre el 30 y el 60%, llegando al 90% en determinadas ocasiones. Cada kilogramo de agua presente en la biomasa representa una pérdida de energía de 2260 kJ, necesaria para evaporar el agua, energía que no puede ser recuperada. La mayoría de gasificadores garantizan el funcionamiento con biomasa de humedades inferiores al 30%, aunque se recomiendan valores más bajos, y normalmente la biomasa utilizada en procesos de gasificación suele tener un contenido en agua entre el 10 y el 20% (Basu 2010). Por este motivo, es muy importante realizar tareas de presecado que eliminen la humedad superficial de la materia prima. Para ello se requiere alcanzar temperaturas superiores a 100°C para evaporar el exceso de agua (Basu 2010). Para el caso que nos atañe, los

corazones de las mazorcas de maíz serán expuestos al sol varias semanas previo paso a ser utilizados. Adicionalmente, una vez iniciado el proceso de gasificación, la biomasa experimenta un intercambio de calor en donde absorbe parte del calor de los gases de escape del motor. Con todo ello se obtiene una humedad adecuada para el uso de la biomasa.

La siguiente etapa en la cadena de procesos que intervienen en la gasificación es la pirólisis. Se trata de un proceso endotérmico (absorbe calor) en el que las largas cadenas de moléculas que forman la biomasa se rompen en otras más cortas. Esto sucede por aporte térmico, sin que se añada ningún agente externo. A partir de esta reacción la biomasa se convierte en un residuo sólido consistente en carbón vegetal (*charcoal* en inglés) formado esencialmente por carbono (C), en alquitranes (en estado gaseoso y líquido (*tars* en inglés), y en los principales gases combustibles (CO).

Seguidamente se produce la reacción de oxidación. En ella, el agente gasificante origina el conjunto de reacciones exotérmicas que generarán el calor necesario para mantener el proceso de gasificación:

- Combustión parcial:
- Combustión total: (2)

A continuación tiene lugar el proceso de reducción, en el que el carbón vegetal producido en la pirólisis se convierte en gas de síntesis. En función del agente gasificante, existen distintas reacciones que permiten gasificar el carbón vegetal. Mayoritariamente estas reacciones son endotérmicas, aunque existen algunas exotérmicas. A continuación se resumen las principales:

- Reacción de Boudouard: (3)
- Reacción de agua-gas: (4)
- Reacción de Hidrogasificación:
- Oxidación parcial (6)

La velocidad de reacción depende básicamente de la reactividad del carbón y del potencial reactivo del agente gasificante. El oxígeno, por ejemplo, es el más activo, seguido por el vapor y por el dióxido de carbono. Por este motivo, la reacción más rápida de las presentadas es la oxidación parcial, que consume muy rápidamente el oxígeno privando a las otras reacciones de él. La reacción de hidrogasificación es mucho más lenta que las otras, motivo por el cual la presencia de metano en el gas de síntesis es minoritaria.

2.2 Elementos principales de la gasificación

Después de analizar los principios de la gasificación se detallan los distintos elementos que participan en el proceso.

2.2.1 Biomasa

Los procesos térmicos de gasificación, a diferencia de los biológicos, pueden procesar prácticamente cualquier tipo de combustible de biomasa. Las únicas limitaciones corresponden a su densidad y a su tamaño. Para densidades inferiores a los 200-250 kg/m³, la biomasa puede provocar problemas en conductos verticales y en gasificadores de lecho fluidizado. En cuanto al tamaño de la biomasa, es necesario que sea homogéneo y que se ajuste a las dimensiones del reactor. Un tamaño de partícula pequeño permite aumentar la calidad del gas y el tiempo de residencia para el craqueo térmico de los alquitranes, pero si es excesivamente pequeño puede provocar que la biomasa se atasque en los conductos o que sea arrastrada junto a las cenizas al exterior del reactor antes de tiempo.

La biomasa presenta una estructura compleja compuesta fundamentalmente de celulosa, hemicelulosa y lignina. Estos polímeros componen la estructura de la biomasa y su concentración varía según la especie, el tipo de tejido vegetal, el estado de crecimiento y las condiciones de crecimiento. Además de estos componentes mayoritarios, la biomasa contiene otros componentes minoritarios como las cenizas, es decir, la fracción inorgánica del material compuesta principalmente por calcio, potasio, sodio, magnesio y sílice. Para una descripción química de la biomasa existen los análisis inmediatos y elementales. El análisis inmediato mide los contenidos de humedad, volátiles, cenizas y carbono fijo, expresados en porcentajes en peso. El análisis elemental permite establecer la composición del combustible (en porcentajes en peso) de carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N), oxígeno (O) y azufre (S). Estos elementos definen el potencial calorífico del biocombustible. Adicionalmente, para predecir el riesgo que ciertos elementos pueden suponer en los procesos termoquímicos, se realizan análisis de la composición elemental de las cenizas.

2.2.2 Agente gasificante

Como se ha visto, para realizar la etapa de combustión u oxidación es necesario un agente oxidante. Actualmente se usan cuatro tipos de agentes: el aire, el oxígeno, el vapor de agua y el hidrógeno. El uso de uno u otro influirá en la composición y en el poder calorífico del gas de síntesis obtenido. El aire es el agente gasificante más práctico por ser gratuito y su infinita disponibilidad, pero presenta el inconveniente de contener un 79% de nitrógeno. Esto hace que el syngas obtenido contenga un 50% de nitrógeno, limitando el poder calorífico del gas a valores aproximados de 5,5 kJ/Nm³. Este gas de síntesis es adecuado para el uso en motores de combustión interna convencionales, pero no para la síntesis de metanol. El uso de oxígeno como agente gasificante mejora sustancialmente el rendimiento global de la gasificación y produce un gas de síntesis con un poder calorífico hasta tres veces mayor. El problema es que la obtención de oxígeno puro implica un aumento significativo del coste

y de la complejidad del sistema. Además en procesos de gasificación con oxígeno puro se alcanzan a menudo temperaturas muy elevadas, en las que proceso entra en modo de escorificación (fusión de las cenizas). Para contrarrestar esto, se usa a veces un moderador que limite las temperaturas de gasificación. El vapor de agua presenta dos ventajas importantes como agente gasificante: no introduce nitrógeno en el gas de síntesis y contiene dos átomos de hidrógeno por cada átomo de oxígeno. De esta forma, el oxígeno permite oxidar el carbono y el excedente de átomos de hidrógeno permite aumentar el contenido de H₂ en el gas de síntesis, aumentando también su poder calorífico.

Finalmente, en determinados procesos también se usa hidrógeno como agente gasificante. De esta forma se obtiene un gas de síntesis con un elevado poder calorífico, comparable al del gas natural. Aun así, suele ser más interesante el uso directo de hidrógeno, por lo que únicamente se usa como agente gasificante cuando se trata de un excedente de baja pureza, no apto para otras aplicaciones como las pilas de combustible.

2.2.3 Catalizadores

Dependiendo de la tecnología y de las condiciones de gasificación, es posible usar catalizadores que induzcan ciertas reacciones, priorizando la formación de determinados compuestos. Para temperaturas de gasificación menores de 550°C, los catalizadores de reformado de níquel o cobalto facilitan el craqueo de fracciones pesadas, reduciendo así la formación de alquitranes. Estos catalizadores también facilitan la formación de CO y H₂ para temperaturas de trabajo comprendidas entre 700 y 800°C. Por otro lado, los catalizadores de zeolita y dolomía permiten trabajar a menor temperatura en la zona de reducción llevando la temperatura de craqueo de 1100°C a 800-900°C.

2.3 Termodinámica de la gasificación

Si la velocidad de reacción y el tiempo de residencia fueran suficientemente largos, se podría asumir que las reacciones llegan a su equilibrio termodinámico. A la temperatura de gasificación (700°C - 1000°C), las únicas combinaciones estables que se pueden producir a partir de los principales elementos de la biomasa (carbono, hidrógeno y oxígeno) son C, CO, CO₂, CH₄, H₂ y H₂O. La concentración relativa de cada especie puede calcularse a partir de la presión, de la composición de la biomasa y del aire introducido en el proceso y de la constante de equilibrio determinada a partir de las propiedades termodinámicas y de la temperatura.

Por esto, se suele presentar la composición del gas de síntesis en función de la cantidad de oxígeno añadido al proceso. Para expresar esta cantidad de oxígeno se usa el factor de equivalencia, definido como la relación entre el

oxígeno utilizado y el oxígeno necesario para una combustión completa:

Un factor de equivalencia comprendido entre $0 \leq \leq 0,1$ corresponde a un proceso de pirólisis; si se encuentra entre $0,2 \leq \leq 0,4$ corresponde a la gasificación; y si ≥ 1 indica una combustión completa. Además, el factor de equivalencia determina también la temperatura de reacción adiabática, que es la temperatura que se alcanzaría si se llegara al equilibrio para la cantidad de aire u oxígeno especificados.

2.4 Composición del gas

En gasificadores reales, la composición del gas suele diferir de la que indicaría el equilibrio termodinámico. Los únicos gasificadores para los que la aproximación en el equilibrio se ajusta bastante bien a la realidad son los de lecho fijo de tiro invertido.

La composición real del gas suele depender de factores como la distribución de temperaturas en el combustible, su tiempo de residencia promedio y la distribución de tiempos de residencia. Estos factores son a su vez dependientes del modo de inyección del agente oxidante, de las dimensiones del reactor y de las pérdidas de calor en el entorno. La composición del gas húmedo es la propiedad más importante, pero se suele utilizar la composición en base seca por la dificultad que supone medir con exactitud la humedad. El poder calorífico se calcula a partir de la composición del gas.

3. Gasificador GEK 20 kW

Para las necesidades del proyecto, desde un primer momento se pensó en una solución de baja potencia. Analizando los diferentes modelos comerciales disponibles, se determinó que la mejor opción para el proyecto Pôle era el gasificador de lecho fijo tipo *downdraft* GEK, de 20 kW, diseñado por la empresa norteamericana All Power Labs. Gracias a la ayuda aportada por el Ayuntamiento de Barcelona, la ONG Misión y Desarrollo para Goundi pudo adquirir una unidad. Actualmente el centro de innovación tecnológica CITCEA-UPC está sometiendo el gasificador a diferentes pruebas de funcionamiento con el fin de prepararlo para su futura estancia en la población chadiana. El gasificador está instalado en un terreno cedido por el Ayuntamiento de Cabrils (Figura 3), provincia de Barcelona, que también colabora en el proyecto. Aquí se están realizando las pruebas, el objetivo de las cuales es verificar el cumplimiento de las expectativas que se tienen en el dispositivo, y elaborar un programa docente para formar a los futuros técnicos chadianos en lo que refiere a operación y mantenimiento del gasificador.



Figura 3. Gasificador GEK en Cabrils

3.1 Descripción del sistema Power Pallet de 20 kW

El sistema está compuesto de un gasificador, un motor de explosión de encendido por chispa, un generador eléctrico y una PCU (*Process Control Unit*), que permite controlar el proceso y monitorizar algunos de sus parámetros de operación. Además se prevé construir una pequeña red de distribución que lleve la electricidad a los consumidores.

3.2 Sistema de gasificación

Se hace una descripción global del funcionamiento del proceso siguiendo el esquema de la Figura 4. En primer lugar, para el proceso de gasificación, se debe introducir la biomasa en la tolva. A continuación, se elimina la humedad en la zona de secado, que se encuentra en la parte inferior de la tolva. La biomasa seca es entonces transportada mediante un tornillo sinfín al gasificador, donde tienen lugar los procesos de pirólisis, oxidación y reducción. Una vez gasificada la biomasa, las partículas sólidas se eliminan en un ciclón. Finalmente, el gas puede seguir dos caminos: en la etapa de puesta en marcha se conduce directamente a la antorcha para ser quemado hasta que el sistema alcance las temperaturas de operación adecuadas, y en régimen de operación normal es dirigido a un filtro, para después entrar en el motor de explosión.

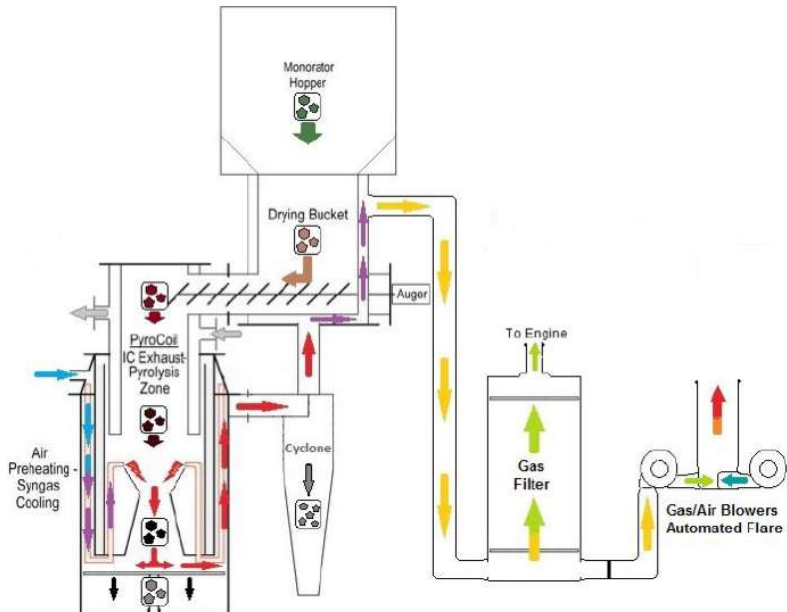


Figura 4. Diagrama del proceso de gasificación de GEK

3.3 Motor de explosión

Una vez obtenido el gas de síntesis propiamente acondicionado, ya puede ser introducido en el motor de explosión. El motor de explosión instalado en el Power Pallet de 20 kW es un Vortec 3.0L 4cyl de gasolina adaptado al uso de gas. Consta de un Servo Control que actúa como carburador para mezclar el gas y el aire en las proporciones adecuadas. La relación de aire y combustible se ajusta a través de un control PID de la PCU, utilizando la señal de un sensor de oxígeno situado en el flujo de gases de escape del motor que permite saber si la mezcla es rica o pobre.

Por otro lado, un regulador Woodward Governor L-Series permite controlar la velocidad de giro del motor de explosión. La configuración del regulador puede ser modificada con el programa L-Series Configuration Tool. De esta forma es posible ajustar los parámetros y la dinámica del control de velocidad. (ALL Power Labs 2012)

3.4 Generador eléctrico

Para transformar la energía mecánica rotacional aportada por el motor de explosión en energía eléctrica, el sistema consta de un generador eléctrico con AVR (*Automatic Voltage Regulation*), síncrono de 4 polos con excitatriz giratoria, rotor bobinado y sin escobillas. Éste es un NPE 32-F/4 CL.F de Mecc-Alte. Funcionando a 50 Hz, genera una potencia aparente de 25 kVA y tiene un rendimiento del 83,9%.

El controlador electrónico que permite regular la tensión es un SR7/2, producido también por Mecc-Alte. En primer lugar, este controlador consta de un bloque funcional que permite regular la tensión a los bornes del generador, comparando la tensión de salida con la de referencia, y generar la señal de control para el PWM (*Pulse Width Modulator*). Éste gobierna el rectificador de tiristores que genera la tensión continua de la excitación. En segundo lugar, el controlador electrónico consta de un bloque de protección contra sobreexcitaciones provocadas por bajadas de frecuencia o por sobrecargas.

3.5 Red eléctrica de distribución

Se prevé construir una pequeña red de distribución eléctrica, que consistirá en una única línea aérea que llevará la electricidad a la población. Está previsto que esta línea principal sea en el futuro el eje vertebrador de la red de distribución. La línea trifásica tendrá una longitud de 2km y, por simplicidad, los conductores estarán dispuestos horizontalmente con una separación de 1m entre ellos. Con tal de reducir las pérdidas en el transporte de la energía, se considera necesario elevar la tensión de la línea a media tensión (MT). Por el momento, se ha optado por un transformador trifásico seco TRIHAL de

100 kVA fabricado por Schneider Electric. Este transformador, con conexión del tipo Dyn11, tiene una tensión nominal del arrollamiento primario de 21 kV y una tensión nominal del secundario de 420 V. Van a ser necesarios dos transformadores, uno para cada extremo de la línea.

En cuanto a la línea de transmisión, se ha escogido el cable LA-56 fabricado por Prysmian (Prysmian Group 2013), con código 47-AL1/8-ST1A. Este es un conductor unipolar desnudo de aluminio con alma de acero pensado para líneas aéreas (1 hilo de acero y 6 de aluminio que lo envuelven). Si el proyecto Pôle funciona favorablemente en Goundi, se añadirá otro transformador en paralelo para lograr la potencia prevista en el horizonte de 10 años.

3.6 Carga eléctrica

El objetivo del proyecto es que con el paso del tiempo los pequeños comercios y los hogares de Goundi se conecten a la red de distribución a cambio de un peaje de acceso y de una retribución en concepto de consumo eléctrico. Esto va a ser inevitablemente un proceso lento, para el que va a ser necesario demostrar a la población la viabilidad y las ventajas del proyecto. Por el momento, el primer consumidor interesado en la electricidad producida en el Pôle es la compañía de aguas de Goundi, que actualmente dispone de dos grupos electrógenos de 5 kW para alimentar a una bomba de 7,5 kW. Dado que todavía se desconocen las características técnicas de dicha bomba, se ha supuesto que se trata de una bomba centrífuga accionada por un motor de inducción.

4. Modelado del sistema

Con el objetivo de demostrar su viabilidad y facilitar el diseño de futuros equipos que amplíen su potencia, se ha desarrollado un modelo del sistema por ordenador. Dicho modelo permite hacer un análisis de sus parámetros de operación y de sus eficiencias, de forma que sea posible optimizar su funcionamiento. Para obtener el modelo completo de la instalación, se ha dividido el sistema en diferentes secciones. La Figura 5 muestra la estructura del modelo de la instalación.

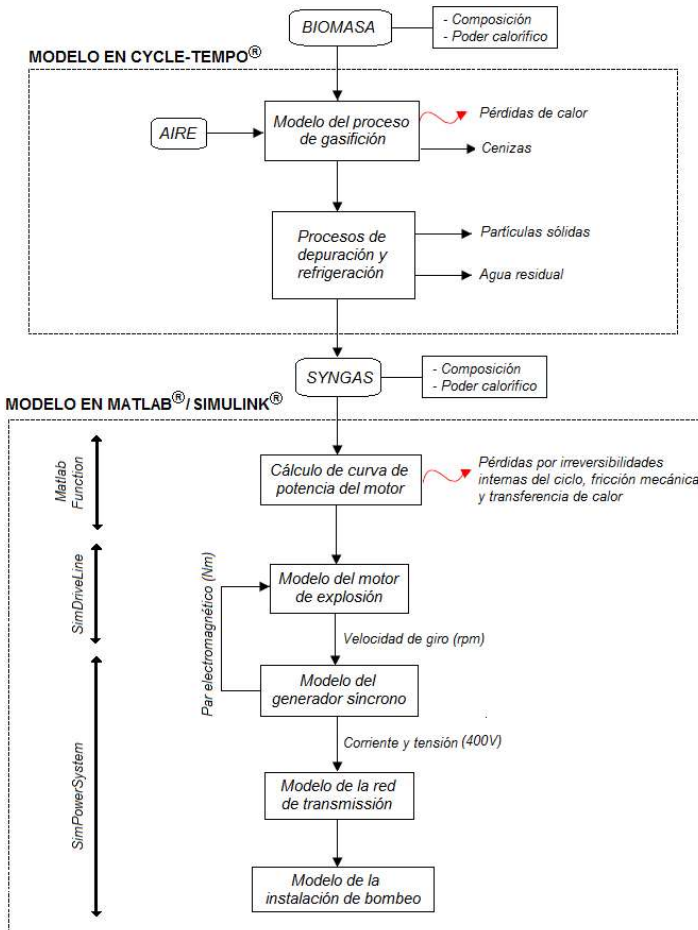


Figura 5. Esquema general del modelo

4.1 Modelo del proceso de gasificación:

Se ha utilizado el programa Cycle-Tempo® para simular las etapas de gasificación, enfriamiento y limpieza del gas de síntesis.

El sistema de ecuaciones resultante es obtenido a través de los balances de masa, energía y especies químicas para todos los componentes y las tuberías del sistema. El modelo de la gasificación está basado en el equilibrio termodinámico, es decir, obtiene la composición de los gases a partir de la minimización de la energía libre de Gibbs, tomando en cuenta las especies químicas presentes y las temperaturas y presiones de reacción. Este tipo de modelos son más convenientes en el estudio de sistemas, ya que son independientes del diseño del proceso. Los modelos basados en el equilibrio termodinámico son válidos para la gasificación de carbón, en la que se llega al equilibrio (Toonssen, et al. 2008), pero en procesos de gasificación de biomasa, el aporte de hidrógeno, monóxido de carbono y agua suelen estar sobreestimados, mientras que la cantidad de metano suele estar subestimada. Por esta razón se suele recurrir a modelos de "casi-equilibrio" a través de métodos de corrección.

En este proyecto, el gasificador se ha modelado a través de tres reactores, correspondientes a cada etapa del proceso de gasificación: la pirólisis, la oxidación y la reducción. De esta forma, ha sido posible ajustar las temperaturas de reacción y el factor de equivalencia para cada etapa del proceso. La etapa de secado se ha simulado a través de un intercambiador de calor y un separador que elimina el agua contenida en la biomasa. El modelo también incluye el ciclón y el filtro que permiten limpiar el gas tras el proceso de gasificación.

Para validar el modelo del proceso de gasificación se ha introducido la composición de la biomasa en las simulaciones de *Cycle-Tempo*® y comparado los resultados obtenidos con los valores típicos del gas de síntesis producido en gasificadores *downdraft* (Reed and Das 1988).

4.2 Modelo del motor de explosión

Para simular el comportamiento del motor de explosión, se ha calculado primero la curva de potencia del mismo a través de un método analítico. Luego, en base a esta curva de potencia, se ha desarrollado un modelo en Matlab® / Simulink® que permite simular el comportamiento dinámico del motor. Siendo un motor de explosión de encendido por chispa, su comportamiento debe ser modelado a través de un ciclo de Otto.

Para calcular la potencia entregada por un motor hay que tener en cuenta que el ciclo termodinámico desarrollado no es ideal y que existen pérdidas. Por eso, el modelo analítico utilizado incorpora las principales fuentes de

irreversibilidad involucradas en el proceso: las irreversibilidades internas, las pérdidas por fricción y las pérdidas por transferencia de calor a través de las paredes del cilindro.

- Irreversibilidades internas: Son las pérdidas internas del ciclo relacionadas con los rendimientos de compresión y expansión isoentrópicas. Además, se ha implementado en las relaciones isoentrópicas una aproximación lineal del coeficiente de dilatación adiabática que pone de manifiesto su dependencia de la temperatura del fluido de trabajo. (Ebrahimi, et al. 2010)

- Pérdidas por fricción: Engloban básicamente las pérdidas por bombeo, relativas al trabajo que debe efectuar el pistón para aspirar y expulsar los gases durante la admisión y el escape; las pérdidas por frotamiento mecánico de los componentes del sistema; y las pérdidas de los accesorios, que equivalen al trabajo requerido por los elementos accesorios del motor tales que bombas, ventiladores, etc.

- Pérdidas por transferencia de calor: Se considera que la transferencia térmica es significativa únicamente en el proceso de expansión, ya que la diferencia de temperaturas entre la pared y el fluido en los demás procesos es mucho menor. Además, se puede hacer una simplificación considerando la temperatura de la pared constante. Con estas simplificaciones, se obtiene un promedio del calor perdido. El trabajo perdido asociado a la transferencia térmica puede calcularse a partir de un factor fenomenológico introducido por Mozurkewich y Berry, cuyo valor suele ser fijado a 0,1 en la literatura especializada. (Mozurkewich y Berry, et al. 1982) (Curto-Risso, et al. 2008)

La potencia mecánica útil entregada al eje del motor viene dada por la potencia desarrollada por el ciclo tomando en cuenta las irreversibilidades internas, menos la potencia perdida por transferencia de calor a través de las paredes del cilindro y la potencia perdida por fricción.

Para generar la curva de potencia, se ha implementado el método de cálculo en una función de Matlab® que ha calculado la potencia entregada al eje para varias velocidades de giro comprendidas dentro del rango de operación del motor. De esta forma, obtenidos los vectores de velocidad y de potencia mecánica se ha realizado una interpolación polinómica para obtener la función que describe la curva de potencia del motor.

Para validar el cálculo de la curva de potencia se ha comparado con la curva real suministrada por el fabricante. Como el motor no se comercializa para operar directamente con gas de síntesis (necesaria una adaptación), dicha comparación se ha realizado tomando la gasolina como combustible. Así pues, se han introducido en el modelo las características del motor Vortec 3,0L 4cyl y los parámetros de operación con gasolina. Con estas condiciones, se observa (Figura 6) que la curva de potencia generada por Matlab® se aproxima bastante bien a la dada en las especificaciones técnicas del motor, aunque sería

conveniente revalidar el método de cálculo con gas de síntesis a partir de las pruebas experimentales realizadas sobre el sistema físico.

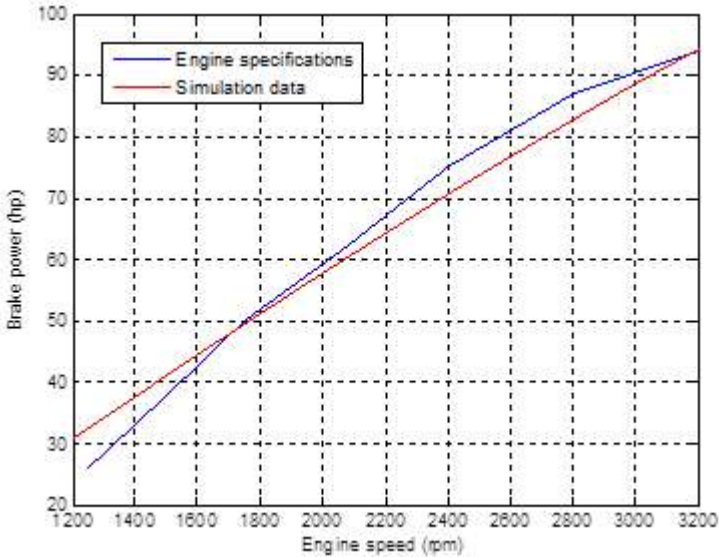


Figura 6. Validación del modelo del motor de explosión

Una vez obtenida la curva de potencia del motor con gas de síntesis como combustible, es necesario simular su dinámica. Para ello se ha utilizado el software Simulink®, que es una aplicación de Matlab® que permite construir y simular modelos de sistemas físicos mediante diagramas de bloques.

El sistema que simula el comportamiento dinámico del motor de explosión, como muestra la Figura 7, está formado por dos sub-sistemas: el motor de explosión (Engine) y el regulador de velocidad que lo gobierna (Speed governor).

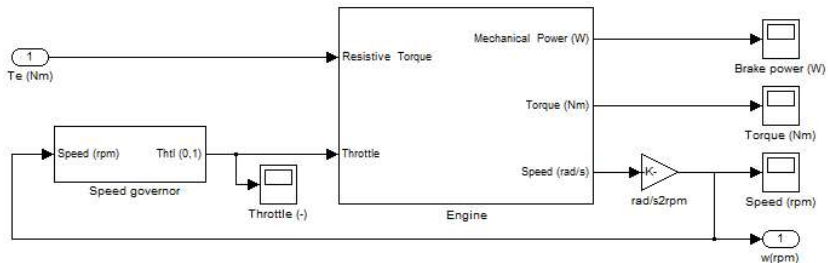


Figura 7. Modelo del motor de explosión y del regulador de velocidad.

El modelo del motor de explosión consta de dos señales de entrada: el par resistivo aplicado al eje del motor y la señal *Throttle* (nivel de apertura de la válvula de mariposa del motor) que permite modular la potencia entregada por el motor. Por otro lado, el modelo se estructura en tres partes: la primera permite calcular el par mecánico entregado por el motor; la segunda simula el comportamiento dinámico del conjunto motorgenerador; y la tercera simula el retardo existente entre el momento en que hay una variación en la señal *Th* y el momento en el que el motor reacciona a dicha variación.

El modelo del regulador de velocidad mantiene la frecuencia nominal comparando la velocidad del motor a la de referencia y regulando el valor de la señal *Throttle*. Variaciones de la frecuencia alejadas del valor nominal podrían provocar el mal funcionamiento de algunos equipos conectados. Por esto, para mantener la frecuencia nominal es necesario que el generador síncrono gire a la velocidad de sincronismo (1500 rpm). La velocidad de giro del motor está ligada al balance de potencia activa en el sistema. Una variación de la potencia activa demandada provocará una variación del par electromagnético en el generador síncrono, que a su vez provocará una variación en la velocidad de giro del conjunto motor-generador.

Finalmente, se ha simulado la conexión mecánica entre el motor de explosión y el generador con la estructura de bloques de la Figura 8. Al estar el generador síncrono acoplado directamente al eje del motor de explosión (sin caja de desmultiplicación), ambas máquinas tienen la misma velocidad de giro. Por otro lado, ignorando la fricción en el generador síncrono, el par electromagnético del generador corresponde al par resistente al que debe hacer frente el motor de explosión. Los factores utilizados permiten convertir las unidades para que correspondan a las solicitadas por cada máquina. Finalmente, al ignorar la inercia del generador síncrono, esta ha sido añadida a la del motor de explosión.

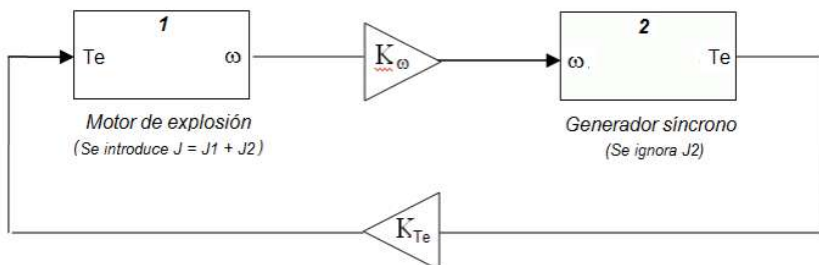


Figura 8. Modelo de la conexión entre el motor de explosión y el generador síncrono

4.3 Modelo del sistema eléctrico

El modelo del sistema eléctrico completo incluye el generador síncrono, el transformador, la línea eléctrica y la bomba de agua conectada al final de la línea.

Para simular el generador síncrono se ha utilizado el bloque *Synchronous Machine pu Standard* de la librería *SimPowerSystems®* (MathWorks 2013), con dos entradas y una salida. La primera entrada es la velocidad de giro del motor y la segunda es la tensión de excitación, que proviene de otro bloque de *SimPowerSystems®* que simula el regulador de tensión de la máquina. El bloque del simulador también dispone de una salida consistente en un vector de señales, al que se tiene acceso a través de un bloque *Bus Selector*. De este vector de señales se ha extraído el par electromagnético aplicado al eje del motor de explosión.

Para simular el transformador se ha utilizado el bloque *Three-Phase Transformer-Two Windings*, que permite escoger el tipo de conexión del transformador y especificar la potencia nominal, la frecuencia nominal y los parámetros del circuito equivalente del transformador.

Al tratarse de una línea de media tensión muy corta, se pueden despreciar los valores de la capacitancia y de la conductancia en paralelo. Así pues, la línea trifásica se ha modelado mediante una carga RL en serie.

Por último, la carga eléctrica conectada a la red es una bomba centrífuga accionada por un motor de inducción de 7,5 kW, que ha sido simulado con el bloque *Asynchronous Machine SI Units*. Este bloque tiene una sola entrada que puede ser la velocidad de giro o el par resistente. El signo de esta entrada determina el régimen de funcionamiento de la máquina. Así pues, se ha introducido el par resistente como señal de entrada, con valor positivo para que el régimen sea motor.

4.4 Análisis dinámico del sistema

Con el fin de analizar el comportamiento dinámico del sistema más próximo a las posibles situaciones de la realidad, se han realizado simulaciones con las siguientes perturbaciones: un arranque directo de la bomba, un arranque estrella-triángulo de la bomba y finalmente, se ha analizado la respuesta del sistema ante una reducción momentánea del poder calorífico del gas de síntesis producido en el gasificador.

5. Otros trabajos realizados

A raíz de la realización del proyecto de Pôle Goundi, se están estudiando otras formas de generación eléctrica que, a corto o medio plazo, puedan complementar a la gasificación. Las alternativas que se están analizando hasta el momento son la generación termoeléctrica y el bombeo de agua con paneles fotovoltaicos. Los futuros trabajos que se iniciarán seguidamente son la posibilidad de interconectar diferentes fuentes de generación con una microred para obtener el máximo provecho de las energías en función de la demanda de energía. Además se ha abierto una campaña de donaciones para poder construir un segundo gasificador opensource con los materiales más sencillos y propios del Chad para que la población de Goundi pueda construirse sus propios gasificadores.

5.1. Alternativas analizadas

La generación termoeléctrica se pretende realizar utilizando paneles Fresnel. Esta tecnología utiliza reflectores planos con un sistema de seguimiento en un eje para concentrar la radiación solar en tubos situados 8 metros por encima de los espejos. Por estos tubos circula un fluido (aceites térmicos o incluso vapor saturado), calentándose hasta alcanzar temperaturas cercanas a los 300°C. Este tipo de sistema destaca por su bajo coste (los reflectores se construyen con espejos de vidrio comunes) y por la sencillez de su construcción, ya que el terreno requerido no tiene que ser estrictamente llano. Además, otra de sus ventajas es que debido al pequeño tamaño de los espejos y a que se instalan a baja altura (aproximadamente a 1 metro del suelo) son menos sensibles al viento y facilitan las operaciones de mantenimiento y limpieza.

Un factor importante a tener en cuenta es el consumo de agua de la instalación, ya que en la región chadiana donde trabajaría la central hay escasez del recurso. Este tipo de tecnología permite trabajar con un condensador aéreo, minimizando el consumo de agua.

La utilización de esta tecnología permite adoptar un sistema de generación directa de vapor, eliminando la necesidad de un intercambiador de calor, ya que el vapor puede dirigirse directamente a la turbina para producir electricidad.

La implantación de esta tecnología queda relegada a una segunda fase del proyecto debido a que no involucra a la población local en los procesos de la central de operación de la central. Pero se trata de una muy prometedora forma de obtención de energía eléctrica porque en la región africana el recurso solar es muy abundante.

La otra alternativa bajo estudio es el bombeo de agua mediante paneles fotovoltaicos. Actualmente la población de Goundi se ve obligada a utilizar un

motor de combustión para bombear agua de un acuífero subterráneo. Poseen dos bombas de 5 kW cada una, pero nunca funcionan simultáneamente. El combustible utilizado para ello (gasóleo) es caro y escaso. La instalación de paneles fotovoltaicos eliminaría la necesidad de combustible y como consiguiente, reduciría los gastos del proceso de bombeo. Lo que hace particularmente interesante esta opción es la posibilidad (actualmente bajo estudio) de conectar directamente el conjunto de paneles fotovoltaicos al motor de corriente alterna existente. Se necesitará por consiguiente un dispositivo de adaptación de la señal eléctrica. El convertidor DC/AC en cuestión también deberá adecuarse a las condiciones de trabajo en lo referente a tensiones de entrada y de salida. La solución a este problema viene dada por un convertidor o variador de frecuencia que actúe como intermediario entre la instalación solar fotovoltaica y el grupo motor-bomba. De este modo el sistema se podrá adecuar a las características de generación obtenidas por captación solar, variando la frecuencia de trabajo del motor y regulando el caudal que se bombea a cada momento. Otras ideas que surgieron durante el estudio permiten la inclusión de un sistema de almacenaje de energía para almacenar parte de la generada por el conjunto de paneles, a fin de utilizarla solo cuando fuese necesario. De la misma forma, también se contempló el uso del excedente de energía para alimentar cargas eléctricas de baja potencia como por ejemplo sistemas de iluminación. Aun así, son diversas las razones para prescindir de un sistema de almacenamiento basado en baterías, que son dispositivos caros que requieren de un mantenimiento continuo y costoso. Existen casos anteriores de baterías instaladas en poblaciones chadianas que en un periodo alarmantemente corto se han degradado hasta el punto de quedar inutilizables. Esto se debe principalmente a las altas temperaturas de trabajo y a los bajísimos niveles de humedad.

El propósito final del proyecto incluye la construcción de un depósito a nivel del suelo en el que almacenar el agua bombeada y al que toda la población tendrá acceso. El proyecto también contempla la inclusión de una bomba adicional alimentada por los otros sistemas de generación que estarán presentes en la población, la gasificación y la generación termosolar.

5.2 La microred del Pôle Goundi

Con el objetivo de interconectar los diferentes puntos de consumo y generación se está empezando a estudiar la viabilidad de instalar una microred en el Pôle Goundi. Los objetivos de la microred son varios según la perspectiva con que se estudie.

Des del punto de vista técnico, la conexión de diferentes fuentes de generación no es sencilla y la operación de las distintas fuentes debe estar automatizada para que en todo momento exista equilibrio entre la producción y el consumo. Las dudas que presenta la microred son las baterías que deberían soportar temperaturas ambiente de 50 °C.

Des del punto de vista económico, se debe maximizar la energía que provenga del sol y minimizar la energía que provenga de las mazorcas o de los generadores diésel de manera que se reduzcan los costes.

Finalmente des del punto de vista del usuario de la microred, se debe disponer de cierta seguridad de servicio y además poder reaccionar frente a imprevistos como es la sala de operaciones del hospital.

En este curso académico se estudiará la viabilidad técnica y económica de la microred con el gasificador y otras fuentes de energía posibles. Si el análisis es favorable y se obtienen recursos se iniciará el proyecto.

5.3 El gasificador *opensource* de Goundi

El gasificador GEK tiene el claro inconveniente que proviene de Estados Unidos y tiene una serie de costes de transporte que pueden comprometer la viabilidad económica de nuevas unidades. Para que los propios chadianos construyan sus gasificadores se ha iniciado una campaña de financiación para diseñar y construir un nuevo gasificador *opensource* que ellos podrán reproducir con sus materiales en el Chad. Además también se financiarán los cursos de formación de técnicos encargados de la fabricación, operación y mantenimiento.

6. Conclusiones

Como conclusiones del artículo, cabe destacar las lecciones aprendidas en el proyecto Pôle Gondi hasta el momento.

A raíz del trabajo realizado, se ha comprobado la viabilidad técnica y económica de la gasificación como fuente de energía renovable en poblaciones sin acceso a la electricidad. Ésto ha sido evidenciado por los resultados obtenidos del análisis dinámico, que ha demostrado la correcta respuesta del sistema frente a distintas perturbaciones de consumo.

En cuanto a los futuros estadios del proyecto, se plantea la incorporación de una planta termoeléctrica. Para ello, se deberán resolver nuevas incógnitas que se plantean en el apartado técnico, como el consumo de agua que requerirá, así como en el apartado económico. Del mismo modo, también se considera la construcción de una microred, formada por el gasificador, baterías y placas fotovoltaicas.

Finalmente, y como punto culminante del trabajo realizado en el campo de la gasificación, la segunda etapa del proyecto Pôle Goundi empieza con el diseño y construcción de nuestro propio gasificador *opensource*. Ideado para ser lo más simple posible, se reducirá la electrónica presente en el dispositivo a los mínimos niveles, con tal de asegurar su perfecta adaptación al entorno donde debe cubrir, y cubrirá, una necesidad real. Además, se harán unos manuales

de construcción y operación totalmente abiertos para que ellos mismos puedan construirse sus propios gasificadores adaptados a la vida del Chad.

Agradecimientos

Agradecer a Misión y Desarrollo para Goundi por la posibilidad de trabajar conjuntamente, por el soporte y confianza. También agradecer el soporte prestado al proyecto, tanto económico como institucional, del Centre de Cooperació pel Desenvolupament de la UPC, del Ajuntament de Barcelona y del Ajuntament de Cabriels. A la plataforma goteo.org, por proporcionarnos el espacio para hacer el proyecto de microfinanciación para construir gasificadores manuales. Y a todas aquellas personas que en algún momento u otro han impulsado el proyecto Póle Goundi, en especial a Marcel Mascaró por su entrega incondicional a la población de Goundi y al hospital.

Bibliografía

- ALL POWER LABS.** 2013. *10-20kW Power Pallets*.
<http://www.gekgasifier.com/products/10-20kwpower-pallets> [consultado 02/2013].
- ALL POWER LABS.** 2013. Gek Wiki.
<http://wiki.gekgasifier.com/w/page/6123718/FrontPage> [consultado 02/2013].
- ALL POWER LABS.** 2012. "Introducing the GEK Gasifier Systems."
http://wiki.gekgasifier.com/w/file/64729212/Introducing%20the%20GEK%20Gasifier%20Systems_rev5.pdf [consultado 02/2013].
- BASU, P.** 2010. "Biomass Gasification and Pyrolysis." Kinglington: Elsevier Inc.
- CULLEN, B.** 2011. "The Combined Otto and Stirling Cycle Prime-Mover-Based Power Plant." Doctoral Thesis, Dublin Institute of Technology, Dublin.
- CURTO-RISSO, P.L., A. MEDINA, AND A. CALVO HERNANDEZ.** 2008. "Theoretical and simulated models for an irreversible Otto cycle." *Journal of Applied Physics* 104 (American Institute of Physics): 094911.
- DEPOORTER RUELLE, VICTOR.** 2013. "Modelización de un sistema de generación eléctrica a partir de la gasificación de biomasa". Proyecto Final de Carrera, Universitat Politècnica de Catalunya, CITCEA-UPC. Barcelona

EBRAHIMI, R., D. GHANBARIAN, AND M.R. TADAYON. 2010. "Performance of an Otto engine with volumetric efficiency." *Journal of American Science (Journal of American Science)*: 27-31.

EUTECH SCIENTIFIC ENGINEERING. 2012. "Thermolib 5.2." The key to thermal management in Simulink®. <http://www.eutech-scientific.de/products-services/tools/thermolib.html> [consultado 03/2013].

GAFNER, I. 2011. "Engines & Fuel Cells." *Otto Engines*. Lausanne: Ecole Polytechnique Federale de Lausanne.

GIRAL GUARDIA, JORDI. 2013. "Generació elèctrica mitjançant gasificació de residus agrícoles a Goundi, República del Txad". Proyecto Final de Máster, Universitat de Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya (CITCEA-UPC), Barcelona.

LLADÓ JAUME, ÀNGEL. 2013 "Estudi i dimensionat d'un sistema de gasificació de biomassa per una població del Txad, Àfrica". Trabajo Final de Grado, Universitat Politècnica de Catalunya, CITCEA-UPC. Barcelona

MATHWORKS. 2013. SimDriveLine: Model and simulate one-dimensional mechanical systems. <http://www.mathworks.es/products/simdrive/> [consultado 05/2013].

MATHWORKS. 2013. SimPowerSystems: Model and simulate electrical power systems. <http://www.mathworks.es/products/simpower/> [consultado 03/ 2013].

MECC-ALTE. 2013. "Instruction manuals no9." Technical guide: Regulators. <http://www.meccalte.com/index.php?s=52&page=1> [consultado 05/2013].

MOZURKEWICH, M., AND R. STEPHEN BERRY. 1982. "Optimal paths for thermodynamic systems: The ideal Otto cycle." *Journal of Applied Physics (American Institute of Physics)*: 34-45.

PRYSMIAN GROUP. 2013. "Cables y accesorios de Media Tensión para distribución de energía." http://www.prysmian.es/export/sites/prysmian-esES/attach/Cables_MT/Catalogo_MT_2013_OK.pdf [consultado 05/2013].

REED, T.B., AND A. DAS. 1988. *Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems*. Golden (Colorado): Solar Energy Research Institute (U.S. Department of Energy).

TOONSEN, R. 2010. "Sustainable Power from Biomass: Comparison of technologies for centralized or de-centralized fuel cell systems." Doctoral Thesis, TU Delft, Delft.

TOONSEN, R., N. WOUDESTRA, AND A. H.M. VERKOOIJEN. 2008. "Exergy analysis of hydrogen production plants based on biomass gasification." *International Journal of Hydrogen Energy (Elsevier)*: 4074–4082.

TU DELFT. 2013. Cycle-Tempo Software. <http://www.cycle-tempo.nl/> [consultado 02/2013].