

FONDO FIDUCIARIO PEREZ-GUERRERO PARA LA COOPERACIÓN TÉCNICA Y ECONOMICA ENTRE PAISES EN DESARROLLO



**“Gasificación de biomasa residual de cosecha de caña para
producir energía eléctrica”
Proyecto PNUD INT/14/K05**

INFORME FINAL



ESTACION
EXPERIMENTAL
AGROINDUSTRIAL
OBISPO COLOMBRES
Tucumán | Argentina



Universidade Federal
de Itajubá-MG



Tucumán, Argentina

Diciembre 2016

Contenido

1	Descripción del proyecto	6
1.1	Titulo del proyecto	6
1.2	Resumen	6
1.3	Antecedentes y justificación.....	6
2	Implementación del proyecto	7
2.1	Gestión del proyecto y capacitación.....	7
2.1.1	Taller de Gasificación de biomasa	7
2.1.2	Viajes oficiales	8
2.1.3	Taller de difusión de resultados.....	13
2.1.4	Capacitaciones.....	18
2.2	Estado de arte de la gasificación.....	21
2.3	Desarrollo de la experiencia en el gasificador piloto de la EEAOOC	22
2.3.1	Cuantificación de la biomasa y caracterización de la materia prima	22
2.3.2	Compra y montaje de equipos.....	25
2.3.3	Preparación de las muestras para su ingreso al gasificador y caracterización puntual 28	
2.3.4	Ensayos de fluidización.....	29
2.3.5	Ensayos de gasificación	31
2.4	Procesamiento de datos y análisis de resultados	47
2.4.1	Determinación de valores promedios de variables de salida y de condiciones operativas óptimas mediante modelado del gasificador.....	47
2.4.2	Evaluación técnica, económica y ambiental	49
2.4.3	Puesta en marcha del gasificador piloto en Cuba.....	53
3	Conclusiones.....	54

Lista de Figuras

Figura 1: Asistentes al taller de gasificación.....	8
Figura 2: Dr. Silva Lora e Ing. Diez Torres en el taller de gasificación.....	8
Figura 3: Dr. Ribas García junto al equipo de trabajo en la planta piloto de gasificación de la EEAOOC. (Ing. M. Golato, Dr. M. Ribas, Dra. D. Paz e Ing. F. Franck)	10
Figura 4: Planta piloto de gasificación con lecho burbujeante de 100kWt (CEDER).....	12

Figura 5: Dra. Ballesteros, Dra. Paz, Mg Albarracín y Dr. Sánchez en el laboratorio de caracterización de biomasa (CEDER)	12
Figura 6: Vista del grupo de trabajo del CIEMAT durante la exposición de Dra. Paz.	13
Figura 7: La Dra. Paz junto con Dr. Moisés Graells y la Dra. Rosario Pastor, investigadores de la Universidad Politécnica de Catalunya.	13
Figura 8: Acto inaugural de la reunión con la presencia de la directora del proyecto Dra. Dora Paz, Sr. Juan José Budeguer, presidente del Honorable Directorio de la EEAOOC, entre otros. .	16
Figura 9: Exposiciones orales durante la reunión técnica.....	16
Figura 10: El Ing. Golato en una presentación oral de trabajos relacionados al proyecto Pérez Guerrero.	17
Figura 11: En la presentación de trabajos, la Dra. Dora Paz, los ingenieros Marcelo Ruiz, Marcos Golato, Federico Franck, Walter Morales, Enrique Feijoo, Gisela Diaz y Carolina Cruz (EEAOOC), participantes del proyecto Pérez Guerrero, entre otros.	17
Figura 12: Las Ing. Zamora y Cruz frente al gasificador piloto del NEST.	18
Figura 13: La Ing. Zamora realizando ensayos en la bomba calorimétrica IKA del NEST.	19
Figura 14: Regiones agroecológicas aptas para la recolección de residuos de cosecha de caña de azúcar.....	23
Figura 15: Esquema de la planta piloto de gasificación propuesta por la EEAOOC.....	26
Figura 16: Esquema del gasificador piloto de la EEAOOC.....	27
Figura 17: Equipo gasificador de biomasa de lecho fluidizado instalado en la EEAOOC.	28
Figura 18: Vista interior del reactor sin carga de arena.....	29
Figura 19: Vista interior del reactor con carga de arena.	30
Figura 20: Compresor de aire que alimenta al gasificador.	31
Figura 21: Interface del software de control del gasificador.	32
Figura 22: Control de combustión del gasificador.	32
Figura 23: Sistema de alimentación de biomasa.	33
Figura 24: Control de combustión.....	34
Figura 25: Válvula de regulación de GN.....	34
Figura 26: Válvula de regulación de Aire.....	34
Figura 27: Llama lograda con el quemador fuera de cámara de combustión.....	35
Figura 28: Medición de presión dinámica.	35
Figura 29: Variación del caudal de aire en relación a la apertura de válvula.....	37
Figura 30: Resultados correspondiente a los valores de la Tabla 13.	38
Figura 31: Detalle del interior del reactor de gasificación.....	40

Figura 32: Medición de presión en cámara de combustión y zona del reactor.	40
Figura 33: Ensayo de la velocidad de giro del VTI en función de la frecuencia.	41
Figura 34: Caída de presión en la placa	41
Figura 35: Resultados del balance de masa y energía del caso base.	44
Figura 36: Resultado del balance de masa y energía del sistema para el caso ensayado	45

Lista de Tablas

Tabla 1: Asistencia al evento.	14
Tabla 2: Estimación de la biomasa residual seca total disponible	22
Tabla 3: Estimación del RAC seco TOTAL y del RAC seco factible de recolectar (sin considerar la quema) según lo recomendado para cada zona agroecológica del área cañera tucumana.	24
Tabla 4: Resultados promedios del análisis de W, CZ, SV, CF, PCS y PCI del RAC- Overo Pozo.	25
Tabla 5: Resultados promedios del análisis de fusibilidad de cenizas del RAC- Overo Pozo.	25
Tabla 6: Resultados promedios del análisis de W, CZ, SV, CF, PCS y PCI del RAC- EEAO.	25
Tabla 7: Resultados promedios del análisis de fusibilidad de cenizas del RAC- EEAO.	25
Tabla 8: Características técnicas, teóricas y operativas del gasificador de la EEAO.	27
Tabla 9: Resultados promedios de W, CZ, SV y CF de las biomásas analizadas.	29
Tabla 10: Resultados promedios de PCS, CI, S y Dp de las biomásas analizadas.	29
Tabla 11: Variación de la presión en función de la carga de arena al reactor.	30
Tabla 12: Características del compresor.	31
Tabla 13: Resultados de la experiencia % apertura de válvula vs caudal de aire.	36
Tabla 14: Resultados del ensayo %Apertura de válvula vs caudal de gas natural.	37
Tabla 15: Caída de presión en placa distribuidora en función de la velocidad de rotación del VTI.	39
Tabla 16: Composición elemental, PCS y PCI de la biomasa considerado en el diseño del gasificador.	43
Tabla 17: Parámetros teóricos del reactor de gasificación.	44
Tabla 18: Composición elemental, PCS y PCI de la biomasa ensayada.	45
Tabla 19: Resultados de los parámetros y características del gas pobre producido.	46
Tabla 20: Condiciones de las experiencias realizadas.	48
Tabla 21: Resultados obtenidos de la experiencia.	48
Tabla 22: Resultados obtenidos de la simulación con el modelo de equilibrio propuesto.	48

Tabla 23: Resultados de la estimación de energía eléctrica a producir en Tucumán a partir de la gasificación.	49
Tabla 24: Inversión necesaria para la recolección de RAC.	50
Tabla 25: Comparación de costos operativos de manejo de RAC con distintos países.	51
Tabla 26: Resultados del ensayo.	53
Tabla 27: Contenido de alquitrán y partículas.	54

1 Descripción del proyecto

1.1 Título del proyecto

Gasificación de biomasa residual de cosecha de caña para producir energía eléctrica.

1.2 Resumen

Frente a los actuales problemas económicos, sociales y ambientales relacionados con la generación de energía eléctrica a partir de combustibles fósiles, se están empezando a emplear en mayor medida combustibles de origen renovable, en particular residuos agrícolas y forestales, que no compiten con los cultivos alimentarios. Una alternativa tecnológica promisorio es la gasificación, donde mediante una combustión incompleta se genera un combustible gaseoso, a partir de biomasa residual, principalmente del cultivo de caña de azúcar en este proyecto. El combustible gaseoso producido puede emplearse para la generación de energía eléctrica en moto-generadores. Este proyecto propone diseñar un proceso con factibilidad económica para la obtención de energía eléctrica a partir de biomasa residual de la caña de azúcar, y ser a su vez una unidad demostrativa para pequeños productores cañeros. Tres reconocidas instituciones de investigación de Brasil, Cuba y Argentina llevarán a cabo los trabajos propuestos.

1.3 Antecedentes y justificación

En la actualidad es cada vez más evidente que una economía dependiente de combustibles fósiles, y sin reservas suficientes de los mismos se enfrenta a una serie de debilidades. En los países importadores de petróleo, la incertidumbre en la oferta y el precio del petróleo causa un gran impacto en la política energética. Los países que basan su economía en el petróleo u otros combustibles fósiles (carbón y gas natural) tienen dificultades para desarrollar modelos económicos sostenibles. Por otra parte, la economía basada en combustibles de origen no renovable genera implicancias negativas para el medio ambiente. Esto justifica la búsqueda de alternativas que disminuyan drásticamente la dependencia de los combustibles fósiles.

La biomasa, como fuente de energía renovable, es una de las opciones más prometedoras para la obtención de energía eléctrica, sin embargo es necesaria una tecnología adecuada para transformar dicha biomasa en energía eléctrica, la cual dependerá del tipo de biomasa en cuestión. Por otro lado, si bien la biomasa representa un gran potencial energético, ésta no debe competir con los cultivos alimentarios. En el caso de los países azucareros el residuo de la cosecha de caña representa un gran volumen de biomasa, alrededor del 20% de la caña molida. Actualmente, esta biomasa se deja en los campos de cultivos, sin aprovechamiento energético, ni económico, y dando lugar a incendios accidentales con graves problemas socio-ambientales: liberación de partículas y compuestos como CO₂, SO₂, NO_x, dioxinas, furanos y otros (que afectan el medioambiente y la salud con problemas como el calentamiento global, la lluvia ácida, enfermedades respiratorias y visuales, etc.); problemas eléctricos por quema debajo de líneas de alta tensión; accidentes de tránsito por disminución de la visibilidad en rutas; etc.

2 Implementación del proyecto

Iniciado en Abril de 2015, el proyecto se desarrolló sin mayores inconvenientes. En general, el proyecto se divide en cuatro partes: gestión del proyecto y capacitación, estado de arte de la gasificación, desarrollo de la experiencia y procesamiento de datos y análisis de resultados.

2.1 Gestión del proyecto y capacitación

2.1.1 Taller de Gasificación de biomasa

El taller de gasificación fue dictado por el Dr. Electo Silva Lora del UNIFEI (Brasil) y se llevó a cabo entre los días 22 y 26 de junio del año 2015. Las clases se dictaron en el Salón de usos múltiples de la EEAOC (Tucumán), repartiéndose entre la mañana y la tarde, con espacios de pausas con servicio de café incluido y tiempo para almorzar. Al taller asistieron el Ing. Francisco Diez Torres del ICIDCA (Cuba), personal de la EEAOC involucrados en el proyecto y técnicos de apoyo. En total sumaron 28 personas asistentes que recibieron al finalizar un certificado de asistencia. Los temas a desarrollar fueron los siguientes:

TEMA I: UNIFEI, NEST y energía. La antropocena y los nuevos paradigmas en la conversión de energía. Avances y limitaciones en la conversión de la energía de la biomasa. La conversión termoquímica de la biomasa: combustión, gasificación y pirólisis.

TEMA II: Gasificación: Las reacciones químicas y las variables que influyen en la eficiencia del gasificador y en la calidad del gas de gasificación. Balances de masa y energía en gasificadores. Tecnologías de gasificación. Gasificador de tipo concurrente, contracorriente y de lecho fluidizado. Gasificadores autotérmicos y alotérmicos. Condicionamiento de la biomasa, calidad del gas y aplicaciones de las diferentes tecnologías de gasificación.

TEMA III: Modelado de la gasificación. Modelos de equilibrio. Modelado en ASPEN de la gasificación de la biomasa. Softwares comerciales para el modelado de gasificación de biomasa. Principios de diseño de gasificadores.

TEMA IV: Las impurezas en el gas de síntesis. Requisitos de calidad del gas para diferentes aplicaciones. Alquitranes, composición y medición de su concentración. Sistemas de limpieza de gas. Procedimiento de diseño y selección del esquema de un sistema de limpieza de gas. Aplicaciones de gas de síntesis: la generación de energía y la producción de biocombustibles. Gasificadores acoplados a motores de combustión interna: Experiencias y problemas relacionados. Modelado del sistema integrado. Sistemas BIGCC; ¿Por qué fracasaron? Fundamentos de BTL: principales productos y proyectos en todo el mundo. La gasificación de los residuos sólidos urbanos. Biorrefinerías sobre la base de la ruta termoquímica.

TEMA V: Principales fabricantes de gasificadores. Proyectos de gasificación en todo el mundo. Principales plantas de gasificación en funcionamiento. La planta de gasificación de Gussing en Austria.

TEMA VI: Investigaciones sobre la gasificación de biomasa en el NEST / UNIFEI en Itajubá, Brasil. Gasificador de corrientes paralelas con dos etapas de inyección de aire, gasificador de lecho fluidizado burbujeante, limpieza de los gases de gasificación para uso en pilas de combustible tipo SOFC, la gasificación utilizando mezclas de oxígeno y vapor

como fluido de trabajo. Investigaciones en curso: planta piloto de gasificación de RDF y el sistema híbrido solar biomasa.

En las Figuras 1 y 2 se observan momentos de las clases teóricas que se desarrollaron dentro del taller de gasificación de biomasa.



Figura 1: Asistentes al taller de gasificación.



Figura 2: Dr. Silva Lora e Ing. Diez Torres en el taller de gasificación.

2.1.2 Viajes oficiales

Primera misión en Argentina - Ing. Francisco Diez Torres y Dr. Electo Silva Lora

La misión se realizó entre los días lunes 22 de Junio y viernes 3 de Julio del año 2015 en la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC) de Tucumán, Argentina. Durante este tiempo el Ing. Diez Torres, investigador del Instituto Cubano de Investigación de Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA) de Cuba participó del taller de Gasificación dictado por el Dr. Silva Lora, investigador de la Universidad Federal de Itajubá de Brasil.

Luego de finalizado el taller, ambos investigadores participaron de un entrenamiento en el Laboratorio de Ensayos y Mediciones Industriales (LEMI) de la EEAOC en el tema:

“Características y Aplicaciones de los Instrumentos Portátiles de Mediciones para Diagnósticos de Eficiencia Industrial y Energética”. El LEMI, cuenta con un gran staff de especialistas de diferentes áreas como Ingenieros Químicos, Mecánicos e Industriales, que son los encargados de realizar las mediciones y diagnósticos en los ingenios azucareros, entre otras industrias, con vistas al seguimiento de su estado en cuanto a la eficiencia tanto industrial como energética. Para ello cuentan con instrumentos portátiles de mediciones en campo como ser: caudalímetros de ultrasonido, medidores de material particulado, analizador electrónico de gases en ambiente, cámara termográfica, etc. Con este equipamiento, unido a los softwares de simulación específicos y a otros equipos fijos que se encuentran en el área del LEMI, los técnicos de la sección de Ingeniería de la EEAOC, realizan auditorías energéticas en fábricas, optimización de balances de masa y energía y en impacto ambiental.

El ICIDCA tiene entre sus tareas, la ejecución de trabajos de optimización industrial y energética en los ingenios de AZCUBA, así como casi todas los servicios que realiza la sección de ingeniería de la EEAOC, por lo que este entrenamiento fue de gran utilidad.

Segunda misión en Argentina – Dr. Mauricio Ribas García

El Dr. Mauricio Ribas García del ICIDCA realizó la segunda misión de Cuba a Argentina entre los días 4 y 14 de abril del año 2016. Durante la misión visitó las instalaciones del LEMI, de la EEAOC y recibió una capacitación acerca de la operación y control automático del gasificador de biomasa de lecho fluidizado (Figura 3).

Se trabajó en conjunto con los especialistas del LEMI en la definición de un modelo estquiométrico del gasificador que permita calcular la composición de los gases a la salida del reactor y demás variables típicas de estos sistemas: poder calorífico inferior, así como la conversión de carbón obtenida la cual nos da una idea de la eficiencia del proceso. La optimización del rendimiento del sistema en forma de calor de combustión de los gases obtenidos de la gasificación, o bien, de gas de síntesis producido por unidad de combustible introducido en el gasificador.

Los resultados del modelo fueron contrastados con datos experimentales no identificándose diferencias significativas con un 95 % de confianza y obteniéndose en todos los casos un error relativo inferior al 5 % por lo que se puede concluir que el modelo resulta adecuado para ser utilizado en la simulación y optimización del proceso de gasificación.

También como parte del trabajo se recibió una capacitación acerca de los distintos métodos de mediciones en fábrica que se disponen en el LEMI. Entre ellos se destaca el equipo analizador termogravimétrico (TGA), marca LECO, para el análisis de los contenidos de cenizas (CZ), sólidos volátiles (SV) y carbono fijo (CF) del residuo agrícola de la cosecha de caña (RAC). Otro equipo importante es el analizador de fusibilidad de cenizas con sistema de reconocimiento de imágenes, marca LECO, modelo AF700, que permite identificar cuatro temperaturas: la inicial de deformación (DT), de ablandamiento (ST), de semiesfera (HT) y de fluidización (FT), para dos atmósferas diferentes: oxidante (CO₂, O₂) y reductora (CO₂, CO).



Figura 3: Dr. Ribas García junto al equipo de trabajo en la planta piloto de gasificación de la EEAOC. (Ing. M. Golato, Dr. M. Ribas, Dra. D. Paz e Ing. F. Franck)

Misión a España – Dra. Dora Paz

La misión a España por parte de la Dra. Paz se llevó a cabo entre los días 3 y 18 de noviembre y constó de la visita al Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas CIEMAT, situado en Madrid. En este centro fue recibida por la Dra. Mercedes Ballesteros, de la División de Energías Renovables, junto con el Dr. José María Sanchez. El CIEMAT es un organismo público de investigación adscrito al Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) a través de la Secretaría de Investigación, Desarrollo e Innovación, de España. Este organismo está focalizado en los ámbitos de la energía y el medioambiente, y las tecnologías relacionadas con ambos. Ocupa una posición intermedia en la cadena que va desde la creación de conocimiento hasta la aplicación industrial, busca servir de puente entre la I+D+i y los objetivos de interés social. El CIEMAT atiende 12 áreas científicas-técnicas entre las que se encuentran la Unidad de Energías Renovables y Ahorro Energético, y la Unidad de Combustibles Fósiles (Valorización Energética), ambas del Departamento de Energía. En estas unidades la Dra. Paz centró su visita fundamentalmente. La Unidad de Energías Renovables es una de las áreas de investigación más importantes del CIEMAT, donde se trabaja para lograr el desarrollo y optimización de nuevas tecnologías energéticas sostenibles y más respetuosas con el medioambiente. Se investiga sobre las principales formas de energía renovable: energía solar (fotovoltaica y concentración solar), energía eólica, bioenergía (biocarburantes y biomasa sólida) y energía marina así como en eficiencia energética y ahorro energético y tecnologías emergentes como las pilas de combustible. En la Unidad de Combustibles Fósiles se analiza la combustión y la gasificación, con objeto de lograr procesos más limpios y eficaces mediante el desarrollo de sistemas avanzados de

combustión y gasificación, así como el análisis, la separación y la limpieza de los gases procedentes de la gasificación. Estos procesos se aplican a combustibles fósiles (carbón), biomasa y residuos (procedentes de procesos industriales, aguas residuales, etc.). En el tema de gasificación se ha realizado la caracterización físico-química y térmica de residuos (bagazo de cerveza de dos productores de cerveza diferentes, astilla de pino de un productor de pellets y fangos) procedentes de empresas ubicadas en la Comunidad de Madrid para evaluar su viabilidad como combustibles. Además, se han analizado las posibilidades de utilización de los gasificadores disponibles para los ensayos con dichos residuos, seleccionando el de lecho fluidizado burbujeante como el más adecuado.

Además la Dr. Paz visitó el Centro de Desarrollo de Energías Renovables (CEDER), situado en Soria, en la provincia de Castilla. Fue recibida por la Ing. Raquel Ramos, jefa de la unidad de Procesos de Conversión Térmica, y por el Ing. Miguel Fernández Llorente, responsable del Laboratorio de Caracterización de Biomásas. El CEDER, dependiente del CIEMAT y adscrito al Departamento de Energía de este Organismo Público de Investigación, está considerado como centro pionero en España en el campo del aprovechamiento energético de la biomasa, además de ser referencia nacional y europea en energía minieólica. La Unidad de Biomasa realiza en el CEDER actividades de investigación aplicada en cultivos energéticos, evaluación de recursos, logística de suministro y almacenamiento, así como en la preparación y acondicionamiento de la biomasa.

En las instalaciones del centro hay distintas áreas destinadas a campos de cultivo, una planta de tamizado y trituración, una instalación de secado de biomasa por convección forzada y otra para la producción de pellets, plantas pilotos con equipos de gasificación en lecho fluido a escala industrial, así como un laboratorio dotado del equipamiento necesario para la caracterización físico-química y energética de la biomasa, considerado en la actualidad como Laboratorio de referencia nacional en la materia. En la Figura 4 se muestra la planta piloto de gasificación del LEMI de 100 kWt.

El Laboratorio de Caracterización de Biomasa, además de prestar apoyo a los diferentes proyectos de investigación que se desarrollan en el CEDER, analiza también un número importante de muestras remitidas por otras instituciones públicas y privadas (Figura 5). Además se verifican, estandarizan y desarrollan nuevos métodos para la caracterización energética de la biomasa y los biocombustibles, lo que le convierte en unos de los más avanzados del país en este campo. La Unidad de Procesos de conversión Térmica, es la unidad responsable de la puesta a punto y operación de las plantas de combustión y gasificación.

Entre los objetivos de esta Unidad están generar conocimiento para apoyar el desarrollo de sistemas avanzados de combustión y gasificación, con especial énfasis en los sistemas basados en tecnologías de lecho fluidizado. Esta tecnología, en sus diferentes variantes, permite la combustión o gasificación de una gran variedad de combustibles (carbón, residuos biomásicos, residuos industriales, residuos líquidos) de manera "limpia" y eficaz, lo que hace que se esté usando de forma creciente para la eliminación, respetando los límites medioambientales establecidos, de todo tipo de residuos con aprovechamiento energético.



Figura 4: Planta piloto de gasificación con lecho burbujeante de 100kWt (CEDER).



Figura 5: Dra. Ballesteros, Dra. Paz, Mg Albarracín y Dr. Sánchez en el laboratorio de caracterización de biomasa (CEDER)

Asimismo, la Dra. Paz realizó una presentación de las actividades de Investigación y servicios realizadas en la EEAOC, en el marco del Proyecto Perez Guerrero INT14K05: “Gasification of residual biomass from sugarcane crops for power generation.” En primer lugar se hizo la presentación institucional de EEAOC, mostrando los planes de investigación propios y los proyectos externos que lleva adelante, con especial énfasis en el Proyecto Perez Guerrero, cuyos fondos han financiado esta misión (Figura 6). Se describió la planta piloto de gasificación de EEAOC, y los resultados de caracterización del residuo agrícola de cosecha de caña (RAC). El Dr. José Maria Sanchez, especialista en gasificación, ofreció su apoyo técnico durante las tareas de puesta en marcha y operación. También se discutió un convenio de colaboración entre CIEMAT y EEAOC, en base al convenio borrador llevado por la Dra. Paz, y se acordó enviarlo al Depto. Jurídico del CIEMAT para su análisis.



Figura 6: Vista del grupo de trabajo del CIEMAT durante la exposición de Dra. Paz.

Por otra parte, durante su estadía la Dra. Paz recibió una invitación del grupo de Simulación de la Universidad Politécnica de Catalunya (Barcelona, España) para visitar las instalaciones del nuevo campus y compartir los proyectos de investigación que llevan a cabo, en vistas de un futuro trabajo en conjunto. El grupo de la universidad catalana está liderado por el Dr. Moisés Graells y la Dra. Rosario Pastor, investigadores con gran experiencia en los temas de simulación de procesos y en tratamiento de efluentes (Figura 7).



Figura 7: La Dra. Paz junto con Dr. Moisés Graells y la Dra. Rosario Pastor, investigadores de la Universidad Politécnica de Catalunya.

2.1.3 Taller de difusión de resultados

La difusión de los resultados preliminares se llevó a cabo durante la XX Reunión Técnica Nacional de la Caña de Azúcar en Tucumán organizada por el CART. En esta reunión técnica de gran convocatoria se reúnen productores y técnicos vinculados con la estratégica actividad cañera agrícola e industrial.

La reunión se realizó en los días 6, 7 y 8 de Abril en la Sociedad Rural de Tucumán. A la misma se estima que asistieron más de 400 técnicos, productores, empresarios, asesores azucareros y representantes de ingenios del NOA.

En la Tabla 1 se detallan la cantidad de personas de cada ingenio del área industrial y de los institutos de investigación relacionados a la industria azucarera que participaron de dicho evento.

Tabla 1: Asistencia al evento.

Empresa	Cantidad de personas
Ingenio Concepción (CACSA)	8
Ingenio La Providencia	4
Ingenio La Fronterita	4
Ingenio La Trinidad	4
Ingenio Leales	5
Ingenio Marapa	3
Ingenio La Corona	5
Ingenio Santa Bárbara	6
Total Ingenios de Tucumán	39
Ingenio Ledesma	12
Ingenio Río Grande	4
Ingenio Tabacal	13
Ingenio La Esperanza	8
Ingenio San Isidro	9
Total Ingenios del Norte	46
Ingenio Guabirá. Bolivia	3
Azucarera Paraguaya. Paraguay	2
Ingenio San Aurelio (Santa Cruz, Bolivia)	2
Total Ingenios de países limítrofes	7
Chacra Experimental Santa Rosa	5
Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombes (EEAOC)	65
INTA	20
Departamento de Azucarera (UNT)	5
Total Institutos Investigación	95

En la reunión estuvieron presentes la Dra. Dora Paz (coordinadora del proyecto), y los participantes de la EEAO: Marcos Golato, Enrique Feijóo, Federico Franck Colombres, Carolina Cruz, Gisela Diaz, Ariel Márquez, Walter Morales, Gimena Zamora Rueda, Florencia Peralta, Gabriela Mistretta y Cesar Zalazar.

Durante el transcurso del evento, para el sector de Industria se desarrollaron temas de interés para la actividad azucarera, en el área de energía, alcohol y medio ambiente, tanto en exposiciones orales como bajo la modalidad de posters.

Personal de la EEAO participantes del proyecto Pérez Guerrero presentaron los siguientes trabajos:

- **Estudio preliminar de estibas de RAC en dos localidades de la provincia de Tucumán. Caracterización energética y estructural.** Casen, S. D.; Feijóo, E. A.; Gomez, C. A.; Golato, M. A.; Romero E. R.; Ruiz, M. y Cardenas G. J.
- **Caracterización energética del residuo agrícola de cosecha de caña de azúcar (RAC) de Tucumán.** Zamora Rueda, G. del H.; Mistretta, M.G.; Peralta, F. L. ; Gutiérrez, C. E.; Feijóo, E. A.; Golato, M. A. ; Paz D. y G.J. Cárdenas.
- **Contenido de cloro total en residuos agrícolas de cosecha de caña de azúcar (RAC) en Tucumán.** Gutierrez, C. E.; Mistretta, M. G.; Zamora Rueda, G. del H.; Peralta, F. L.; Golato, M. A.; Coronel, M.; Ruiz, M.; Paz, D. y Cárdenas G. J.
- **Contenido de azufre total en residuo agrícola de cosecha de caña de azúcar (RAC) de Tucumán.** Mistretta, M.G.; Gutiérrez, C. E.; Zamora Rueda, G. del H.; Peralta, F. L.; Golato, M. A.; Paz D.; Ruiz, M. y G.J. Cárdenas.
- **Contenido de sílice insoluble en cenizas de residuos agrícolas de cosecha de caña de azúcar (RAC) en Tucumán.** Gutierrez, C. E.; Mistretta, M. G.; Zamora Rueda, G. del H.; Peralta, F. L.; Golato, M. A.; Juárez, G.; Ruiz, M.; Paz, D. y Cárdenas G. J.

En las Figuras 8, 9, 10 y 11 se muestran momentos del evento.



Figura 8: Acto inaugural de la reunión con la presencia de la directora del proyecto Dra. Dora Paz, Sr. Juan José Budeguer, presidente del Honorable Directorio de la EEAOC, entre otros.



Figura 9: Exposiciones orales durante la reunión técnica.



Figura 10: El Ing. Golato en una presentación oral de trabajos relacionados al proyecto Pérez Guerrero.



Figura 11: En la presentación de trabajos, la Dra. Dora Paz, los ingenieros Marcelo Ruiz, Marcos Golato, Federico Franck, Walter Morales, Enrique Feijoo, Gisela Díaz y Carolina Cruz (EEAOC), participantes del proyecto Pérez Guerrero, entre otros.

Por otra parte, también se realizó la reunión de inicio del proyecto en el marco del Simposio Bioeconomía Argentina 2015 Región NOA, realizada entre los días 1 y 2 de julio de 2015 en San Miguel de Tucumán. Se explicaron en líneas generales, los integrantes del proyecto, objetivos y los resultados esperados. Disertó la Dra. Paz, directora del proyecto.

El simposio fue de sumo interés para los concurrentes por lo cual, al presentar el proyecto se logró la difusión esperada.

2.1.4 Capacitaciones

Viaje de capacitación al NEST (Brasil)

Entre los días 1 al 7 de septiembre de 2015 las Ing. Carolina Cruz y Gimena Zamora llevaron a cabo una capacitación, en el Núcleo de Excelencia en Generación Termoeléctrica y Distribuida (NEST), perteneciente al Instituto de Ingeniería Mecánica de la Universidad Federal de Itajubá (UNIFEI), Minas Gerais, Brasil. En este viaje las Ing. tuvieron la oportunidad de participar en ensayos en el gasificador piloto de lecho fijo del NEST y de realizar un interlaboratorio con los equipos del instituto brasileño. Se enfatizó en el ensayo en la planta piloto de gasificación para la realización de experiencias en el gasificador, con el objetivo de aprender sobre su puesta en marcha, funcionamiento y uso de distintas biomásas. La experiencia se realizó en un gasificador de lecho fijo, con dimensiones de 140 cm de altura total y 30 cm de diámetro (Figura 12), que consta de 9 termocuplas para el control de temperatura, utilizando miscanthus como combustible, y con aire como agente gasificante. El ensayo alcanzó una temperatura de reacción de 800°C y se observaron la evolución de las temperaturas y de la concentración de gases.



Figura 12: Las Ing. Zamora y Cruz frente al gasificador piloto del NEST.

Con respecto al interlaboratorio, se trabajó con muestras de nuestra región en Argentina (bagazo, sorgo fibroso y RAC) y muestras de Itajubá (Maíz, miscanthus, eucalipto y cascarilla de arroz). Asimismo, se utilizaron los equipos modernos del NEST y sus metodologías, de modo de poder comparar las técnicas con las utilizadas en el LEMI.

Se conoció el equipo Analizador Elemental del NEST, la preparación de las muestras y la metodología empleada, que luego serán aplicados en nuestro laboratorio cuando contemos con ese equipamiento.

Se trabajó con el equipo analizador termogravimétrico (TGA 701), en base a la norma ASTM D 5142, en el mismo se determinaron los parámetros del contenido de humedad, cenizas, sólidos volátiles y carbono fijo con biomasa de nuestra región y biomásas pertenecientes a Itajubá.

Además, se utilizó la Bomba Calorimétrica marca IKA modelo C2000 (Figura 13), modo dinámica a 25°C, para la determinación del poder calorífico superior de las muestras en estudio.

Cabe destacar que se analizaron las mismas muestras con equipos de similares características en el LEMI, pero con metodologías específicas para cada biomasa.

Es importante destacar, que esta experiencia sirvió para el fortalecimiento de ambos laboratorios en cuanto a la caracterización energética de la biomasa, como así también para intercambiar técnicas de gasificación.



Figura 13: La Ing. Zamora realizando ensayos en la bomba calorimétrica IKA del NEST.

Luego de esta experiencia se elaboró el artículo titulado “Caracterización de biomásas regionales: experiencias en interlaboratorio de Tucumán (Argentina) e Itajubá (Brasil), de autores Marta C. Cruz, Gimena del H. Zamora Rueda, Marcos A. Golato y Dora Paz. Este trabajo se presentó para su publicación en la Revista Avance Agroindustrial de la EEAOC.

Presentación de trabajo en el congreso ASADES

Entre los días 10 al 13 Noviembre de 2015 la Ing. Gimena Zamora Rueda asistió a la XXXVIII Reunión de Trabajo de la Asociación de Energías Renovables y Ambiente (ASADES), organizado por la Facultad Regional de San Rafael de la Universidad Tecnológica Nacional, realizada en la ciudad de San Rafael, Mendoza. En la misma se expusieron temas de interés institucional dentro del área de las energías renovables y se presentaron y discutieron temas relacionados a los nuevos paradigmas de la conversión de

energía, utilización de los residuos, la sustentabilidad y el uso de fuentes renovables, a través de conferencias a cargo de investigadores de Argentina y Brasil.

Esta reunión de trabajo permitió difundir los resultados de trabajos de investigación realizados en el Laboratorio de Ensayos y Mediciones Industriales (LEMI), de la Sección Ingeniería y Proyectos Agroindustriales de la EEAOC. El artículo presentado de manera oral se tituló “Caracterización energética del residuo agrícola de cosecha de caña de azúcar (RAC) de Tucumán” de autores: G. del H. Zamora Rueda, M.G. Mistretta, F. L. Peralta, C. E. Gutiérrez, E. A. Feijóo, M. A. Golato, D. Paz y G.J. Cárdenas.

Este trabajo tuvo por objetivo caracterizar el residuo agrícola de cosecha de caña de azúcar (RAC), mediante análisis inmediatos, poder calorífico superior, determinaciones de elementos inorgánicos y fusibilidad de cenizas, y se muestra una comparación de estos parámetros con los encontrados para bagazo de caña de azúcar. Se trabajó con 20 muestras provenientes de campos cañeros tucumanos. Los resultados obtenidos fueron importantes, ya que se pudo concluir que el RAC, es un buen combustible para ser aprovechado energéticamente en calderas de vapor bagaceras.

La participación de la Ing. Zamora en ASADES fue de gran importancia, ya que se establecieron relaciones con otros participantes, en particular investigadores del Instituto de Investigaciones en Energías No Convencionales (INENCO), perteneciente a la Universidad Nacional de Salta. El equipo representante del INENCO se encuentra trabajando en la tecnología de la gasificación de residuos de vid, y presentaron una revisión de antecedentes con diseños y parámetros a tener en cuenta para la aplicación en residuos regionales.

Taller de gasificación

Las Ing. Gisela Diaz y Carolina Cruz asistieron al taller de gasificación organizado y dictado por técnicos del INTI Tucumán. Este taller se desarrolló en el marco de la Segunda Semana de la Bioenergía en el NOA en los días 23 al 26 de agosto del corriente año. Los objetivos del taller fueron brindar conocimientos teóricos y prácticos para la operación de planta de gasificación de biomasa y aportar los fundamentos básicos sobre el manejo y la logística de la biomasa residual para el aprovechamiento en plantas de gasificación.

Curso de capacitación de mediciones

El técnico Alejandro De Los Ríos de la EEAOC asistió al curso de capacitación sobre medición de caudales titulado “Ultrasonido” entre los días 3 y 14 de agosto de 2015. El curso se realizó en la Universidad Tecnológica Nacional de Campana, provincia de Buenos Aires, y fue dictado por Jhonatan Brasccetta del OCA. Durante el curso se vieron conceptos generales de los Ensayos No Destructivos de materiales (END) que son: Ensayos Visuales (EV); Líquidos Penetrantes (LP); Partículas Magnetizables (PM); Ultrasonido (US); Inspección Radiográfica (RX); Corrientes Inducidas (CI); Flujo Disperso (FD). Se vieron las ventajas y desventajas de cada uno de los métodos, como así también los costos que tienen los mismos. Se explicaron las terminologías (transductor, palpador, etc.) y los principios físicos del Ultrasonido (tipos de ondas, frecuencia, amplitud, periodo, longitud de onda, propagación de onda, etc.). En el curso se vieron las distintas técnicas de ensayos y sus limitaciones: técnica pulso-eco; ensayo de transferencia; ensayos de inmersión.

Se explicaron los tipos de representaciones en los ensayos de Ultrasonido como ser A-Scan, B- Scan y C-Scan y lo que me muestra cada una de estas representaciones. Se realizaron prácticas con equipos proporcionados por la Facultad en: mediciones de espesores, cálculos de medio paso, ensayos en tubos (longitudinal y transversal), técnica DAC (soldaduras).

Como transferencia se realizó una charla de capacitación al personal del LEMI sobre los conocimientos adquiridos en este curso.

2.2 Estado de arte de la gasificación

En Europa, en especial en los países del norte, la biomasa como combustible juega un importante rol en las políticas del país. Últimamente se están poniendo a punto plantas que procesan entre 7.000 y 8.000 t/año de biomasa, entre ellas se tiene las tecnologías de ENAMORA (lecho fluidizado de presión compensada), GUASCOR (lecho móvil updraft), INERCO (lecho fluido burbujeante atmosférico) y TAIM-TFG (gasificador downdraft con aire) (IDAE y BESEL S.A., 2007).

Reed and Das. 1988, desarrollaron un manual tecnológico para el diseño y desarrollo de proyectos de gasificación de biomasa, que se considera de referencia a nivel mundial.

Un proyecto de la Universidad de Barcelona, realiza un análisis de viabilidad técnica y económica para la implantación de una planta de cogeneración a partir de la gasificación de biomasa residual agrícola en la comarca del Segrià que contribuye a mejorar la sostenibilidad del territorio a la vez que se genera empleo y actividad económica (Cañadas y Villarrubia, 2014).

Asimismo, una revisión de estudios teóricos-experimentales fue llevada a cabo por un grupo de investigadores de Colombia (Perez, Borge, & Agudelo, 2010). De los estudios experimentales, destacaron un trabajo en el que se comprobó que tamaños de partícula inferiores a 2 mm deben evitarse en los gasificadores de lecho fijo en corrientes paralelas, ya que provocan elevadas pérdidas de carga, disminuyendo la cantidad de aire disponible en la zona de oxidación, lo que reduce la calidad del gas pobre obtenido, a la vez que se incrementa el contenido de alquitranes en el gas.

En la Argentina, existen algunos proyectos de cogeneración alimentados con biomasa forestal (Misiones), ya sea con residuos del procesamiento mecánico de la madera (aserrín, corteza, costaneros), y de desechos o residuos forestales o de cosecha (despunte, ramas, tocones). También existen algunos proyectos de producción de biocombustibles sólidos, como son los pellets de madera, tanto en Corrientes como en Misiones.

En cuanto a gasificación, se tiene como antecedentes la instalación y puesta en marcha de una planta de gasificación de biomasa en Presidencia De La Plaza, Chaco, para generar energía a partir de residuos forestales a cargo del INTI. El aprovechamiento de los desechos de los aserraderos permitió proyectar una planta de gasificación de 250 kW para abastecer a una planta de Pellets ya operativa. La planta piloto fue adquirida en 2011 a la empresa india Ankur Scientific Energy Technologies Pvt. Ltd.

La EEAOC dispone de un reactor de gasificación de lecho fluidizado diseñado por investigadores de la Institución y se encuentra finalizando el desarrollo de una Planta Piloto, donde está emplazado el mencionado reactor. Dicha planta tiene como finalidad la realización de ensayos de aprovechamiento de biomasa residual para la producción de gas combustible de origen renovable para generar energía eléctrica. La planta consta de tres

etapas: (1) Gasificación propiamente dicha; (2) Acondicionamiento de gases (sistemas de limpieza) y (3) Producción de energía eléctrica. Actualmente se encuentra concluida la primera etapa, y los fondos de este proyecto servirán para completar la segunda etapa.

Por otro lado, el gobierno nacional está buscando impulsar el uso de biomasa con fines energéticos y promocionar el potencial de una energía renovable y segura en todo el país mediante el proyecto Promoción de la Energía Derivada de Biomasa (PROBIOMASA). En este sentido, la Ley Nacional 27191, Modificatoria de la Ley 26.190, “Régimen de Fomento Nacional para el Uso de Fuentes Renovables de Energía Destinada a la Producción de Energía Eléctrica”, que establece como objetivo lograr una contribución de las fuentes de energía renovables hasta alcanzar el ocho por ciento (8%) del consumo de energía eléctrica nacional, al 31 de diciembre de 2017. Y aumentar en una segunda etapa la contribución de las fuentes renovables de energía hasta alcanzar el veinte por ciento (20%) del consumo de energía eléctrica nacional, al 31 de diciembre de 2025.

2.3 Desarrollo de la experiencia en el gasificador piloto de la EEAO

2.3.1 Cuantificación de la biomasa y caracterización de la materia prima

Cuantificación de la biomasa

La implementación de sistemas productivos con bajo impacto ambiental son una preocupación tanto para la agroindustria como para la sociedad, resultando la producción de azúcar una de las áreas donde la sustentabilidad es un objetivo prioritario y alcanzable. La cosecha en verde de la caña de azúcar aparece como una importante alternativa para conformar sistemas de producción más limpios, prescindiendo de la quema de material vegetal y residuos de cosecha, conservando el suelo y ofreciendo una posibilidad para la generación de energía. Una estimación del potencial de residuos disponible de la caña de azúcar cobra gran relevancia en el momento de definir estrategias de manejo que aseguren desarrollo sustentable del cultivo.

La cantidad de RAC seco potencialmente disponible en el área cañera de Tucumán, se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2: Estimación de la biomasa residual seca total disponible (RAC SECO TOTAL) para el área cañera de Tucumán.

Tucumán	Datos estadísticos de sección satelital
	RAC total potencial (materia seca)
Años	Total (t)
2014	2.195.235
2015	2.174.847

Esta información determina que el área cañera tucumana dispondría entre 2.170.000 y 2.200.000 toneladas de RAC seco potencial.

El área cañera de Tucumán (Figura 14) presenta 3 diferentes zonas agroecológicas bien definidas que, por sus características, especialmente en relación a sus condiciones de

drenaje y/o eliminación del agua superficial, pueden modificar los porcentajes de recolección de los residuos de la cosecha en verde. Así, en las zonas con problemas de drenaje, el mantenimiento de los residuos de cosecha en superficie es una limitante en la brotación y crecimiento normal por la excesiva humedad en el suelo. En estas condiciones se recomienda retirar del campo el 70% de los residuos de cosecha (zona de la Llanura Deprimida).

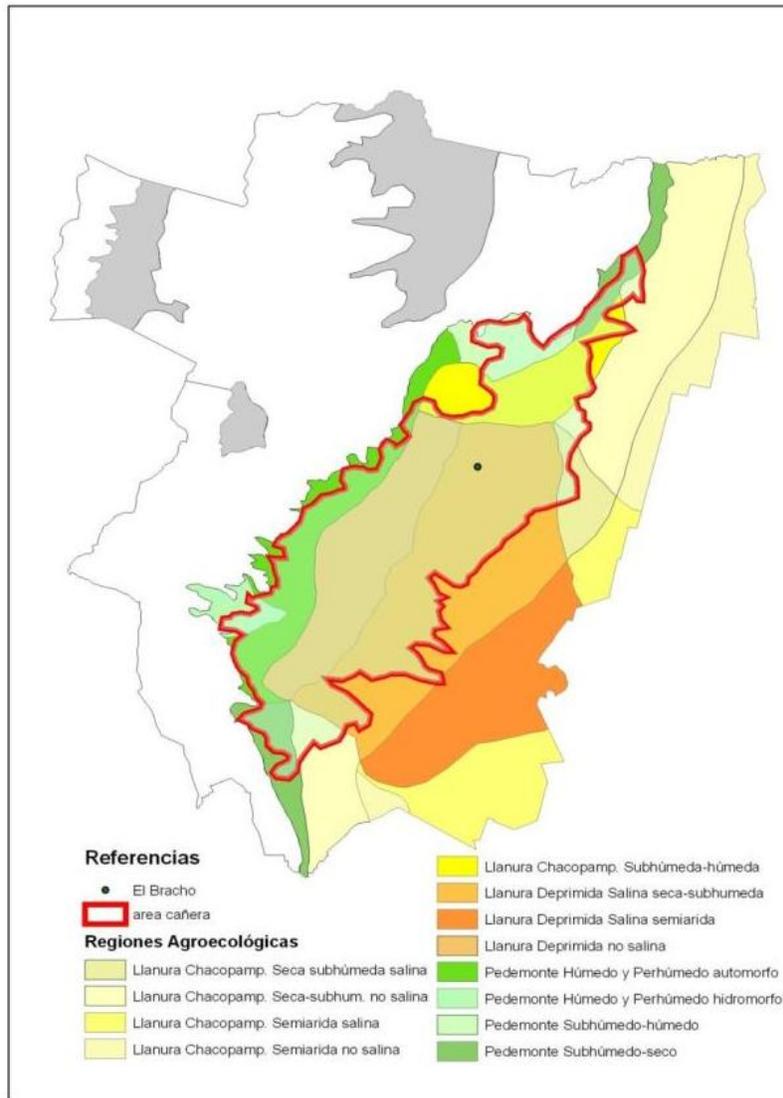


Figura 14: Regiones agroecológicas aptas para la recolección de residuos de cosecha de caña de azúcar.

En las zonas cañeras situadas en el Pedemonte y en la llanura Chaco-Pampeana, es agrónomicamente conveniente mantener entre el 60-70% de los residuos sobre el suelo para aprovechar todos los beneficios que brinda el mantenimiento de la cobertura de maloja en los aspectos de conservación de humedad, evitar problemas de erosión hídrica y eólica, aumentar la eficiencia del riego, facilitar el control de malezas y de algunas plagas, mejorar progresivamente la disponibilidad de nutrientes y la mejora de la fertilidad de los suelos, entre otros.

A tal efecto y con el propósito de mejorar la precisión de la estimación del RAC potencialmente disponible en Tucumán para ser recolectado, si se evitara totalmente la quema, en cada subregión del área cañera, se procedió a trabajar sobre la información básica de las últimas cinco zafras. En la Tabla 3 se resumen los resultados obtenidos de dicha estimación para cada zafra.

Tabla 3: Estimación del RAC seco TOTAL y del RAC seco factible de recolectar (sin considerar la quema) según lo recomendado para cada zona agroecológica del área cañera tucumana.

Región agroecológica	2014	2015
Pedemonte	145837	144483
Llanura Chaco pampeana	970188	961178
Llanura deprimida	96938	96038
Total Tucumán RAC seco	1.212.964	1.201.699
Total Tucumán RAC (15 % Humedad)	1.455.441	1.441.924

Caracterización de la materia prima

La cosecha de caña de azúcar se realiza en Tucumán de manera mecanizada (integral) en un 95%, el residuo que queda en el campo se lo denomina residuo agrícola de cosecha (RAC). Para la caracterización de la biomasa se trabajó con muestras de RAC de variedad de caña LCP 85-384, con tipo de levantamiento enfardado pertenecientes a Overo Pozo y a la EEAOC. Estas muestras fueron procesadas en LEMI. Se trabajó con 48 muestras de RAC-Overo Pozo y 48 muestras de RAC – EEAOC.

A estas muestras se le realizaron las siguientes determinaciones:

- Análisis del contenido de humedad (W): secado en estufa a 105°C hasta peso constante.
- Análisis del contenido de cenizas (CZ), sólidos volátiles (SV), carbono fijo (CF): equipo termogravimétrico automatizado TGA 701, marca LECO, con atmosferas controladas de aire, nitrógeno y oxígeno, según la norma ASTM D 5142-02.
- Análisis del poder calorífico superior (PCS): equipo bomba calorimétrica automatizada, C5000, marca IKA, con operación adiabática, con atmosfera controlada de oxígeno, normas DIN 51900, ISO 19228, ASTM D240, ASTM D2015-96, ASTM D4809, ASTM D5865, ASTM D5868 y ASTM E711.
- Cálculo del poder calorífico inferior (PCI): el cálculo se realiza a partir de la W, PCS y el contenido de hidrógeno (5,55% en base seca).
- Análisis de fusibilidad de cenizas: determinación de las temperaturas de inicio de la deformación (DT), temperatura de ablandamiento (ST), temperatura de semiesfera (HT) y temperatura de fluidización (FT), por medio del calentamiento en horno

automático con circulación forzada y atmósfera oxidante (O₂- CO₂) y reductora (CO₂-CO), según norma ASTM D1857.

A continuación se muestran los resultados de la caracterización en las Tablas 4, 5, 6 y 7.

Tabla 4: Resultados promedios del análisis de W, CZ, SV, CF, PCS y PCI del RAC- Overo Pozo.

OVERO POZO	PROMEDIO W [%]	PROMEDIO CZ [%] (b.s.)	PROMEDIO SV [%] (b.s.)	PROMEDIO CF [%] (b.s.)	PROMEDIO PCS [kJ/kg] (b.s.)	PROMEDIO PCI [kJ/kg] (b.h.)
MUESTREO 15-01	14,36	14,06	69,50	16,23	16.216	13.552
MUESTREO 06-04	15,70	13,03	69,85	17,11	16.521	13.552
MUESTREO 23-06	16,52	14,30	68,71	17,13	16.322	13.294
PROMEDIO	15,53	13,80	69,36	16,82	16.353	13.466

Referencia b.s.: base seca; b.h.: base húmeda.

Tabla 5: Resultados promedios del análisis de fusibilidad de cenizas del RAC- Overo Pozo.

OVERO POZO	Fusibilidad de cenizas				Fusibilidad de cenizas			
	Atmósfera: Reductora				Atmósfera: Oxidante			
	DT[°C]	ST[°C]	HT[°C]	FT[°C]	DT[°C]	ST[°C]	HT[°C]	FT[°C]
MUESTREO 15-01	1.070	1.345	1.437	>1.500	1.100	1.294	1.368	>1.500
MUESTREO 06-04	1.101	1.341	1.453	>1.500	1.074	1.263	1.385	>1.500
MUESTREO 23-06	1.074	1.273	1.357	1429	1.070	1.207	1.431	>1.500
PROMEDIO	1.081	1.320	1.416	1.429	1.081	1.255	1.395	>1.500

Tabla 6: Resultados promedios del análisis de W, CZ, SV, CF, PCS y PCI del RAC- EEAOC.

EEAOC	PROMEDIO W [%]	PROMEDIO CZ [%] (b.s.)	PROMEDIO SV [%] (b.s.)	PROMEDIO CF [%] (b.s.)	PROMEDIO PCS [kJ/kg] (b.s.)	PROMEDIO PCI [kJ/kg] (b.h.)
MUESTREO 15-01	25,17	15,08	68,08	16,85	16.270	11.812
MUESTREO 09-04	41,03	15,52	68,26	16,22	16.091	9.068
MUESTREO 23-06	41,55	17,98	65,37	16,66	15.830	8.960
PROMEDIO	35,91	16,19	67,24	16,57	16.064	9.947

Tabla 7: Resultados promedios del análisis de fusibilidad de cenizas del RAC- EEAOC.

EEAOC	Fusibilidad de cenizas				Fusibilidad de cenizas			
	Atmósfera: Reductora				Atmósfera: Oxidante			
	DT[°C]	ST[°C]	HT[°C]	FT[°C]	DT[°C]	ST[°C]	HT[°C]	FT[°C]
MUESTREO 15-01	1.128	1.321	1.433	>1.500	1.125	1.293	1.378	>1.500
MUESTREO 09-04	1.098	1.341	1.457	>1.500	1.067	1.300	1.425	1.495
MUESTREO 23-06	1.151	1.291	1.378	>1.500	1.157	1.265	1.359	>1.500
PROMEDIO	1.126	1.318	1.423	>1.500	1.116	1.286	1.387	1.495

2.3.2 Compra y montaje de equipos

A partir de estudios bibliográficos y experiencias realizadas en el Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Estatal de Campinas (Unicamp), del estado de San Pablo, Brasil; y en el Núcleo de Estudios de Sistemas Térmicos (NEST), de la Universidad Federal de Itajubá, del estado de Minas Gerais, también de Brasil; durante los años 2008 y 2009 respectivamente, la Sección Ingeniería y Proyectos Agroindustriales de la EEAOC, diseñó una planta piloto para la producción de energía eléctrica a partir de gasificación de biomásas, a ser construida en 3 etapas (Figura 15).

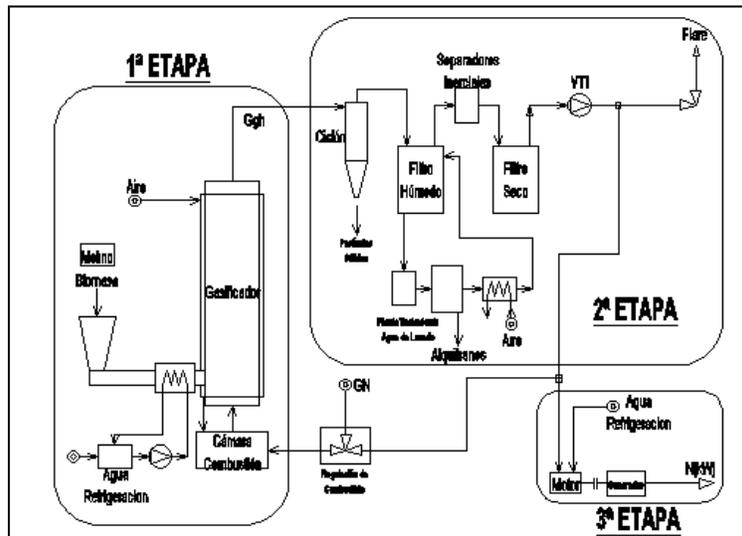


Figura 15: Esquema de la planta piloto de gasificación propuesta por la EEAOC

La 1ª etapa consistió en diseño, fabricación y montaje del equipo gasificador (etapa casi concluida, falta el ventilador de tiro inducido). La 2ª etapa consistió en el diseño de equipos fabricación y montaje para el acondicionamiento de los gases producto de la gasificación y para la combustión del gas en un quemador atmosférica (flare), cuando no haya producción de energía eléctrica simultánea. Esta etapa se encuentra parcialmente concluida con el aporte del proyecto Pérez Guerrero, con el cual se realizó la compra de cañerías y accesorios para el sistema de limpieza de gases, válvulas, electroválvulas, filtros; y microesferas de vidrio. Por último, en una 3ª etapa se adicionará un motor de combustión interna acoplado a un generador de energía eléctrica.

En la Figura 16 se puede observar un esquema básico conceptual del reactor de gasificación diseñado por la EEAOC. Se puede apreciar el intercambiador de calor (ICQ), ubicado en la envoltura del reactor, instalado para aprovechar parte del calor generado en el equipo, para el calentamiento del aire utilizado como agente gasificante.

Por la parte lateral inferior del reactor, se introducirá directamente la biomasa en el lecho inerte formado por arena con alto contenido de sílice. Previamente se acondicionará la biomasa en tamaño y contenido de humedad para favorecer el proceso de reacción.

Al ingresar dicha biomasa al reactor, se calentará hasta alcanzar la temperatura de reacción, seguidamente se gasificará generando un gas de bajo poder calorífico, formado principalmente por CO, H₂ y N₂. Estos gases producto saldrán por la parte superior y serán inducidos a pasar a través de un sistema de limpieza primario, que constará inicialmente por un ciclón de separación, donde se eliminará el particulado grueso y restos de arena arrastrada del lecho. Luego, ingresará a una torre de lavado húmedo, donde los gases circularán en contracorriente a una fina capa de agua pulverizada; y que se encontrará de manera distribuida a lo largo del equipo.

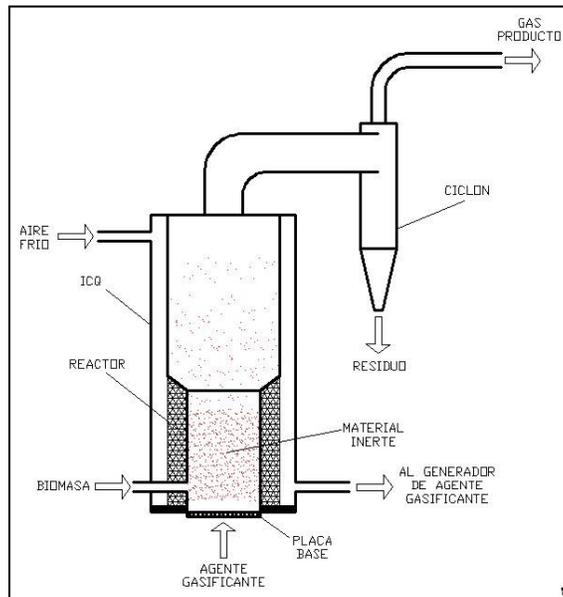


Figura 16: Esquema del gasificador piloto de la EEAOC.

Posteriormente, los gases lavados ingresarán a un sistema de secado secundario, dotado de filtros inerciales, donde eliminará las posibles gotas de agua adquiridas en el lavado; luego los gases serán conducidos a un equipo de secado fijo con lecho absorbente para eliminar definitivamente la humedad contenida.

De esta manera se logrará obtener un gas seco, que será aspirado por medio de un ventilador de tiro inducido; y se conducirá al sistema de medición de caudal. Finalmente, los gases producto serán aspirados e inyectados en un motor de combustión interna que accionará un generador de energía eléctrica.

En Tabla 8, puede observarse las características técnicas, teóricas y operativas del gasificador diseñado por la EEAOC.

Tabla 8: Características técnicas, teóricas y operativas del gasificador de la EEAOC.

Características del gasificador piloto de la EEAOC	
Capacidad (biomasa)	30 kg/h
Densidad (biomasa)	390 kg/m ³
Tamaño medio de partícula (biomasa)	0,85 mm
Esfericidad (biomasa)	0,49
Porosidad (biomasa)	0,64
Cantidad necesaria de aire	31 Nm ³ /h
Producción de gases	72 Nm ³ /h
Poder calorífico del gas producto	1200 kcal/Nm ³ (5,02 kJ/Nm ³)
Eficiencia térmica	89%
Potencia eléctrica máxima generada	24 kW

En Figura 17, se muestra la planta de gasificación de biomasa instalada en el LEMI de la EEAOC. Se puede ver el reactor de gasificación, el ciclón de separación primaria y la torre de lavado húmedo de los gases combustibles producidos.



Figura 17: Equipo gasificador de biomasa de lecho fluidizado instalado en la EEAOC.

2.3.3 Preparación de las muestras para su ingreso al gasificador y caracterización puntual

Para el acondicionamiento de la biomasa de experimentación en el gasificador piloto del LEMI se realizaron las caracterizaciones de granulometrías y análisis inmediato y poder calorífico superior de las muestras de bagazo, sorgo y RAC. Se trabajó con 15 muestras de cada biomasa, estas fueron procesadas en el LEMI. Las determinaciones realizadas fueron:

- Análisis del contenido de cenizas (CZ), sólidos volátiles (SV), carbono fijo (CF): equipo termogravimétrico automatizado TGA 701, marca LECO, con atmósferas controladas de aire, nitrógeno y oxígeno, según la norma ASTM D 5142-02.
- Análisis del poder calorífico superior (PCS): equipo bomba calorimétrica automatizada, C5000, marca IKA, con operación adiabática, con atmósfera controlada de oxígeno, normas DIN 51900, ISO 19228, ASTM D240, ASTM D2015-96, ASTM D4809, ASTM D5865, ASTM D5868 y ASTM E711.
- Contenido de azufre (%S): determinación en bomba calorimétrica Parr, según norma ASTM D3177-02.
- Contenido de cloro (%Cl): determinación en bomba calorimétrica Parr, según norma ASTM E 776-87.
- Determinación del diámetro de partícula (D_p) de la biomasa mediante el ensayo de granulometría, equipo vibrador Zaranda QE_TAM_02 y mallas de acero inoxidable ASTM con aberturas de 19 mm a 0,28 mm.

En las Tablas 9 y 10 se muestran los resultados puntuales del acondicionamiento de las biomásas:

Tabla 9: Resultados promedios de W, CZ, SV y CF de las biomásas analizadas.

Muestras	Promedio W [%]	Promedio CZ [%] (b.s.)	Promedio SV [%] (b.s.)	Promedio CF [%] (b.s.)
Bagazo	56,25	10,76	72,98	15,77
Sorgo	72,61	6,23	74,44	19,33
RAC	10,28	11,63	71,45	16,96

Referencias: b.s.: base seca

Tabla 10: Resultados promedios de PCS, CI, S y Dp de las biomásas analizadas.

Muestras	Promedio PCI [kJ/kg] (b.h.)	Promedio CI [%] (b.s.)	Promedio S [%] (b.s.)	Promedio Dp [mm]
Bagazo	3911	0,11	0,17	1,13
Sorgo	4174	0,10	0,26	1,48
RAC	4009	0,24	0,26	1,55

2.3.4 Ensayos de fluidización

Se realizó un ensayo preliminar con el 97% de apertura real de válvulas de aire, regulando la alimentación de arena con variador de frecuencia a una frecuencia constante de 48,5 [Hz]. Se midió la presión bajo la placa distribuidora, sin carga de arena por medio del tornillo de alimentación (Figura 18), luego se procedió a la carga de arena en cantidades parciales de: 6, 10 y 12 [Kg] respectivamente (Figura 19). Los resultados obtenidos se muestran en Tabla 11.

En la Figura 18 puede verse en el fondo la placa distribuidora con las boquillas inyectoras de aire. Además, puede apreciarse el primer sensor de medición de temperatura del la cámara de reacción.



Figura 18: Vista interior del reactor sin carga de arena.

En la Figura 19 puede verse la última carga de arena lograda (12 kg), la misma cubre totalmente la placa distribuidora, quedando el nivel a poca distancia del primer sensor de temperatura.



Figura 19: Vista interior del reactor con carga de arena.

En la Tabla 11 pueden observarse los resultados logrados en este ensayo de la variación de la presión estática (ΔP), medido en el Punto 1 de la zona de la cámara de combustión (ver Figura 13), en función de la carga de arena al reactor.

Tabla 11: Variación de la presión en función de la carga de arena al reactor.

Frecuencia	Arena	% Apertura	ΔP
[HZ]	[Kg]	[%]	[mmca]
48,5		97	56
			60
	6		71
			86
	10		102
			108
	12		130

2.3.5 Ensayos de gasificación

Puesta en marcha del gasificador en Argentina y operación en condiciones estables

En el presente apartado se describen las operaciones de puesta a punto de los elementos accesorios que componen el sistema de combustión, operaciones realizadas en condiciones de vacío, o sea, sin alimentación de biomasa.

El reactor cuenta con un quemador de gas natural para generar gases calientes para el calentamiento del lecho interior. Para ello, el sistema está compuesto por líneas acometidas para la alimentación de gas natural y aire. Además, cuenta con elementos de regulación para el ajuste de los caudales.

El caudal de aire es suministrado por un compresor a tornillo, el cual se muestra en la Figura 20. Las características del compresor se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12: Características del compresor

Caudal de aire [m ³ /h]	126
Presión de descarga [Bar]	10
Potencia del motor [kw]	15
Velocidad [rpm]	2970
Tensión	380v/50hz/3fases
Peso [kg]	550



Figura 20: Compresor de aire que alimenta al gasificador.

La instalación de gasificación también cuenta con un software de control y un sistema de seguridad de encendido con electroválvulas. En la Figura 21 se muestra la interface del software, el mismo permite la visualización de la temperatura a lo largo del reactor y de la presión de los gases en dos puntos característicos, en la zona media del reactor y en la descarga de los gases (salida reactor).

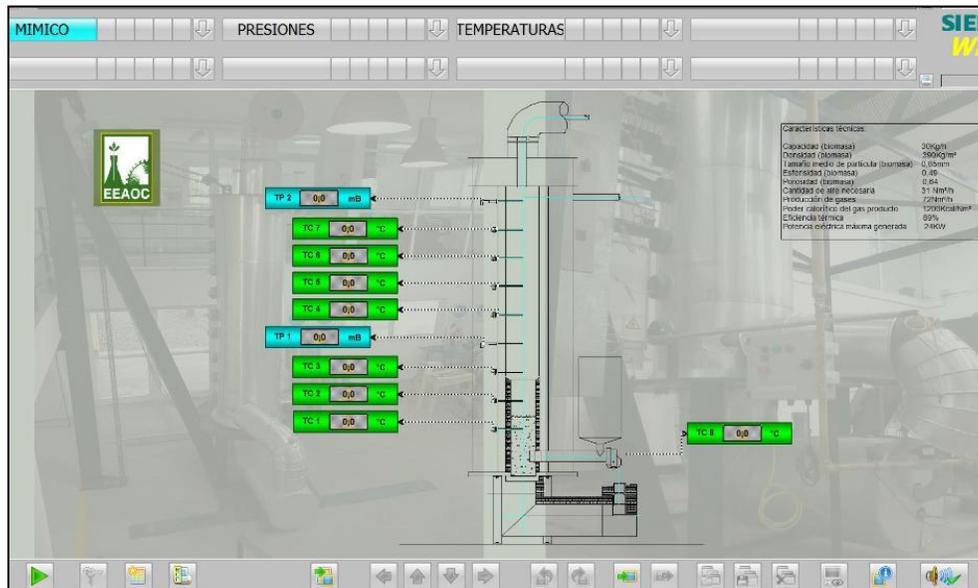


Figura 21: Interface del software de control del gasificador.

En la Figura 22 se indica la interface del lazo de control de combustión, en la cual se indica el porcentaje de apertura o posición de las válvulas de control de gas y del aire como así también la relación entre los mismos. Desde aquí también se puede manejar el accionamiento del motor alimentador de biomasa.

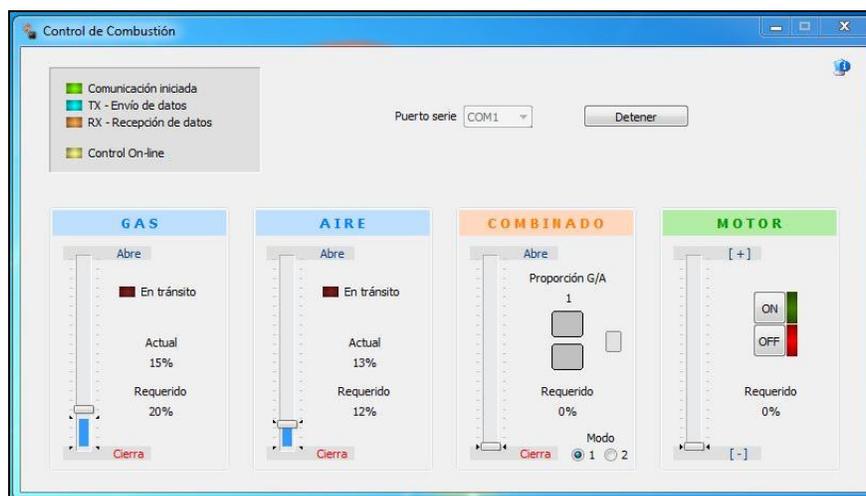


Figura 22: Control de combustión del gasificador.

En la Figura 23 se indica el sistema de alimentación de biomasa, el mismo se encuentra constituido por un transportador helicoidal, refrigerado por medio de un encamisado por donde circula agua. El accionamiento del tornillo alimentador se realiza por medio de un moto-reductor, el cual es gobernado desde el lazo de control de combustión.



Figura 23: Sistema de alimentación de biomasa.

Ensayo de regulación de válvulas

El primero de los ensayos realizados fue el de las válvulas de regulación de gas natural y la del aire necesario para la combustión y generación de gases calientes, como así del aire para la gasificación. El objetivo planteado fue verificar que los accionamientos de las mismas realicen la operación de cierre hermético en la posición totalmente cerrada, como la de verificar el flujo en la posición totalmente abierta. Para ello, se instalaron termocuplas y sensores de presión acoplados al sistema de control.

En la Figura 24 se observa los distintos elementos que constituye el sistema de control del quemador de gas. El mismo está conformado por filtros, electroválvulas de posición on-off, como así también por una válvula de regulación motorizada, las cuales se alimentan con una tensión de 12VCC para las electroválvulas y de 0-10VCC para las válvulas de regulación. En la misma figura se observa el gabinete de conexionado eléctrico de los distintos elementos.



Figura 24: Control de combustión.

A continuación se muestran las válvulas que fueron objeto de ensayos de testeo y regulación. Ambas tienen la característica de ser accionadas eléctricamente. En las Figuras 25 y 26 se las observa en detalle, ya instaladas en la línea.



Figura 25: Válvula de regulación de GN.



Figura 26: Válvula de regulación de Aire.

Una vez logrado y verificado lo anterior, se extrajo el quemador de la cámara de combustión para realizar pruebas de combustión y definir la mejor relación aire – combustible para esa condición. Esta operación fue planificada para ensayar las válvulas de gas y de aire manteniendo una contrapresión constante, en este caso la atmosférica.

En la Figura 27 puede observarse la llama del quemador lograda con el equipo funcionando al exterior, o sea, fuera de la cámara de combustión. Este ensayo se realizó para definir la longitud de la llama y sostenimiento de la misma para esas condiciones.



Figura 27: Llama lograda con el quemador fuera de cámara de combustión.

Para determinar los correspondientes caudales de gases y de aire, se efectuaron mediciones de la presión dinámica de los fluidos mediante tubo Pitot, para diferentes grados de aperturas de las válvulas correspondientes. En la Figura 28 se puede observar el punto de medición de flujo en la línea de gas natural.



Figura 28: Medición de presión dinámica.

Con las velocidades medidas, se determinaron los caudales de gas y de aire. En Tabla 13 puede verse los resultados de la experiencia.

Tabla 13: Resultados de la experiencia % apertura de válvula vs caudal de aire

% Apertura	ΔP_{DIN} [mmca]	δ [kg/m³]	V [m/s]	Q [m³/h]
100	55,23	1,125	31,0	465,7
95	43,59		27,6	413,7
90	55,15		31,0	465,3
85	36,86		25,4	380,4
80	38,75		26,0	390,1
75	40,55		26,6	399,0
70	45,47		28,2	422,5
65	46,03		28,3	425,1
60	47,17		28,7	430,4
55	46,77		28,6	428,5
50	46,98		28,6	429,5
45	48,38		29,0	435,8
40	55,93		31,2	468,6
35	53,00		30,4	456,2
30	57,57		31,7	475,4
25	56,37		31,4	470,5
20	40,81		26,7	400,3
15	3,51		7,8	117,4
10	3,28		7,6	113,5
5	3,22		7,5	112,4
0	3,16	7,4	111,4	

Donde:

%Apertura: representa la posición de la válvula, 0% y 100% equivale a totalmente abierta y cerrada, respectivamente.

ΔP_{DIN} : presión dinámica del aire en la cañería.

δ : densidad del aire adoptada.

V: velocidad del aire medida en la cañería.

Q: caudal de aire.

En la Figura 29 se observa la relación existente entre el caudal de aire de suministro al reactor y el grado de apertura de la correspondiente válvula de control. La curva obtenida resultó representativa para el tipo de válvula de control instalada (válvula esférica con comando servoasistido eléctricamente).

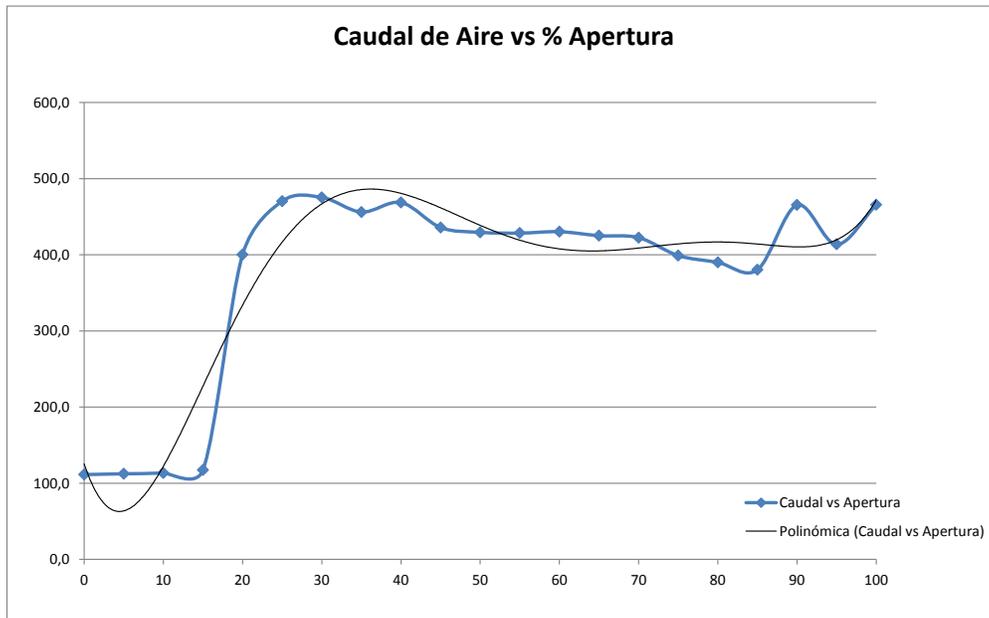


Figura 29: Variación del caudal de aire en relación a la apertura de válvula.

En la Tabla 14 se resumen los distintos valores registrados en la medición realizada en el sistema de alimentación de gas, donde en función de la posición (% Apertura), de la válvula se midió la presión dinámica (ΔP_{DIN}), medida en milímetros de columna de agua. Con esto se calculó la velocidad y caudal correspondiente para las condiciones de trabajo y normales.

La Figura 30 muestra los resultados de la relación obtenida entre flujo de gas natural y el grado de apertura de la válvula de control.

Tabla 14: Resultados del ensayo %Apertura de válvula vs caudal de gas natural.

% Apertura	ΔP_{DN} [mmca]	V [m/s]	Qgas [m3/h]	QNgas [Nm3/h]
0	3,94	9,78	9,98	9,30
5	4,17	10,06	10,27	9,57
10	4,27	10,18	10,39	9,68
15	4,47	10,41	10,63	9,90
20	4,69	10,67	10,89	10,14
25	4,95	10,96	11,18	10,42
30	5,1	11,12	11,35	10,58
35	5,36	11,40	11,64	10,84
40	5,56	11,61	11,85	11,04
45	5,66	11,72	11,96	11,14
50	5,84	11,90	12,15	11,32
55	5,96	12,02	12,27	11,44
60	6,1	12,16	12,42	11,57
65	6,37	12,43	12,69	11,82
70	6,55	12,61	12,87	11,99
76	6,72	12,77	13,03	12,14
79	6,85	12,89	13,16	12,26
88	7,07	13,10	13,37	12,45
98	7,34	13,34	13,62	12,69

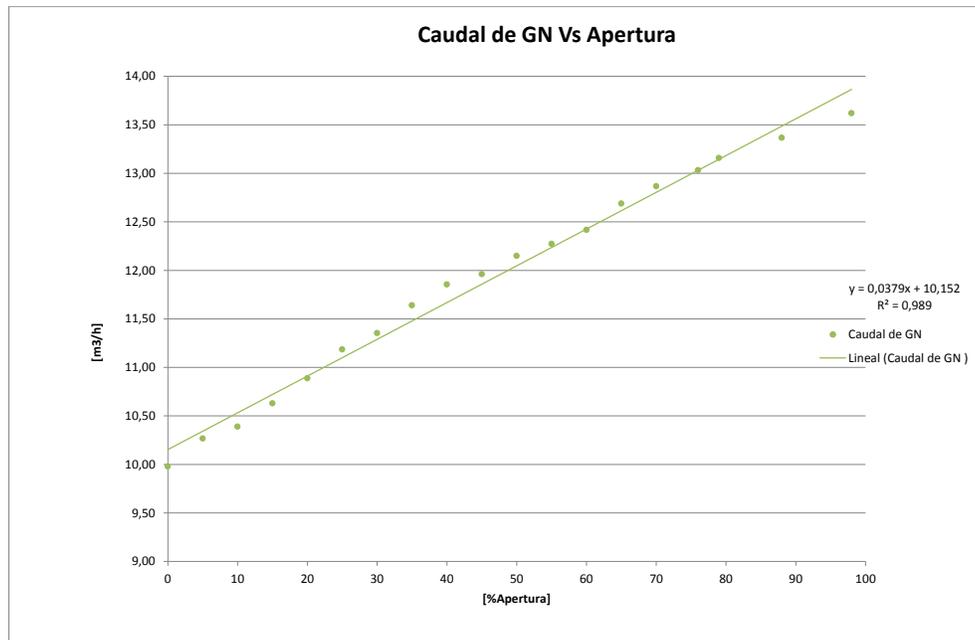


Figura 30: Resultados correspondiente a los valores de la Tabla 13.

Por otro lado, se realizaron ensayos de combustión variando las cantidades de aire y gas natural hasta lograr una relación óptima aire-combustible. De esta manera se analizó cualitativamente el comportamiento del quemador y la calidad de la combustión mediante la estabilidad y color de la llama.

Estudio del comportamiento del quemador dentro de la cámara de combustión, para lograr el encendido del piloto y del quemador se logró partiendo de las condiciones óptimas anteriormente indicadas. Debido a las dificultades que presentó inicialmente el encendido del quemador, se colocó un ventilador de tiro inducido (VTI) en la parte superior del reactor. Se utilizó este ventilador existente en nuestra planta piloto, de menor capacidad que la requerida por el gasificador, debido a que no se consiguió finalmente la financiación para un VTI apropiado con fondos de otro proyecto. La regulación de este VTI se logró por medio de la variación de la velocidad de rotación del motor de accionamiento, a través de un variador de frecuencia, para alcanzar distintas presiones en la cámara de combustión, y permitir una regulación adecuada a las necesidades del quemador.

Se ensayó el VTI haciendo variar la frecuencia de alimentación, medida en Hertz (Hz), se registraron simultáneamente la velocidad de giro del motor, medida directamente por medio de un tacómetro. Los resultados de la experiencia se encuentran indicados en la Tabla 15. Así también, se realizaron mediciones de presión por debajo y por encima de la placa distribuidora.

Con la ayuda del VTI se lograron condiciones favorables dentro de la cámara de combustión para las diferentes relaciones aire-combustible, donde se alcanzaron condiciones óptimas para el encendido del piloto y del quemador, lográndose llamas perfectamente desarrolladas y estables. Esto se logró haciendo variar la velocidad del VTI, por lo tanto el tiro en la cámara de combustión, para la mejor relación aire-gas, de manera tal de obtener la mejor calidad de llama.

Además, en Tabla 15 se informa la caída de presión que se produce en la placa distribuidora para todas las condiciones ensayadas.

Tabla 15: Caída de presión en placa distribuidora en función de la velocidad de rotación del VTI.

Hora	Hz	ΔP_{cc} [mmca]	$\Delta P_{Reactor}$ [mmca]	n [rpm]	Δp Placa
11:53	50	-71	-105	2724	88,0
12:11	45	-52	-76	2250	64,0
12:13	40	-42	-63	2040	52,5
12:14	35	-35	-46	1650	40,5
12:16	30	-25	-36	1420	30,5
12:18	25	-17	-23	1270	20,0
12:20	20	-13	-19	1010	16,0
12:23	15	-8	-10	800	9,0
12:25	10	-4	-6	520	5,0

Donde:

ΔP_{cc} : presión en la cámara de combustión, próxima a la placa distribuidora, medida en milímetros de columnas de agua.

$\Delta P_{Reactor}$: presión por encima de la placa distribuidora, medida en milímetros de columna de agua.

n[rpm]: velocidad de giro del motor que acciona el VTI.

ΔP_{Placa} : caída de presión provocada por la placa distribuidora, medida en milímetros de columna de agua.

En la Figura 31 se indican los puntos en los cuales se llevaron a cabo las mediciones y la ubicación del VTI. En el punto 1 se realizó la medición de presión en el interior de la cámara de combustión. En el punto 2 se registro la presión sobre la placa distribuidora de aire. Por último, el punto 3 indica la ubicación del VTI.

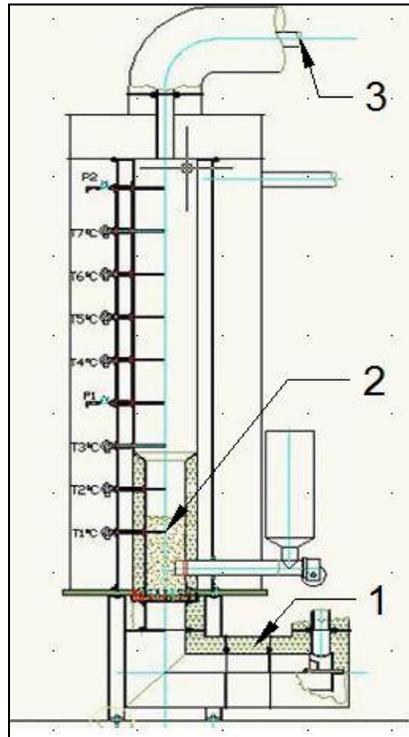


Figura 31: Detalle del interior del reactor de gasificación.

Con los datos de presión registrados en los puntos 1 y 2, e indicados en Figura 31, se confeccionó la Tabla 16. En la Figura 32 se muestran los resultados de los ensayos realizados. Se puede observar la caída de presión en la cámara de combustión (ΔP_{CC}) y en la zona de la cámara del reactor ($\Delta P_{Reactor}$).

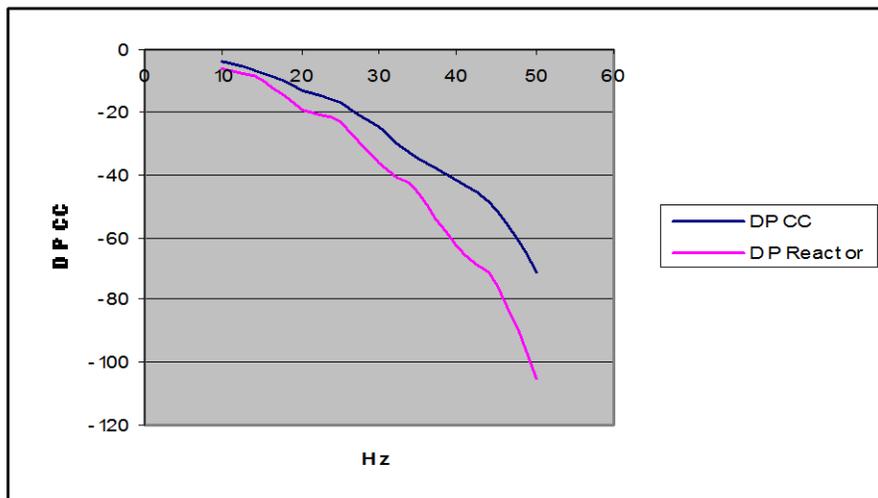


Figura 32: Medición de presión en cámara de combustión y zona del reactor.

Referencias:

- ΔP_{CC} : Presión de los gases en la cámara de combustión.
- $\Delta P_{Reactor}$: Presión de los gases en zona del reactor.

La Figura 33 se muestra la variación de la velocidad de giro del ventilador, en rpm, en función de la frecuencia de alimentación del motor del VTI.

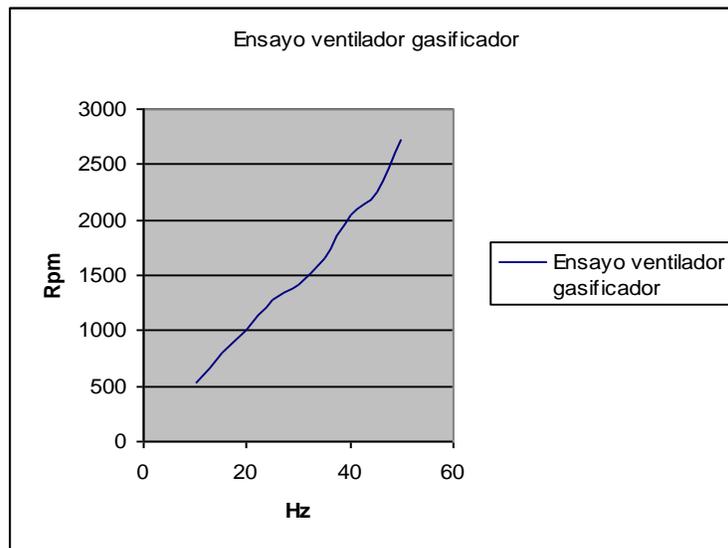


Figura 33: Ensayo de la velocidad de giro del VTI en función de la frecuencia.

Con los datos de los ensayos en la cámara de combustión y en la zona del reactor, se determinó la caída de presión en la placa distribuidora de aire, que se encuentra ubicada entre los puntos 1 y 2 (ver Figura 31). La Figura 34 muestra la caída de presión en la placa distribuidora en función de la frecuencia de alimentación de la tensión del VTI.

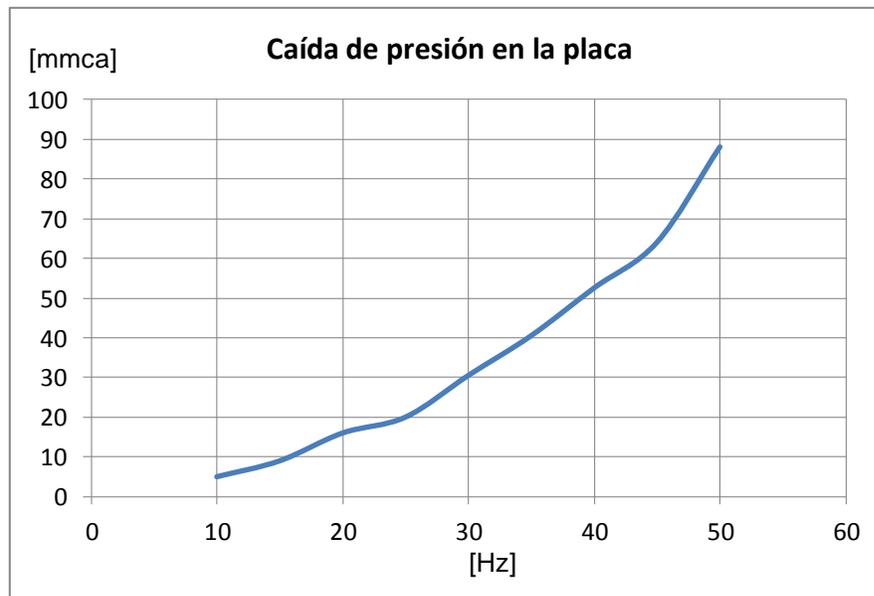


Figura 34: Caída de presión en la placa

Ensayos preliminares de gasificación

A pesar de no disponer la totalidad de los equipos que conforman la Planta de Gasificación de Biomasa instalada en la EEAOC, los ensayos se concentraron en la producción de los gases pobres combustibles. Para ello, se realizaron mediciones de sobre el reactor.

Estos ensayos consistieron en verificar los índices y parámetros característicos de operación del gasificador de biomasa instalado en el LEMI-EEAOC.

Los ensayos se realizaron en dos etapas:

❖ Etapa 1: preparación de la biomasa.

En esta etapa se realizó la recepción y proceso de adecuación granulométrica de la biomasa a utilizar en el gasificador, en una zona de preparación de biomasa. Primero se llevó a cabo un picado grueso del material, para ello se utilizó una picadora a cuchillas, con capacidad máxima de molienda de hasta 300 kg/h.

Luego, la biomasa pre-picada se pasó por un molino de discos, de picado fino, hasta lograr un tamaño adecuado de (< a 3 mm). Capacidad de corte hasta 30 kg/h.

Finalmente esta biomasa, de aproximadamente 3 [mm] de diámetro fue cargada en la tolva de alimentación del tornillo alimentador del reactor de gasificación, el cual transporta la biomasa hasta el interior del mismo. Este tornillo sinfín es refrigerado por medio de la circulación de agua, la cual es bombeada desde un tanque de 1000 litros.

❖ Etapa 2: proceso de gasificación.

En esta etapa, se produjo la gasificación de la biomasa propiamente dicha, para ello se llevó al reactor a las condiciones necesarias de temperatura y presión. La alimentación del gasificador se logra inicialmente con una corriente de gases calientes producto de la combustión de gas natural en una ante cámara externa al reactor, y por medio del ingreso del flujo de biomasa seca y acondicionada a temperatura ambiente. Cuando se alcanzó las condiciones de proceso, los gases calientes fueron sustituidos por el agente gasificante (aire caliente), el cual fue inyectado en el interior del reactor mediante la placa distribuidora, situada en la parte inferior de la cámara de reacción.

Inicialmente se utilizó gases calientes producto de la combustión de gas natural para alcanzar las temperaturas de trabajo en el interior del reactor. Este calentamiento se realizó durante aproximadamente 3 horas. El mismo se realizó gradualmente hasta alcanzar una temperatura aproximadamente de 300°C.

A partir de estas condiciones, se accionó el sistema de alimentación de biomasa para cargar la arena. Esta operación se realizó en forma gradual y hasta alcanzar una carga de 12 kg de la misma. Cabe indicar que la capacidad de diseño es de 50 kg, pero al no disponer del ventilador de tiro inducido apropiado, fue necesario disminuir la misma.

Una vez alcanzado el estado de fluidización de la arena a temperatura constante (300°C±10°C), se habilitó el ingreso de la biomasa hasta condiciones de régimen o diseño (30kg/h) o hasta alcanzar una relación entre del 4% de la arena ingresada.

Para estas condiciones, se observó que la temperatura a lo largo del reactor comenzó a elevarse debido a la combustión de la biomasa, que entra en contacto con el agente gasificante (gases calientes + aire en exceso), que dio lugar a las reacciones de gasificación en el lecho fluidizado burbujeante de arena, instante en el cuál se redujo el ingreso de gas natural sin variar el aire primario inicial. Esta regulación se realizó en función de las

reacciones termoquímicas del proceso, que fueron monitoreadas por medio de un análisis de los gases a la salida del reactor. Una vez logrado un régimen constante de temperaturas, para un flujo constante de biomasa, se anuló definitivamente el suministro de gas natural, lográndose un sistema autosustentable.

A la salida del gasificador se obtuvo un gas combustible (“gas pobre”) y se buscó mantener constante la temperatura en el reactor, aproximadamente entre 750° a 800°C.

En el estado transitorio del arranque se controló la temperatura en la zona del horno, la regulación de aire-gas la realiza el sistema de control instalado para tal fin, como así también el registro de la temperatura y presión a lo largo del reactor.

El aire primario fue provisto por un compresor a tornillos que entregó el aire necesario (caudal y presión), tanto para la combustión inicial, como para la fluidización de la arena y la biomasa. Este aire ingresó de manera envolvente rodeando exteriormente el reactor, tomando el calor que irradia el mismo, produciendo el aire caliente de gasificación (agente gasificante).

Para este ensayo se implementó un sistema de control, mediante un PLC, de manera que el mismo mantuvo las condiciones necesarias para que se lleve a cabo el proceso tanto en condiciones de régimen como así también tome las medidas correctivas bajo condiciones transitorias y críticas.

Por cuestiones de seguridad se realizó la combustión de los gases pobres generados en el reactor, a través de un quemador atmosférico (flare). Además, se monitoreo y registro las temperaturas y presiones a lo largo del reactor (cámara de gasificación), la presión de aire a la entrada del reactor, la presión de los gases combustibles a la salida del reactor.

Balance de masa y energía – Caso base

A partir de los datos de diseño, se logró realizar un balance de masa y energía para estas condiciones.

En Tabla 16 puede verse la composición elemental de la biomasa oportunamente considerada en el diseño del reactor de gasificación. Además, se indica el poder calorífico superior e inferior de la misma.

Tabla 16: Composición elemental, PCS y PCI de la biomasa considerado en el diseño del gasificador.

Composición química de la biomasa (B)		
	%en peso b.h.	
C	36,6%	
H	4,4%	
O	33,8%	
N	0,9%	
Cenizas	9,4%	
humedad	15,0%	
PCS =	3908	kcal/kg
PCI =	2997	kcal/kg

Balance de masa y energía – Caso Ensayo Preliminar

En la Tabla 18 puede verse los resultados del análisis de composición elemental de la biomasa ensayada y los correspondientes valores de poder calorífico superior e inferior.

Tabla 18: Composición elemental, PCS y PCI de la biomasa ensayada.

Composición química de la biomasa (B)		
	%en peso b.h.	
C	35,9%	
H	4,3%	
O	33,2%	
N	0,9%	
Cenizas	9,2%	
humedad	16,5%	
PCS =	4231	kcal/kg
PCI =	3203	kcal/kg

En la Figura 36 puede observarse los resultados del balance de masa y energía obtenido de los ensayos realizados en el reactor.

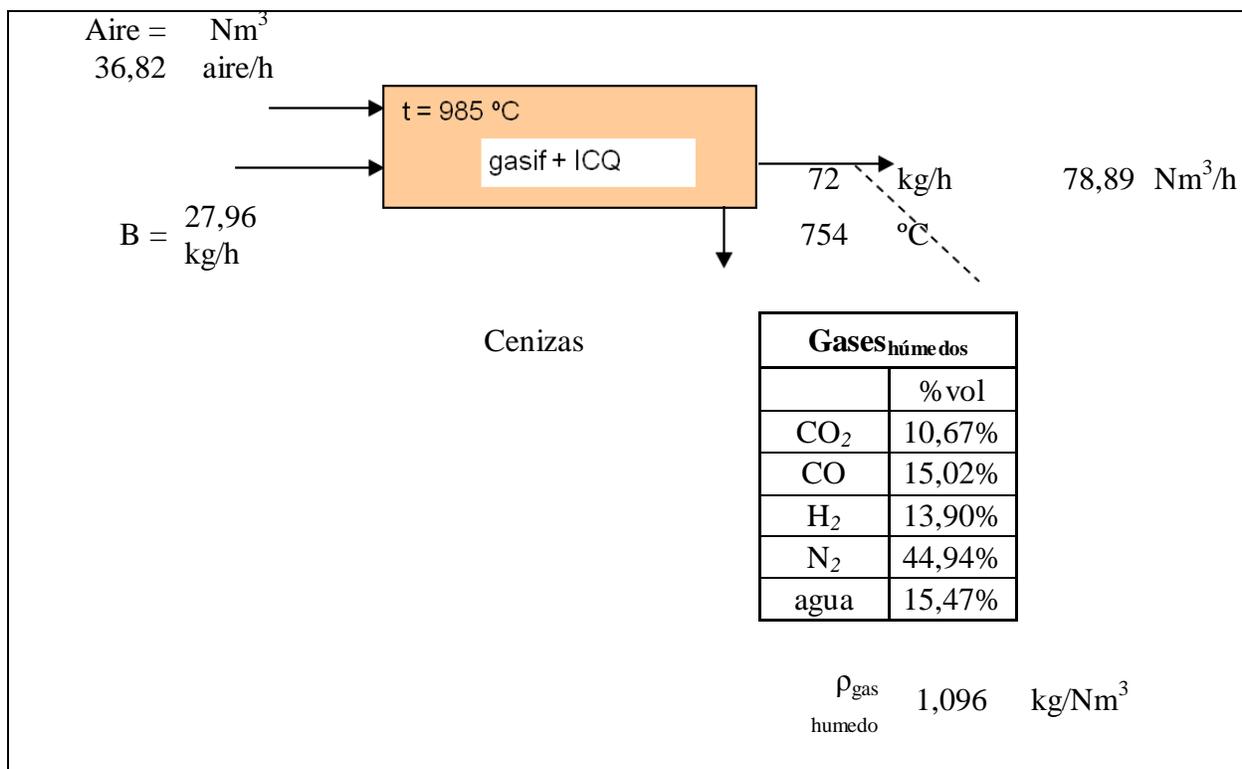


Figura 36: Resultado del balance de masa y energía del sistema para el caso ensayado

En la Tabla 19 se observan los resultados de los parámetros operativos logrados con el reactor en funcionamiento.

Comparando los resultados alcanzados para los valores del ensayo (Tabla 19), en relación al caso teórico (Tabla 17), puede observarse que el rendimiento frío logrado fue inferior al de diseño (60% vs 93%), este hecho se debió a que el reactor operó por debajo de la capacidad máxima de diseño (27,9 kg/h vs 35,6 kg/h). Además, la temperatura de los gases producidos alcanzó los 754°C, aproximadamente un 18% más del valor teórico (640°C).

Asimismo, el poder calorífico del gas producido (812 kcal/Nm³), se encontró por debajo del determinado por cálculo (1458 kcal/Nm³), esto también pudo deberse a la baja carga con que se encontraba operando el equipo.

Estos resultados resultan preliminares y que deberán ajustarse hasta alcanzar las condiciones de diseño. Una vez completada la Planta de Gasificación, se realizarán ensayos con los equipos seleccionados y diseñados para la operación eficiente del reactor. No obstante, los resultados hasta que logrados son representativos y pueden mejorarse con la realización de mayores ensayos de regulación.

Tabla 19: Resultados de los parámetros y características del gas pobre producido.

Poder calorífico superior del gas húmedo	877	kcal/Nm ³ G
Poder calorífico inferior del gas húmedo	812	kcal/Nm ³ G
Rendimiento frío =	72%	
En base seca:		
Gases_{SECOS}		
	%vol	
CO ₂	12,62%	
CO	17,77%	
H ₂	16,44%	
N ₂	53,17%	
agua	0,00%	
p _{gas seco}	1,149	kg/Nm ³
Kg de gases secos por kg de biomasa	2,283	
Poder calorífico superior del gas seco	1038	kcal/Nm ³ G
Poder calorífico inferior del gas seco	961	kcal/Nm ³ G
Rendimiento frío =	60%	

2.4 Procesamiento de datos y análisis de resultados

2.4.1 Determinación de valores promedios de variables de salida y de condiciones operativas óptimas mediante modelado del gasificador

Para el modelado del reactor se debe, en primer lugar, definir los parámetros de funcionamiento del mismo y luego los parámetros que caracterizan el lecho fluidizado como ser diámetro de partícula, esfericidad, porosidad y densidad del sólido, diámetro y altura del reactor, etc.

Para el modelado del equilibrio se realizan estos supuestos:

- Cada reacción tiene lugar en serie, en un reactor separado, y reaccionan hasta alcanzar el equilibrio.
- El gasificador se alimentará de biomasa y aire según la proporción que indiquemos ($0.25 \leq ER \leq 0.35$) de forma continua.
- El rango de operación del gasificador estará entre 750°C - 900°C a una presión de trabajo de 1 atm.
- El estado de fluidización $1.2 \leq \mu_0 / \mu_{mf} \leq 6$.
- Se considera el sistema en estado estacionario e isotérmico debido a la homogeneidad que otorga el lecho fluidizado.
- La volatilización de la biomasa se supone instantánea, incluyéndola a la entrada del lecho, estando formado fundamentalmente por H_2 , O , CO_2 , H_2O , CH_4 . Estas especies se distribuyen uniformemente dentro del gas en fase de emulsión.
- Definir las correlaciones empleadas para el cálculo de las fracciones másicas.

A través del modelado matemático se podrá obtener la composición de salida de cada especie a partir de introducir la composición de entrada de cada especie (H_2 , N_2 , O_2 , CO , CO_2 , H_2O , CH_4 , C). Por lo tanto, con los pesos moleculares de cada especie y la definición de los parámetros de funcionamiento se podrá calcular el gasto (moles/seg) de entrada de cada especie.

Para validar los resultados del modelo de equilibrio se realizaron simulaciones tomando como referencia las publicaciones de Yan y col., 1997, Petersen y col., 2004 y Corella y col., 1996 para definir los parámetros geométricos del gasificador y los rangos de las variables de operación. Así pues, se utilizará los parámetros geométricos de una instalación a escala comercial, proceso Winkler (Higman y col., 2003). Se realizaron simulaciones con el modelo de equilibrio bajo las mismas condiciones de operación en las que se han obtenidos los resultados experimentales, con el fin de comparar los órdenes de magnitud de los resultados de las simulaciones con los resultados experimentales para una validación del modelo. En las Tabla 16,17 y 18 se presentan los resultados de las simulaciones junto con los resultados experimentales de la bibliografía.

Tabla 20: Condiciones de las experiencias realizadas.

T [°C]	760	785	780	820
ER	0,23	0,24	0,29	0,31
μ_0/μ_{mf}	1,2	1,3	1,2	1,2

ER: Equivalence Ratio

Tabla 21: Resultados obtenidos de la experiencia.

Resultados experimentales				
CH₄ (vol %, base seca)	CO (vol %, base seca)	H₂ (vol %, base seca)	PCI (MJ/Nm³)	Conversión de char (%)
7	9	12	5	79
7	10	11	4,7	86
5	13	10	4,5	85
5	14	9	4,6	85

Tabla 22: Resultados obtenidos de la simulación con el modelo de equilibrio propuesto.

Resultados modelo de equilibrio				
CH₄ (vol %, base seca)	CO (vol %, base seca)	H₂ (vol %, base seca)	PCI (MJ/Nm³)	Conversión de char (%)
8	9	36	7	36
6,5	10	36	6,9	36,8
6	12	37	6,7	37
5,2	13	37	6,5	39

De acuerdo al modelo de equilibrio, en lo que a composición de gas de síntesis, respecta, comparando órdenes de magnitud de los resultados de las simulaciones con los resultados experimentales, se puede apreciar un valor en la composición de H₂ tres veces superiores a los valores experimentales. Una posible respuesta a la alta composición de H₂ obtenido, puede estar en el método empleado para el desarrollo del modelo de equilibrio, el llamado método de relajación, de tal manera que es muy importante las reacciones consideradas y el orden de dichas reacciones para el desarrollo del modelo. Por lo tanto, una explicación al alto valor en la composición de H₂ en estos resultados puede ser a causa de considerar tres reacciones de gasificación que producen H₂, ordenadas en una posición que prevalecen sobre las demás reacciones de gasificación también consideradas. Sin embargo, en la tabla 1 se puede apreciar como el modelo de equilibrio presenta valores de composición de CO con un error de menor del 10% y valores de composición de CH₄ con un error entre 10%-20%, con respecto a los resultados experimentales.

De acuerdo al modelo de equilibrio, los resultados de conversión de char de las simulaciones no entran dentro de los rangos típicos de eficiencia en la conversión (60-90%), presentando errores algo mayores del 25% con respecto a los experimentales. Estos valores son inferiores a los resultados esperados en un proceso típico de gasificación de biomasa, pero al estar el modelo basado en los parámetros termodinámicos, la conversión obtenida puede considerarse elevada, y por lo tanto, es de esperar que tampoco coincidan.

Para concluir, como era de esperar los valores PCI obtenidos de acuerdo al modelo de equilibrio, es algo superiores con respecto a los resultados experimentales debido a la alta composición de H₂ obtenido, puesto que el CH₄ y CO presentan valores de composición muy similares a los experimentales. No obstante, los valores de PCI están dentro de los valores típicos que se obtienen experimentalmente en procesos de gasificación de biomasa: 4-7 MJ/Nm³ (Mori y col., 1975).

Como conclusión, el modelo de equilibrio es una herramienta que arroja resultados coherentes de una manera relativamente sencilla y rápida, ya que las tendencias generales de los resultados en cuanto a composición de gas de síntesis, conversión de biomasa y PCI son muy similares a los resultados experimentales.

Los resultados de la composición de H₂ obtenidos con el modelo de simulación son superiores a los experimentales. El modelo de equilibrio presenta valores de composición de CO con un error menor del 10% y valores de composición de CH₄ con un error entre 10%-20%, con respecto a los resultados experimentales. Un aumento del Equivalence Ratio (ER) se traduce en aumentar la tendencia a combustión, obteniendo mayor cantidad de CO₂ (16%-20%) y menor cantidad de CO (6%-12%). De acuerdo al modelo de equilibrio, un aumento de la Temperatura en el proceso favorece la conversión de biomasa (37%-39%), una mayor producción de CO (6%-20%) y H₂ (33%-38%), y una disminución de CH₄ (3%-8%), en consecuencia, el PCI aumente ligeramente (6,95-7,06 MJ/Nm³) siendo positivo desde el punto de vista energético. Las condiciones óptimas teóricas de acuerdo al modelo de equilibrio son: T=900°C, ER=0,25; con un valor de PCI=7,06 MJ/Nm³ y una conversión de biomasa del 39,72%.

Para una posible mejora de acuerdo al modelo de equilibrio, se recomienda implementar mayor número de reacciones y realizar simulaciones con diferentes órdenes de reacción según el método de relajación empleado.

2.4.2 Evaluación técnica, económica y ambiental

Evaluación técnica

La planta piloto propuesta por la EEAOC, podría entregar anualmente 129,6 MWh considerando 360 días trabajados las 24 hs. Trabajando con RAC, se calcula un requerimiento anual de 741 rollos de RAC de 350 kg que equivale al RAC recolectable, presecado a campo de 25 ha de caña. Se estima que el consumo específico de biomasa será de 2 kg/kWhe.

A continuación se realiza una estimación de la energía eléctrica que se podría producir en Tucumán a partir de la gasificación de los residuos agrícolas de la cosecha en verde de la caña de azúcar. La estimación se efectúa sobre la base de la superficie cultivada actual y los rendimientos culturales promedios para Tucumán (226.000 ha y 65 t/ha). El RAC potencial total se estima en toneladas de materia seca residual sobre la base de 150 [kg de RAC seco/t de caña molible]. El RAC utilizable para generación de energía se estima asumiendo que se recoge el 55% del total disponible. Los resultados de la estimación se presentan en la Tabla 23.

Este simple análisis nos muestra el gran potencial que tiene la Provincia de Tucumán para generar energía eléctrica (2.747.030 MWh/año) a partir del proceso de gasificación de los residuos agrícolas de la cosecha de la caña de azúcar (RAC). Este resultado representa 1,3

veces la energía consumida por la Provincia durante el 2007 de 2.149.450 MWh/año según D´Boeck, et al., 2009.

Tabla 23: Resultados de la estimación de energía eléctrica a producir en Tucumán a partir de la gasificación.

Parámetro	Valor	Unidad
Superficie Caña	226.000	ha
Rend. Cultural	65	t/ha
Caña molida	14.690.000	t de caña/año
RAC %Caña	20%	%Caña
Cantidad RAC	2.938.000	t de RAC/año
%humedad RAC	15%	%
Total RAC seco Tucumán	2.497.300	t de RAC/año
%RAC aprovechable	55%	
Total RAC seco Tucumán recolectable	1373.515	t de RAC/año
Total RAC seco Tucumán recolectable	1.373.515.000	kg de RAC/año
Consumo específico Planta Gasificación	2	kWhe/kg
Horas operación Planta Gasificación	24	h
Días operación Planta Gasificación	360	días
Energía Eléctrica Producida	2.747.030.000	kWh/año
	2.747.030	MWh/año
Consumo Tucumán (EPRET 2007)	2.149.450	MWh/año

Evaluación económica

La confección de fardos a partir de residuo agrícola de cosecha (RAC) de maloja de caña de azúcar es una actividad incipiente en la región, por lo que la información disponible es escasa. Es por esto que, para estimar el costo, se emplearon valores reales y teóricos de: tiempos operativos, consumos y requerimientos de mano de obra. Cabe aclarar que los valores reales corresponden a datos de ensayos y a información del único contratista que ofrece este servicio en la provincia de Tucumán.

En la Tabla 24 se detallan las inversiones necesarias para armar un frente de recolección de RAC.

Tabla 24: Inversión necesaria para la recolección de RAC.

Equipo	Valor
Tractor 80	\$ 40.000
Hileradora	\$ 900
Tractor 170	\$ 132.000
Megaenfardadora	\$ 175.000
Casilla	\$ 1.200
Camioneta	\$ 15.000
Inversión Total	USD 364.100

Utilizando el mismo método de manejo del RAC se evaluaron los distintos costos operativos de recolección, carga y transporte. El análisis de costo se realizó sobre la base de 50 toneladas de RAC. Los costos que se tuvieron en cuenta fueron:

- Costo de recolección.
- Costo de cargado.
- Costo de transporte.

Los resultados se muestran en la Tabla 25.

Tabla 25: Comparación de costos operativos de manejo de RAC con distintos países.

	Argentina (*) (Tucumán)	Brasil (**)	Colombia (***)
Recolección (US\$/t)	4,67	4,54	
Cargado (US\$/t)	2,14	1,94	
Transporte (US\$/t)	3,25	3,13	
TOTAL (US\$/t)	10,06	9,61	7,4 – 11,7

(*) Fuente: EEAOC – Sección Ingeniería y Proyectos / Argentina.

(**) Fuente: CTC – Manoel Regis L. V. Leal / Brasil.

(***) Fuente: CENICANA – James Cock – Carlos O. Briceño – Jorge Torres / Colombia.

Evaluación ambiental

Para la evaluación de impacto ambiental se realizó en primera instancia, una lista de acciones del proyecto identificadas.

- Obtención de RAC – Cosecha de caña
- Secado a campo
- Rotoenfardado
- Transporte a Ingenio
- Picado y acondicionamiento de RAC
- Generación de energía

Para la valoración de impactos se utilizó el análisis matricial, que surge de la relación entre las distintas acciones del proyecto y del ecosistema afectado, obteniéndose una Matriz General, donde comienzan a identificarse los efectos sobre el medio receptor, destacándose el carácter de los mismos.

En la Matriz General se identificaron cuales serán los factores del medio receptor que serán afectados, según el grado de susceptibilidad ante las acciones del proyecto, obteniéndose un cuadro donde se caracterizaron los impactos de acuerdo a las relaciones causa - efecto determinadas en la matriz general. Consiguiendo de este modo, el cuadro de valoración de incidencia de los impactos producidos. Consecuentemente se procedió a la fase de valoración de los impactos generados por las acciones del proyecto según su magnitud y el grado de incidencia. La magnitud, representa la cantidad y la calidad del factor modificado. La incidencia se refiere, en cambio, al grado o intensidad de la alteración producida.

El valor del impacto ambiental es función de la magnitud del mismo y de su incidencia con su signo correspondiente.

Se adoptó la escala entre 1 y 10 para la Intensidad de la Incidencia y entre 0 y 1 para expresar los valores obtenidos en todos los análisis planteados para la magnitud.

El signo es negativo (-) para todos los efectos negativos y positivo (+) para los efectos beneficiosos que ocasiona el proyecto.

Análisis de los Resultados y Conclusiones

En la evaluación de impactos se consideraron dos escalas para los impactos negativos y una para los positivos.

• Impactos Negativos

Salvo en los factores de incremento de nivel de ruido y del tránsito vehicular, la gran mayoría presentan una valoración menor que 6, por lo que pueden considerarse irrelevantes. Índice de Impacto menor que 6, se consideran de poca relevancia. Índice de Impacto mayor o igual que 6 se consideran significativos y están sujetos a medidas de mitigación en caso de ser posible.

• Impactos Positivos

Se identificaron en total 43 impactos positivos, la mayoría están relacionados con el factor socio económico, debido a la dinamización de los sectores productivos, la toma de mano de obra, los aportes al sector público y la aceptabilidad social del proyecto con criterios ambientales de producción limpia. Respecto al proceso agrícola se valora la alternativa de utilizar el RAC como biocombustible disminuyendo sensiblemente la quema de caña.

De esta manera el proyecto contempla la minimización de los impactos ambientales más significativos, maximizando los beneficios económicos y ambientales.

En síntesis, el proyecto plantea una alternativa que se valora como muy positiva desde el punto de vista de la minimización de los impactos ambientales, para este tipo de proceso, con aplicación de una producción más limpia. Desde el punto de vista socio económico se evalúa como muy favorable, toda vez que propicia la ocupación de mano de obra.

Respecto de los impactos negativos Identificados, se deben gestionar de acuerdo a los lineamientos del PGA planteados en el apartado siguiente.

Plan de Gestión Ambiental (PGA)

Se estructuró de acuerdo a las diferentes Acciones del proyecto, considerando los impactos negativos más significativos identificados.

Medidas de Prevención y Mitigación

-Implementación de un plan de manejo de insumos y combustibles que establezca las medidas para el almacenamiento y manejo seguro de los mismos.

-Implementación de un plan de monitoreo y control de los niveles de ruido ambiente.

Otras Recomendaciones:

-Se recomienda interactuar con la comunidad, mediante programas de información, en particular en lo referente a la gestión ambiental de la empresa y los conceptos de producción limpia aplicados, para difundir las acciones implementadas y fomentar actitudes responsables respecto del cuidado del medio ambiente.

-Se recomienda la implementación de un plan de seguridad que incluya toda la señalización correspondiente para evitar la ocurrencia.

2.4.3 Puesta en marcha del gasificador piloto en Cuba

La puesta en marcha del gasificador se llevo a cabo durante los meses de abril, mayo y junio del año 2016 en el ICIDCA, Cuba, con la participaron de investigadores cubanos, luego de haber tenido en la EEAOC, Argentina, la experiencia necesaria para tal fin. Las misiones a Argentina fueron realizadas en dos oportunidades, en junio de 2015 viajo Francisco Diez Torres y en marzo de este año viajo el Dr. Mauricio Ribas García. Este ultimo junto al Dr. Raul Sabadi Díaz, y los ingenieros José A. Perez Hernández y Juan Fernandez estuvieron presentes en los ensayos.

El gasificador es del tipo lecho fluidizado, de aproximadamente 6 metros de altura y 990 mm de diámetro construido con chapa de acero 1020 de 3/16 "de espesor y revestido con material refractario y aislante.

La biomasa utilizada fue bagazo de caña (residuo de la industrialización de la caña) que fue lo que tenían disponible en esa fecha para realizar los ensayos.

El sistema de alimentación de la biomasa se compone de un silo inferior, un transportador de tornillo sin fin, un silo superior, una válvula rotativa, y un tornillo sin fin de alimentación principal.

El calentamiento del lecho hasta el estado denominado autosustentado (en el que el proceso se mantiene sólo por el control del suministro de la biomasa y el aire en el reactor) se realiza a través de un quemador que es uno de los componentes del sistema de partida.

El sistema de limpieza de gas consiste en un ciclón, un lavador Venturi y dos separadores ciclónicos, que tienen por objetivo eliminar o reducir las partículas y el alquitrán presente en el gas.

El proceso de gasificación es controlado por las lecturas de temperatura en todo el gasificador y por los flujos de aire y de biomasa. Siendo que se trata de un proceso muy dinámico con cambios extremadamente rápidos en ciertos momentos, es necesario utilizar un sistema de adquisición de datos, donde los valores de las pruebas pueden ser registrados y analizados más adelante.

La Tabla 26 presenta las condiciones operacionales del reactor y la composición del gas obtenido para el gasificador operando con bagazo de caña de azúcar

Tabla 26: Resultados del ensayo.

Biomasa	Bagazo de caña
Temperatura del lecho (°C)	700
Consumo de combustible (kg/h)	134
Flujo de aire (m ³ /h)	126
Factor de aire	0,2
Velocidad superficial (m/s)	0,56
Elemento	Composición
CO (Vol. %)	14,4
CH ₄ (Vol. %)	3,2
H ₂ (Vol. %)	1,3
PCI (MJ/Nm ³)	3,1

Esas condiciones fueran impuestas al reactor para el análisis de la concentración de alquitrán y partículas en el gas. El procedimiento y el análisis de alquitrán y partículas presentes en el gas es el gravimétrico.

La Tabla 27 muestra el contenido de alquitrán y partículas de gas.

Tabla 27: Contenido de alquitrán y partículas.

	Bagazo de caña
Alquitrán (g/Nm ³)	117,8
Partículas (g/Nm ³)	16,68

La tecnología de gasificación de lecho fluidizado requiere una serie de cuidados para poder ser implementada con éxito. Sin embargo, debe prestar especial atención al sistema suministro de combustible, ya que de él depende el control de temperatura del lecho. Al ocurrir variaciones bruscas de temperatura, y su aumento repentino, puede ocurrir el colapso del lecho por aglomeración y/o sinterización.

El gasificador de lecho fluidizado puede operar con diferentes tipos de biomasa de baja granulometría, pero el sistema de alimentación debe ser adecuado a las características de cada uno.

El poder calorífico del gas obtenido es coherente en gasificadores de este tipo de acuerdo con diferentes autores. El porcentaje de H₂ en el gas fue ligeramente inferior a lo esperado, pero el CO y CH₄ mantuvieron valores coherentes.

3 Conclusiones

Este proyecto permitió ampliar el conocimiento sobre la tecnología de gasificación y completar el equipamiento de la primera y segunda etapas de la planta piloto de gasificación de la EEAOC, además de establecer estrechas relaciones con colegas de ICIDCA y UNIFEI que trabajan en la temática. Asimismo, nos permitió visitar el CIEMAT, y el CEDER en España, con experiencia en gasificadores de mayor capacidad.

Cabe aclarar que no se contó con algunos equipos que estaban previstos ser financiados por otros proyectos, razón por la cual sólo se pudieron realizar ensayos preliminares.

Consideramos que este proyecto debería continuar habida cuenta que los ensayos realizados no fueron suficientes para validar la metodología.

-----0-----