



UNIVERSIDAD
DE PIURA

REPOSITORIO INSTITUCIONAL
PIRHUA

INSTALACIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE UN GASIFICADOR DE LECHO FLUIDIZADO

Pedro Alegría-Castellanos

Piura, enero de 2017

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Mecánico-Eléctrica

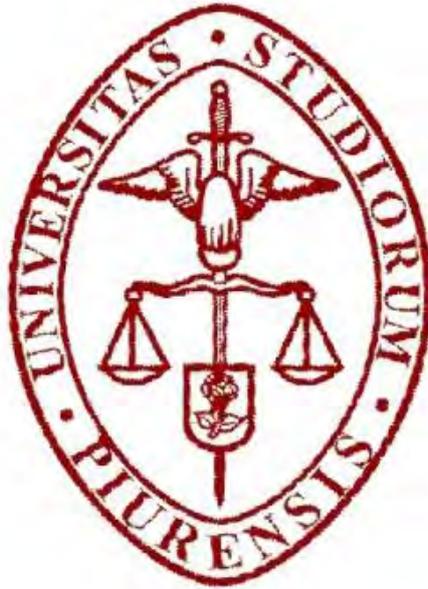
Alegría, P. (2017). *Instalación y puesta en marcha de un gasificador de lecho fluidizado* (Tesis de pregrado en Ingeniería Mecánico-Eléctrica). Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Mecánico-Eléctrica. Piura, Perú.



Esta obra está bajo una [licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Perú](#)

[Repositorio institucional PIRHUA – Universidad de Piura](#)

UNIVERSIDAD DE PIURA
FACULTAD DE INGENIERÍA



“Instalación y puesta en marcha de un gasificador de lecho fluidizado”

Tesis para optar el Título de
Ingeniero Mecánico - Eléctrico

Pedro Jesús Alegría Castellanos

Asesor: Dr. Ing. Edilberto Vásquez Díaz

Piura, Enero 2017

**A Dios; a mi padre, quien me enseñó a
nunca rendirme; a mi madre, quien siempre
creyó en mis capacidades; y a mis
hermanos.**

Prólogo

El objetivo de este trabajo es el de detallar el proceso de instalación del gasificador de lecho fluidizado burbujeante en el campus de la universidad y el protocolo de puesta en marcha del mismo.

La instalación y puesta en marcha de este sistema es el primer paso para poder realizar estudios propios en la universidad sobre producción de gas empleando hoja de caña de azúcar de la región. Más adelante, en otros trabajos sobre la planta experimental, se realizarán estudios acerca de producción de energía.

Resumen

En el presente trabajo se mantiene como objetivo principal la exposición de la instalación del gasificador de lecho fluidizado burbujeante en el campus de esta universidad, el protocolo de puesta en marcha del sistema total de gasificación y concluir mencionando las similitudes entre los resultados de temperatura previstos en investigaciones anteriores con los obtenidos en esta tesis.

Se realiza primero un análisis sobre el porqué con los años viene siendo importante estudiar sistemas de aprovechamiento de biomasa para la generación de energía limpia. Se hará mención a trabajos previos a este, sobre el diseño del gasificador a instalar, para luego iniciar con la descripción de cada dispositivo que lo conforma. Teniendo completa la planta experimental, mediante razonamiento y pruebas, con el equipo de colaboradores del proyecto ideamos el protocolo de puesta en marcha del sistema. Definido el protocolo se realizaron las pruebas finales y se muestran los resultados obtenidos.

Por diseño se tiene de forma teórica los valores de temperatura de salida del gas producto de la gasificación. Como conclusión se llegaría a determinar hasta qué punto se igualan o difieren los valores teóricos con los obtenidos de pruebas.

Índice

Prólogo	vii
Resumen	ix
Índice	xi
Introducción.....	1
Capítulo I.....	3
Aspectos generales.....	3
1.1. El desarrollo industrial y su impacto ambiental en el mundo.....	3
1.2. El dilema de las energías renovables	4
1.3. Biomasa	5
1.4. Proceso de transformación de la biomasa.....	7
1.4.1. Procesos biológicos	7
1.4.2. Procesos termoquímicos.....	7
1.5. Gasificadores de biomasa	9
1.5.1. Tipos de gasificadores de biomasa.....	10
1.5.1.1. Gasificadores de lecho fijo	10
1.5.1.2. Gasificadores de lecho fluidizado.....	11
1.5.1.3. Gasificadores de lecho arrastrado	11
Capítulo II.....	13
Instalación e instrumentación	13
2.1. Modelo del dimensionamiento	13
2.2. Diseño del soporte para el cuerpo del gasificador	18
2.3. Preparación del espacio de la planta experimental	22
2.4. Modificaciones al gasificador previas a su instalación.....	28

2.5. Instalación subsistema gasificador junto con soporte y cubierta aislante.....	30
2.6. Instalación tableros del equipamiento del gasificador.....	33
2.6.1. Instalación tablero de energía principal y sensores de temperatura.....	34
2.6.2. Instalación tablero de adquisición de datos.....	40
2.6.3. Instalación tablero del soplador.....	44
2.7. Instalación de subsistemas de funcionamiento externo.....	45
2.7.1. Instalación subsistema Soplador.....	45
2.7.2. Subsistema dosificador de biomasa.....	47
2.7.3. Subsistema del quemador.....	51
2.8. Sistema de monitoreo y control remoto.....	53
2.9. Planta gasificador de lecho fluidizado instalada.....	54
2.9.1. Equipamiento auxiliar.....	54
2.10. Teoría general de algunos dispositivos empleados en la instalación.....	57
2.10.1. Llaves Termo-magnéticas.....	57
2.10.2. Termocuplas.....	58
2.10.3. RTD.....	58
2.10.4. Interruptores Diferenciales.....	60
2.10.5. Variador de frecuencia.....	62
Capítulo III.....	63
Puesta en marcha de la planta experimental de gasificación.....	63
3.1. Descripción del proceso.....	63
3.2. Protocolo de puesta en marcha.....	65
Capítulo IV.....	81
Pruebas del sistema y resultados.....	81
4.1. Indicaciones.....	81
4.2. Pruebas realizadas con subsistemas por separado.....	81
4.2.1. Experimentando con subsistema de alimentación de biomasa.....	81
4.2.2. Experimentando con subsistema de fluidización.....	85
4.2.3. Experimentando con subsistema quemador.....	86
4.3. Prueba de planta experimental de gasificador de lecho fluidizado.....	88
4.3.1. Primer espacio temporal de funcionamiento.....	92
4.3.2. Segundo espacio temporal de funcionamiento.....	94
4.3.3. Tercer espacio temporal de funcionamiento.....	96

4.3.4. Cuarto espacio temporal de funcionamiento	96
4.3.5. Quinto espacio temporal de funcionamiento	99
Conclusiones.....	101
Referencias	103
Anexo A.....	105
Anexo B.....	109
Anexo C.....	111

Introducción

La gasificación es un tema que se viene estudiando ampliamente desde hace varias décadas, en distintas partes del mundo, mas no es el caso de nuestro país. Los gasificadores son dispositivos los cuales su uso, con el diseño y logística de recursos apropiada, conllevan a disminuir emisiones contaminantes, reducir costos en producción de energía y disminuir costos en tratamiento de desechos. Todas estas ventajas son las principales a mencionar y son las que en estos tiempos permanecen en tendencia debido a la proliferación de campañas concernientes a producción de energía limpia y sustentable.

En el primer capítulo se muestra un panorama general sobre la contaminación, el uso de energías renovables, biomasa y los procesos que conlleva la gasificación. Se termina hablando sobre los tipos de gasificadores remarcando el uso de gasificadores de lecho fluidizado.

En el segundo capítulo es mostrado, utilizando investigaciones anteriores, los parámetros que guían al cálculo teórico de las dimensiones del gasificador a ser instalado. Luego se procede de forma detallada a explicar cada uno de los dispositivos que conforman la planta experimental con su respectiva instalación.

En el tercer capítulo es detallado el protocolo de puesta en marcha del sistema total y las recomendaciones que, por experiencia, son requisitos para llevar al reactor a cumplir con su objetivo.

En el cuarto capítulo se exponen los resultados de probar cada uno de los subsistemas conformantes de la planta experimental. Este capítulo concluye con el análisis de datos obtenidos de la última prueba realizada hasta la fecha de presentación de esta tesis con los cuales se analizará la semejanza con lo predicho por teoría.

Capítulo I

Aspectos generales

1.1. El desarrollo industrial y su impacto ambiental en el mundo

Desde la segunda mitad del siglo pasado, el desarrollo intensivo de la industria -cuya matriz está basada en los combustibles fósiles (petróleo y sus derivados)- viene ocasionando graves alteraciones al ecosistema de la tierra; impactando directamente en la calidad de vida de todos sus habitantes.

El dióxido de carbono (CO₂), principal residuo de los combustibles fósiles, se encuentra en cantidades abundantes en la atmósfera terrestre, y está causando el calentamiento global. Según Antonio Brack Egg, éste es “un fenómeno consistente en una alteración del sistema climático planetario, definida básicamente por un aumento en la temperatura mundial promedio. La causa de esta alteración debemos buscarla en un creciente desbalance de los gases que forman la atmósfera, y más específicamente, en el incremento de ciertos gases –los denominados gases de efecto invernadero-, como consecuencia de las actividades humanas”¹.

El secretario general de la Organización de Naciones Unidas (ONU), Sr. Ban Ki-moon, declaró en el año 2014, que el primer problema entre todos los del mundo “es el cambio climático”². Este criterio, junto con la erradicación de la pobreza extrema y el combate a la desigualdad y la injusticia, se mantiene como línea maestra para alcanzar los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible, que los líderes y gobernantes de todo el mundo, el 25 de setiembre del 2015, se comprometieron ante la ONU, en incorporarlos en sus respectivas políticas de Estado. El objetivo 7 (Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos) establece las siguientes metas:

¹ Brack, A., (2004). *Ecología*. Perú: Empresa editora El Comercio S.A.

² Lomborg, L., (2014, 01 de octubre). Reconocer prioridades verdaderas. ¿Luchar contra el cambio climático o contra la pobreza? *El Comercio*, p. A20.

- Para 2030, garantizar el acceso universal a servicios de energía asequibles, confiables y modernos.
- Para 2030, aumentar sustancialmente el porcentaje de la energía renovable en el conjunto de fuentes de energía.
- Para 2030, duplicar la tasa mundial de mejora de la eficiencia energética.
- Para 2030, aumentar la cooperación internacional a fin de facilitar el acceso a la investigación y las tecnologías energéticas no contaminantes, incluidas las fuentes de energía renovables, la eficiencia energética y las tecnologías avanzadas y menos contaminantes de combustibles fósiles, y promover la inversión en infraestructuras energéticas y tecnologías de energía no contaminante.
- Para 2030, ampliar la infraestructura y mejorar la tecnología para prestar servicios de energía modernos y sostenibles para todos en los países en desarrollo, en particular los países menos adelantados, los pequeños Estados insulares en desarrollo y los países en desarrollo sin litoral, en consonancia con sus respectivos programas de apoyo³.

1.2. El dilema de las energías renovables

El reto asumido por los países signatarios de la ONU, entre los que se encuentra el Perú, de dar cumplimiento a los objetivos de desarrollo sostenible, y, en particular el objetivo 7, ha generado un dilema moderno en el campo energético: renovable versus no renovable. Es pertinente diferenciar ambas fuentes; así, “una fuente no renovable de energía (ENR) es aquella que procede de un yacimiento que se agota en la medida en que de él se va extrayendo el material energético”⁴, a manera de ejemplo citamos los tres combustibles fósiles más empleados: el petróleo, el gas natural y el carbón mineral. Asimismo, “Las energías renovables (ER) son, en cambio, reproducibles a partir de mecanismos meteorológicos o biológicos. Esto significa que la propia naturaleza se encarga de reponer o reproducir la energía consumida”⁵; ejemplos de ER son las energías solar, hidráulica, eólica, geotermal y de biomasa.

El problema del calentamiento global es real; sin embargo, para muchos gobernantes y empresarios, no es una prioridad mundial, comparado con verdaderas urgencias con las cuales se enfrentan la mayoría de países. Al respecto, Lomborg (2014) expresa que “Un nuevo estudio del Centro para el desarrollo Global muestra crudamente el costo de impulsar las energías renovables. Gastar US\$10 mil millones en energías renovables en África puede sacar a 20 millones de las tinieblas y de la pobreza. Pero gastar 10 mil millones en gas sacaría a 90 millones. Insistir en las energías renovables significa dejar deliberadamente a 70 millones de personas en la oscuridad”.

³ Objetivos de desarrollo sostenible. (2016, 17 de noviembre). Recuperado 07:53, setiembre 27, 2016, de Wikipedia, Enciclopedia Libre: https://es.wikipedia.org/wiki/Objetivos_de_Desarrollo_Sostenible

⁴ Marticorena, B. (2004). *Ciencia y tecnología – La energía*. Perú: Empresa editora El Comercio S.A.

⁵ Loc. Cit.

En este dilema energético, también hay posiciones a favor. Una de ellas es la de Bill Gates, el multimillonario filántropo y socio fundador de la multinacional Microsoft, quien planea duplicar su inversión personal en innovadoras tecnologías verdes a US\$2 mil millones durante los próximos cinco años. En una entrevista con el Financial Times, declaró que había invertido directamente en unas quince empresas e indirectamente en otras treinta, a través de fondos de capital de riesgo; y, esperaba que en los próximos cinco años exista una buena probabilidad de que se duplique su inversión. Gates declaró que “la única manera de alcanzar el escenario inmensamente positivo es a través de una gran innovación. La innovación realmente ‘dobla la curva’⁶”. La apuesta de Gates es invertir en la I+D de energías renovables durante los próximos años, para identificar fuentes confiables de energía “cero carbono”, que puedan explotarse a escala y compara la búsqueda de tecnologías renovables con los comienzos de la industria tecnológica: “Si yo te hubiera hablado sobre el software a finales de 1970, te hubiera dicho: ‘Escúchame, alguien va a ganar mucho dinero’. Si hubieses escogido Microsoft, Apple o Google habrías ganado mucho dinero”⁷.

1.3. Biomasa

El Ministerio de Energía y Minas del Perú en el Balance Nacional de Energía del año 2014, define a la biomasa como aquella "materia orgánica no fósil de origen biológico que puede ser utilizada con fines energéticos para la producción de calor y algunas veces también de electricidad. Bajo este concepto se agrupan el bagazo, la bosta, la yareta y los residuos agrícolas.”⁸

La composición de la biomasa presenta, principalmente, carbono, oxígeno, hidrógeno, algo de nitrógeno y una cantidad variable de cenizas, desde muy baja (inferiores a un 0,5% p/p) en los combustibles de tipo maderero, hasta muy alta (cerca al 50% p/p) para algunos residuos. Generalmente, los contenidos de azufre son muy bajos, comparados con el carbón. Estas características, favorecen su empleo como fuente de energía, por su reducida emisión de gases de efecto invernadero; asimismo, su bajo costo contribuye con las economías locales.

Una de las principales desventajas para el empleo intensivo de la biomasa es su baja producción por unidad de área, lo cual eleva los costos vinculados a su acopio y transporte desde el lugar de origen hasta el punto de consumo [1]; situación que obliga a maximizar la eficiencia de los procesos de los sistemas basados en biomasa y considerar los reducidos márgenes de utilidad económica.

⁶ Adams, C., Thornhill, J., (2015, 29 junio). Bill Gates duplicará inversión en energía renovable. *El Comercio, Día.1*, p. 23.

⁷ Loc. Cit.

⁸ Ministerio de Energía y Minas del Perú. (2016). Balance Nacional de Energía 2014. Consultado el 18 de noviembre de 2016, de: <http://www.minem.gob.pe>.

Hasta hace solo 150 años, la principal fuente de energía que se consumía en el mundo era la biomasa, en forma de leña, para usos domésticos y de pequeñas industrias. Hacia 1920 el consumo relativo de biomasa en el mundo disminuyó fuertemente, y en la misma proporción aumentó el consumo de carbón, el cual fue luego reemplazado por el petróleo. A partir de 1980, la matriz energética mundial se ha diversificado con otras fuentes como la nuclear, el gas natural y la hidroelectricidad.

Actualmente, el panorama energético del Perú, en términos generales, es bastante favorable por la diversidad de fuentes disponibles. En el caso de las energías renovables, la biomasa (leña, bagazo, bosta y yareta) ocupa el primer lugar, delante de la hidroenergía y la energía solar; tal como se puede apreciar en la Tabla 1.1 y Figura 1.1, siguientes:

Tabla 1.1. Producción de energía primaria (en tera joules TJ)

FUENTE	2013	2014	VARIACIÓN (%)
Energía Comercial			
Gas Natural + LGN ^a	695 787	718 972	3
Petróleo Crudo	132 930	146 479	10
Hidroenergía	100 389	99 899	-,5
Carbón Mineral	5 752	6 175	7
Subtotal	934 859	971 524	4
Energía No Comercial			
Leña	81 640	81 313	
Bagazo	20 405	21 520	5
Bosta & Yareta	7 990	7 701	-4
Energía Solar ^{69b}	1 019	1 052	3
Subtotal	111 055	111 586	0
TOTAL	1 045 913	1 083 111	4

Fuente: Balance Nacional de Energía 2014. MEM.

^a Producción fiscalizada

^b Estimado

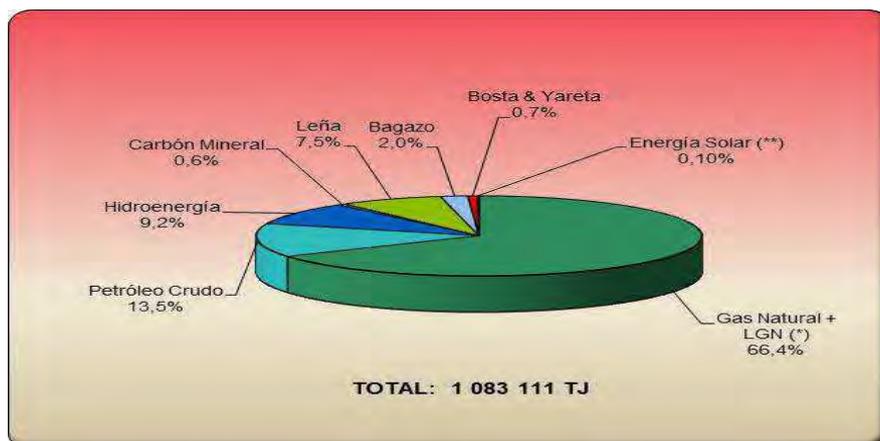


Figura 1.1. Estructura de la producción de energía primaria: 2014
Fuente: Balance Nacional de Energía 2014. MEM.

1.4. Proceso de transformación de la biomasa

La biomasa se encuentra en la naturaleza en estado sólido, lo cual dificulta su manipulación y empleo. Para revertir esta condición se somete a la biomasa a diversos procesos que la convierten en portadora energética en estado líquido o gaseoso. Los procesos biológicos y termoquímicos se constituyen en los principales.

1.4.1. Procesos biológicos

La biomasa es sometida a la acción directa de microorganismos o de sus enzimas en general lo cual ocasiona una reacción conocida como fermentación. Este proceso se aplica en la producción de etanol o metano, ácidos orgánicos, alcoholes, cetonas y polímeros.

1.4.2. Procesos termoquímicos

La transformación química de la biomasa se produce cuando se le somete a altas temperaturas (300-1500°C). Cuando se calienta la biomasa se genera un proceso de secado y evaporación de sus componentes volátiles, seguido de reacciones de descomposición de sus moléculas (combustión, gasificación y pirolisis), dando como resultado la generación de calor, combustibles gaseosos, líquidos y sólidos; a partir de los cuales pueden producirse una gran variedad de productos secundarios, incluida la electricidad. [2]

Durante la combustión u oxidación, se transforma la energía química contenida en la biomasa en un gas con elevada temperatura y, por tanto, alto calor sensible; para esto, es indispensable poner la biomasa en contacto con un comburente, siendo el aire el más económico.

En la pirolisis, el calentamiento a altas temperaturas (200°C- 500°C) en ausencia de oxígeno que sufre la biomasa da lugar a su descomposición en tres fracciones:

- Sólida, consistente en carbono casi puro unido a cualquier material inerte que estuviese presente en los residuos (llamado coque de pirolisis). Es un residuo carbonoso que puede ser utilizado como combustible o para la producción de carbono activo.
- Líquida, consistente en un flujo de alquitrán o aceite que contiene metanol, hidrocarburos oxigenados complejos, ácido acético y acetona.
- Gaseosa, compuesto por hidrógeno, metano, monóxido de carbono y diversos gases en menor proporción (gases ligeros no condensables).

Finalmente, en la gasificación, la biomasa se somete a un conjunto de reacciones termoquímicas en un ambiente con presencia de oxígeno y en forma controlada; el cual da como resultado un gas combustible denominado “gas pobre” por su bajo contenido calórico. En realidad el contenido calórico y calidad del gas producto depende de este agente gasificante, la Figura 1.2 muestra los subproductos que se pueden obtener.

Los procesos termoquímicos descritos, presentan una serie de ventajas y desventajas, las cuales deben ser evaluadas para justificar su selección en concordancia con la aplicación final.

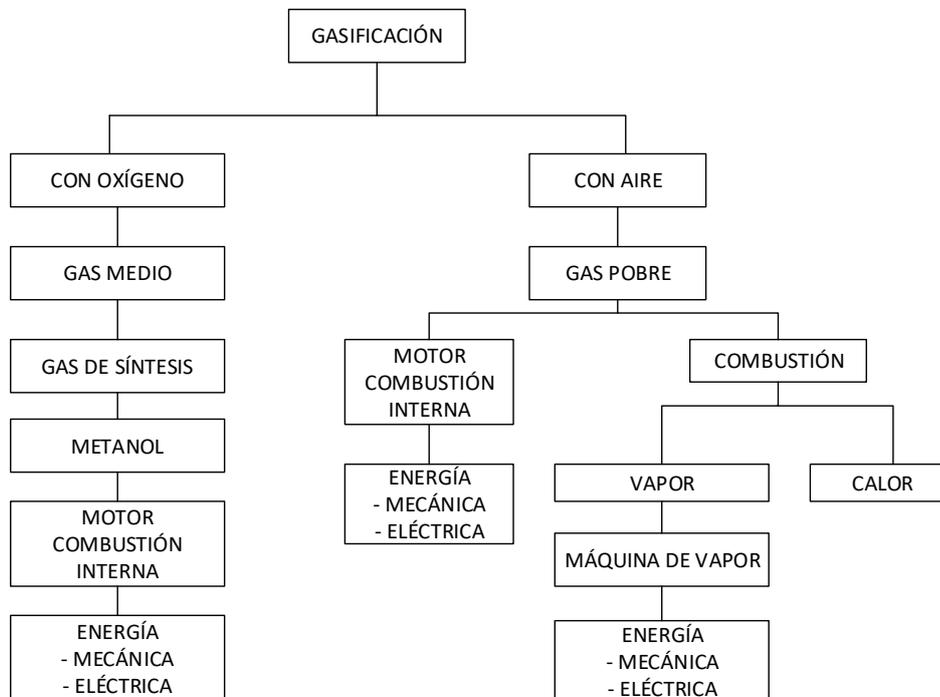


Figura 1.2. Diagrama de la porción de la gasificación y sus subproductos [3].

1.5. Gasificadores de biomasa

Un gasificador es fundamentalmente un reactor termoquímico donde tienen lugar los procesos de secado y pirolisis; combustión de volátiles y carbonizado; y, gasificación de carbonizado⁹. Según el tipo de gasificador, estos pasos van sucediendo en espacios diferenciados en el reactor (como ocurre en los lechos fijos) o de manera simultánea al interior del mismo (como sucede en los lechos fluidizados); de manera tal que, los distintos pasos no pueden distinguirse a simple vista.

En el inicio del proceso, el calentamiento de las partículas de la biomasa hace que la humedad se libere en forma de vapor. Simultáneamente, empieza el proceso de pirolisis, en el cual la materia sólida comienza a descomponerse o devolatilizarse, generando un residuo sólido carbonoso o carbonizado, gases condensables (hidrocarburos pesados) y gases no condensables (CO, CO₂, H₂, CH₄, O₂, N₂, hidrocarburos ligeros y H₂O). La distribución de estos productos dependerá de la tecnología empleada, la velocidad de calentamiento, la temperatura, la naturaleza de la biomasa y el tamaño de partícula del combustible.

Los gases condensables resultantes del proceso de pirolisis, pueden considerarse como alquitranes primarios, y generalmente se presentan en el gas de gasificación final [4]. El alquitrán ensucia y corroe los equipos, especialmente aquellos situados aguas abajo durante el proceso de enfriamiento del gas.

Las reacciones inducidas con oxígeno son exotérmicas y proveen de la energía suficiente para el secado, la pirolisis y las reacciones de gasificación y reformado, por medio de la combustión parcial de los volátiles y el carbonizado generados. La cantidad de oxígeno inyectado al gasificador depende de la tecnología empleada. Para gasificación directa, ésta se encuentra en el rango de un 15 y un 40% del oxígeno teórico requerido para la combustión completa.

En el proceso de gasificación del carbonizado se utiliza el calor sensible de los gases y del propio carbonizado para ocasionar las reacciones de gasificación heterogéneas, que son endotérmicas.

Se considera que en el proceso de gasificación existen tres etapas principales. El mismo proceso se llega a resumir en la Figura 1.3.

⁹ AGVE (2016, 20 de noviembre). Gasificadores de biomasa. Publicado en <http://www.agve.com.ar/biomasaqueesgasificador.php>

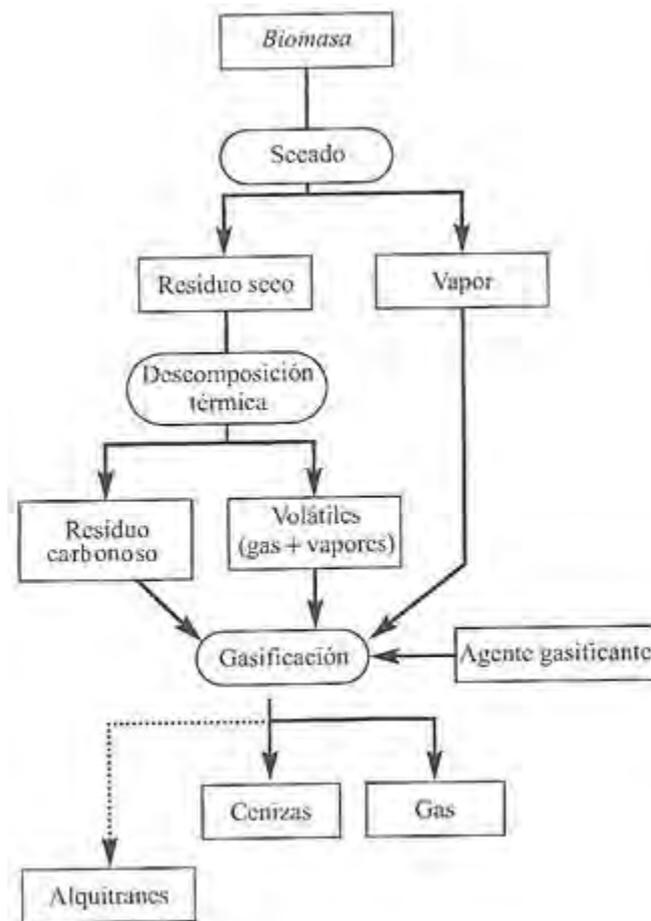


Figura 1.3. Esquema de proceso de gasificación [3].

1.5.1. Tipos de gasificadores de biomasa

Para la gasificación de biomasa se dispone en el mercado internacional de una amplia variedad de reactores. En la elección se deben de considerar una serie de factores, siendo los principales la granulometría de la biomasa residual, la humedad, el grado de pureza requerido del gas de síntesis o según el manejo del combustible.

1.5.1.1. Gasificadores de lecho fijo

En este tipo de gasificador la biomasa se mantiene estática dentro del reactor y mediante el proceso de pirolisis va consumiendo la totalidad de la carga. Dependiendo del sentido de las corrientes del combustible (biomasa) y agente gasificante, los gasificadores de lecho fijo se subdividen en:

- Gasificadores de flujo descendente: Las corrientes son paralelas. El sólido entra por la parte superior dando como resultado que el oxidante y el vapor arrastren las partículas de carbón a medida que fluyen a través del gasificador.
- Gasificadores de flujo ascendente: Las corrientes circulan en sentido opuesto. El sólido es introducido por la parte superior y desciende lentamente en contracorriente con el flujo del gas generado por la introducción de los agentes gasificantes (aire u oxígeno y vapor) por el fondo del gasificador [3].

1.5.1.2. Gasificadores de lecho fluidizado

En este tipo de gasificador el agente gasificante circula por el interior del reactor a una velocidad ascendente de tal forma que el lecho de sólido inerte se encuentra en estado de fluidificación, ocasionándose en el interior del reactor una retromezcla que facilita la transferencia de materia y energía entre el combustible y el gas. Existen dos categorías dentro de este tipo de gasificadores: los burbujeantes y los circulantes.

- Gasificadores de lecho fluidizado burbujeante: El agente fluidizante-gasificante genera una velocidad lo suficientemente baja tal que no provoca una circulación significativa de sólido.
- Gasificadores de lecho fluidizado circulante: El agente fluidizante-gasificante genera una velocidad mucho más elevada la cual ocasiona la circulación de sólidos. Este sólido se recircula al reactor mediante el empleo de un ciclón y un sistema de retorno al gasificador.

Las principales ventajas de los gasificadores de lecho fluidizado son: excelente control de la temperatura y las velocidades de reacción; alta capacidad específica; potencial de escalado a mayores tamaños; y, adaptación a cambios de biomasa. Contrariamente, presentan niveles moderados-altos de alquitranes y partículas en el gas de salida; y, la conversión del combustible no es tan elevada, si se compara con los gasificadores de lecho fijo.

1.5.1.3. Gasificadores de lecho arrastrado

Los gasificadores de lecho arrastrado operan, de manera similar con las calderas de carbón pulverizado. Funcionan en isocorriente con un tamaño de partícula muy fino, debido a que los tiempos de permanencia en el reactor son muy cortos. Las altas temperaturas de operación del reactor dan como resultado conversiones muy elevadas y la presencia de alquitrán en el gas de salida es prácticamente nula. Se dispone de poca experiencia en la aplicación de esta tecnología en la gasificación de biomasa [5].

En la Tabla 1.2 se resume el modo de contacto del sólido al interno del gasificador con el gas de acuerdo al tipo de gasificador.

Tabla 2. Modo de contacto de la biomasa con el gas [6].

T i p o	Modo de contacto sólido con el gas
Gasificador de lecho fijo (Flujo descendente)	El sólido y el gas circulan en la misma dirección descendente.
Gasificador de lecho fijo (Flujo ascendente)	El sólido y el gas circulan en dirección contraria. El sólido circula en dirección descendente y el gas circula en dirección ascendente.
Gasificador de lecho fluidizado (burbujeante)	La velocidad del gas es relativamente baja. Los sólidos inertes permanecen en el reactor. Un sólido inerte puede ser la arena.
Gasificador de lecho fluidizado (circulante)	Ocurre separación de sólidos en la corriente gaseosa. Los sólidos inertes son arrastrados, separados y recirculados al reactor.
Gasificador de lecho arrastrado	La velocidad del gas es alta. Normalmente no existen sólidos inertes, la alta velocidad del gas genera elevadas velocidades de transformación.

El gasificador a instalar dentro del campus de la universidad es de tipo fluidizado burbujeante. Por investigaciones previas se demuestra que es el más adecuado para ser implementado debido a las mejores prestaciones y características, como mezclado homogéneo y escalamiento.

Capítulo II

Instalación e instrumentación

2.1. Modelo del dimensionamiento

En el presente capítulo se abarcará el proceso de instalación del gasificador de lecho fluidizado dentro de la Universidad de Piura, la instalación de los equipos de adquisición de datos y la puesta en marcha para la producción de syngas.

El diseño del gasificador se realizó empleando el modelo teórico – práctico de tesis de maestría de Edgardo Olivares Gómez realizada en la Universidad Estatal de Campiñas, se usan ecuaciones de modelamiento como también la experiencia de Glauco Sanchez, Waldir Bizzo y De Souza Santos.

El modelo es el presentado en Figura 2.1 donde se muestra el lineamiento a seguir. Los parámetros principales del lineamiento son:

$\dot{Q}_{vb\max}$ → Capacidad máxima del gasificador

T_{ml} → Temperatura media del lecho

v_{sg} → Velocidad superficial del gas de fluidización

E_d → Demanda de energía del proceso

PCI_g → Poder calorífico inferior del gas

E_{mg} → Eficiencia media del gasificador

FA → Factor de aire, relación entre flujo de aire actual y estequiométrico

PCS_C^S → Poder calorífico superior del combustible en base seca

En la investigación de Jorge Estremadoyro [7] se encuentran explicados de manera minuciosa cada uno de los parámetros que rigen la obtención de las dimensiones del gasificador a construirse, junto con el ciclón para tratamiento de cenizas y el sistema de alimentación.

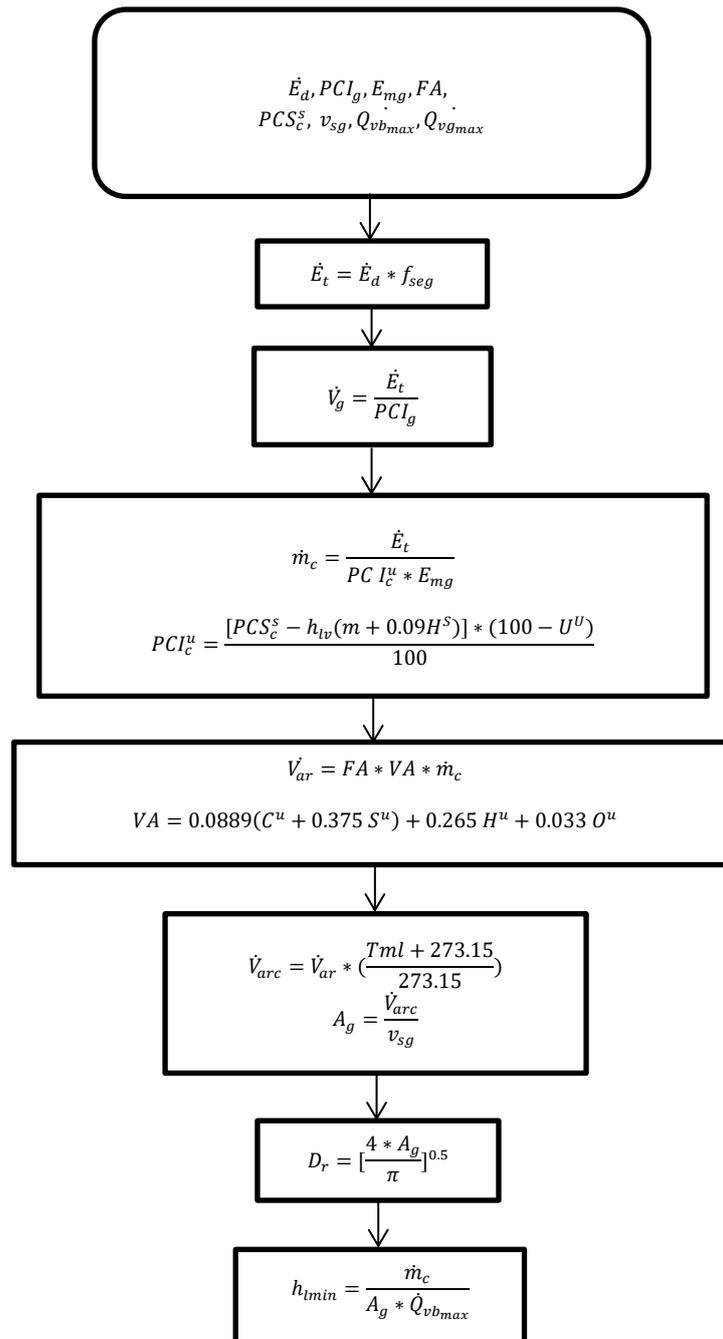


Figura 2.1. Lineamiento para cálculo de dimensiones del gasificador [7].

En la figura anterior, Figura 2.1, es observable como el diseño, y es de esperar, se basa tanto en requerimientos de trabajo buscados del dispositivo como de las características de la biomasa a utilizar. Con el método anterior se obtiene como resultado la altura mínima de fluidización y el diámetro interno del gasificador.

Las dimensiones del ciclón se obtienen a partir de relaciones de dimensión, Tabla 2.1, al emplear estas relaciones son conseguidas las dimensiones mostradas en la Tabla 2.2.

Tabla 2.1. Relaciones de dimensión para el ciclón [7].

Relaciones de dimensión	Valor del parámetro
k_a	0.44
k_b	0.21
k_s	0.5
k_{D_e}	0.4
k_h	1.4
k_H	3.9
k_B	0.4

Tabla 2.2. Dimensionamiento del ciclón [7].

Parámetro	Valor [m]
Altura de ducto de entrada al ciclón	0.0727
Ancho de ducto de entrada al ciclón	0.0347
Diámetro del cuerpo del ciclón	0.1652
Altura de la salida del ciclón	0.0826
Diámetro del tubo de salida del ciclón	0.0661
Altura de la parte cilíndrica del ciclón	0.2313
Altura total del ciclón	0.6443
Diámetro de la parte más estrecha del ciclón	0.0661

Por último con respecto a las propiedades del sistema de alimentación estas se detallan en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Propiedades teóricas del sistema de alimentación de biomasa [7].

Parámetro asumido	Valor
n	27 r.p.m.
ψ	0.25
γ	120 kg/m ³
c_a	1 (para roscas horizontales)

Los valores de los parámetros del sistema de alimentación fueron tomados en cuenta para el planeamiento de la instalación, mas no fueron empleados para la construcción del mismo debido a la posibilidad de construcción. Más adelante se mostrará el diseño del sistema de alimentación que se construirá.

Por lo tanto el dimensionamiento del sistema gasificador queda como se puede ver en la Figura 2.2.

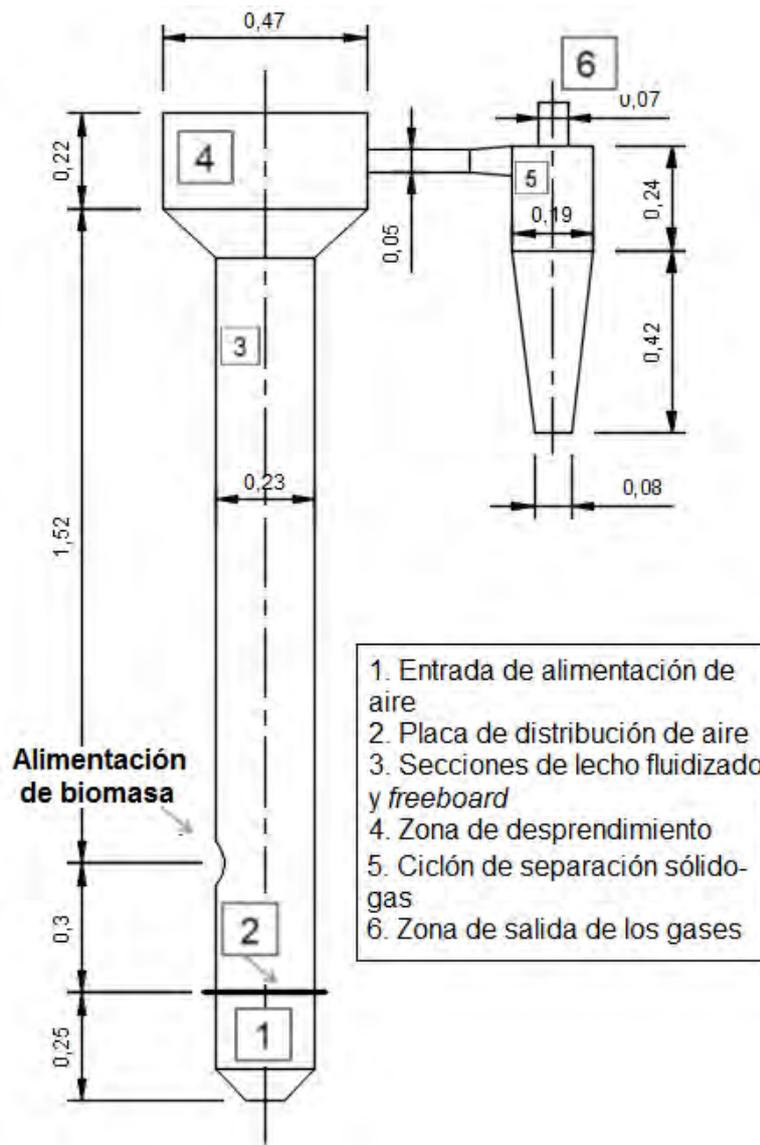


Figura 2.2. Plano del cuerpo del gasificador [7].

Debido a las altas exigencias en temperatura a las cuales será sometido y por la disponibilidad del material, el cuerpo del gasificador será construido de acero AISI 304. Este acero tiene como propiedades de interés ser inoxidable y con punto de fusión superior a los 1400 °C.

En Figura 2.3 y Figura 2.4 se tiene graficado el gasificador en SOLIDWORKS y una foto real del dispositivo construido con las especificaciones dadas, respectivamente.

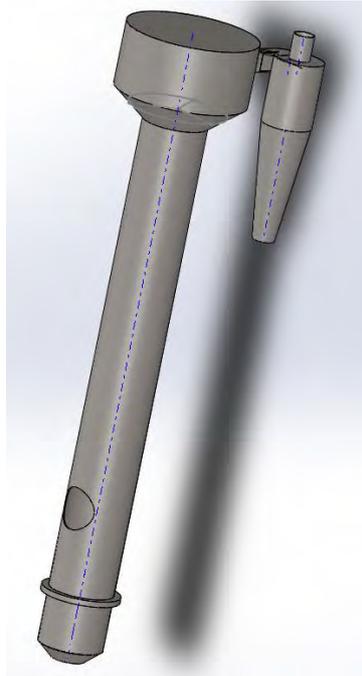


Figura 2.3. Cuerpo del gasificador en SOLIDWORKS.

Fuente: Foto tomada por tesista.



Figura 2.4. Cuerpo del gasificador real.

Fuente: Foto tomada por tesista.

2.2. Diseño del soporte para el cuerpo del gasificador

El gasificador requiere un soporte con el cual pueda mantenerse en posición vertical de tal forma que se puedan realizar de forma apropiada los procesos de fluidización, ingreso de biomasa y salida de syngas. El peso del dispositivo es de aproximadamente 90 kg, para mayor eficiencia en espaciamento un primer modelo con diseño sencillo de cuatro apoyos con tubos huecos de hierro de una pulgada sería la opción más adecuada. Considerando estas características se obtiene el diseño preliminar del soporte del gasificador, Figura 2.5. En la Figura 2.6 se tiene además, gracias al complemento “SOLIDWORKS Simulation”, el análisis de esfuerzos estáticos a los cuales se verá sometida la estructura una vez soporte al dispositivo gasificador.

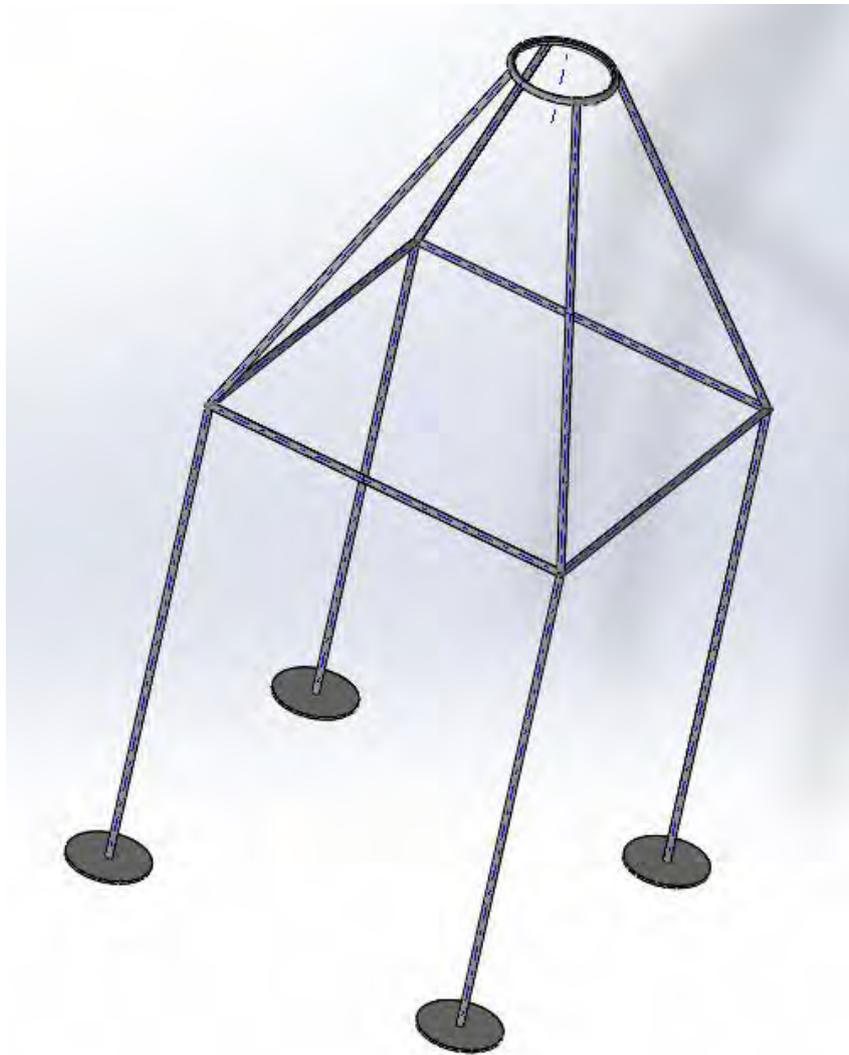


Figura 2.5. Diseño preliminar del soporte.

Fuente: Elaboración propia.

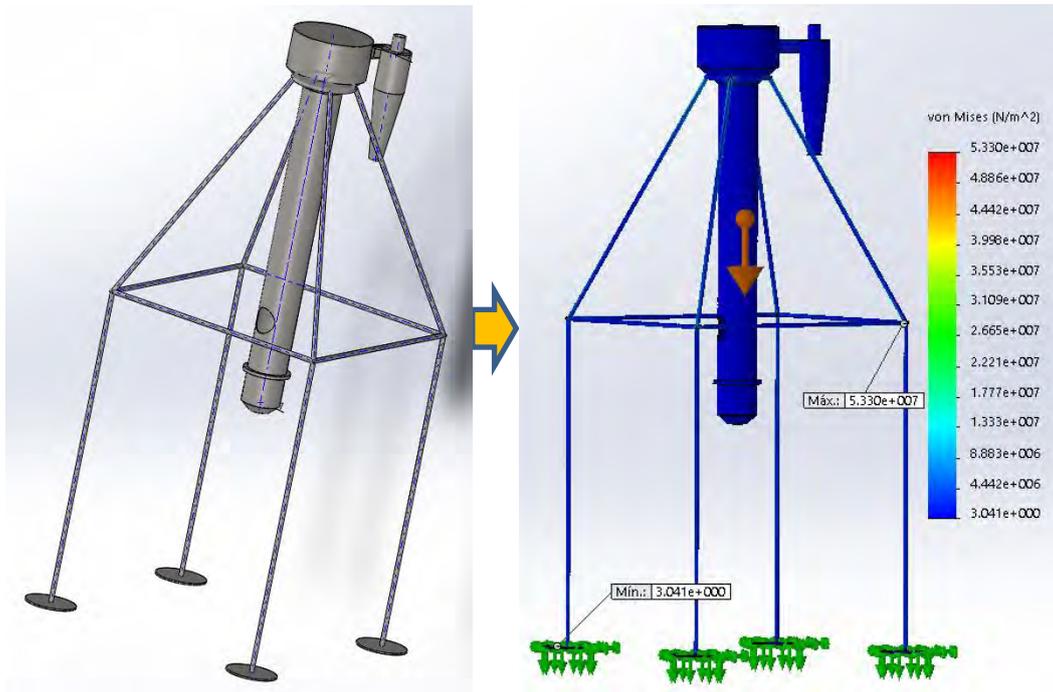


Figura 2.6. Simulación del soporte con carga el peso del cuerpo del gasificador.

Fuente: Elaboración propia.

Con inspección rápida de la Figura 2.6 se llega a determinar que el punto de máximo esfuerzo es en las esquinas del cuadrado central de la estructura donde se unen los tubos, y era de esperar debido a que es zona de concentración de esfuerzos. La zona donde se encuentra el punto de mínimo esfuerzo es cercano a los bordes de la cara superior de las bases del soporte, el peso se distribuye apropiadamente por la cara inferior. Luego se tiene en el software activada la opción de deformación real dando como resultado que el soporte no cederá ante el peso del gasificador. Como último punto, para dejar en claro que el diseño realizado resistirá el peso sin sufrir deformaciones, se muestra en la Tabla 2.4 los datos reales de las propiedades del acero AISI 304 en el software SOLIDWORKS para el gasificador y en la Tabla 2.5 los datos del acero AISI 1020, que vienen predeterminados dentro del software, usados en el soporte.

Tabla 2.4. Propiedades AISI 304

Fuente: Software SOLIDWORKS.

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	190000	N/mm ²
Coefficiente de Poisson	0.29	N/D
Módulo cortante	75000	N/mm ²
Densidad de masa	8000	kg/m ³
Límite de tracción	517.017	N/mm ²
Límite de compresión		N/mm ²
Límite elástico	206.807	N/mm ²
Coefficiente de expansión térmica	1.8e-005	/K
Conductividad térmica	16	W/(m·K)
Calor específico	500	J/(kg·K)
Cociente de amortiguamiento del material		N/D

Tabla 2.5. Propiedades AISI 1020

Fuente: Software SOLIDWORKS.

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	200000	N/mm ²
Coefficiente de Poisson	0.29	N/D
Módulo cortante	77000	N/mm ²
Densidad de masa	7900	kg/m ³
Límite de tracción	420.507	N/mm ²
Límite de compresión		N/mm ²
Límite elástico	351.571	N/mm ²
Coefficiente de expansión térmica	1.5e-005	/K
Conductividad térmica	47	W/(m·K)
Calor específico	420	J/(kg·K)
Cociente de amortiguamiento del material		N/D

Es rápidamente observable que el límite elástico es aproximadamente cinco veces superior al esfuerzo máximo registrado en la estructura de soporte, por lo que es fácil de aseverar que el diseño de esta estructura preliminar es adecuado para el proyecto.

El diseño preliminar soportará sin problemas el peso del gasificador, pero son requeridas ciertas modificaciones con las cuales asegurar tanto la estabilidad como la facilidad en desplazamiento. Considerando estas razones se optó por fabricar la estructura diseñada por el tesista Ricardo García, cuyo diseño en SOLIDWORKS y estructura fabricada son las mostradas en Figura 2.7 y Figura 2.8, respectivamente. En el Anexo A se tienen las dimensiones de este último diseño.

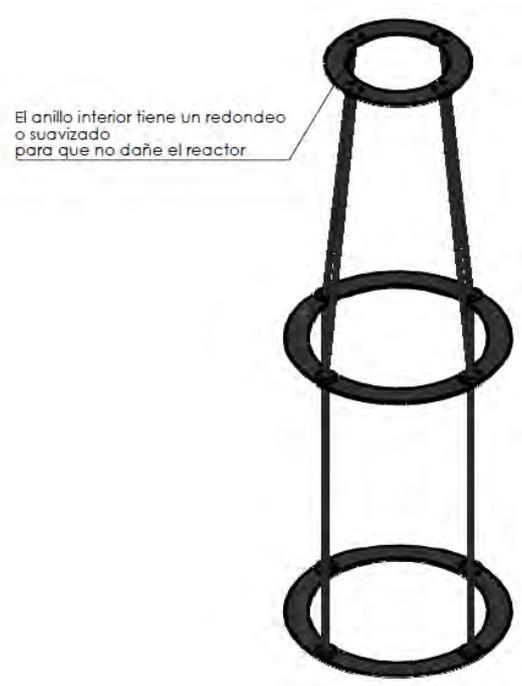


Figura 2.7. Diseño final del soporte del cuerpo del gasificador en SOLIDWORKS.

Fuente: Tesista Ricardo García.



Figura 2.8. Soporte construido para el gasificador.

Fuente: Foto tomada por tesista.

Se observa en este nuevo diseño la presencia de una base circular además de la unión central que ahora viene a ser circular, en el primer diseño se consideró cuadrada. Este nuevo diseño cuenta además con uniones empernadas siendo así desmontable para cualquier futura modificación que se requiera realizar al sistema. La zona de soporte del cuello ya no es una tubería sino que adquiere la forma de arandela con los bordes internos suavizados para no dañar o abollar el cuello del gasificador. Los tubos empleados tienen las mismas características que los empleados en el primer diseño, una pulgada de diámetro, y el material empleado para toda la estructura es AISI 1020, como se señaló previamente.

2.3. Preparación del espacio de la planta experimental

Al ser un dispositivo con el cual se trabajará a altas temperaturas y cuyo producto del proceso es gas, fue asignado al proyecto el espacio con ubicación adecuada en la cual se pueda construir la plataforma de trabajo sin perturbar ni poner en riesgo la salud de personas ajenas al mismo. Los planos del espaciamiento y la estructura de la plataforma se pueden observar en Figura 2.9, Figura 2.10, Figura 2.11 y Figura 2.12, respectivamente.

En la Figura 2.9 se observa señalada con una flecha verde la ubicación asignada para la construcción de la plataforma donde se instalará el gasificador de lecho fluidizado, su ubicación se encuentra entre el policlínico de la universidad, designado con el número 12, y el radar, designado con el número 19. Luego en la Figura 2.10 se tiene la vista de planta de la plataforma suponiendo el equipo ya instalado, las dimensiones del terreno de trabajo son de 5x4 m.

En Figura 2.11 y 2.12 son mostradas las vistas laterales de la plataforma con las dimensiones del techo dando además de una aproximación del espaciamiento con una persona de tamaño promedio parada en la plataforma.

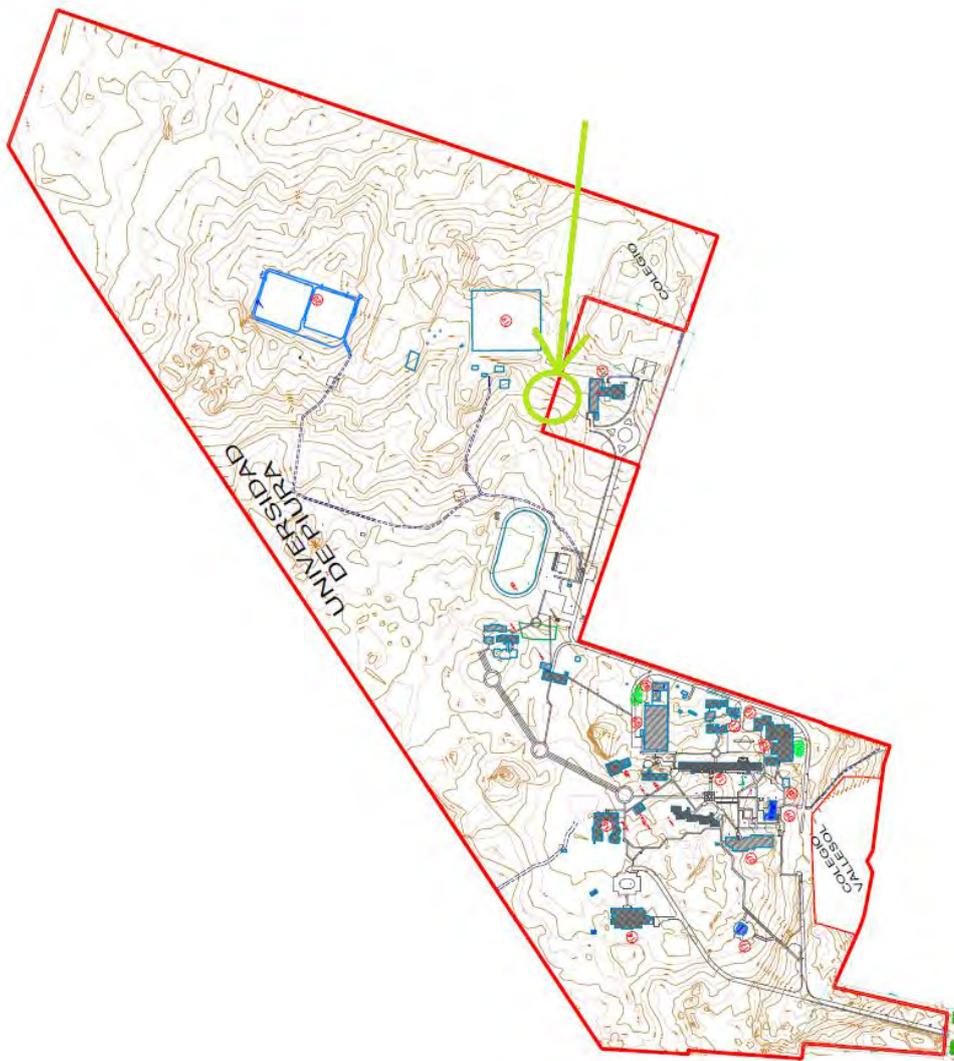


Figura 2.9. Plano con ubicación señalada de la localización del gasificador.

Fuente: Elaboración propia.

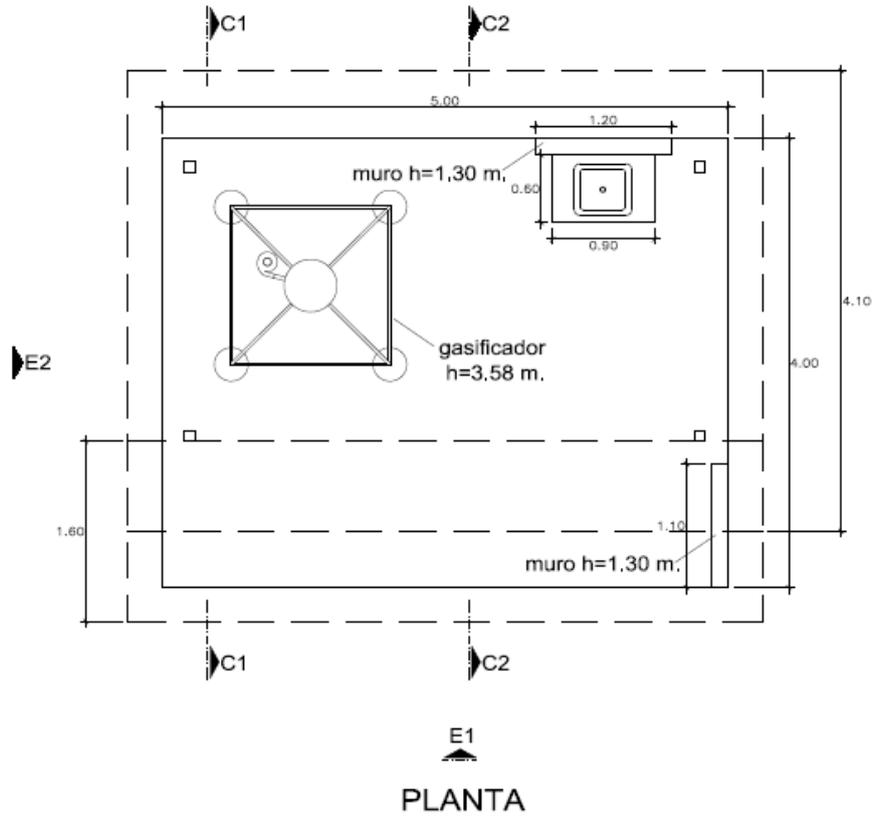


Figura 2.10. Vista de planta del diseño de plataforma.

Fuente: Universidad de Piura.

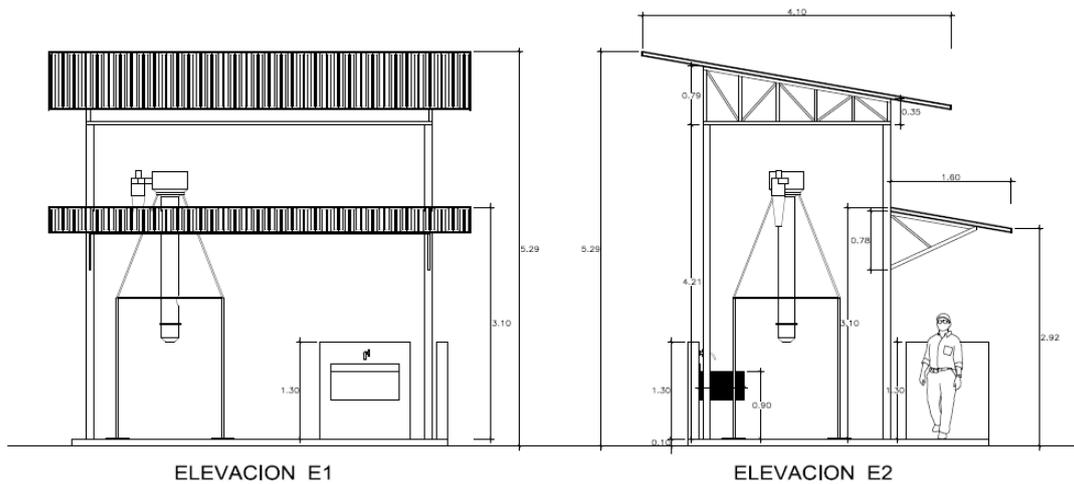


Figura 2.11. Vistas laterales I del diseño de plataforma.

Fuente: Universidad de Piura.

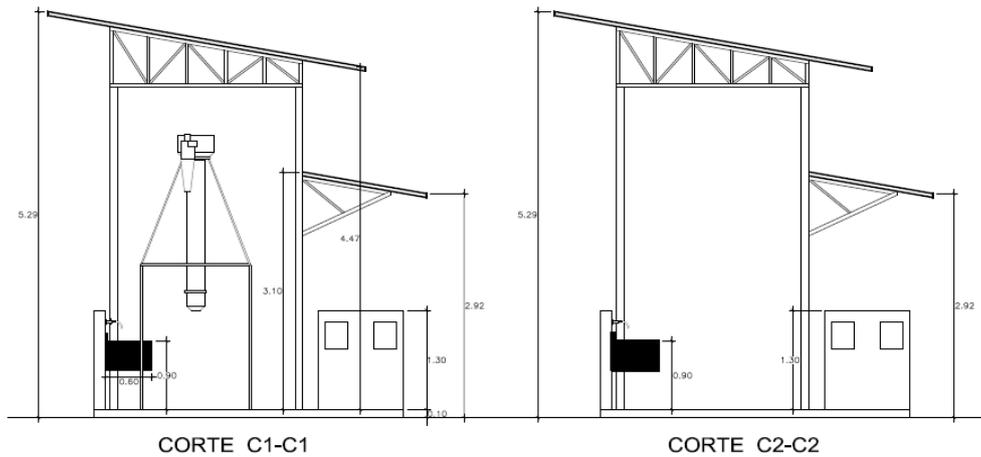


Figura 2.12. Vistas laterales II del diseño de plataforma.

Fuente: Universidad de Piura.

Es observable además que se asignó en el diseño de la plataforma el dimensionamiento para la construcción de un lavadero, Figura 2.13, y el sistema que provee energía eléctrica. Los sistemas de adquisición de datos y variadores de velocidad, al igual que la plataforma en general requieren de suministro de energía eléctrica. Para esto se tiene el sistema de energía eléctrica de la plataforma, Figura 2.14, conformado por el tablero eléctrico y las tomas de corriente.



Figura 2.13. Lavadero de la plataforma.

Fuente: Foto tomada por tesista.



Figura 2.14. Sistema de energía eléctrica de la plataforma.

Fuente: Foto tomada por tesista.

El tablero eléctrico, adquirido de la empresa RENSA, puede observarse en la Figura 2.15. Al interior de este tablero se colocaron llaves termo-magnéticas de marca ABB modelo SH 203 C 25, Figura 2.16: {1} es la llave que permite el paso de corriente a las otras dos, {2} activa los tomacorrientes y {3} energiza las luminarias de la plataforma y el tablero de energía principal.



Figura 2.15. Tablero eléctrico de la plataforma.

Fuente: Foto tomada por tesista.

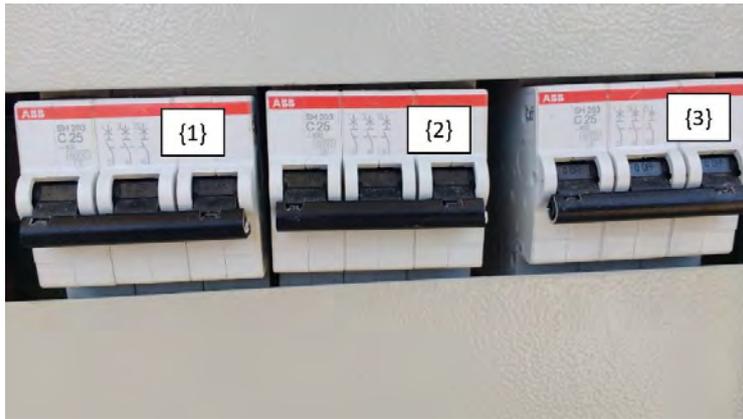


Figura 2.16. Llaves termo-magnéticas del tablero eléctrico.

Fuente: Foto tomada por tesista.

El resultado de la construcción de la plataforma es mostrado en la Figura 2.17.



Figura 2.17. Resultado de construcción de la plataforma.

Fuente: Foto tomada por tesista.

En la Figura 2.17 se observa que la construcción fue enmallada hasta cierta altura con el fin de proteger a la plataforma de los animales salvajes que rondan por el bosque del campus, además de delimitar apropiadamente el espacio de trabajo.

2.4. Modificaciones al gasificador previas a su instalación

A cargo de la empresa Factoría Libertad se dio paso a aumentar la altura de la zona superior al freeboard por unos 20 cm con el objetivo de poder colocar en la tapa un visor con el cual se pueda observar el proceso desde la parte superior del gasificador, la empresa también se haría cargo de la fabricación de la tapa y el depósito de cenizas que se colocaría en la zona baja del ciclón. Ambas partes se logran observar en Figura 2.18 y Figura 2.19 respectivamente. Luego, para poder instalar los equipos sensores de temperatura, RTD y termocuplas, se realiza roscado de tipo NPT hembra de ½” debido a las características de los medidores, esta modificación puede observarse en Figura 2.20. Las últimas modificaciones fueron la ampliación del orificio de entrada de biomasa, por motivos de dimensionamiento y construcción del tornillo dosificador, aumentándolo a 10 cm de diámetro, y la realización de un orificio para el acople del cañón de un quemador. El tamaño de esta entrada se realizó de las mismas dimensiones a las de alimentación de biomasa, 10 cm. Los resultados luego de estas últimas modificaciones se observan en la Figura 2.21.

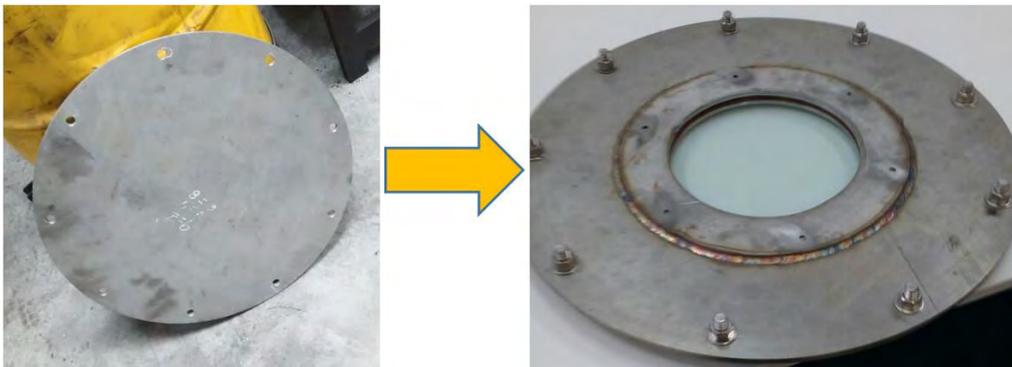


Figura 2.18. Resultado de colocar visor a la tapa del gasificador.

Fuente: Foto tomada por tesista.



Figura 2.19. Depósito de cenizas.

Fuente: Foto tomada por tesista.



Figura 2.20. Entradas con roscado hembra para los sensores de temperatura.

Fuente: Foto tomada por tesista.



Figura 2.21. Entradas con brida para llama del quemador y biomasa.

Fuente: Foto tomada por tesista.

2.5. Instalación subsistema gasificador junto con soporte y cubierta aislante

Terminadas las modificaciones del apartado anterior el cuerpo del gasificador se encuentra apto para ser montado con el soporte sobre la plataforma, Figura 2.22.



Figura 2.22. Cuerpo del gasificador y soporte instalados.

Fuente: Foto tomada por tesista.

Como se sabe este dispositivo trabajará desde el inicio de su operación con altas temperaturas, por razones de rendimiento del proceso además por seguridad, se vio necesaria la inclusión de aislante térmico para el dispositivo. El rendimiento del proceso viene ligado a la idea de no permitir que existan pérdidas de energía térmica a través de las paredes del reactor hacia el ambiente exterior, así se llegará a las temperaturas esperadas con la cantidad de combustible necesario. Estas pérdidas térmicas podrían ser tomadas, en caso no existiera aislante, como perturbaciones en el modelado del sistema. Por motivos de seguridad se ha de considerar, que si bien es cierto cada operario en la plataforma trabajará con el equipo de seguridad respectivo, un dispositivo operando por horas con temperaturas en el exterior a 500 °C siempre tiende a ser un peligro potencial.

El aislante térmico consiste en dos capas formadas por lana de fibra de vidrio. La capa de lana en contacto directo con el reactor, primera capa, de color blanco que se ve en Figura 2.23, trabaja con temperaturas hasta los 1000 °C.



Figura 2.23. Primera capa del recubrimiento térmico.

Fuente: Foto tomada por tesista.

La segunda capa, de color marrón, trabaja con temperaturas hasta 500 °C. En la Figura 2.24 se puede observar esta segunda capa.



Figura 2.24. Segunda capa del recubrimiento térmico.

Fuente: Foto tomada por tesista.

La empresa encargada de la instalación del aislante fue Kaefer Kostec. El procedimiento a seguir para instalar este aislante es simple, primero se miden las superficies continuas y en base a estas medidas son cortados retazos de los rollos de las diferentes capas aislantes. Para la sujeción de la primera capa al reactor se requiere ajustar esta mediante alambres colocados por tramos. La segunda capa posee mallado de alambre, por lo que no es necesario rodear al reactor con alambre sino que el mismo se utiliza para amarrar los extremos de la malla del aislante. Por último se coloca una cubierta metálica en todo el dispositivo por motivos estéticos y debido a que, por características propias del aislante, este tiende a producir picazón al contacto con la piel. Finalmente en la Figura 2.25 se puede observar los resultados de la instalación del reactor con la cubierta aislante necesaria.



Figura 2.25. Cuerpo del gasificador con cubierta aislante totalmente instalada.

Fuente: Foto tomada por tesista.

2.6. Instalación tableros del equipamiento del gasificador

Es necesario indicar que la instalación de los elementos que serán mencionados en este apartado fue realizada por la empresa de servicios de ingeniería ANDAL. El equipamiento para la puesta en marcha y correcto funcionamiento del sistema del gasificador es repartido en tres tableros, Figura 2.26.



Figura 2.26. Tableros de control del sistema.

Fuente: Foto tomada por tesista.

Viendo desde la izquierda de la Figura 2.26, el primer tablero, tablero de energía principal, contiene la llave termo-magnética que permite la alimentación de energía eléctrica a los demás dispositivos. El segundo tablero, del centro, será llamado tablero de adquisición de datos debido a que contiene el PLC y los convertidores A/D para la recepción de medidas de los sensores de temperaturas. El tercer tablero será llamado tablero del soplador, en este se encuentra contenido el variador de frecuencia destinado a comandar el soplador.

2.6.1. Instalación tablero de energía principal y sensores de temperatura

El tablero de energía principal del reactor, en el cual se guardan las llaves termo-magnéticas y diferenciales necesarios para la protección de cada uno de los equipos que se encargan de dar funcionamiento al gasificador. En este tablero además se tiene el variador de frecuencia destinado para el funcionamiento del motor del dosificador de biomasa. La instalación del tablero de energía principal, Figura 2.27, se realizó en paralelo con los medidores de temperatura. Dentro de este tablero, como ya se mencionó, se encuentran llaves termo-magnéticas de la marca Weg, Figura 2.28.

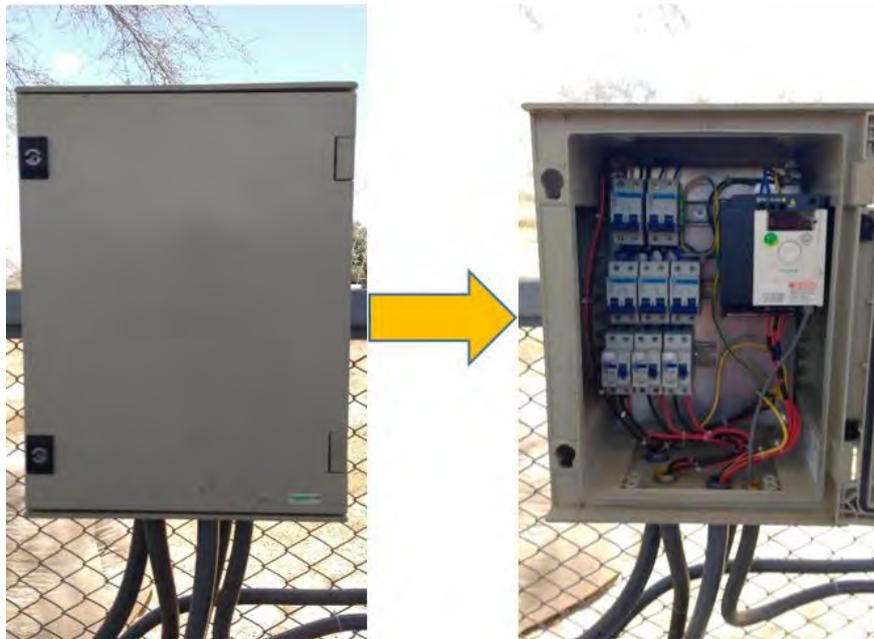


Figura 2.27. Tablero de energía principal y sus componentes.

Fuente: Foto tomada por tesista.



Figura 2.28. Llaves termo-magnéticas dentro del tablero de energía principal.

Fuente: Foto tomada por tesista.

Cada una de las llaves termo-magnéticas cumple con activar los diferentes equipos, en la Figura 2.29 se encuentran señaladas cada una de estas llaves siendo su función: (1), de modelo MDW C50, permite el paso de energía eléctrica al resto de llaves; (2), de modelo MDW C16, es la llave termo-magnética para alimentar el variador de frecuencia del tornillo dosificador de biomasa; (3), de modelo MDW C16, es la llave que permite el paso de corriente al diferencial, segundo dispositivo de seguridad, que activa el quemador; las dos llaves siguientes también emplean diferenciales por seguridad, (4), de modelo MDW C6, es el primer dispositivo de seguridad del tablero de adquisición de datos y (5), de modelo MDW C10, es el primer dispositivo de seguridad del tablero del soplador.

Continuando con los componentes del tablero de energía, los interruptores diferenciales, marca Weg modelo RDW empleados son los que se muestran en la Figura 2.29, en esta se señalan cada uno de los diferenciales. [1] de In 40A es el segundo dispositivo de seguridad del quemador, activando la llave termo-magnética y luego este diferencial llega a energizar al quemador. Los dos interruptores siguientes requieren también que sus respectivas llaves sean previamente activadas, [2] de In 25A permite el paso de energía al tablero de adquisición de datos y [3] de In 25A al tablero del soplador.



Figura 2.29. Diferenciales dentro del tablero de energía principal.

Fuente: Foto tomada por tesista.

El último componente de este tablero es el variador de frecuencia de la marca Siemens modelo ATV12HU15M2, Figura 2.30, el cual es destinado para asignar la referencia de operación del motor del tornillo dosificador. Este dispositivo tiene la dirección “5” para comunicación Modbus.



Figura 2.30. Variador de frecuencia del sistema dosificador de biomasa.

Fuente: Foto tomada por tesista.

A continuación será mostrada la instalación de los medidores de temperatura al reactor. En total se instalaron 9 medidores de temperatura de los cuales 3 son RTD de tipo pt 100. Los sensores RTD adquiridos para el proyecto presentan tres cables de conexión, tal cual se ve en la Figura 2.31. Los 6 restantes son termocuplas tipo K. Estos últimos sensores presentan de característica conexión por dos cables, como se ve en la Figura 2.32.



Figura 2.31. Sensor pt 100 adquirido para el proyecto.

Fuente: Foto tomada por tesista.



Figura 2.32. Termocupla tipo k adquirido para el proyecto.

Fuente: Foto tomada por tesista.

El posicionamiento de estos medidores de temperatura se observa en la Figura 2.33. Esta posición de los sensores a lo largo del reactor y en puntos importantes, como en la salida del ciclón, es de importancia para el análisis del perfil de temperaturas y en base a la cantidad de entrada de biomasa evaluar cómo varía el perfil y la temperatura en la salida del ciclón. Este procedimiento de análisis es importante para el futuro del proyecto, la composición del gas de salida depende directamente de las temperaturas que rigen el proceso, y estas dependen de los parámetros controlables del sistema como son la entrada de aire y biomasa.

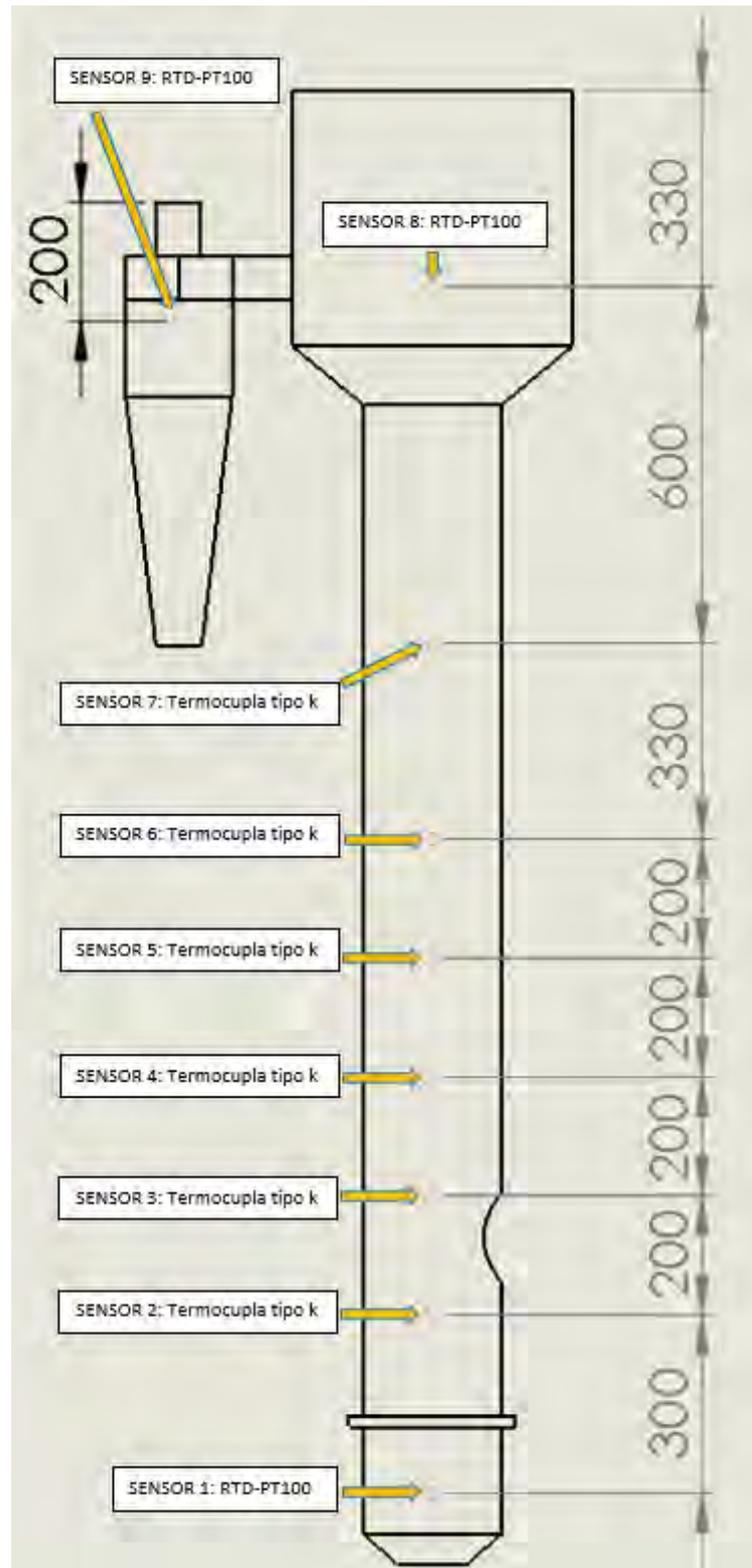


Figura 2.33. Esquema de posicionamiento de los sensores en el reactor.

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede ver en la Figura 2.34, el cableado de los sensores se junta en un solo conduit de color negro el cual es llevado al tablero de adquisición de datos.



Figura 2.34. Proceso de unión de cablearía de los sensores en un conduit.

Fuente: Foto tomada por tesista.

2.6.2. Instalación tablero de adquisición de datos

Este tablero es de la marca Siemens, Figura 2.35. En el interior se encuentra la fuente propia con serie C0-01 AC, Figura 2.36, que lleva el voltaje de 220 voltios en alterna a 24 voltios en continua; el PLC CLICK Koyo con serie C0-01DD1-D, Figura 2.37, como componente principal del sistema; dos módulos A/D de serie C0-04THM, Figura 2.38, para termocuplas y dos módulos A/D de serie C0-04RTD, Figura 2.39, para RTD; y por último dos módulos A/D de serie C0-04AD-1, Figura 2.40, para adquisición de datos con valores entre 0-20 mA. El PLC tiene la dirección “3” para comunicación Modbus.

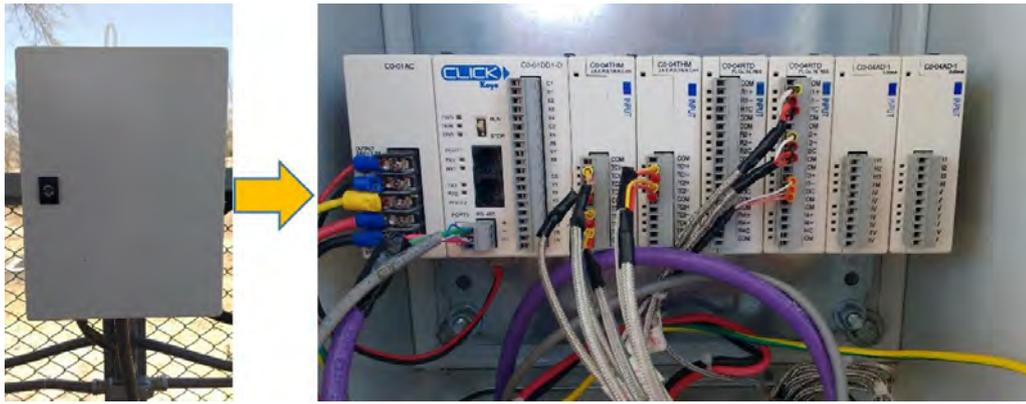


Figura 2.35. Tablero de adquisición de datos.

Fuente: Foto tomada por tesista.



Figura 2.36. Fuente propia del PLC y sus demás componentes.

Fuente: Foto tomada por tesista.



Figura 2.37. PLC CLICK Koyo.

Fuente: Foto tomada por tesista.



Figura 2.38. Módulos A/D para termocuplas.

Fuente: Foto tomada por tesista.

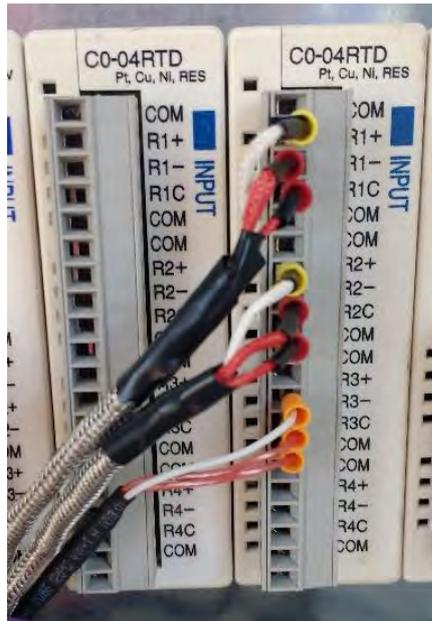


Figura 2.39. Módulos A/D para RTD.

Fuente: Foto tomada por tesista.



Figura 2.40. Módulos A/D para adquisición de datos con valores entre 0-20 mA.

Fuente: Foto tomada por tesista.

El sistema de adquisición de datos previamente mencionado ha sido configurado por la empresa TGI, Figura 2.41. Se instalaron y asignaron direcciones con el CLICK Programming Software a las tres RTD tipo pt 100 y a las seis termocuplas tipo k.



Figura 2.41. Momento de configuración del sistema de adquisición de datos.

Fuente: Foto tomada por tesista.

2.6.3. Instalación tablero del soplador

Este tablero de la marca TIBOX, Figura 2.42, contiene únicamente al variador de velocidad de marca Weg modelo CFW 500, Figura 2.43, destinado a asignar la referencia de velocidad al motor del soplador. Este dispositivo tiene la dirección “1” para comunicación Modbus.



Figura 2.42. Tablero del soplador.

Fuente: Foto tomada por tesista.



Figura 2.43. Variador de frecuencia del soplador.

Fuente: Foto tomada por tesista.

2.7. Instalación de subsistemas de funcionamiento externo

El cuerpo del gasificador es el primer componente o subsistema que conforma todo el sistema de gasificación. En el siguiente apartado se describirán los equipos instalados a ser comandados por los dispositivos al interno de los tableros de control. Para la denominación se separarán estos equipos en tres diferentes subsistemas.

2.7.1. Instalación subsistema Soplador

El subsistema soplador consiste de un motor trifásico industrial de la marca Baldor de 3 HP, Figura 2.44; acoplado a un sistema de ventilación, Figura 2.45, fabricado por la empresa PEERLESS ELECTRIC; y un conducto metálico flexible, Figura 2.46, que sirve de conexión entre la boca de salida de aire del ventilador y la base del gasificador.



Figura 2.44. Motor del subsistema soplador.

Fuente: Foto tomada por tesista.



Figura 2.45. Ventilador del subsistema soplador.

Fuente: Foto tomada por tesista.



Figura 2.46. Conexión del subsistema soplador con el gasificador.

Fuente: Foto tomada por tesista.

Con todas las partes requeridas a disposición se ensambla el subsistema de la Figura 2.47 cuya función es la fluidización.



Figura 2.47. Subsistema soplador armado e instalado.

Fuente: Foto tomada por tesista.

2.7.2. Subsistema dosificador de biomasa

Viene conformado por la mesa soporte de la estructura total, Figura 2.48; tolva dosificadora de biomasa, Figura 2.49, tornillo sin fin, Figura 2.50; reductor mecánico de velocidad, Figura 2.51, cuya relación viene dada en su placa llevando de 910 rpm a 35 rpm por lo que la relación de cambio es de 25.6 aproximadamente; y un motor asíncrono de 1.6 kW, Figura 2.52, de la marca ISI IMPIANTI.



Figura 2.48. Mesa soporte del subsistema dosificador.

Fuente: Foto tomada por tesista.



Figura 2.49. Tolva del subsistema dosificador.

Fuente: Foto tomada por tesista.



Figura 2.50. Tornillo sin fin del subsistema dosificador.

Fuente: Foto tomada por tesista.



Figura 2.51. Reductor de velocidad mecánico entre el motor y el tornillo sin fin.

Fuente: Foto tomada por tesista.



Figura 2.52. Motor trifásico del subsistema dosificador.

Fuente: Foto tomada por tesista.

El diseño del subsistema fue realizado por el tesista Ricardo Garcia. Las dimensiones de la tolva, su soporte y del tornillo sin fin se tienen en la Figura 2.53, además de mostrarse en el Anexo B.

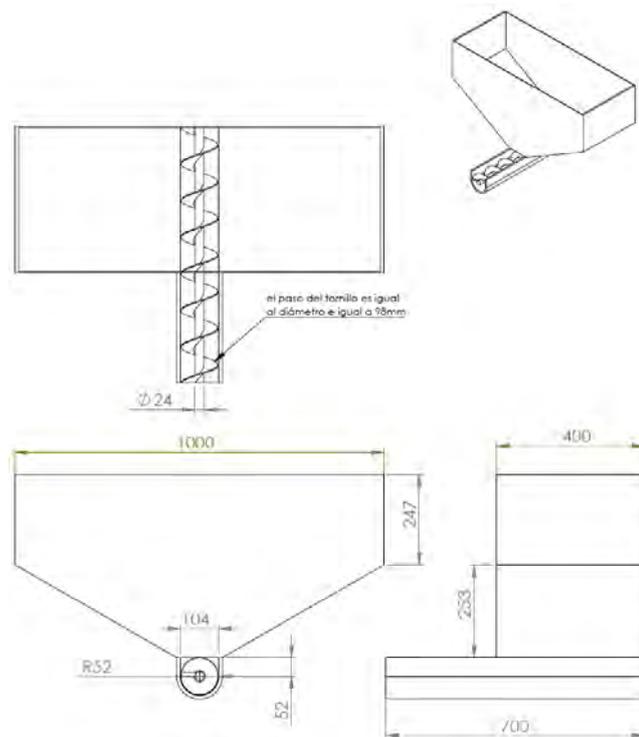


Figura 2.53. Diseño del subsistema dosificador.

Fuente: Tesista Ricardo García.

El subsistema de dosificación de biomasa armado, Figura 2.54, permitirá el ingreso requerido de materia prima al gasificador.



Figura 2.54. Subsistema dosificador de biomasa completo.

Fuente: Foto tomada por tesista.

2.7.3. Subsistema del quemador

El quemador de la marca WAYNE modelo HSG 400, Figura 2.55, es el equipo principal de este subsistema, es sostenido por una mesa metálica de fierro, Figura 2.56. Para el funcionamiento del quemador se requiere suministro de gas propano. Este último viene contenido en un balón de tipo normal, Figura 2.57, usados en cocinas industriales.



Figura 2.55. Quemador.

Fuente: Foto tomada por tesista.



Figura 2.56. Mesa soporte del subsistema quemador.

Fuente: Foto tomada por tesista.



Figura 2.57. Balón de gas propano de tipo normal.

Fuente: Foto tomada por tesista.

Se coloca el quemador encima de la mesa de soporte, con el cañón acoplado a la entrada de fuego del gasificador, Figura 2.58. Por motivos de seguridad el balón de gas se encuentra a una distancia de 6 metros del quemador.



Figura 2.58. Subsistema quemador instalado y acoplado al gasificador.

Fuente: Foto tomada por tesista.

Con este último subsistema quedan instalados los cuatro subsistemas principales: Gasificador, subsistema soplador, subsistema dosificador y el quemador.

2.8. Sistema de monitoreo y control remoto

Ambos variadores y el PLC se encuentran conectados mediante red con protocolo de comunicación Modbus y conexiones físicas de tipo RJ45. Esta red es monitoreada con una notebook, Figura 2.59, de la marca HP de 64 bits, con procesador Intel Core i5, 8 GB RAM y sistema operativo Windows 10, mediante los programas ModbusTester, KeepServer y MATLAB-Simulink. La interfaz de monitoreo, Figura 2.60, creada en MATLAB-SIMULINK permite activar los variadores, observar y guardar los datos medidos de todos los sensores de la planta.

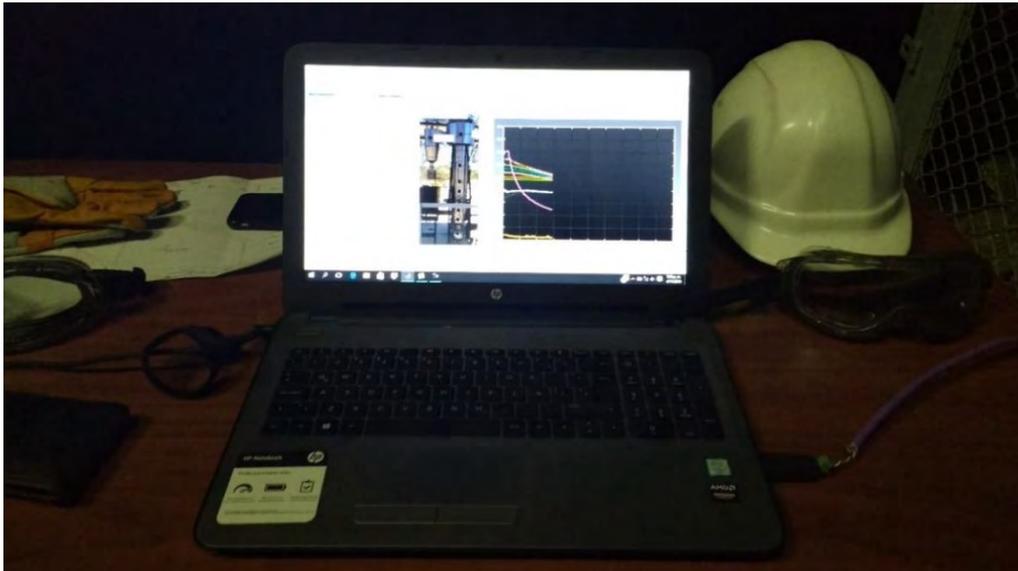


Figura 2.59. Notebook como sistema de monitoreo y control remoto.

Fuente: Foto tomada por tesista.

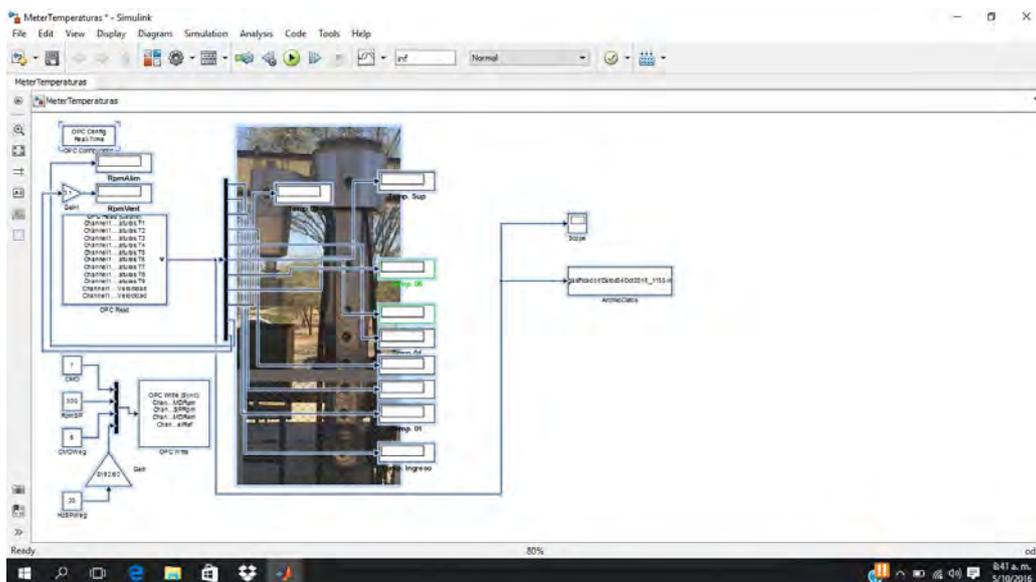


Figura 2.60. Interfaz del programa de monitoreo y control de la planta.

Fuente: Foto tomada por tesista.

2.9. Planta gasificador de lecho fluidizado instalada

En la Figura 2.61 se observa concluida la instalación de la planta de gasificador de lecho fluidizado en la plataforma. Cada uno de los equipos que permiten el funcionamiento del sistema gasificador pueden verse en la figura antes mencionada, los subsistemas y tableros han quedado fijos en sus respectivos soportes.



Figura 2.61. Planta gasificador de lecho fluidizado instalada.

Fuente: Foto tomada por tesista.

2.9.1. Equipamiento auxiliar

El resto del equipamiento viene a ser elementos necesarios para que el operario trabaje sin mayores percances o contratiempos. A continuación se mencionarán brevemente estos elementos: mesa de trabajo mostrada en la Figura 2.62, locker en la Figura 2.63, escalera en la Figura 2.64, luminarias mostradas en la Figura 2.65 y el extintor Figura 2.66.



Figura 2.62. Mesa de trabajo.

Fuente: Foto tomada por tesista.



Figura 2.63. Locker de herramientas.

Fuente: Foto tomada por tesista.



Figura 2.64. Escalera.

Fuente: Foto tomada por tesista.



Figura 2.65. Luminarias de la plataforma.

Fuente: Foto tomada por tesista.



Figura 2.66. Extintor contra incendios.

Fuente: Foto tomada por tesista.

2.10. Teoría general de algunos dispositivos empleados en la instalación

Se denota la necesidad de dejar en claro la utilidad y ciertos puntos sobre el funcionamiento de algunos dispositivos mencionados durante los apartados anteriores.

2.10.1. Llaves Termo-magnéticas

También conocidos como breakers, los interruptores termo-magnéticos sirven como aparamenta de protección de circuitos cuando la corriente en estos sobrepasa los niveles máximos permitidos. Este dispositivo se basa en dos de los efectos producidos cuando circula corriente eléctrica por un circuito: el magnético y el térmico. En un solo equipo se concentran distintos sistemas de protección. Un mismo breaker posee tres sistemas de desconexión, estos son manual, térmico y magnético.

Dentro del dispositivo se encuentra una placa bimetálica la cual al someterse a corrientes por encima de las permitidas se expande y, por diseño del interior del dispositivo, los contactos del breaker se separan cuyo tiempo de separación depende de la intensidad de sobrecorriente. Una vez abierto el sistema por falla este puede ser reactivado de forma manual. En caso se trabaje con unidades grandes se tiende a recurrir a solenoides e inclusive motores eléctricos para reactivar el breaker y con esto restablecer la energía.

Como ejemplo de selección de llave termo-magnética usaremos el breaker de la marca Weg modelo MDW-C50, empleado en el tablero de energía principal que se detalla más adelante. Se tiene que los modelos C trabajan bajo ciertos parámetros indicados en el manual del mismo dispositivo. El interruptor termomagnético de curva C tiene como característica el disparo instantáneo para corrientes entre 5 a 10 veces la corriente nominal, para el modelo antes mencionado el rango vendría a ser entre 250 y 500 amperios para disparo instantáneo. Los dispositivos con curva C son instalados para aplicaciones con cargas inductivas. En la Figura 2.67 se tiene la curva de comportamiento de los dispositivos B y C.

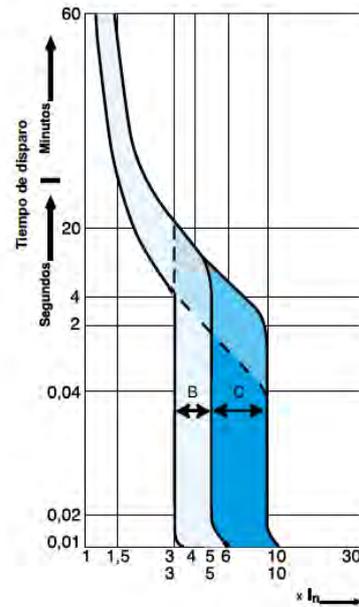


Figura 2.67. Curva del comportamiento de un breaker B y C [8].

Al guiarse del gráfico de la Figura 2.67 se llega a afirmar, como ejemplo, que el equipo MDW-C50 abrirá sus contactos desconectando al sistema dentro del rango de 0.02 o máximo 4 segundos en caso se tenga sobrecorriente con 250 amperios [8].

2.10.2. Termocuplas

Las termocuplas son instrumentos de medida hechos con dos conductores de diferentes materiales metálicos unidos en un extremo. Si se genera una diferencia de temperatura en esta unión se produce diferencia de potencial en el orden de los milivoltios en los extremos libres de ambos cables, esta varía de manera directa conforme varíe el delta de temperatura.

Las termocuplas tipo K se encuentran comúnmente en aplicaciones como la fundición y hornos trabajando a temperaturas menores a los 1300 °C. Este tipo de termocuplas se caracterizan por tener un cable de aleación níquel – cromo y el otro de níquel – aluminio. Trabajan en procesos con rangos de temperatura entre los -180 °C y los 1372 °C y emite voltaje máximo de 54.8 mV [11].

2.10.3. RTD

Los sensores de temperatura tipo Pt100 son fabricados con un alambre de platino, a 0 °C tiene una resistencia de 100 ohms y conforme se incrementa la temperatura la resistencia aumenta de forma no lineal, pero con tablas se llega a encontrar la temperatura correspondiente de acuerdo a la resistencia que mida el equipo. Una de las ventajas que corresponden directamente con las conexiones se refiere a las facilidades con las distancias, usando cable de cobre se pueden realizar conexiones con longitudes de hasta 30 metros desde el Pt100 hasta el medidor sin generar

mayores problemas. Se suelen usar tres tipos de conexiones diferentes para la obtención de medidas, cada uno de estos contempla la forma de disminuir o eliminar el error de medida:

- Conexión con 2 hilos:

Siendo el más fácil de implementar es a la vez el menos recomendado. En la Figura 2.68 se puede apreciar cómo se realiza este tipo de conexión con dos cables de diferentes resistencias, R_{c1} y R_{c2} . Este método genera error debido a que el instrumento que medirá la señal dará como resultado el valor de $R(t) + R_{c1} + R_{c2}$. Con el fin de atenuar este error todo lo posible se requiere que R_{c1} y R_{c2} sean de magnitudes muy bajas.



Figura 2.68. Esquema de conexión con 2 hilos [12].

- Conexión con 3 hilos:

En este modo de conexión se requiere que cada cable de forma individual presente la misma resistencia que los demás. En la Figura 2.69 se ve que se requiere una resistencia R_c en todos los cables. El método de medida suele basarse en el “puente de Wheatstone”. La disposición del circuito lo hace posible. Una forma de medir la resistencia también puede ser pasando corriente conocida a través de los cables azul y verde, midiendo la resistencia de ambas. Luego se repite el proceso pero en los cables café y azul. Finalmente se le resta el primer valor medido al segundo y se obtiene la resistencia requerida.

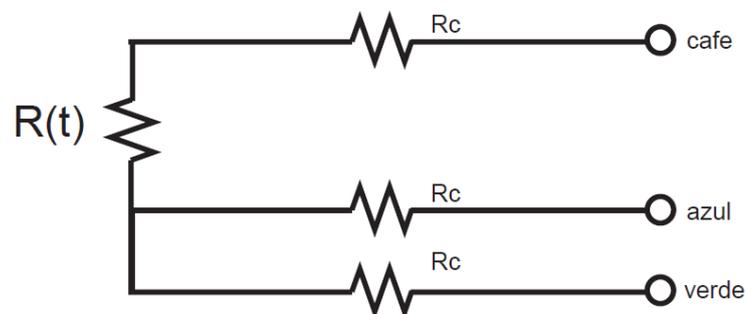


Figura 2.69. Esquema de conexión con 3 hilos [12].

- Conexión con 4 hilos:

Este tipo de conexión permite obtener medidas más precisas que las conexiones anteriormente mencionadas pero se requiere un equipo extra que viene a ser un voltímetro. En la Figura 2.70 se ve la disposición de los cables. No se requiere que las resistencias R_{c1} , R_{c2} , R_{c3} y R_{c4} sean iguales pero sí que R_{c2} y R_{c3} sean de alta resistencia con el fin de impedir el paso de corriente y se tenga de forma precisa el voltaje en $R(t)$. Por último se divide el voltaje medido entre la corriente de excitación ingresada al circuito para obtener el valor de $R(t)$ [12].

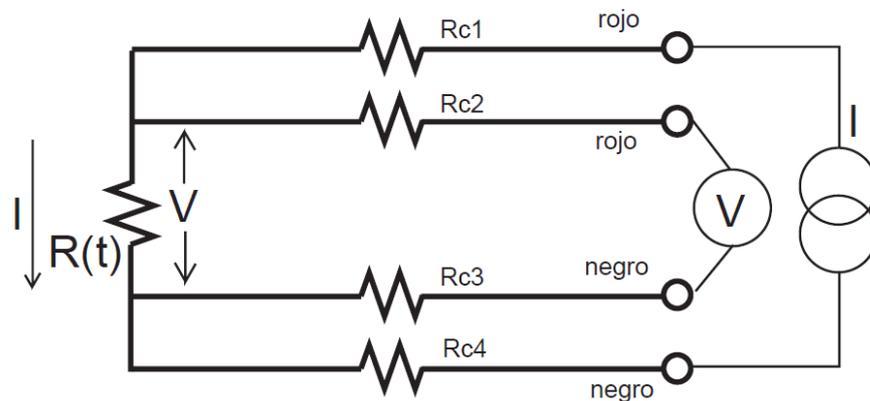


Figura 2.70. Esquema de conexión con 4 hilos [12].

2.10.4. Interruptores Diferenciales.

El principal objetivo de los dispositivos diferenciales es el de detectar las corrientes de defecto de fuga a tierra anteriores, también conocidas como corrientes diferenciales, y desconectar el sistema en caso estas corrientes representen peligro para personas o los bienes.

La corriente diferencial es el resultado de algún defecto de aislamiento entre un conductor activo y una masa o la tierra. Esto quiere decir que la fuente suministra al sistema una cierta magnitud de corriente la cual no encuentra retorno a la misma, obteniendo entre las líneas un diferencial de corriente. Si una persona llega a tocar algún cable sin cubrir o dispositivo que genere fugas inmediatamente se activará la protección del sistema desactivando el suministro de corriente para evitar daños a tal persona.

Se tiene registrado que a través de los años con el uso de interruptores diferenciales debido a la promulgación de la ley obligatoria de usar estos dispositivos en Japón las muertes por electrocución en este país han descendido. Esto se observa en la Figura 2.71 [9].

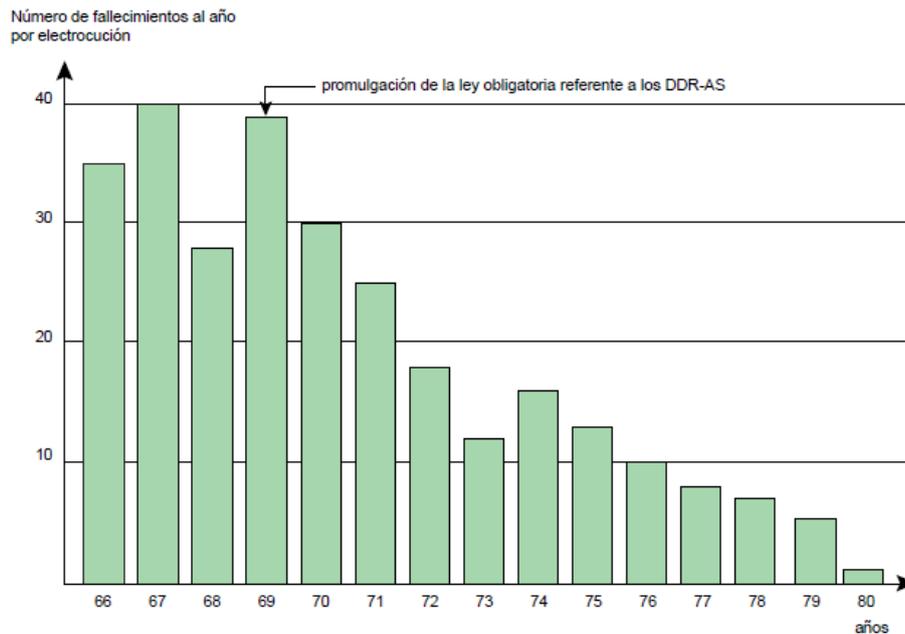


Figura 2.71. Gráfico demostrativo del descenso de fallecimientos por el uso de diferenciales en Japón [9].

El dispositivo consiste en general de lo siguiente expuesto en la Figura 2.72:

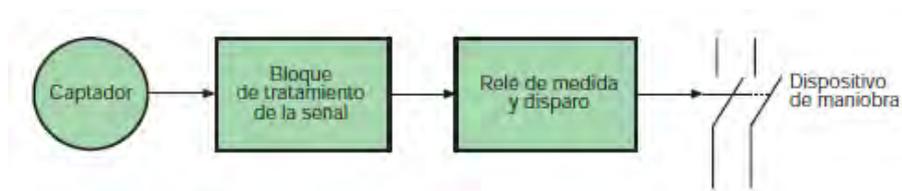


Figura 2.72. Esquema general de componentes de un diferencial [9].

- Captador: Suministra una señal eléctrica en el momento que la suma de las corrientes que pasan por los conductores activos no es igual a cero.
- Bloque de tratamiento de la señal: La señal leída por el captador es tratada electrónicamente para el correcto funcionamiento del siguiente componente del diferencial, evitando errores.
- Relé de medida y disparo: Compara la señal eléctrica dada por el captador luego del tratamiento con un valor de referencia y manda la orden de apertura al siguiente componente.
- Dispositivo de maniobra: Viene a ser un interruptor que detiene el flujo de corriente al sistema al realizarse su apertura [9].

2.10.5. Variador de frecuencia

Mediante un variador de frecuencia es posible controlar la velocidad de motores eléctricos para cualquier tipo de aplicación. El esquema básico de un variador, Figura 2.73, consiste en la combinación del puente de diodos para rectificar corriente alterna a continua, condensadores que eviten voltaje de rizado y el puente inversor consistente de elementos IGBT (“insulated-gate bipolar transistor”) con el cual, mediante la asignación correcta del “duty cycle” a los IGBT, obtenemos señal a la frecuencia requerida.

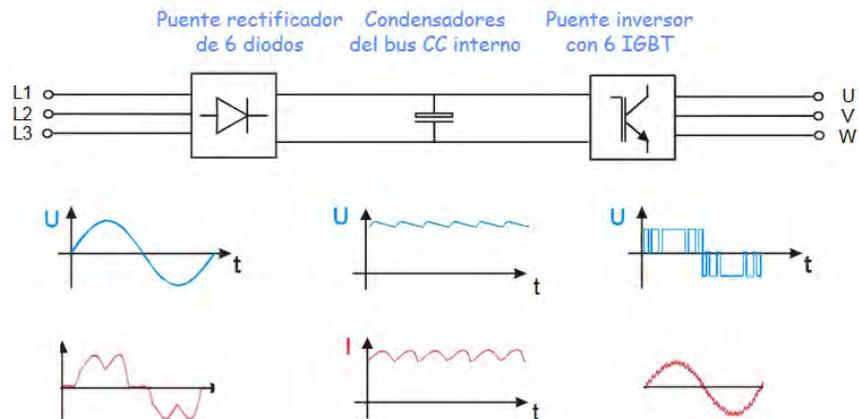


Figura 2.73. Esquema general de un variador de frecuencia [10].

En la Figura 2.74 se muestra algo más detallado como se conforman estos circuitos variadores de frecuencia. En este caso se observa que es de alimentación y salida trifásica [10].

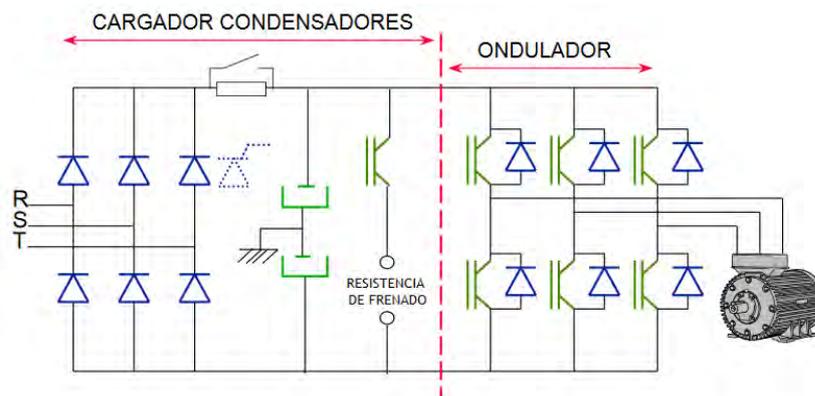


Figura 2.74. Esquema didáctico de un variador de frecuencia trifásico [10].

Capítulo III

Puesta en marcha de la planta experimental de gasificación

3.1. Descripción del proceso

Los cuatro subsistemas principales, descritos en el capítulo anterior, son llamados así debido a que sin estos la producción de syngas no puede realizarse. El presente apartado se centra en describir de manera superficial cómo trabaja el sistema de gasificación.

Dentro del gasificador se encuentra bauxita mostrada en la Figura 3.1, material inerte para el proyecto, que debe ser calentada con el quemador para el automantenimiento del proceso. Esta es sostenida por una malla distribuidora, como se logra apreciar en la Figura 3.2, de número 40 (agujeros de 0.42 mm de diámetro) de acero inoxidable. Una vez calentado el material inerte, superior a los 300 °C, se procede a prender el soplador. El soplador mantendrá una cama de material inerte levitando dentro del gasificador. Por último el motor del sistema de dosificación de biomasa es encendido para que ingrese hoja de caña de azúcar, esta inicialmente fue trasladada por sacos a la planta experimental como se aprecia en la Figura 3.3. La hoja antes de ser ingresada debe cortarse para reducir su tamaño, con esto el proceso de gasificación es capaz de desarrollarse y mantenerse. Luego de ingresar la hoja al gasificador, mediante procesos termoquímicos, se obtendrá como producto syngas.



Figura 3.1. Muestra de bauxita, material inerte.

Fuente: Foto tomada por tesista.



Figura 3.2. Malla distribuidora a emplear en el gasificador.

Fuente: Foto tomada por tesista.



Figura 3.3. Hoja de caña sin cortar en sacos.

Fuente: Foto tomada por tesista.

3.2. Protocolo de puesta en marcha

En el apartado a tratar ahora será descrita de forma detallada el encendido de cada uno de los componentes de la planta, hasta el último tramo de la experimentación con la planta que viene a ser la lectura y recopilación de datos en la notebook.

Etapas de puesta en marcha:

- 1) Verificar que todo el sistema se encuentre en estado apagado:

Como se verá en los siguientes pasos, el sistema de gasificación depende de ciertas etapas que deben seguirse con cuidado para evitar cualquier inconveniente durante la puesta en marcha. Al entrar en la planta experimental verificar que la palanca del regulador del gas se encuentre hacia abajo en posición apagado como es señalado en rojo en la Figura 3.4, que el indicador del regulador del quemador no supere el nivel 0, Figura 3.5, y que el switch del quemador se encuentre en estado “OFF”, Figura 3.6.

Revisar que las palancas de las llaves e interruptores del tablero de energía principal se encuentren en estado “0-OFF”. Además verificar que las palancas de las llaves del tablero eléctrico central se encuentren hacia abajo en posición “0-OFF”.



Figura 3.4. Posición de válvula cerrada del balón de gas.

Fuente: Foto tomada por tesista.



Figura 3.5. Posición en nivel 0 indicando que no hay ingreso de gas al quemador.

Fuente: Foto tomada por tesista.

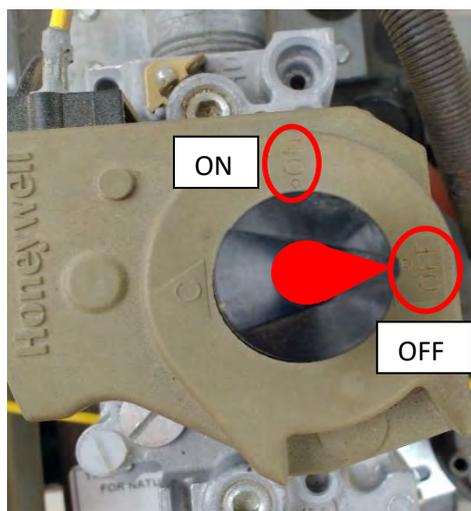


Figura 3.6. Switch del quemador en indicando estado “0-OFF”.

Fuente: Foto tomada por tesista.

2) Preparar e introducir material inerte al gasificador y preparar la biomasa:

Ambos elementos deben atravesar por tratamientos propios. La bauxita, material inerte, comprada viene en sacos donde no todos los granos miden 3 mm de diámetro necesario para el proceso. Por lo que se cierne con malla para diámetro de grano de este tamaño, tamiz número 10, Figura 3.7. Al interno del gasificador se necesita un lecho de material inerte que no baje de 15 cm de altura, esto debido a que la llama del quemador debe mantenerse en contacto directo con parte del material inerte. Luego de cernirse se procede a desacoplar el cañón del quemador e ingresar material inerte tamizado al gasificador por el orificio desocupado del desacople, en caso el material inerte haya sido ingresado previamente al gasificador por alguna prueba anterior esta indicación es omitida.

La hoja de caña, biomasa, también requiere tratamiento previo antes de poder ser ingresada al gasificador a través del tornillo dosificador. Esta es cortada con tijeras de jardinería hasta obtener retazos aproximadamente de 2 cm por 2 cm, Figura 3.8.



Figura 3.7. Proceso de tamizado del material inerte.

Fuente: Foto tomada por tesista.



Figura 3.8. Biomasa en proceso de preparación.

Fuente: Foto tomada por tesista.

3) Habilitar el energizado de toda la planta:

En la sección 2.3 se mostró el tablero eléctrico central de toda la planta, este permite prender las luminarias, energiza los tomacorrientes y permite el paso de corriente al tablero de energía principal. En la Figura 3.9 se muestra en la parte superior que las palancas de las llaves se posicionan hacia abajo permitiendo ver en la mismas que se encuentran en estado “0-OFF”, subiendo estas palancas es cambiado el estado a “I-ON” activando por tanto las llaves, tal cual se ve abajo en la misma figura.



Figura 3.9. Proceso de activación de las llaves termo-magnéticas del tablero eléctrico.

Fuente: Foto tomada por tesista.

- 4) Habilitar energía a las llaves termo-magnéticas de los subsistemas, energizar el variador del dosificador de biomasa, energizar llave termo-magnética del subsistema de adquisición de datos y del variador del soplador:

De las llaves termo-magnéticas mostradas en la sección 2.6.1 se da paso a subir la palanca de (1) para llevar del estado “0-OFF” a “I-ON”, encender, la llave de energía principal tal cual se muestra en la Figura 3.10. Esta llave permite el paso de energía al resto de dispositivos que conforma cada subsistema. Proceder a subir la palanca de la llave (2) para activar el variador del dosificador, Figura 3.11. Con esto el variador muestra en el display el mensaje “nSt”, Figura 3.12, dado que se encuentra configurado para trabajar a través de comunicación industrial Modbus, permaneciendo en modo de parada hasta que se envíe el comando necesario [13]. Esta etapa finaliza con encender (4) y (5), Figura 3.13, permitiendo el paso de corriente a los diferenciales de la siguiente etapa.

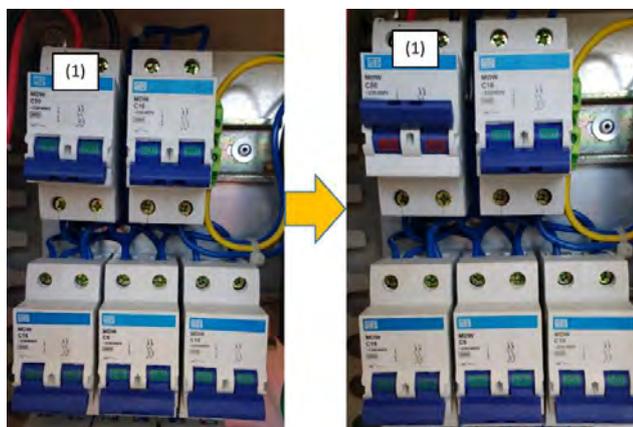


Figura 3.10. Proceso de activación de la llave de energía principal de los dispositivos del sistema.

Fuente: Foto tomada por tesista.



Figura 3.11. Proceso de activación de la llave del variador del sistema dosificador.

Fuente: Foto tomada por tesista.



Figura 3.12. Mensaje que por defecto debe aparecer en el display del variador al ser encendido.

Fuente: Foto tomada por tesista.



Figura 3.13. Proceso de activación de las llaves del sistema de adquisición de datos y del soplador.

Fuente: Foto tomada por tesista.

5) Energizar tablero de adquisición de datos y tablero de soplador:

En la sección 2.6.1 se mostraron los diferenciales [2] y [3] del tablero de adquisición de datos y del soplador, respectivamente. Ambos deben ser activados, Figura 3.14. Concluida esta acción el PLC muestra la luz de los indicadores PWR y RUN en verde, esto es señalado con rojo en Figura 3.15, denotando que el sistema se encuentra preparado para trabajar. Con respecto al variador del soplador, una vez encendido, por defecto de configuración, se encuentra en modo local, izquierda de Figura 3.16. Para cambiar de modo local a modo remoto, derecha de Figura 3.16, y ser comandado por comunicación industrial Modbus, se oprime el botón LOC/REM en el equipo. El requerimiento de cambio de local a remoto brinda seguridad al sistema de gasificación dado que no permite que cualquier operario que no haya leído el manual de uso ejecute la puesta en marcha. Este botón se encuentra señalado con rojo en Figura 3.16.

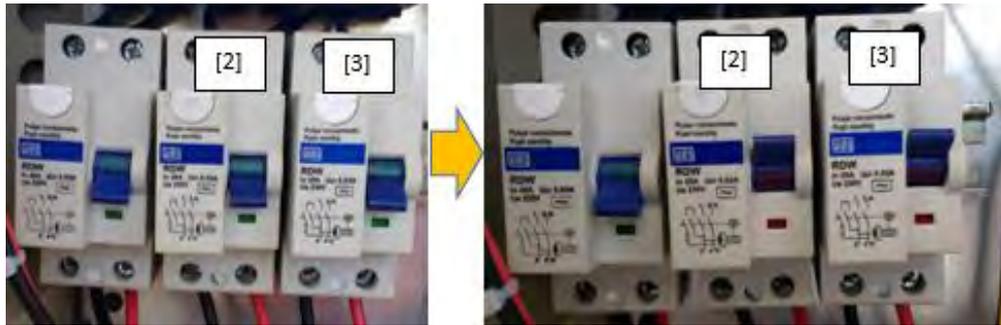


Figura 3.14. Proceso de activación de los diferenciales del sistema de adquisición de datos y del soplador.

Fuente: Foto tomada por tesista.

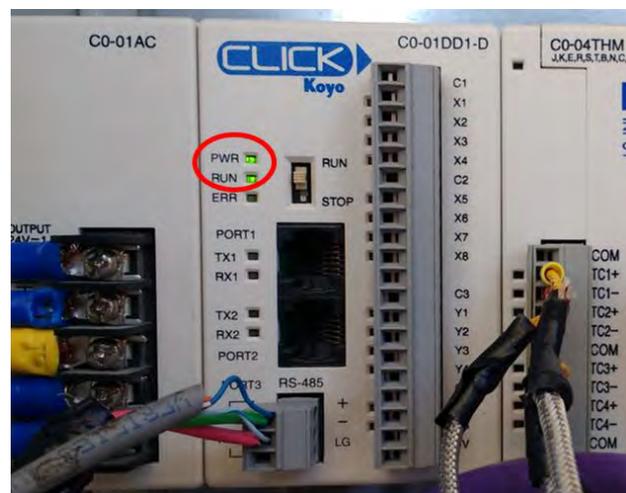


Figura 3.15. Indicadores del PLC mostrando que se encuentra apto para operar.

Fuente: Foto tomada por tesista.



Figura 3.16. Cambio del modo manual al modo remoto del variador del soplador.

Fuente: Foto tomada por tesista.

6) Preparar programa de lectura y recopilación de datos:

Con la notebook encendida, y conectada con el cable RS485 USB (señalado con rojo en Figura 3.17) en el puerto adecuado, como se ve en la figura antes mencionada, para comunicación Modbus, ingresar al programa MATLAB R2015a. En la barra de tareas haciendo click en “HOME”, luego en “New”, se procede con “Graphical User Interface” apareciendo así los últimos GUI empleados, es seleccionado “MedicionGas.fig” con lo que aparecerá el archivo modificable de la interfaz GUI del programa a emplear, esta etapa termina dando click en la flecha verde (Run Figure), click en “Abrir Animación” de la ventana emergente, resultando en la apertura del archivo “MeterTemperaturas” de Simulink. Todos los archivos previamente mencionados se encuentran en la posición C:\Gasificador. El programa inicia a tomar datos luego de dar click en “Inicio de Operación”, solo se leerán las temperaturas al interno del gasificador cercanas a la ambiental. Todo el proceso anterior se observa en la Figura 3.18.

Al dar click en “Inicio Operación” el programa enviará al bloque “CMD” del simulink el comando 0 y luego el comando 6, estos comandos son escritos en el address 48602 del variador del dosificador como protocolo de puesta en marcha indicado en el manual del variador [13]. Al mismo tiempo también se mandan los comandos 0 y 6 al bloque “CMDWeg”, escribiéndose los mismos en el address 400683 del variador del soplador como protocolo de puesta en marcha [14]. Es necesario detallar que en estos momentos los sistemas del soplador y dosificación se encuentran en espera del resto de comandos para poder ser encendidos. El ingreso de estos comandos mencionados puede visualizarse en la Figura 3.19.

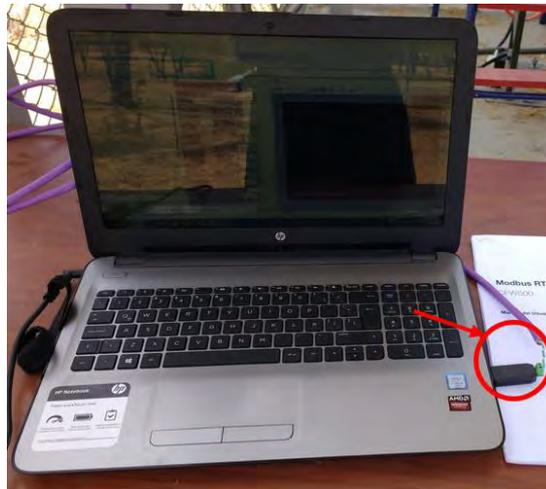


Figura 3.17. Notebook con conexión RS485 USB para comunicación Modbus.

Fuente: Foto tomada por tesista.

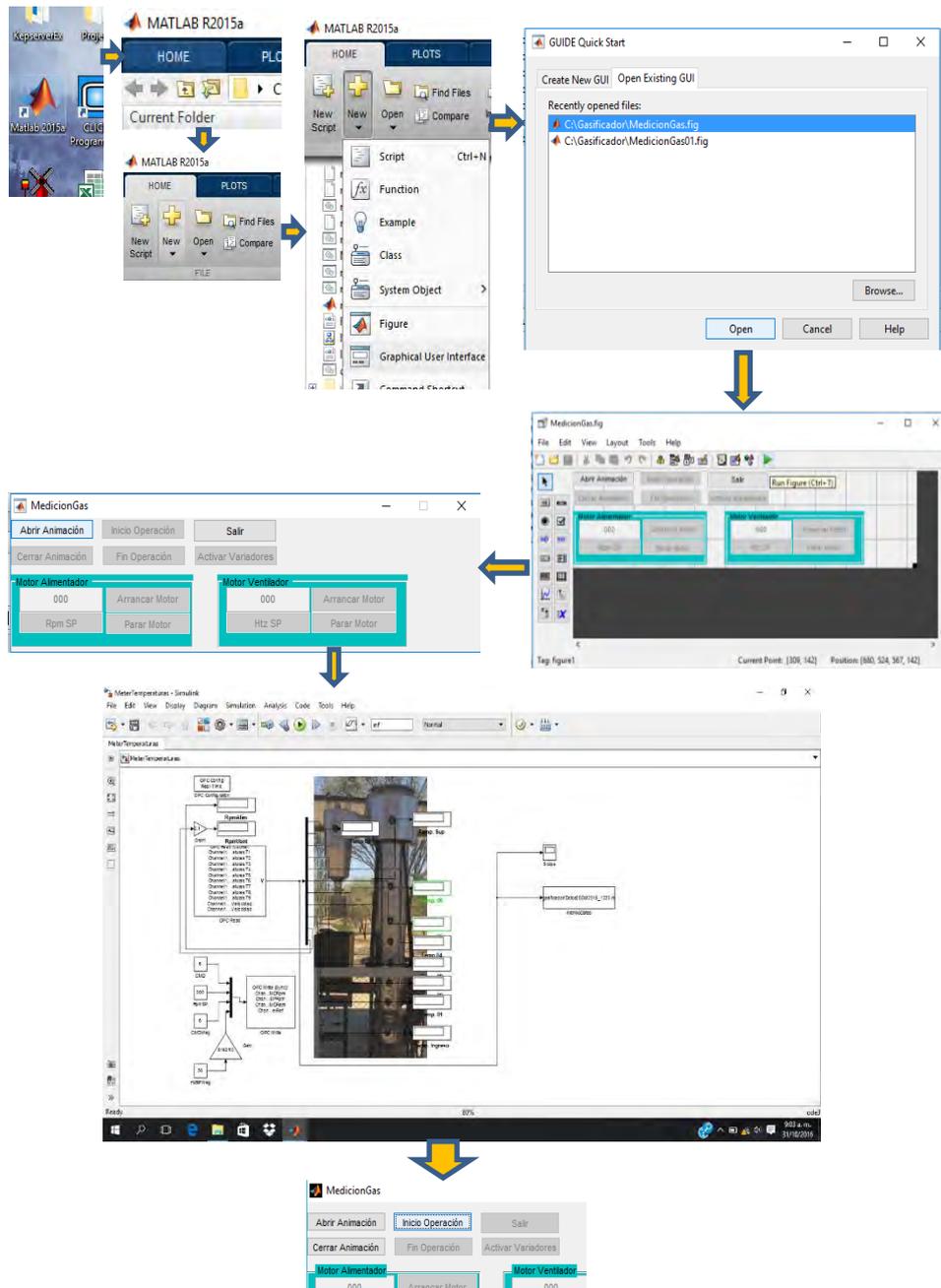


Figura 3.18. Proceso de iniciación del programa de lectura y recopilación de datos.

Fuente: Elaboración propia.

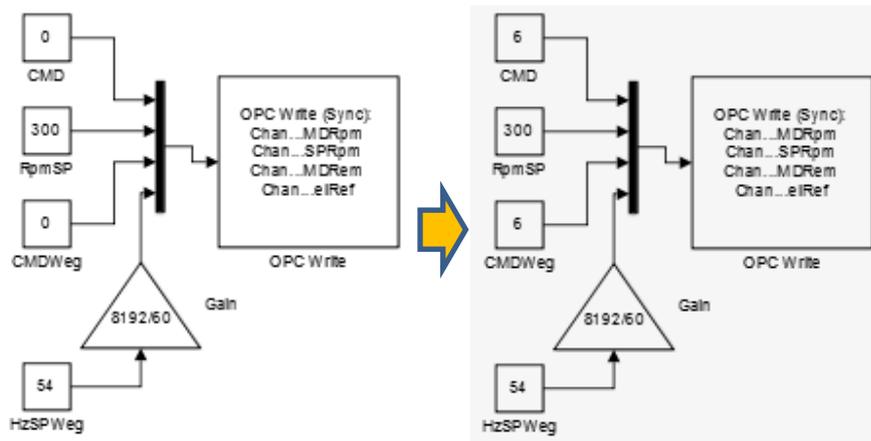


Figura 3.19. Ingreso de comandos iniciales mostrados en la interfaz creada en “Simulink”.

Fuente: Elaboración propia.

7) Encender quemador:

En caso el quemador se encuentre desacoplado del gasificador, dar paso a colocarlo en su mesa de soporte para acoplarlo a la entrada del cañón en el gasificador.

Teniendo el quemador posicionado, continúa la operación accionando la llave termo-magnética (3), Figura 3.20, y el interruptor diferencial [1], Figura 3.21. Se sabrá que el quemador es alimentado con energía eléctrica cuando este emita sonido, dando acción por lo tanto a activar la válvula del balón de gas realizando el proceso mostrado en la Figura 3.22. Realizada esta acción se esperan 5 minutos, luego de pasar este tiempo emplear un destornillador plano para colocar el indicador del regulador del quemador a nivel 2, Figura 3.23, y cambiar el estado del switch del quemador de “OFF” a “ON”, Figura 3.24. Del quemador se escuchará un sonido agudo proveniente del mechero, tras esto emitirá la flama buscada. En caso suene el mechero y no se escuche flama alguna ni se emita calor se apaga el quemador, se cambia la posición del nivel de su indicador a 0, se apaga el regulador de la válvula del balón de gas y se apaga el diferencial del quemador. En caso al repetir los pasos desde el inicio de esta etapa el quemador no emita flama, existen dos posibles razones de solución rápida: el balón de gas se encuentra vacío o se introdujeron granos del material inerte en el cañón del quemador. Si el balón está vacío se da paso a cambiarlo por uno lleno, si se introdujeron granos del material inerte entonces se da paso a desacoplar el quemador y limpiar los granos al interno del cañón.



Figura 3.20. Activación del breaker del quemador.

Fuente: Foto tomada por tesista.

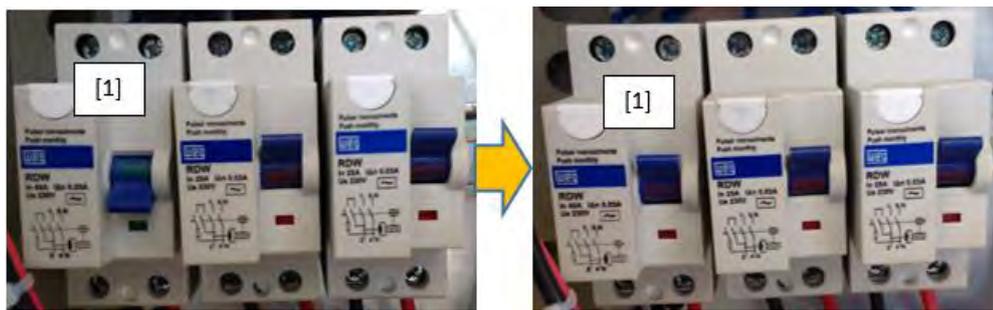


Figura 3.21. Activación del diferencial del quemador.

Fuente: Foto tomada por tesista.

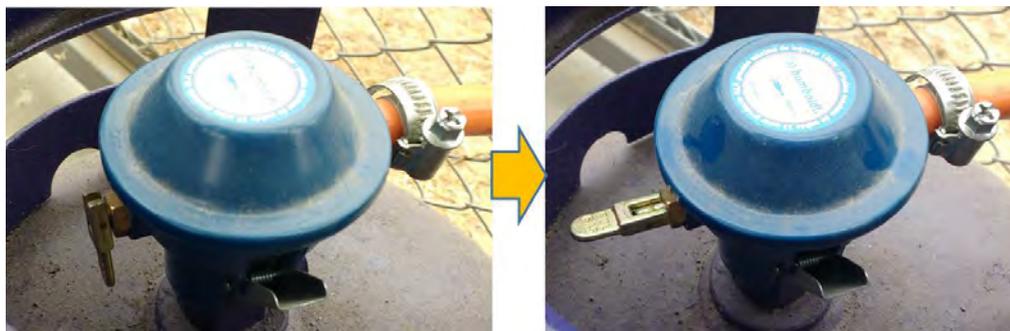


Figura 3.22. Apertura válvula de suministro de gas.

Fuente: Foto tomada por tesista.

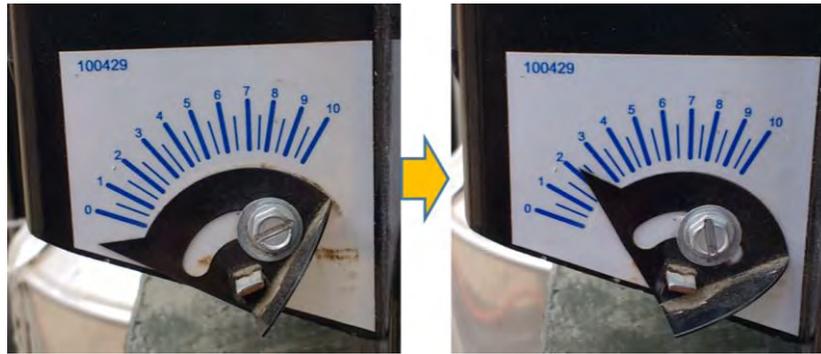


Figura 3.23. Cambio de nivel necesario para el encendido del quemador.

Fuente: Foto tomada por tesista.

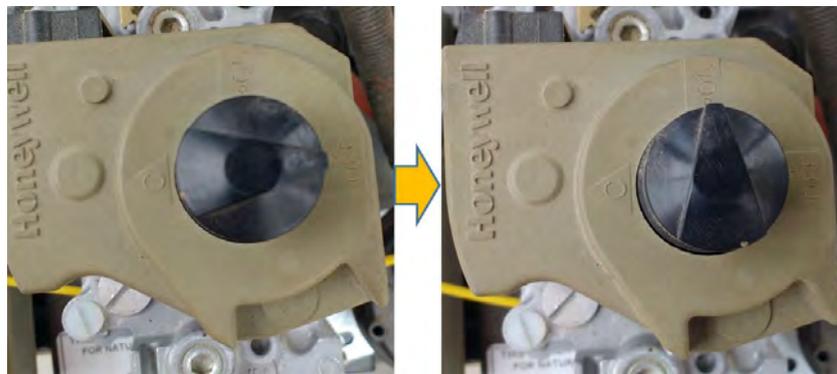


Figura 3.24. Cambio de posición del swieth del quemador de “ON” a “OFF”.

Fuente: Foto tomada por tesista.

8) Calentar material inerte, accionar soplador y tornillo dosificador:

Una vez emitida la flama, el quemador es mantenido prendido en nivel 2 por diez minutos hasta que la temperatura registrada en el SENSOR 2 y SENSOR 3 de la Figura 2.33, en la sección 2.6.1, marquen valores superiores a los 700 °C.

Una vez obtenido este valor de temperatura al interno del gasificador utilizando la GUI “MedicionGas”, usada previamente en MATLAB, hacer click en “Activar Variadores” para activar los botones de los cuadros “Motor Alimentador” y “Motor Ventilador”. Es necesario mencionar que antes de dar click en este botón primero hay que permitir a los comandos del paso anterior ser escritos en los “address” sino se pueden presentar problemas de encendido más adelante por no respetar el protocolo de puesta en marcha de los variadores. El programa primero envía el comando 7 al bloque “CMD”, Figura 3.25, de tal forma que el programa escribe el comando en el address 48602 del variador del dosificador. El proceso de fluidización requiere emplear el soplador en valores de frecuencia entre 52 y 60 Hz por lo que se digita 54 en el espacio disponible en el cuadro “Motor Ventilador”, hacer click en “Htz SP” y luego click en “Arrancar Motor” de este

mismo cuadro con lo cual el programa manda el comando 7 al bloque “CMDWeg” (Figura 3.26) de tal forma que se escriba al address 400683 del variador del soplador encendiéndolo dado que se completa el protocolo de encendido descrito en el manual del fabricante [14]. Al activar el soplador las temperaturas al interno del gasificador tienden a bajar dado que entra aire a temperatura ambiente. El quemador y el soplador trabajarán en conjunto solo por unos diez segundos luego dar click en “Parar Motor” dentro del cuadro “Motor Ventilador” de la GUI para apagar el soplador. Con esto se realiza cambio de posición del material inerte, los granos de bauxita en capas más bajas del lecho no adquirirían energía térmica necesaria al no estar en contacto directo con la llama del quemador, y se logra que porción considerable del lecho alcance la temperatura suficiente para que al estar en contacto con biomasa reaccione y se inicie el proceso de gasificación. Esperar 10 minutos y el mismo proceso de encendido y apagado del soplador es repetido dos veces más.

Una vez estabilizadas las temperaturas del SENSOR 2 y SENSOR 3 en valores superiores a 700 °C, el siguiente paso es apagar el quemador realizando el inverso a los pasos de su encendido. Se deposita biomasa dentro de la tolva y lo siguiente es encender el tornillo dosificador. Se digita 300 en el espacio disponible en el cuadro “Motor Alimentador”, dar click en el botón “Rpm SP” y luego en “Arrancar Motor” con lo cual el programa manda el comando 15 al bloque “CMD” (Figura 3.27) de tal forma que se escriba al address 48602 del variador del dosificador encendiéndolo dado que se completa el protocolo de encendido descrito en el manual del fabricante [13]. Por último nuevamente es encendido el soplador con referencia de 54 Hz. Todo el procedimiento de encendido de ambos sistemas se ve en Figura 3.28.

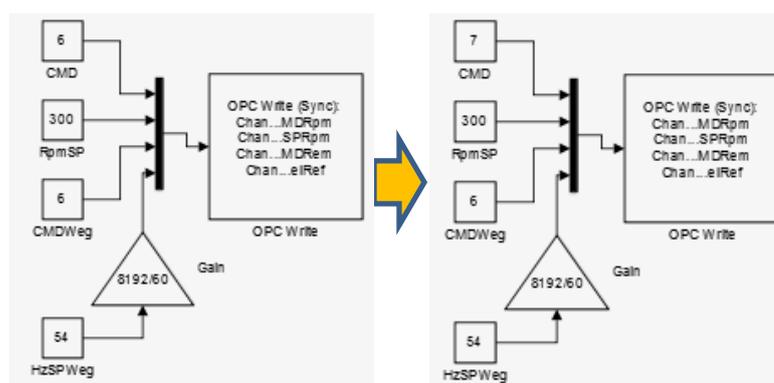


Figura 3.25. Ingreso de comando 7 del protocolo de puesta en marcha del variador del dosificador en la interfaz creada en “Simulink”.

Fuente: Elaboración propia.

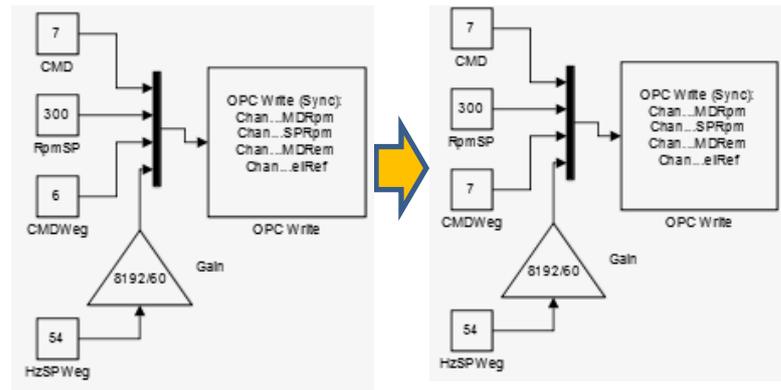


Figura 3.26. Ingreso de comando 7 del protocolo de puesta en marcha del variador del soplador para su encendido.

Fuente: Elaboración propia.

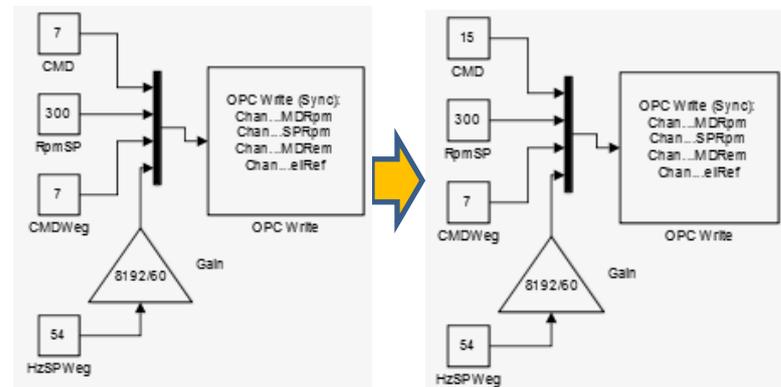


Figura 3.27. Ingreso de comando 15 del protocolo de puesta en marcha del variador del dosificador para su encendido.

Fuente: Elaboración propia.

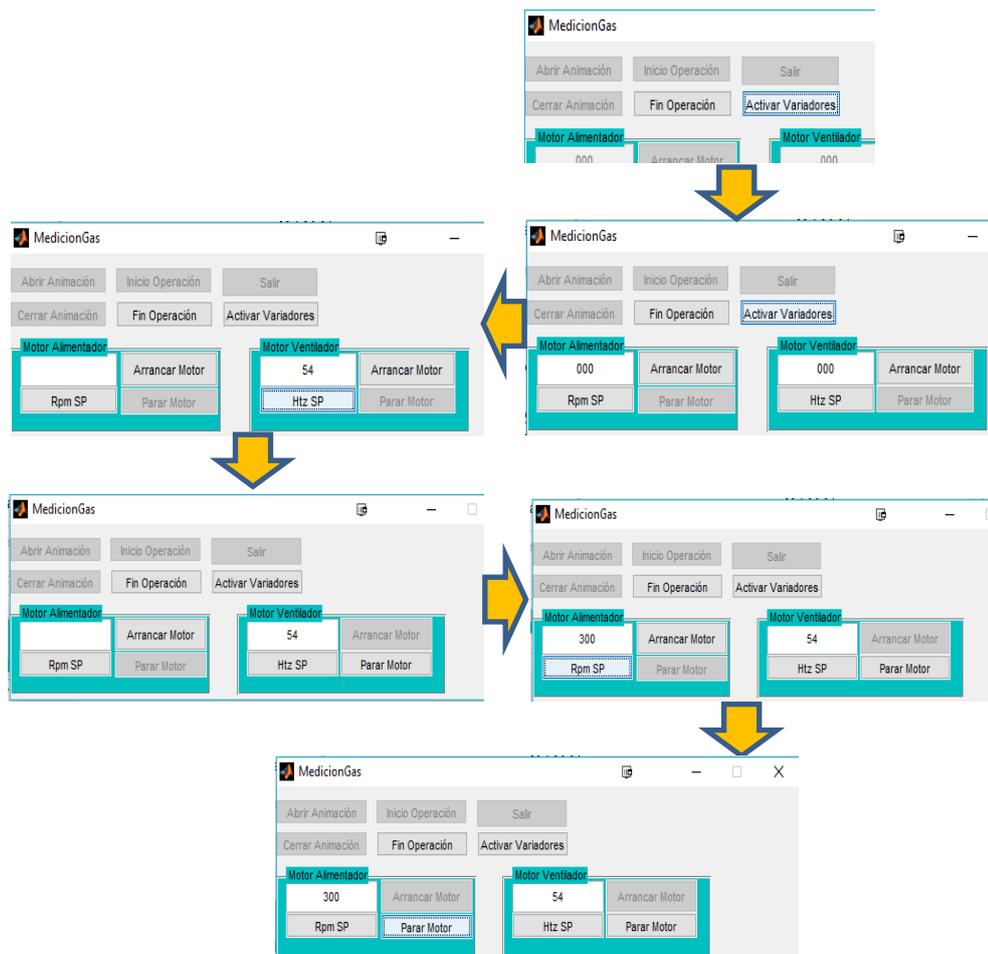


Figura 3.28. Procedimiento de encendido del soplador y dosificador mediante la GUI del programa de adquisición de datos.

Fuente: Elaboración propia.

9) Monitorear el sistema de gasificación hasta el establecimiento y almacenar datos:

Una vez el dispositivo del alimentador empieza a ingresar biomasa al gasificador se observa el gráfico de temperatura vs tiempo esperando a que el sistema establezca a entrada de biomasa constante, es común que en sistemas térmicos de este tipo el tiempo de espera sea de poco más de diez minutos. Por teoría se tiene previsto que al gasificar biomasa el SENSOR 2 y SENSOR 3 lleguen a establecerse a 800 °C, pero en base a la cantidad y la velocidad de ingreso dependerá la temperatura en estos sensores. En los resultados se mostrará el comportamiento completo del gasificador especificando todos los parámetros de trabajo. Una vez el operario decida que los datos capturados son los necesarios se procede a dar click en el botón “Parar Motor” en los cuadros “Motor Alimentador” y “Motor Ventilador” de la GUI, y por último hacer click en el botón “Fin Operación” con lo cual los datos capturados serán guardados en una hoja de datos con formato “.mat”.

En el diagrama de flujo de la Figura 3.29 se encuentra resumido el protocolo de puesta en marcha explicado en esta sección.

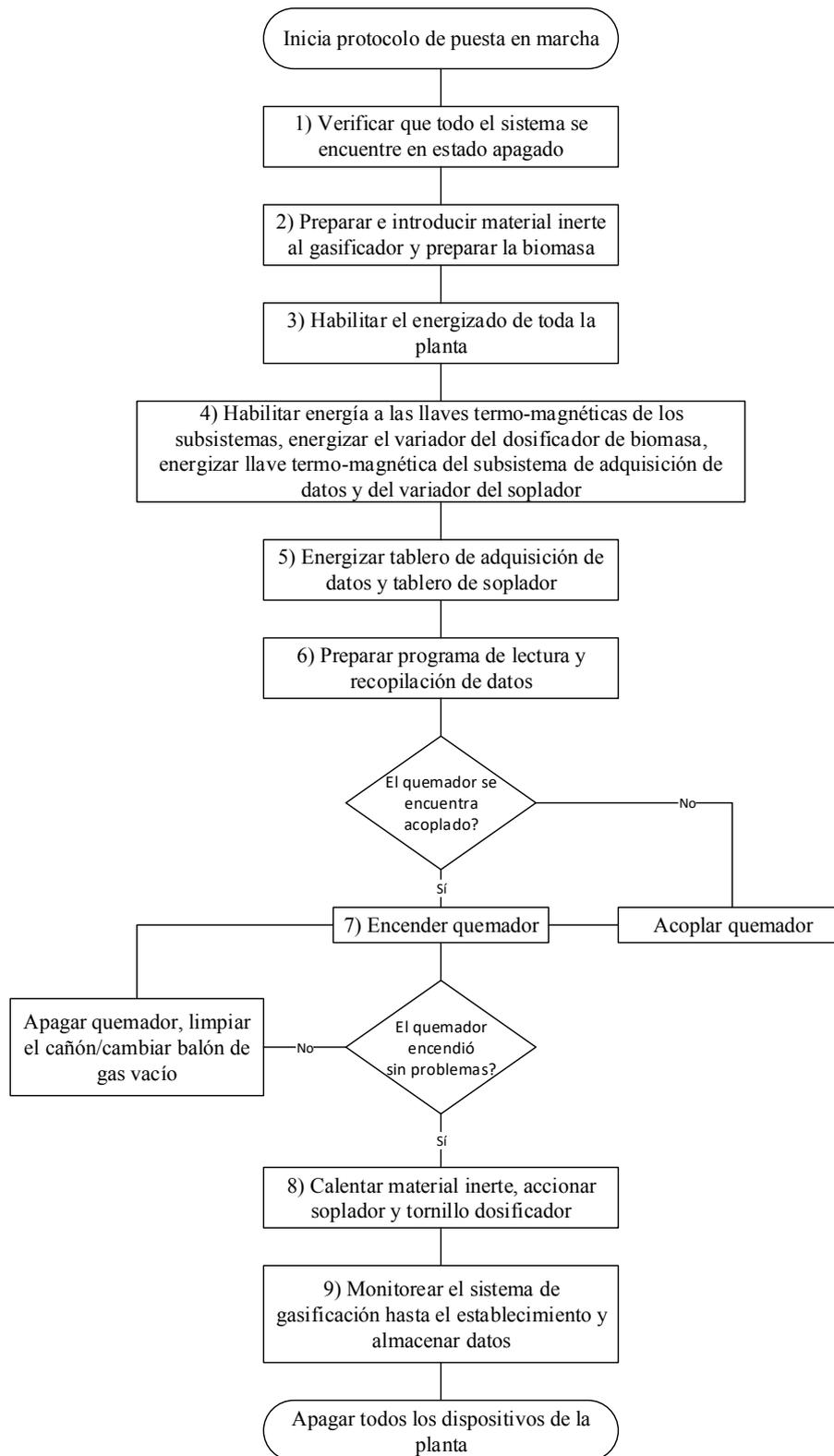


Figura 3.29. Diagrama de flujo del protocolo de puesta en marcha.

Fuente: Elaboración propia.

Capítulo IV

Pruebas del sistema y resultados

4.1. Indicaciones

En el presente capítulo se mostrarán los resultados de poner a prueba cada subsistema por separado y por último al sistema de gasificación en conjunto como planta experimental de pruebas finales.

4.2. Pruebas realizadas con subsistemas por separado

4.2.1. Experimentando con subsistema de alimentación de biomasa

Con el subsistema montado se procedió a experimentar con el mismo, es necesario conocer la capacidad de transporte de biomasa del tornillo dosificador al gasificador. El procedimiento para conocer la cantidad de biomasa por minuto ingresada al gasificador fue el siguiente:

1. Desacoplar la parte baja del gasificador, la que contiene la malla distribuidora. En este espacio hueco es acoplado un depósito que contendrá la biomasa post pruebas.
2. El operario del sistema coge el balde que posee la planta experimental como herramienta y mide su peso con la balanza digital registrando el dato.
3. Llenar el balde y proceder a medir nuevamente su peso con el balde ahora lleno preferiblemente superior al 75%, nuevamente registrando este dato de peso.
4. Se resta este segundo dato con el primero para obtener la cantidad de biomasa en kg que se empleará en cada una de las pruebas.
5. La biomasa del balde es vaciada en la tolva con el subsistema apagado y procurando mantener la mayor cantidad de biomasa posible concentrada en la parte visible del tornillo dentro de la tolva.

6. El sistema dosificador es encendido especificando una velocidad en el rango posible, en este momento se inicia a medir el tiempo con cronómetro. La biomasa cae por el espacio dejado hacia el depósito, una vez el operario se percate que no cae más hoja este detiene el cronómetro y apaga el motor del tornillo. Este dato de tiempo es registrado.
7. Se repiten los mismos pasos anteriores un mínimo de tres veces en la misma velocidad que se necesite analizar y luego variar la velocidad, procediendo a repetir los pasos anteriores.

Para las velocidades del motor a 300, 500 y 700 rpm fueron obtenidos datos empleando los pasos antes mencionados. Es necesario recordar que entre el tornillo con tolva y el motor se tiene al reductor de velocidades mecánico, por lo que la velocidad ingresada al programa, a la cual se moverá solo el motor, no será la equivalente en el tornillo. Los datos de las pruebas realizadas, Tabla 4.1, Tabla 4.2 y Tabla 4.3, son resultado de pruebas a temperatura ambiente.

Tabla 4.1. Datos recopilados al probar el subsistema de alimentación con referencia de 300 rpm.

VELOCIDAD DE 300 RPM				
PESO (kg)	Tiempo (min)	Tiempo (s)	Flujo másico (kg/s)	Flujo másico (kg/min)
0.7	3:40	220	0.00318182	0.19090909
1	5:50	350	0.00285714	0.17142857
0.8	4:00	240	0.00333333	0.2
0.8	3:50	230	0.00347826	0.20869565
Flujo Másico promedio a 300 RPM				0.19275833

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.2. Datos recopilados al probar el subsistema de alimentación con referencia de 500 rpm.

VELOCIDAD DE 500 RPM				
PESO (kg)	Tiempo (min)	Tiempo (s)	Flujo másico (kg/s)	Flujo másico (kg/min)
0.7	2:20	140	0.005	0.3
0.7	2:15	135	0.00518519	0.31111111
0.7	2:18	138	0.00507246	0.30434783
Flujo Másico promedio a 500 RPM				0.30515298

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.3. Datos recopilados al probar el subsistema de alimentación con referencia de 700 rpm.

VELOCIDAD DE 700 RPM				
PESO (kg)	Tiempo (min)	Tiempo (s)	Flujo másico (kg/s)	Flujo másico (kg/min)
0.7	1.2	80	0.00875	0.525
0.7	1.2	80	0.00875	0.525
0.7	1.19	79	0.00886076	0.53164557
Flujo Másico promedio a 700 RPM				0.52721519

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4.1 se ve el gráfico de los valores promedio del flujo másico entregado por el tornillo vs velocidad del motor del sistema dosificador. Además se muestra la ecuación del ajuste o tendencia polinómica que podría describir el comportamiento del tornillo a diferentes velocidades.

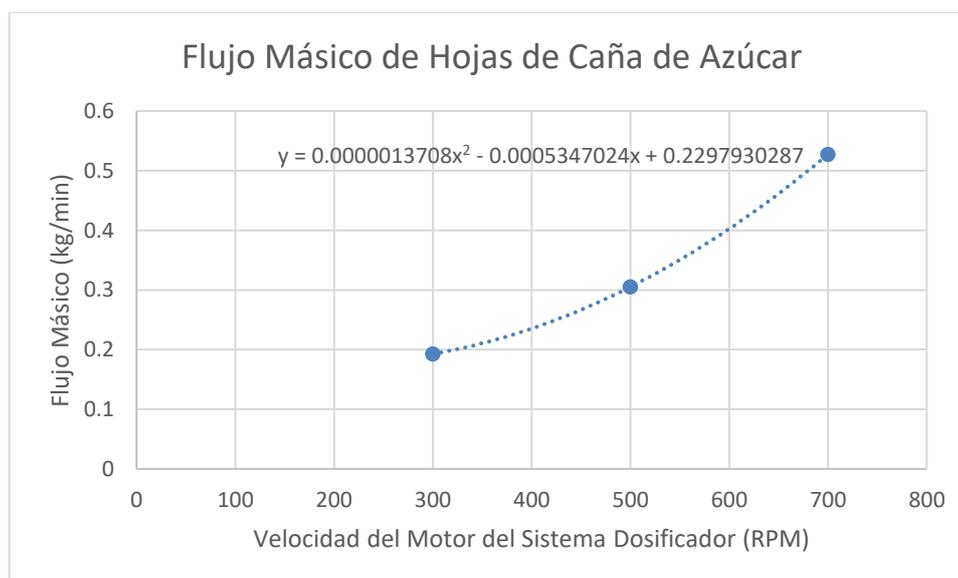


Figura 4.1. Curva de tendencia del flujo másico entregado por el subsistema dosificador.

Fuente: Elaboración propia.

Durante los primeros intentos de puesta en marcha de la planta existieron ciertos percances al intentar trabajar con el subsistema de alimentación luego de emplear el subsistema quemador.

El primer percance fue la fundición de la bocina entre el soporte del eje y el mismo, con lo cual se producía desbalance durante la operación. Además el diseño del soporte del eje no permitía el paso de biomasa provocando estancamiento. Como solución se decidió recortar la carcasa del tornillo para que este ingrese un par de centímetros en el reactor y la biomasa no se estanque, y se empleó una bocina metálica para aguantar las exigencias de temperatura, pero lo segundo no resultó. El último percance fue que al emplear una bocina del mismo material que el eje, estos terminan pegándose debido a dilatación por las condiciones de temperatura. Las bocinas deben ser de un material más blando que el eje para evitar este tipo de situaciones. Como resultado, debido a la potencia del motor del sistema dosificador, el soporte se dobló tal cual se ve en Figura 4.2.



Figura 4.2. Torcedura del soporte del eje del subsistema dosificador.

Fuente: Foto tomada por tesista.

Por lo tanto se quitó el soporte del eje dado que, al realizar pruebas, la biomasa en el momento de funcionamiento actuaba como cama para el eje por lo que no se producía desbalance.

4.2.2. Experimentando con subsistema de fluidización

Instalado el subsistema de fluidización se realizaron pruebas con el fin de conocer cómo se comporta la cama de material inerte bajo diferentes frecuencias de trabajo del variador. Es necesario mencionar que las alturas registradas son aproximaciones y no reflejan completamente los valores reales.

Las pruebas se realizaron con 10 cm de bauxita con tamaño de grano de 3 mm de diámetro promedio dentro del gasificador al variar la frecuencia de trabajo del motor del sistema dosificador. En la Tabla 4.4 se muestran los datos de altura empíricos a las frecuencias digitadas en el programa de mando.

Tabla 4.4. Datos registrados de las pruebas realizadas con el subsistema soplador.

Estado del Lecho	Frecuencia (Hz)	Altura (cm)
Fijo	40	0
Fijo	41	0
Fijo	42	0
Fijo	43	0
Fijo	44	0
Fijo	45	0
Expandido	46	0,1
Expandido	47	0,2
Expandido	48	0,3
Expandido	49	0,4
Expandido	50	0,5
Expandido	51	0,6
Expandido	52	0,7
Fluidizado	53	10

Fuente: Elaboración propia.

De los datos de la Tabla 4.4 se obtuvo el gráfico de la Figura 4.3 donde es mostrada la tendencia que sigue el material inerte conforme es incrementado de a pocos el valor de frecuencia al cual trabaja el motor del soplador. Teniendo el gráfico de la Figura 4.3, es visible la tendencia de la altura del material inerte por encima del lecho de 10 cm conforme incrementa la frecuencia de trabajo. No se consideraron en la toma de datos empíricos valores previos a los 40 Hz debido a que por experiencia con estas magnitudes el lecho no se veía alterado de alguna forma, a partir de 40 Hz en adelante se empiezan a observar mínimas vibraciones. Desde los 46 Hz se observa que las partículas de la parte superior del lecho empiezan a saltar, esto persiste con mayor notoriedad hasta los 52 Hz. Este rango de trabajo es definido como lecho expandido, donde existe movimiento de los granos superficiales del lecho. Cuando la frecuencia es llevada a los 52 Hz se rompe la

inercia del lecho provocando que gran porcentaje del lecho se mantenga suspendido, este es el estado de lecho fluidizado al cual debemos trabajar.

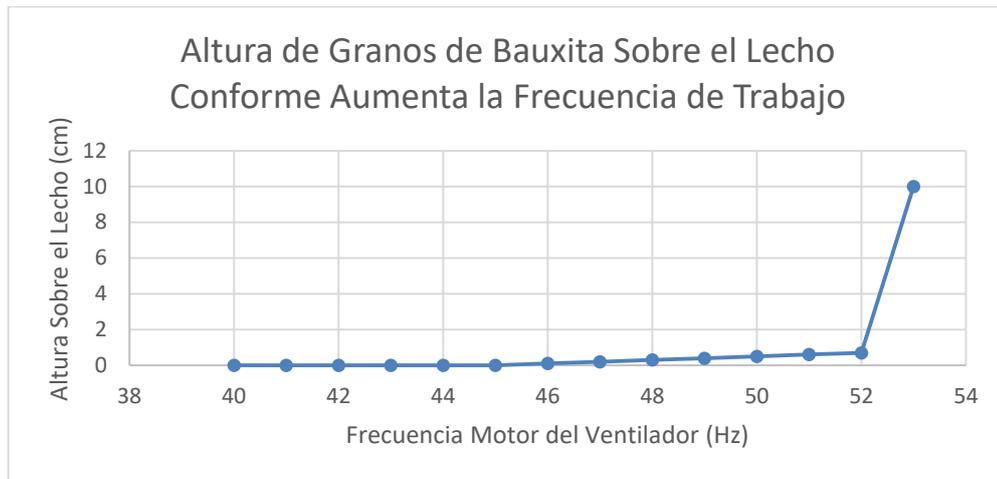


Figura 4.3. Gráfico de tendencia de la altura del material inerte sobre el lecho al probar el subsistema soplador.

Fuente: Elaboración propia.

4.2.3. Experimentando con subsistema quemador

Se probó el funcionamiento y capacidades que tiene el quemador en el sistema de gasificación. Los resultados de estas pruebas son mostrados en el gráfico de la Figura 4.4.

Anteriormente se explicó la instalación de un visor en la parte superior del gasificador. Por lo general los visores para aplicaciones térmicas trabajan bajo rangos especificados por cada tipo de aplicación. En este caso se previó por cálculos teóricos que el visor debía resistir por lo menos 500 °C y fue solicitado a la empresa Factoría Libertad un visor con el tratamiento apropiado de tal manera que resistiera estas condiciones térmicas. En este gráfico de pruebas (Figura 4.4) se muestra el momento en el cual el primer visor empleado se quiebra.

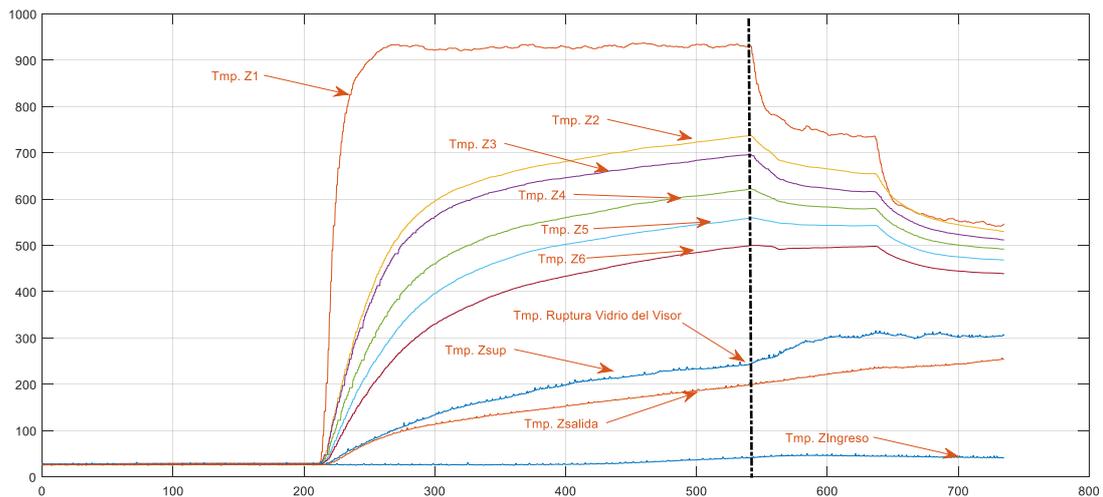


Figura 4.4. Temperaturas registradas de la prueba de funcionamiento del subsistema quemador.

Fuente: Tesista Ricardo García.

En la Figura 4.5 es mostrado cómo queda este visor al someterse a temperaturas superiores a sus capacidades de 250 °C.

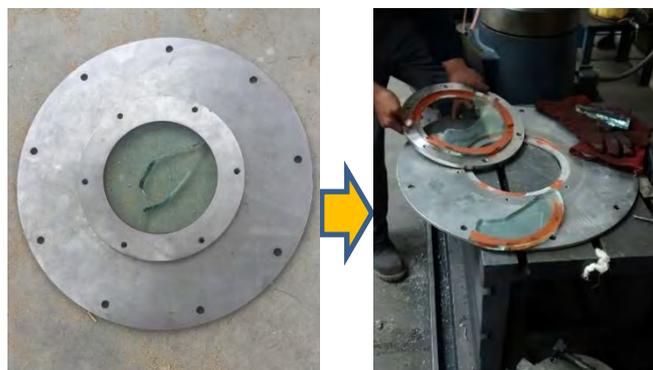


Figura 4.5. Visor quebrado por sometimiento a temperaturas más elevadas que sus capacidades.

Fuente: Foto tomada por tesista.

El nuevo visor fue pedido a un fabricante en Lima, luego de realizar las siguientes pruebas confirmamos que el nuevo visor si cumple con las propiedades necesarias.

4.3. Prueba de planta experimental de gasificador de lecho fluidizado

En este último apartado se procederá a explicar los resultados obtenidos de la última prueba realizada en la planta experimental de gasificador de lecho fluidizado instalado en la universidad.

Estas pruebas se realizaron el lunes 7 de noviembre del presente año 2016 en la planta experimental, entre las 9:27 am y las 11:19 am. Como lecho fueron empleados aproximadamente 15 cm de bauxita con mínima proporción de hoja de caña combinada por encima en un inicio. Siguiendo el protocolo de puesta en marcha del presente trabajo, una vez encendido el quemador, el ventilador del subsistema soplador emanó humo (Figura 4.6), de la misma forma sucedió con la tolva del subsistema dosificador de biomasa. Este humo es producto de la quema de hoja de caña que se encontraba presente combinada con el material inerte.



Figura 4.6. Humo emanando del ventilador del subsistema soplador.

Fuente: Foto tomada por tesista.

Pasando el tiempo y siguiendo con el protocolo se obtuvieron los datos mostrados en la Figura 4.7, estos bajo los parámetros de operación de la Figura 4.8.

En la Figura 4.9 se tiene en un solo gráfico tanto los datos de temperatura obtenidos como los parámetros de trabajo en el tiempo. Se decidió mostrarlos juntos para explicar los diferentes pasos y eventos sucedidos durante la prueba realizada. Se han separado los sucesos por espacios de tiempo delimitados en el gráfico por notas.

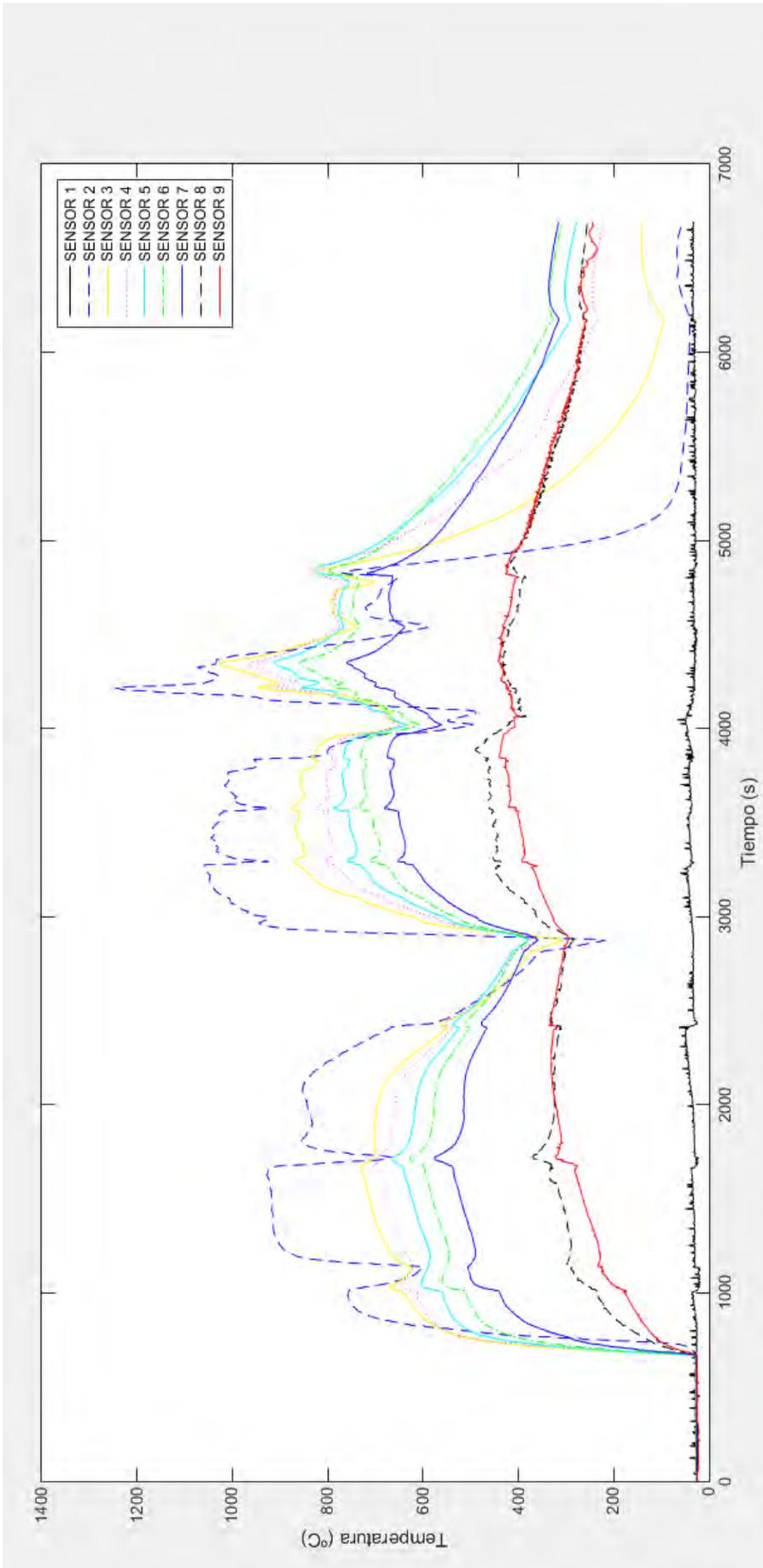


Figura 4.7. Datos de temperatura medidos por cada sensor durante la operación.

Fuente: Elaboración propia.

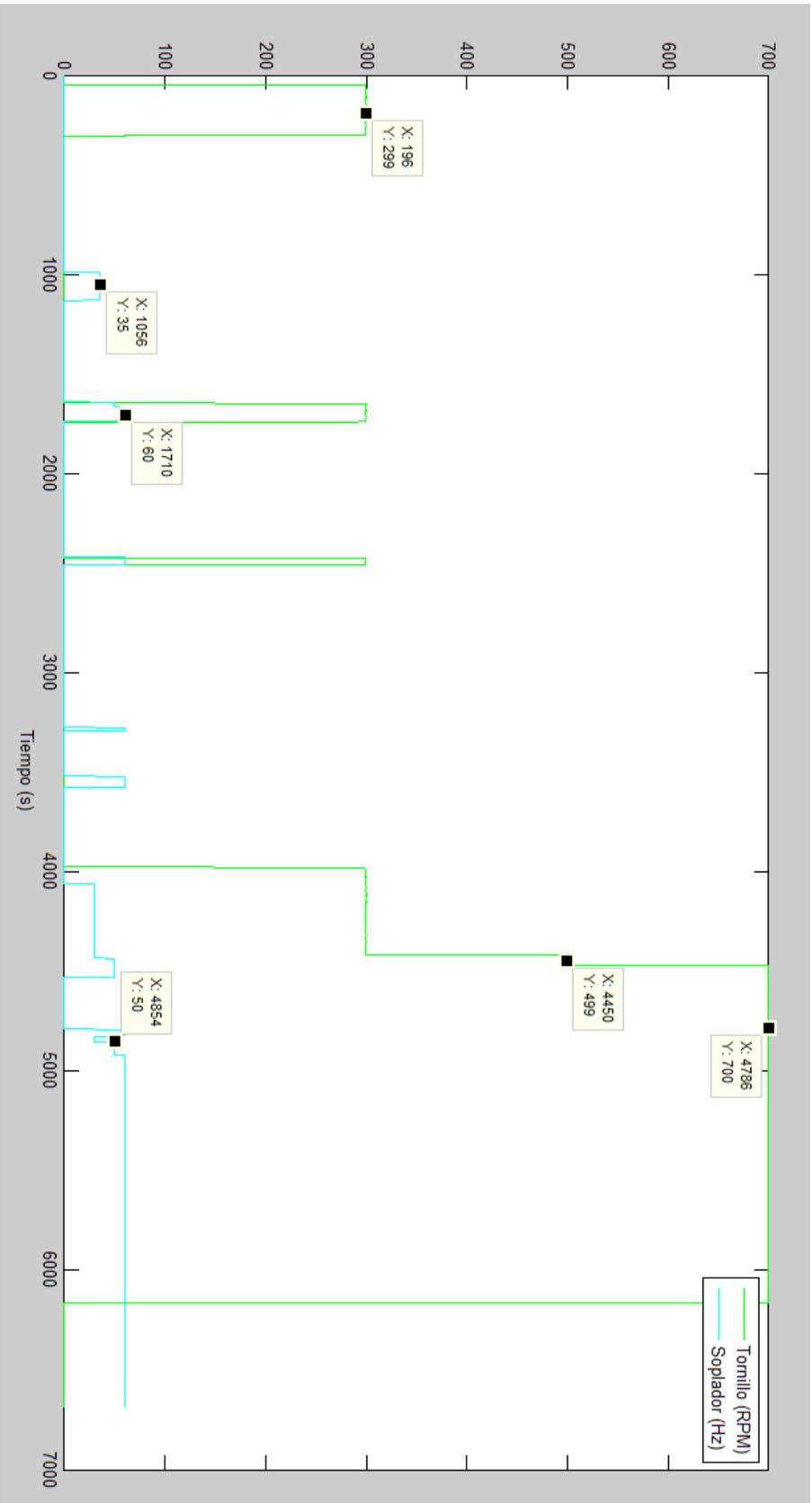


Figura 4.8. Parámetros referencia ingresados al soplador y dosificador.

Fuente: Elaboración propia.

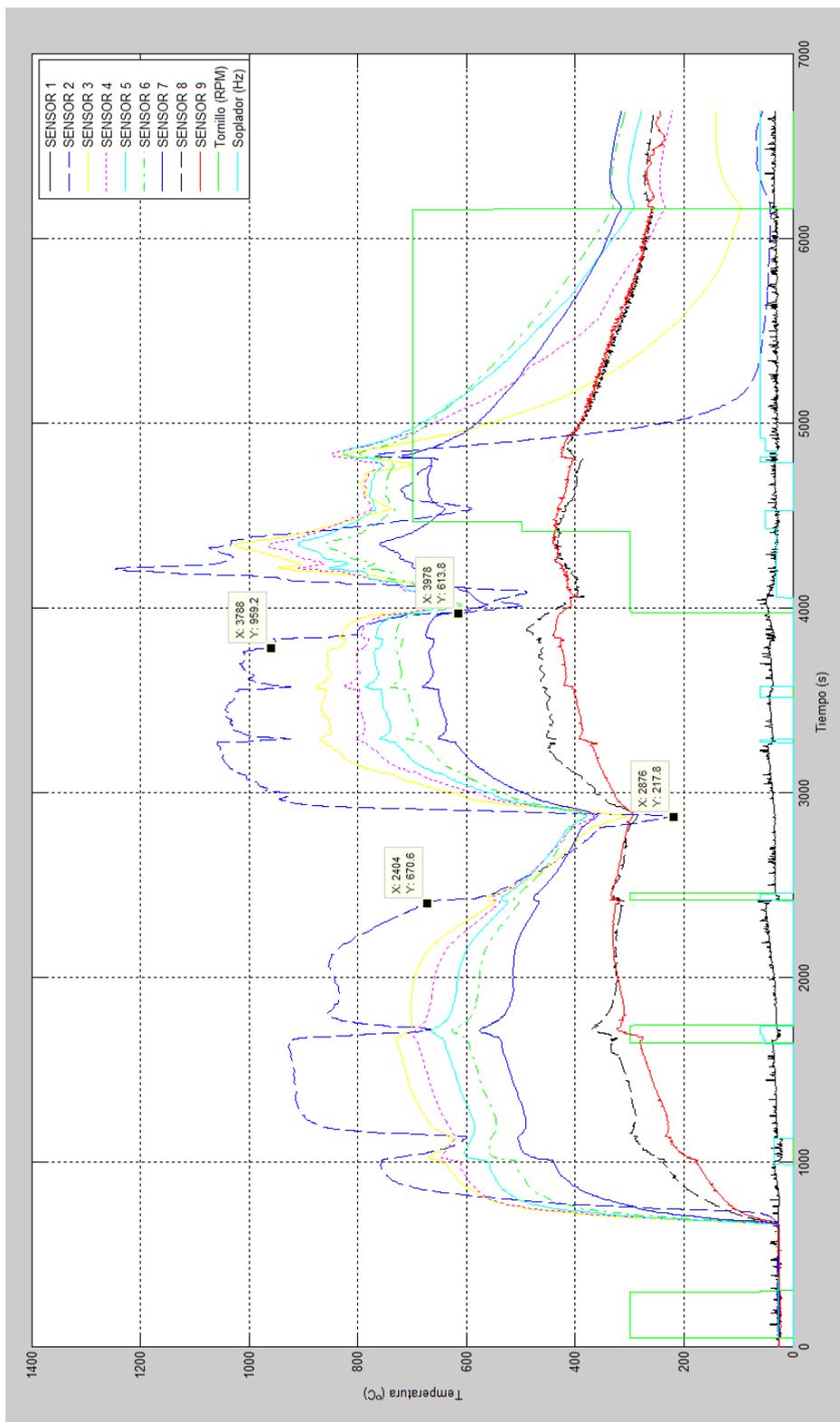


Figura 4.9. Datos de temperatura medidos junto con los parámetros de referencia ingresados.

Fuente: Elaboración propia.

4.3.1. Primer espacio temporal de funcionamiento

El primer espacio de tiempo a señalar es el que se encuentra entre el segundo 0 y 2404 donde se siguió el protocolo de puesta en marcha sin ningún problema hasta un suceso a mencionar más adelante. A los 50 segundos de iniciada la operación es encendido el tornillo a su capacidad mínima programada de 300 rpm, esto con el fin de meter material inerte que se encontraba en el subsistema dosificador por pruebas anteriores. Es aquí donde se combinan pequeñas cantidades de biomasa con el lecho de material inerte, también se habían realizado pruebas anteriores con biomasa. En el segundo 670 el quemador es encendido lo que provoca incremento de temperatura. A los 990 segundos el soplador es encendido para analizar el cambio de temperatura a 35 Hz, apagándolo pasados 140 segundos. Luego se vuelve a encender a los 1642 segundos de funcionamiento pero esta vez con el fin de mover el material inerte y promover el calentamiento homogéneo del mismo; primero se enciende a 50 Hz, luego elevamos a 55 Hz y por último a 60 Hz para probar el comportamiento a altas temperaturas, apagando el soplador a los 96 segundos. En este periodo de tiempo se mantiene el dosificador encendido a 300 rpm para reingresar el material inerte que salta hacia el interior del alimentador de biomasa debido a la presión de aire. Entre el segundo 2102 y 2404 se apaga el quemador y los operarios no se percatan del hecho. En la Figura 4.10 se ha separado todo espacio de tiempo detallado con anterioridad para ser visualizado.

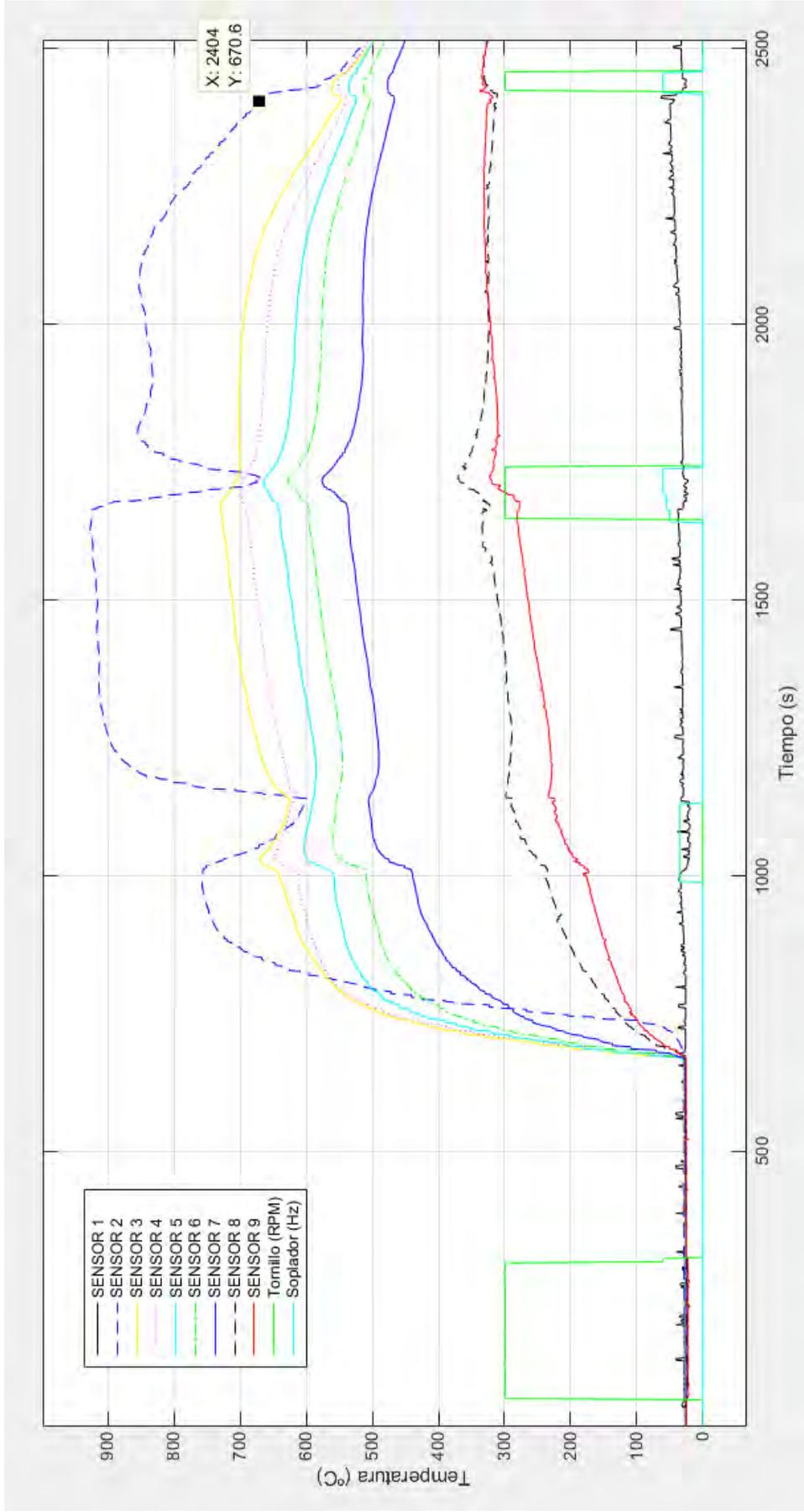


Figura 4.10. Primer espacio temporal de funcionamiento de la planta experimental.

Fuente: Elaboración propia.

4.3.2. Segundo espacio temporal de funcionamiento

El segundo espacio de tiempo es comprendido entre los 2404 y 2876 segundos de funcionamiento de la planta, en este periodo el quemador se encuentra apagado en contra de los deseos de los operarios debido a fallas. En el segundo 2424 es encendido el soplador junto con el quemador con los últimos parámetros empleados hasta el momento, y es apagado a los 34 segundos. Dado que la temperatura seguía en caída los operarios se percatan acerca de la falla con el quemador, por lo que se procedió a repetir el protocolo de encendido del quemador y este encendió en el segundo 2876 de funcionamiento. En la Figura 4.11 se ha separado todo espacio de tiempo detallado con anterioridad para ser visualizado.

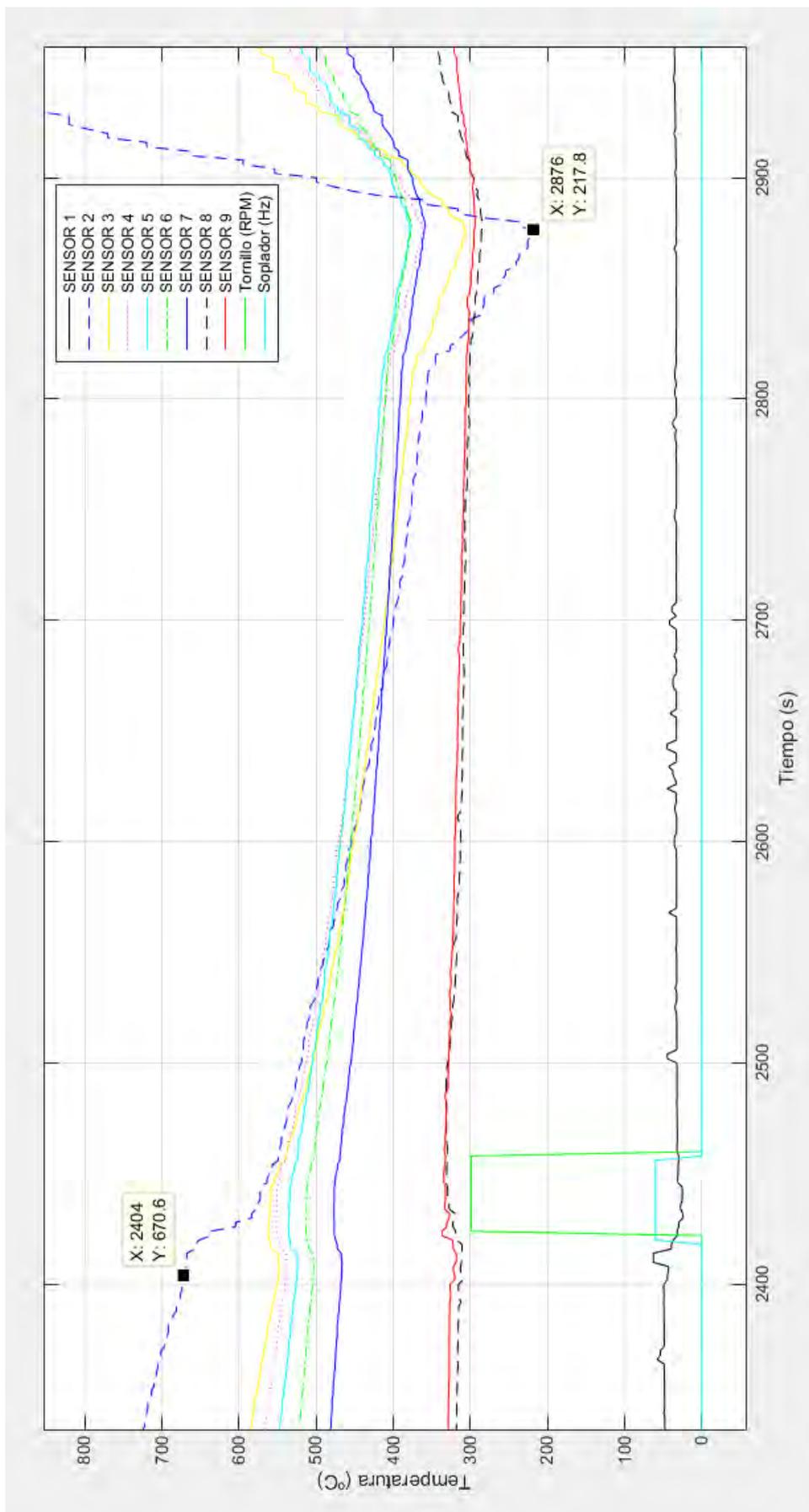


Figura 4.11. Segundo espacio temporal de funcionamiento de la planta experimental.

Fuente: Elaboración propia.

4.3.3. Tercer espacio temporal de funcionamiento

El tercer espacio se encuentra entre los 2876 y 3788 segundos de funcionamiento (Figura 4.12), en este se reinicia la operación de la planta pero con temperaturas iniciales elevadas. Se repite las especificaciones del protocolo de puesta en marcha, encendido y apagado del soplador con el fin de homogeneizar la temperatura en el lecho. En la Figura 4.12 se puede apreciar nuevamente como con el encendido del soplador las temperaturas tienden a bajar mientras este se mantenga encendido.

4.3.4. Cuarto espacio temporal de funcionamiento

El cuarto espacio es el comprendido entre los 3788 y 3994 segundos (Figura 4.13), en este periodo el quemador nuevamente se apaga pero en esta ocasión la razón es falta de gas propano en el balón para el mantenimiento de la flama.

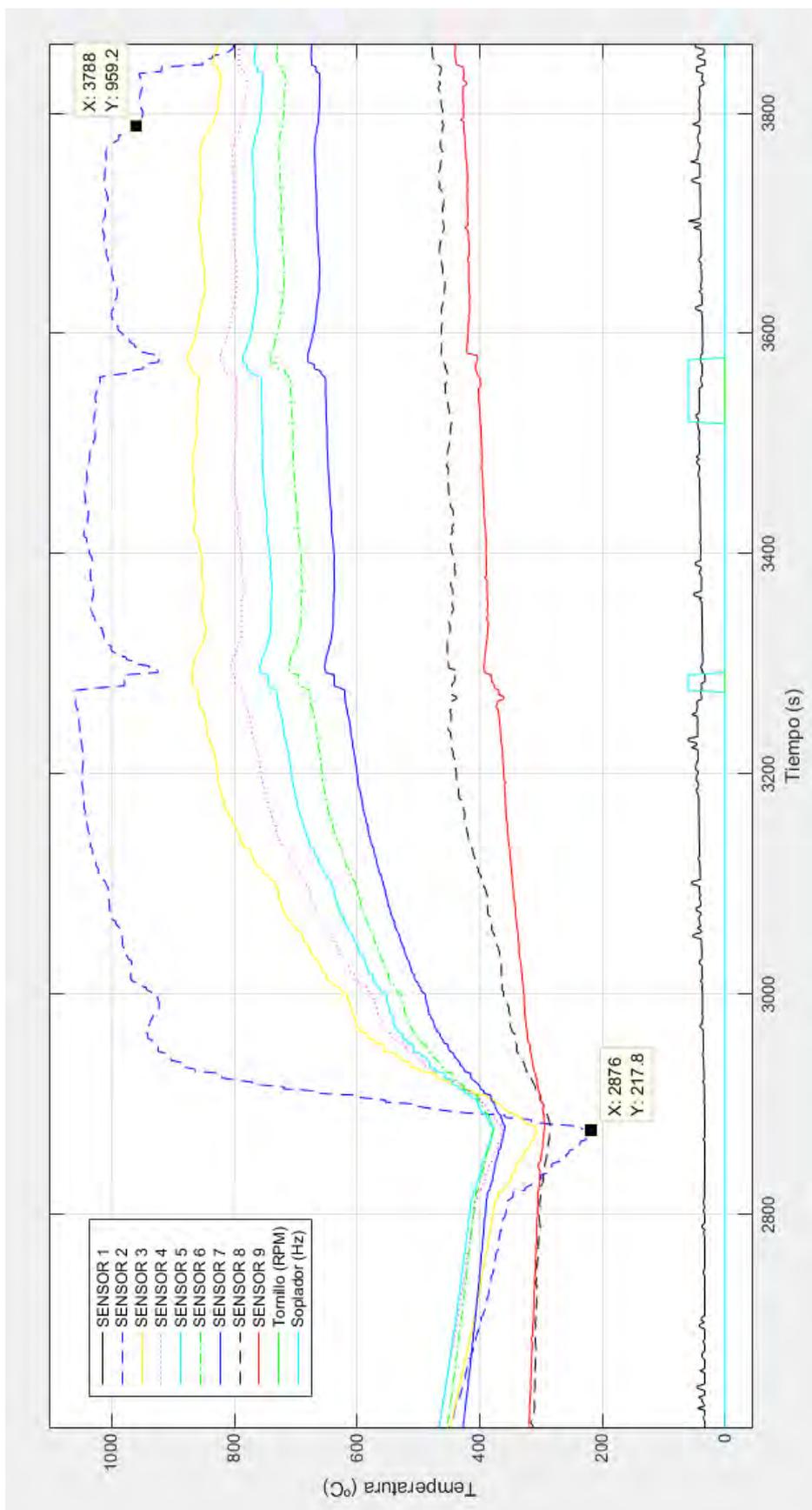


Figura 4.12. Tercer espacio temporal de funcionamiento de la planta experimental.

Fuente: Elaboración propia.

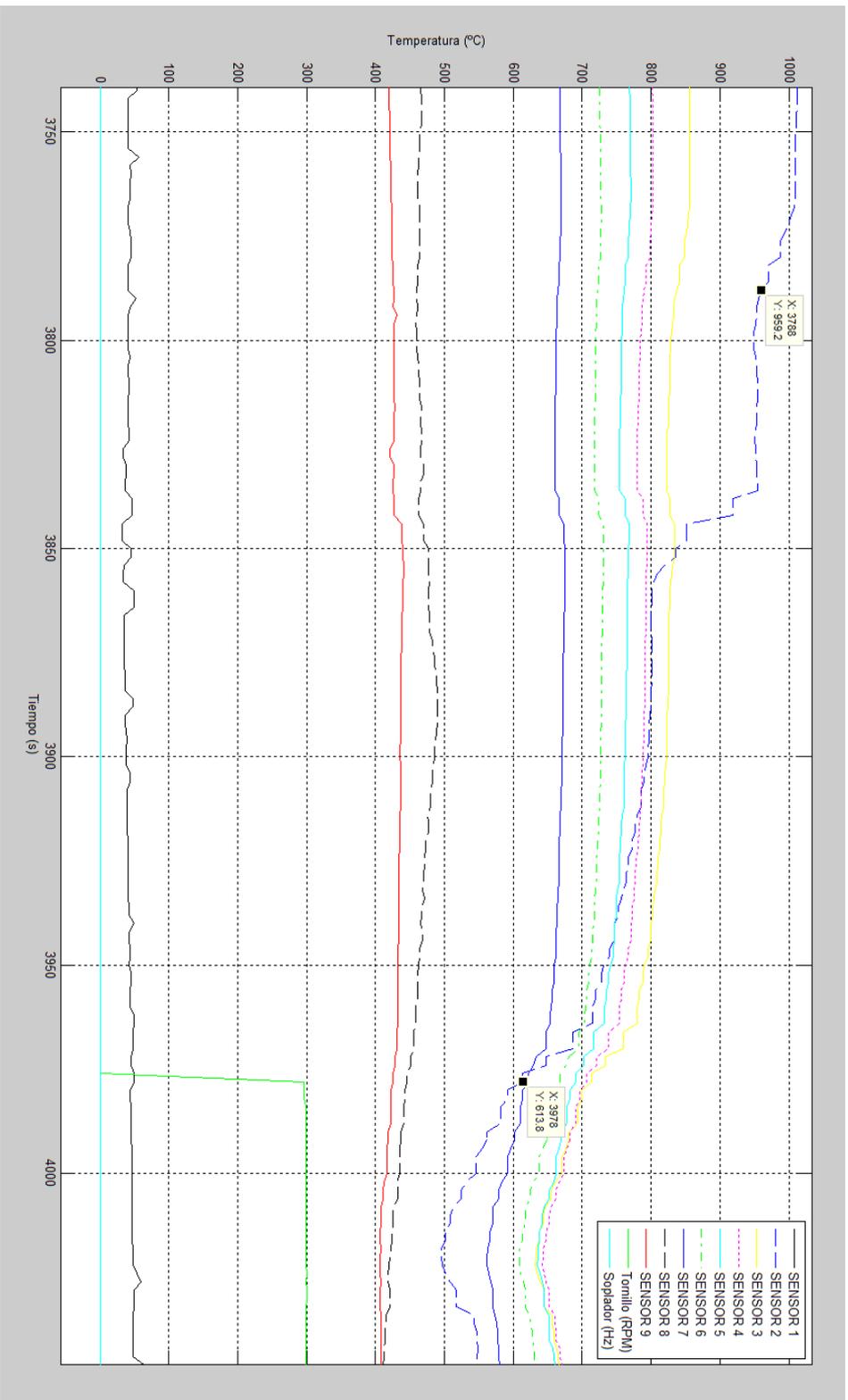


Figura 4.13. Cuarto espacio temporal de funcionamiento de la planta experimental.

Fuente: Elaboración propia.

4.3.5. Quinto espacio temporal de funcionamiento

El quinto, y último, periodo se encuentra entre los 3978 y 6694 segundos de funcionamiento. Se inicia el ingreso de biomasa al reactor. La tolva dosificadora es llenada con hoja de caña picada y se procede con encender el sistema de alimentación de biomasa en el segundo 3978 de funcionamiento a 300 rpm. Luego de ingresar biomasa al reactor esta reaccionó combustionando y elevando la temperatura, en el segundo 4088 se observa de la Figura 4.14 un salto de temperatura casi en el mismo momento en que se enciende el soplador en 30 Hz. Estas altas temperaturas en el reactor se mantienen hasta el segundo 4368, momento en el cual es empleada la mayoría de biomasa preparada para las pruebas. En el segundo 4470 se emplea el resto de biomasa preparada consiguiendo aumento momentáneo de los valores de temperatura, en estos momentos se trabaja con el tornillo a 700 rpm y el soplador a 60 Hz. Es en el segundo 4848 que toda la biomasa es agotada y consumida por completo, esto es observable dado que los valores de las temperaturas inician su descenso. En la Figura 4.14 se ha separado todo espacio de tiempo detallado con anterioridad para ser visualizado.

Es entre los 4470 y 4848 segundos de funcionamiento del sistema total que es confirmada la aproximación teórica sobre las temperaturas de los medidores de temperatura SENSOR 2 y SENSOR 3 una vez ingresada biomasa al reactor. Las temperaturas en este periodo de funcionamiento tienden a acercarse a los 800 °C teóricos. Empleando biomasa constante y trabajando a 60 Hz con el ventilador es probable que se hubiera adquirido esta condición de temperatura en estado estacionario, sobretodo para el SENSOR 3.

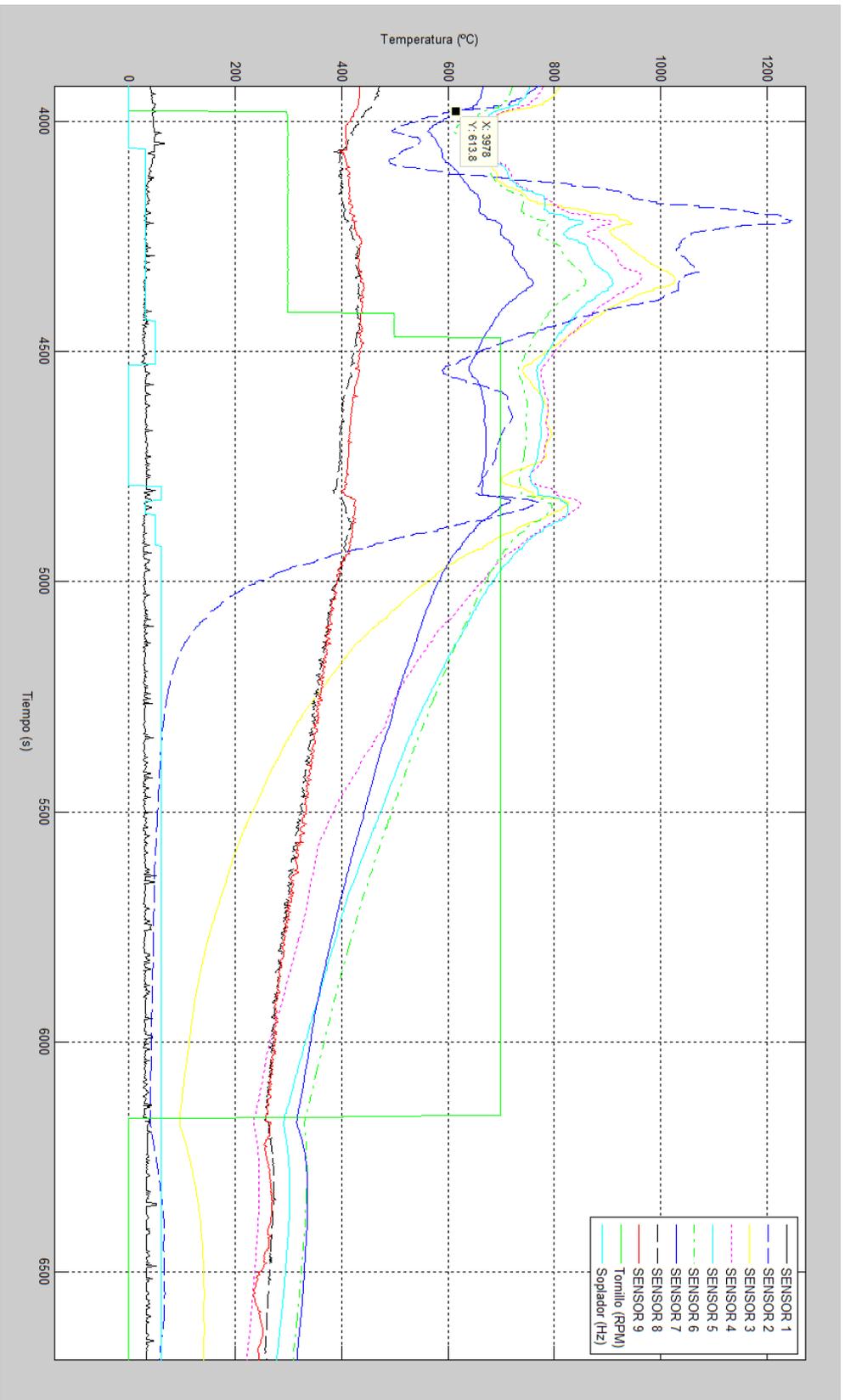


Figura 4.14. Quinto espacio temporal de funcionamiento de la planta experimental.

Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

- En todo proyecto de ingeniería se realiza análisis previo para diseñar un sistema y sus componentes. Al inicio se diseñaron los parámetros del tornillo sin fin del sistema dosificador en base a las condiciones de flujo másico que debía cumplir, pero el diseño no era apropiado.

Los diseños deben contemplar la capacidad real para que el equipo sea construido. El diámetro de ingreso de biomasa calculado teóricamente no era lo suficientemente grande lo cual podría provocar estancamiento de las hojas en el sistema dosificador, además que la construcción del mismo tornillo sería más complicada. En el diseño del sistema real construido se corrigió esta característica.

- En artículos e investigaciones realizadas por otros autores mencionan distintas formas de precalentar el lecho antes del ingreso de biomasa. Estos emplean desde fuentes de calor en la zona baja de sus gasificadores, cercana al ingreso de aire, hasta llenar inicialmente el reactor con gas para luego mediante una pequeña fuente de fuego incendiar el interior para elevar temperaturas.

Nuestra forma de precalentar el lecho con el quemador puede ser considerada práctica e inclusive más segura, pero tiene sus inconvenientes. La llama proveniente del dispositivo calienta directamente al SENSOR 2, a la zona de la pared del reactor cercana al sistema dosificador y al tornillo sin fin. Dado que no todo el material inerte no es directamente calentado por el quemador es necesario encender el soplador para homogeneizar las temperaturas en el lecho. Un diseño de entrada con el cañón del quemador inclinado apuntando hacia el lecho de material inerte nos evitaría la necesidad de encender el soplador para lo mencionado anteriormente.

- Complementando la conclusión anterior, además de evitar tener que prender el soplador para homogeneizar temperaturas también disminuiríamos la frecuencia de limpieza interna del material inerte al interno del quemador debido a los

granos transportados por la corriente de aire del soplador. La permanencia de granos del material inerte durante la operación del quemador produce su apagado indeseado.

- Luego de realizar pruebas gasificando las hojas de caña nos percatamos de algo interesante. El gas producto salía con una tonalidad blanca, esto debe ser causado por los diferentes agentes producidos del proceso de gasificación, además del gas, como vienen a ser sulfuros e inclusive alquitranes. Solo el gas es incoloro e inodoro, por lo que para obtenerlo con estas características tendríamos que colocar filtros en la chimenea de salida para limpiar las impurezas tal cual se menciona en investigaciones sobre otros gasificadores instalados.
- Dadas las características del producto de gasificar hoja de caña, este puede emplearse en sistemas de calentado directo por la temperatura del gas en la salida, en turbinas de gas para producir energía mecánica o eléctrica, y además el gas también podría ser almacenado y transportado para emplearse en otros sistemas. Es un punto positivo la no dependencia de combustibles fósiles cuya combustión produce emisiones contaminantes.
- Con los datos obtenidos de las últimas pruebas realizadas hasta el momento podemos concluir que, como era de esperarse dado que en todo sistema existen perturbaciones, observamos cierto contraste entre las temperaturas teóricas estimadas y las reales. Si en caso se hubiera realizado esta prueba con las condiciones descritas en la última sección del capítulo IV de este trabajo las diferencias habrían sido incluso menores. Pero por el momento obtuvimos resultados realmente positivos dado que comprobamos la proximidad de la teoría con la práctica implementada en un sistema real.

Referencias

- [1] MacKendry, P (2002). *Energy Production from Biomass (part 1): Overview of biomass*. Bioresource Technology.
- [2] Maniatis, K., (2001). *Progress in Biomass Gasification: an Overview. En: Progress in Thermochemical Biomass Conversion*. London (UK): Blackwell Science.
- [3] Castro, S., (2015). *Instalación y arranque de un prototipo de gasificación*.
- [4] Jand, N., (2005). *Decomposition of Wood Particles in Fluidized Bed*. UK: Ind. Eng. Chem. Res.
- [5] Campoy, M., (2009). *Gasificación de biomasa y residuos en lecho fluidizado: estudios en planta piloto*. Memoria presentada para optar al título de Doctor por la Universidad de Sevilla y al título de Doctorado Europeo. Universidad de Sevilla. España.
- [6] Cuba, A. (2011). *Piloto de gasificador downdraft operado con biomasa*. Tesis de Maestría en Energía.
- [7] Estremadoyro, J. (2015). *Análisis de factibilidad para producción de energía utilizando un gasificador de hojas de caña de azúcar*.
- [8] Grupo WEG – Unidad Automatización (2013). *Interruptores termomagnéticos – cajas y accesorios de distribución – Interruptores – dispositivos de protección*.
- [9] Schneider Electric. *Guía de protección diferencial en baja tensión*.
- [10] Cañadas, M (2002). *Iniciación a la variación de velocidad*. Centro formación Schneider Electric.
- [11] Arian – Control & Instrumentación. *¿Qué son y cómo funcionan las termocuplas?*

[12] Arian – Control & Instrumentación. *PT100, su operación, instalación y tablas.*

[13] Sneider Electric (2009). *Altivar 12, variadores de velocidad para motores asíncronos.* Manual del usuario.

[14] WEG Drives & Controls (2013). *Modbus RTU CFW500 user's manual.*

Anexo A

El Anexo A muestra las dimensiones del soporte construido del gasificador.

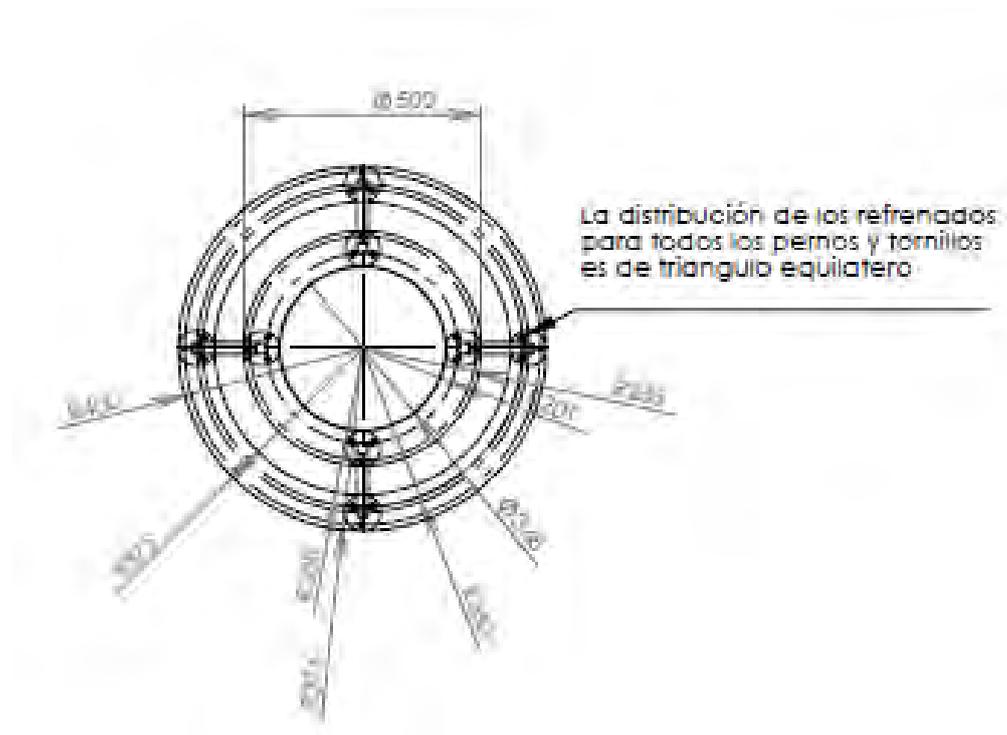


Figura A.1. Medidas en milímetros de vista de planta del soporte del gasificador.

Fuente: Tesista Ricardo García.

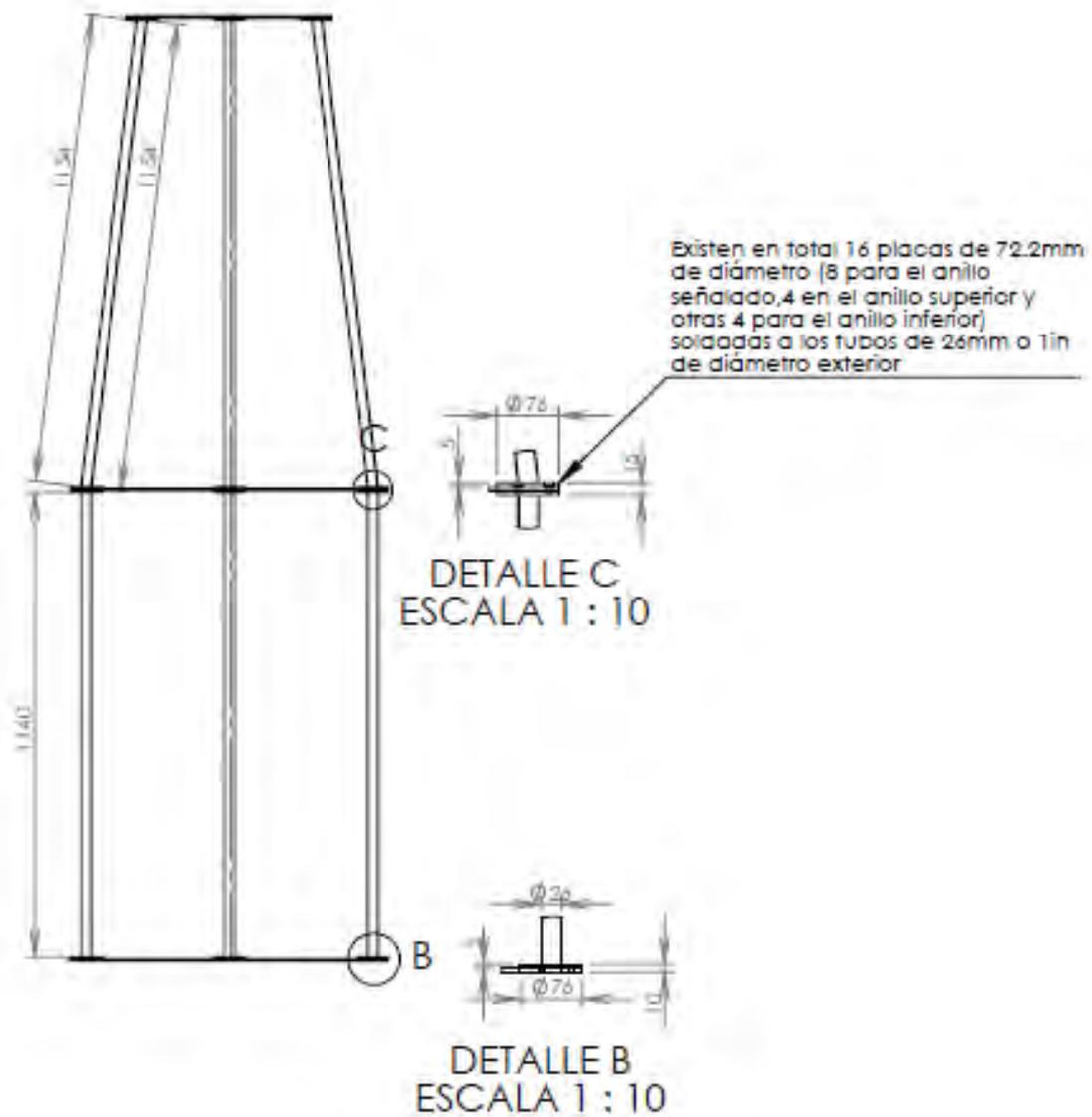


Figura A.2. Medidas en milímetros de vista lateral del soporte del gasificador.

Fuente: Tesista Ricardo García.

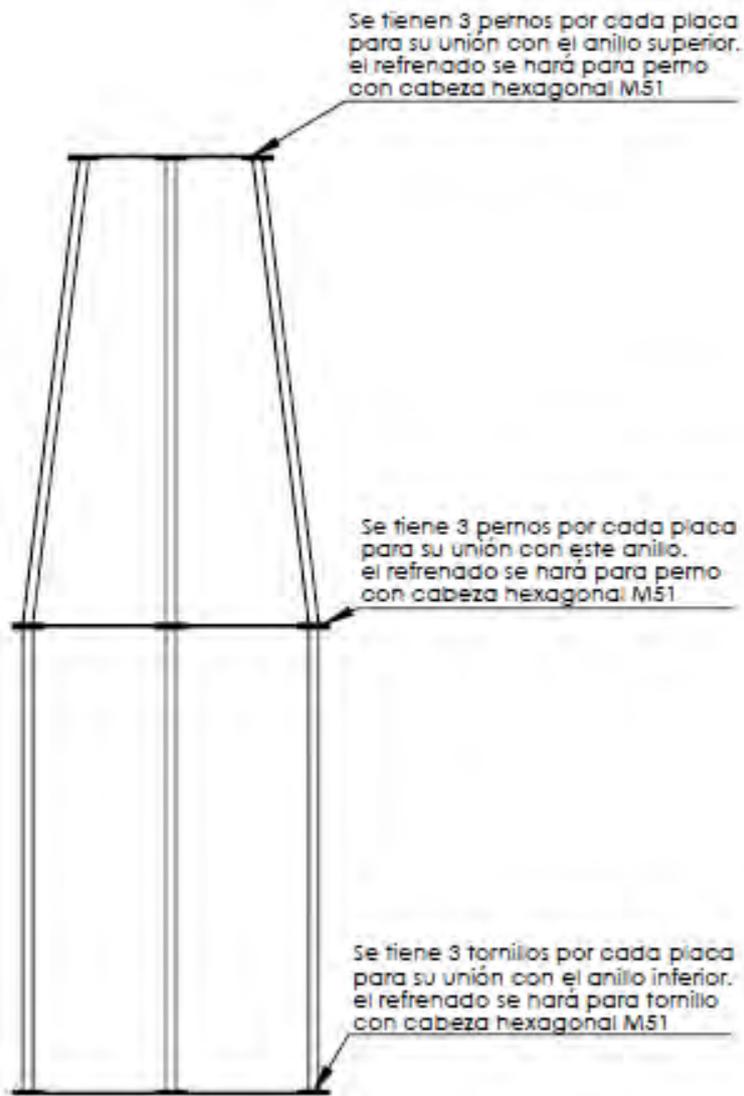


Figura A.3. Especificaciones de ayuda para construcción del soporte.

Fuente: Tesista Ricardo García.

Anexo B

El Anexo B muestra las dimensiones de la tolva, su soporte y del tornillo sin fin.

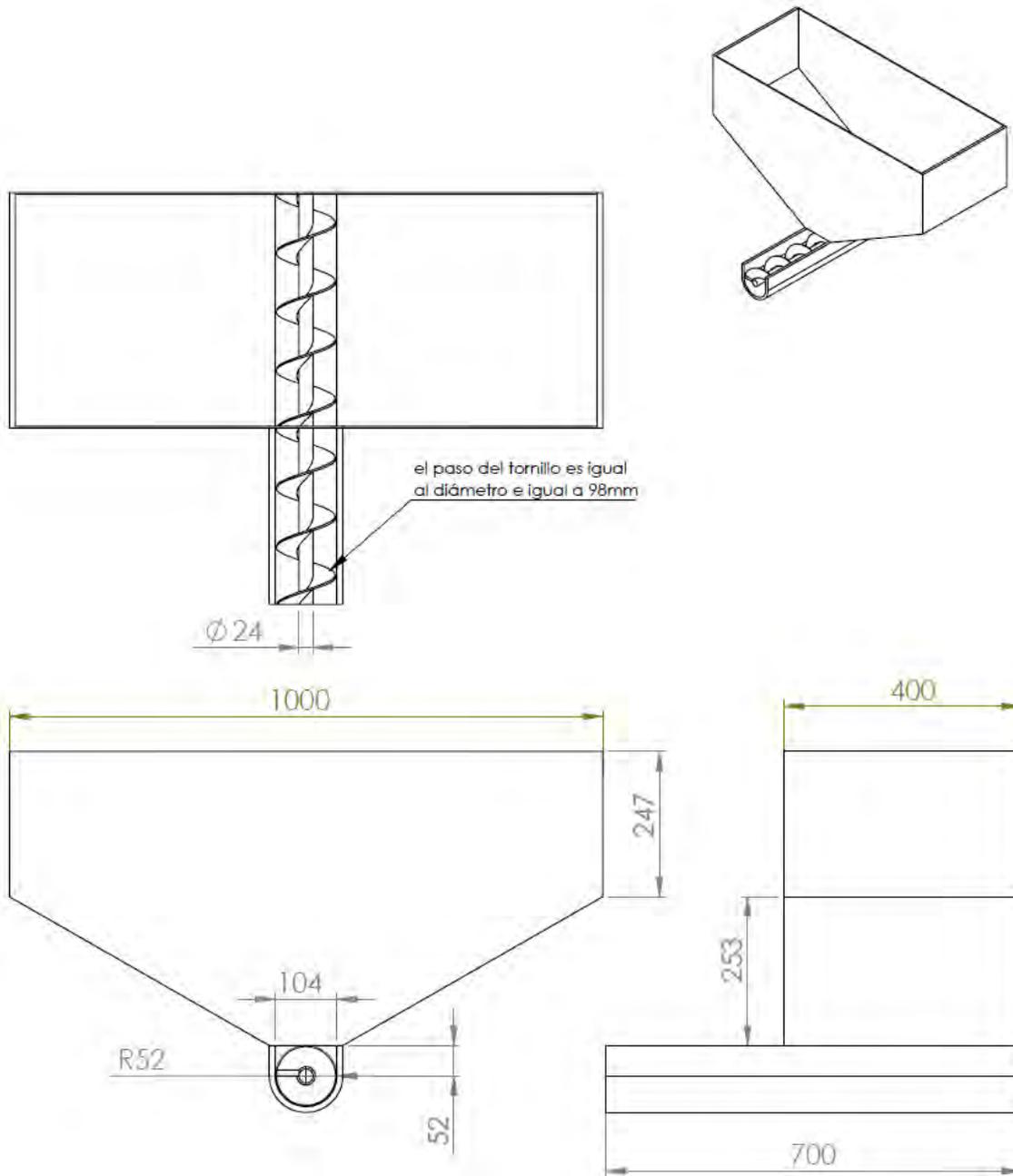


Figura B.1. Diseño de la tolva, su soporte y del tornillo sin fin en milímetros.

Fuente: Tesista Ricardo García.

Anexo C

El anexo C muestra el código, para el software MATLAB, del archivo “ploteando.m” que facilita la visualización de los datos obtenidos de la puesta en marcha de la planta. Los datos se encuentran guardados en el archivo “Datos07Nov2016_0927.mat”.

```

clc
close ALL

t=Temperature(1,:);
Sensor1=Temperature(2,:);
Sensor2=Temperature(3,:);
Sensor3=Temperature(4,:);
Sensor4=Temperature(5,:);
Sensor5=Temperature(6,:);
Sensor6=Temperature(7,:);
Sensor7=Temperature(8,:);
Sensor8=Temperature(9,:);
Sensor9=Temperature(10,:);

Tornillo=Temperature(11,:);
Soplador=Temperature(12,:);

figure(1)
plot(t,Sensor1,'k');hold on;
plot(t,Sensor2,'b--');hold on;
plot(t,Sensor3,'y');hold on;
plot(t,Sensor4,'m:');hold on;
plot(t,Sensor5,'c');hold on;
plot(t,Sensor6,'g-.');hold on;
plot(t,Sensor7,'b');hold on;
plot(t,Sensor8,'k--');hold on;
plot(t,Sensor9,'r');
plot(t,Tornillo,'g');hold on;
plot(t,Soplador,'c')
grid
legend('SENSOR 1','SENSOR 2','SENSOR 3','SENSOR 4','SENSOR
5','SENSOR 6','SENSOR 7','SENSOR 8','SENSOR 9','Tornillo
(RPM)','Soplador (Hz)')
ylabel('Temperatura (°C)');
xlabel('Tiempo (s)');

figure(2)
plot(t,Tornillo,'g');hold on;
plot(t,Soplador,'c')
legend('Tornillo (RPM)','Soplador (Hz)')
xlabel('Tiempo (s)');

figure(3)
plot(t,Sensor1,'k');hold on;
plot(t,Sensor2,'b--');hold on;
plot(t,Sensor3,'y');hold on;
plot(t,Sensor4,'m:');hold on;
plot(t,Sensor5,'c');hold on;
plot(t,Sensor6,'g-.');hold on;
plot(t,Sensor7,'b');hold on;
plot(t,Sensor8,'k--');hold on;
plot(t,Sensor9,'r');
legend('SENSOR 1','SENSOR 2','SENSOR 3','SENSOR 4','SENSOR
5','SENSOR 6','SENSOR 7','SENSOR 8','SENSOR 9')
ylabel('Temperatura (°C)');
xlabel('Tiempo (s)');

```