



U
P
A
E
P

Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla

Centro Interdisciplinario de Posgrados
Departamento de Ingenierías

Doctorado en Ingeniería Mecatrónica

***Diseño del sistema de control para un colector
solar implementado en un reactor de termólisis***

Tesis para obtener el grado de Doctor en Ingeniería
Mecatrónica

Presenta:

Mtro. José Gilberto Montaña Márquez

Director de Tesis:

Dr. Alfredo Toriz Palacios

Puebla, México

Octubre 2020



UPAEP – Secretaría General

Dirección General de Apoyos Académicos

Dirección del Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación.

Biblioteca Central - **Karol Wojtyla**

Tesis Digitales Restricciones de uso:

DERECHOS RESERVADOS ©

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de textos, imágenes, gráficas, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente de donde la obtuvo mencionando el autor o autores involucrados en el documento.

Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla

Centro Interdisciplinario de Posgrados

Investigación y Consultoría

Departamento de Ingeniería

Doctorado en Ingeniería Mecatrónica

Se aprueba la Tesis:

***Diseño del sistema de control para un colector solar
implementado en un reactor de termólisis***

Presentada por:

José Gilberto Montaña Marquez

Comité Asesor

Dr. Alfredo Toriz Palacios

Director

Dr. Luis Rosales Roldan

Asesor

Dr. Juan Francisco Méndez Díaz

Asesor

Puebla, México.

11 de noviembre de 2020

Dedico esta tesis a:

A mi madre María Eugenia

Por su apoyo, por su paciencia en mi educación y por la motivación constante que me ha permitido ser la persona que soy ahora.

A mi padre Gilberto

Por ser mi primer maestro e inspiración para convertirme en ingeniero, por su ejemplo, por sus consejos, por su apoyo y ayuda.

Agradecimientos

La presente Tesis es un esfuerzo en el cual, directa o indirectamente, participaron varias personas leyendo, opinando, corrigiendo, teniéndome paciencia, dando ánimo, acompañando en los momentos de crisis y en los momentos de felicidad.

Agradezco al Dr. Alfredo Toriz Palacios por haber confiado en mi persona, por la paciencia y por la dirección de este trabajo. A los Doctores Francisco Méndez y Luis Rosales por los consejos, el apoyo y el ánimo que me brindaron.

Gracias también a mis queridos amigos, que me apoyaron y me permitieron entrar en su vida durante estos casi cinco años de convivir dentro y fuera del salón de clase. A mi hermana y cuñado que me acompañaron en esta aventura que significó el doctorado y que, de forma incondicional, entendieron mis ausencias y mis malos momentos.

Índice

CAPITULO 1

1. Propósito y Organización	1
1.1. Planteamiento del problema	1
1.2. Objetivo general	3
1.3. Objetivos específicos	3
1.4. Preguntas de investigación	3
1.5. Justificación	3
1.6. Alcances y limitaciones	4
1.6.1. Alcance	4
1.6.2. Limitaciones	5

CAPITULO 2

2. Marco teórico	6
2.1. Residuos sólidos urbanos	6
2.1.1. Clasificación	7
2.1.2. Problemática de los residuos sólidos urbanos	9
2.1.3. Contaminación de mantos acuíferos	9
2.1.4. Contaminación de suelos	10
2.1.5. Contaminación atmosférica	10
2.1.6. Manejo y tratamientos	10
2.1.7. Rellenos sanitarios	11
2.1.8. Recolección selectiva y plantas recicladoras	12
2.1.9. Plantas incineradoras	12
2.1.10. Procesos de tratamiento de RSU por descomposición	13
2.2. Colector solar	28
2.2.1. Concentrador lineal de tubo	29
2.2.2. Concentrador puntual	30
2.2.3. Control de colectores solares	32
2.3. Red neuronal	34
2.3.1. Clasificación por capas	37
2.3.2. Aprendizaje	37

CAPITULO 3

3. Estado del arte	40
--------------------	----

CAPITULO 4

4. Desarrollo	44
4.1. Geometría solar y estructura	44
4.1.1. Ángulos solares	45
4.2. Sensor solar	48
4.3. Espejos reflectantes	51

4.4. Sistema para pruebas	55
4.5. Sistema de control	61
4.5.1. Elección de la red neuronal	61
4.5.2. Aprendizaje de la red neuronal	64
4.6. Colector solar controlado por una red neuronal	65
 CAPITULO 5	
5. Pruebas y Resultados	67
5.1. Pruebas	67
5.2. Resultados	69
 CAPITULO 6	
6. Conclusiones y trabajo a futuro	73
6.1. Conclusiones	73
6.2. Trabajo a futuro	75
 Bibliografía	 78

CAPITULO 1

Propósito y Organización

1.1. Planteamiento del problema

Con la propia evolución de la humanidad y más aun con el avance tecnológico, nuestra necesidad de recursos para la vida diaria se ha visto incrementada en los últimos años. En el informe de “Desacoplamiento de recursos naturales” entregado en el 2011 al panel del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) cuyo coautor es el Dr. Mark Swilling, de la Universidad de Stellenbosch, Sudáfrica, se plantea que, de seguir con el ritmo actual de consumo, estaremos gastando 140 mil millones de toneladas de recursos naturales por año para el 2025, de las cuales no se recuperara ni el 40% en procesos de reciclaje o reutilización. La cifra anterior se prevé que se incremente 3 veces a mediados del siglo. Lo anterior de forma resumida implica que para el 2025 seremos incapaces de satisfacer nuestras necesidades de recursos naturales.

El consumo no controlado de recursos conlleva a varios problemas en su mayoría ambientales, que pueden repercutir en el cambio climático y pérdida de biodiversidad en los sistemas naturales, así como un aumento considerable en la contaminación de todos los sistemas del planeta. Sin embargo, para el presente trabajo se acotará la lista en solo dos; tratamiento de residuos y generación de energía.

Al consumir recursos naturales para cualquier actividad se genera residuos, algunos de estos residuos son absorbidos de forma natural por los sistemas donde se generen, otros deben ser retirados y tratados de forma adecuada para evitar contaminantes o ser reutilizados. Sin embargo, en la actualidad la generación de residuos se ha incrementado de forma exponencial, según el informe del Banco Mundial (BM) “What a Waste: A Global Review of Solid Waste Management”, para el 2025 en promedio cada una de las personas producirá 1,42 Kg de basura urbana al día, más del doble de lo producido hoy (0,7 Kg). Eso significa que, en los próximos 10 años, pasaran de producirse 680 millones de toneladas de desechos en las ciudades al año a 2.200 millones de toneladas. Las cifras anteriores son preocupantes siendo que los residuos urbanos pueden causar serios daños ambientales y de salud a la población.

En México según las estadísticas recolectadas por el sitio “Waste Atlas” que se basa en los estudios del Regional Evaluation on Urban Solid Waste Management in Latin America and the Caribbean, en el 2010 se generó un total de 36.4 millones de toneladas de residuos sólidos urbanos (RSU), sin embargo una estadística de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat) arroja que en el 2018 se generó un total de 53.1 millones de toneladas de RSU lo que representa un incremento del 45% en solo 8 años, cabe mencionar que estos datos no toman en cuenta los RSU no depositados en los centros de recolección o rellenos sanitarios los cuales pueden representar más de un 15% del total de residuos generados por la población.

De las 53.1 toneladas de RSU generadas en México durante el 2018 según la Semarnat se estima que el 52% son residuos orgánicos, 6.1% residuos plásticos, 15.1% residuos relacionados con el papel y otras celulosas, 6.1% residuos de vidrio, 3% metales y el 18.2% catalogados como otros residuos donde pueden estar desechos peligrosos o materiales combinados. Podemos notar que en México casi un 60% de los RSU son materiales que contienen carbón y de los cuales se pueden desprender gases como CO₂ o CH₄, si son quemados o depositados en rellenos sanitarios, esto representa un daño a largo plazo en la calidad del aire y la producción de gases de efecto invernadero.

Derivado de lo anterior la Semarnat y el sitio Waste Atlas ofrecen información sobre el tratamiento de RSU. Se conoce la siguiente información; una tasa de reciclaje del 4% para RSU como metales, vidrios, plásticos y celulosas, sin embargo, el dato más preocupante es una tasa promedio del 31% que equivale a RSU con eliminación errónea, lo cual significa que son RSU no tratados de forma adecuada, aunque si son recolectados por los medios adecuados, y por ende contribuyen a contaminación de mantos acuíferos, suelos y generación de gases. Un residuo mal tratado podría causar daños en diversas áreas como; ambiental, económica y social.

En el apartado ambiental un RSU que no sea tratado podría causar la sobreexplotación de recursos pues al no poder ser reciclado no se podrán recuperar materias primas. Viendo el mal tratamiento de un RSU desde un punto de vista económico, se pueden encontrar varios inconvenientes como; alta inversión en gestión de residuos, altos costos relacionados a los procesos de descontaminación o contingencias ambientales, consumo elevado de combustible por actividades logísticas y la pérdida de valor económico en los suelos ocupados.

El proceso actual en México para el tratamiento de RSU no peligrosos, consiste en la creación de rellenos sanitarios, así como en vertederos no regulados y en menor medida a un proceso de reciclaje que es llevado a cabo por entidades privadas. Se considera que solo un 65% de RSU es tratado de forma adecuada y con bajo impacto ambiental, esto según estadísticas de la Semarnat.

Un relleno sanitario es un lugar destinado a la disposición final de RSU, en el cual se toman múltiples medidas para reducir los problemas generados por algún otro tipo de tratamiento, como son los tiraderos. Dichas medidas son; por ejemplo, el estudio meticuloso del impacto ambiental, económico y social desde la planeación y elección del lugar hasta la vigilancia y estudio del lugar en toda la vida del vertedero.

En un relleno sanitario, a medida que se va colocando los RSU, se compactan con maquinaria y cubierta con una capa de tierra y otros materiales para posteriormente cubrirla con otra capa de tierra que ronda los 40 cm de grosor y sobre esta depositar otra capa de RSU y así sucesivamente hasta que el relleno sanitario se da por saturado. En la base del relleno se coloca una geomembrana la cual evitara filtraciones de los excretos y demás líquidos provenientes de la descomposición de los residuos. El objetivo final del relleno sanitario es que los RSU se biodegraden naturalmente. Si bien es una solución de medio-bajo impacto ambiental para el tratamiento de RSU conlleva a dos problemas graves; el primero de ellos es la ocupación de grandes extensiones de tierra donde se puede generar contaminantes, y el segundo, es que gracias a la biodegradación de los residuos orgánicos se produce metano (CH_4) el cual es un gas tres veces más dañino que el CO_2 , esto debido a que su molécula no puede dividirse fácilmente y permanece en el ambiente formando un domo térmico, el cual causa cambios en la temperatura general del planeta. Sin embargo, si el CH_4 es quemado de forma controlada puede reducir su impacto ambiental además de ser aprovechado como fuente de energía.

En los últimos 10 años se ha observado un incremento en el consumo de energía a nivel mundial siendo esto la principal preocupación hoy en día; debido a que lo anterior propicia el sobreconsumo de recursos naturales y el incremento de contaminantes. En México, según el Sistema de Información Energética (SIE) perteneciente a la Secretaría de Energía de México (SENER), en el 2006 se consumió un total de 23.5MW de energía eléctrica dividida entre una producción del 69% por medio de hidrocarburos, 8% por energía nuclear y 23% por energías alternativas, mientras que la SENER reporta que para el 2017 se consumió un total de 215.9 MW, lo cual representa un incremento 9.2 veces lo que se consumió en el año 2006. Estos datos son preocupantes pues de seguir con el mismo ritmo de consumo energético para el 2025 no se podrá abastecer de energía al país según datos obtenidos por el SIE.

De acuerdo con la información anterior se plantea responder la siguiente pregunta para esta investigación, ¿En qué forma se puede desarrollar un proceso automatizado para el tratamiento de residuos orgánicos, cuyo impacto ambiental sea bajo debido al uso de energía renovable para el proceso y sirva de base para la generación de energía?

1.2. Objetivo general

Diseñar un prototipo para el control y automatización de un colector solar por medio de redes neuronales, para impulsar un reactor de termólisis para el tratamiento de residuos sólidos urbanos por medio de técnicas de gasificación para la descomposición de la materia orgánica.

1.3. Objetivos específicos

Dado que el proyecto tratado en este documento se puede dividir en varias etapas se plantean los siguientes objetivos particulares:

- Identificar el tipo de residuos sólidos urbanos
- Analizar las técnicas actuales para la trata de residuos solidos
- Identificar las ventajas y desventajas de los sistemas de trata de residuos actuales
- Analizar el estado del arte y de la tecnología para los sistemas de trata de residuos
- Verificar legislaciones vigentes
- Proponer un diseño general para el sistema
- Diseño estructural de un concentrador solar que pueda alcanzar 1000°C.
- Estudio de los posibles materiales para el concentrador solar
- Diseño de un sistema de control automático para su implementación en el concentrador solar.
- Diseño del sistema de control para el reactor de termólisis.
- Construcción de un modelo funcional a escala.

1.4. Preguntas de investigación

- ¿Las técnicas existentes hoy en día para la trata de residuos son de bajo impacto ambiental?
- ¿Es posible diseñar un proceso automático para la trata de residuos?
- ¿Cómo afecta los rellenos sanitarios a la generación de metano?
- ¿De qué forma se puede aprovechar la basura orgánica para la generación de energía?
- ¿Es factible el aprovechamiento de RSU para generación de CH₄ que funcione como fuente de gas natural o para turbinas de ciclo combinado?
- ¿Es posible la creación de un reactor de termólisis por energía solar?

1.5. Justificación

La generación de RSU es algo inherente a las actividades humanas, podemos decir con cierta certeza que en cualquier zona que exista presencia humana habrá desechos.

Según las últimas estadísticas de la Semarnat, en varias ciudades del país en promedio se genera 10,850 toneladas diarias de basura. De lo anterior el Organismo Operador del Servicio de Limpia (OOSL) reporta que solo se recolecta el 40% de los RSU siendo desconocido el destino final del otro 60%, si bien existen programas de reciclaje no reportados, se estima que solo abarcan un 15%, dejando un 45% de los RSU sin destino aparente, sin embargo, es común que esos desechos acaben en terrenos, barrancas, ríos o se incineren de forma no controlada.

Esto más que decepcionante se debe ver como una oportunidad, pues será prácticamente imposible eliminar la producción de RSU, pero se pueden crear estrategias para disminuir las problemáticas generadas por el tratamiento de estos. Así mismo se puede buscar solucionar otros problemas relacionados, como la producción de energía eléctrica con bajo impacto ambiental, uno de los más grandes retos actuales.

En México se tienen estados que cuenta con algunos de los municipios más ricos en temas de agricultura, estos municipios generan un porcentaje considerable de residuos orgánicos siendo un rango de entre un 45% y 51% de los residuos que se genera al día. En su mayoría la basura recolectada acaba en rellenos sanitarios los cuales ocupan una gran extensión de terreno y pueden ser un foco de contaminación para el subsuelo y mantos acuíferos. Una solución, que si bien no es del todo limpia, es la incineración por medio de termólisis y pirolisis siendo estos procesos menos contaminantes que la incineración tradicional, además se podrán obtener subproductos como carbón, aceite y gas que se pueden aprovechar en varios procesos industriales.

El gas CH_4 conocido como metano o gas natural, producto de la incineración de RSU orgánicos, puede ser utilizado para las actividades referentes a servicios básicos humanos, además de ser un combustible óptimo para turbinas de ciclo combinado que ayudan a la producción de energía. Al ser aprovechado de esta forma podemos romper la molécula del metano y evitar su comportamiento como gas de efecto invernadero, además de cubrir un problema grave en la actualidad; la escasez de energía eléctrica.

Lograr la creación de un sistema de trata de residuos eficiente y bajo impacto ambiental es la motivación principal de este trabajo, pues al lograr una solución de este tipo se podrá incrementar el porcentaje de RSU recolectados y tratados de forma adecuada, además de poder cubrir un porcentaje de la demanda energética del estado, sin la ocupación de extensiones de terrenos y con un bajo impacto ambiental.

1.6. Alcances y limitaciones

El presente proyecto se divide en varias etapas de desarrollo dentro de las cuales habrá varios retos tecnológicos que deberán ser abordados por ende se plantean varios objetivos alcanzables, así como limitaciones.

1.6.1. Alcance

Como punto de partida se realizará el diseño geométrico del colector solar, así como la elección de los materiales adecuados para un correcto funcionamiento. Lo anterior será ligado al diseño de la estructura de soporte la cual deberá tener un cierto número de grados de libertad, que servirán para la orientación del colector solar, en base a los grados de libertad y el movimiento en general que debe realizar el colector, se deberá implementar un sistema de control de lazo cerrado. El sistema de control deberá ser robusto para que el colector solar genere un punto caliente con la temperatura adecuada para iniciar el funcionamiento del reactor de termólisis.

Si bien los reactores de termólisis y pirolisis ya existen en la actualidad y son ocupados en varios procesos industriales, su aplicación al campo de tratamiento de residuos sólidos y generación de energía es reciente, por tal motivo se realizará una revisión para verificar el diseño del reactor y de ser necesario se realizarán modificaciones para su acople al colector solar. El reactor funciona con variables establecidas de temperatura y presión, por esta razón se deberá realizar una caracterización y parametrización de estas variables para poder aplicar un sistema de control y automatización de este.

Dado que se pretende sentar una base para la generación de energía mediante la implementación de un reactor de termólisis o pirolisis, se pretende obtener parámetros fiables de los productos obtenidos del reactor para determinar si la caracterización de variables y por ende el control del reactor son aceptables.

Se considera la creación de un prototipo a escala reducida para la demostración y prueba del sistema planteado, este prototipo demostrara el funcionamiento del concentrador solar y el sistema de automatización, pero no así el funcionamiento del reactor completo debido a ciertas limitaciones físicas y económicas que serán detalladas en la siguiente sección.

En el caso del reactor se buscará la demostración de los resultados mediante simulaciones computacionales que permitan obtener parámetros para la calibración del sistema en general.

1.6.2. Limitaciones

Al ser un proyecto de índole sustentable y para generación de energía tendrá limitantes claras en rubros tecnológicos, económicos y relacionados con el tiempo de desarrollo. Una de las principales limitantes tiene que ver con el aspecto tecnológico, pues los sistemas de concentración solar requieren cierto tipo de materiales los cuales son muy específicos y poco usados a nivel industrial lo que los vuelve escasos y difíciles de conseguir. Si no se tiene acceso a estos materiales no se podrá tener la eficiencia adecuada y necesaria para el proyecto.

La creación del reactor será una de las limitantes más fuertes pues no se cuenta con los recursos económicos y el tiempo adecuado para recrear el sistema a una escala real, además en el caso del reactor no se cuenta con sistemas de simulación específicos que puedan arrojar datos útiles y aunque se propone simulaciones para comprobar los resultados, estas serán limitadas.

Si bien la tecnología y el conocimiento usados en este tipo sistemas ya existe, no lo es así su implementación de forma combinada. Aunque los concentradores solares ya son usados y los reactores de termólisis también lo son, no se ha buscado su implementación de forma conjunta y mucho menos la variación de parámetros para buscar el mejor resultado ambientalmente hablando. Por lo anterior la información es inexistente para este tipo de sistemas lo cual representara una gran limitante, sin embargo, en esta investigación se pretende sentar la base tecnológica para este tipo de proyectos.

Dentro del aspecto económico, al no contar con recursos económicos suficientes no se podrá acceder a materiales adecuados para la construcción del sistema completo a una escala usable. Así mismo el tiempo no es suficiente para llevar a cabo una construcción y por ende el proyecto solo llegara al planteamiento teórico completo, simulación y construcción de un prototipo limitado.

Capítulo 2

Marco teórico

Gracias a la industrialización y avances tecnológicos que ha alcanzado la sociedad en la actualidad, se han generado un sin número de actividades que dependen del uso continuo de recursos, al finalizar dichas actividades los recursos usados se convierten en residuos que deberán desecharse. Anteriormente, dado la forma de vida del ser humano, los residuos eran en un mayor porcentaje orgánicos y por ende biodegradables y no dañinos al medio ambiente, sin embargo, con el crecimiento poblacional y la agrupación de los seres humanos en ciudades, los residuos tomaron más relevancia pues ya no podían ser desechados en ciertos lugares para su biodegradación además de contener un mayor porcentaje de materiales inorgánicos.

De esta forma se llegó a la conclusión que los residuos en las ciudades deberían tener su propia clasificación y separar los residuos sólidos de los líquidos pues la forma de trata es diferente y requieren procesos diferentes, a partir de esta concepción surge la clasificación de Residuos Sólidos Urbanos (RSU). [8]

2.1. Residuos sólidos urbanos

El concepto de residuos sólidos urbanos ha sido definido a lo largo del tiempo de formas muy diversas. Así, la OCDE (Organización de Cooperación y Desarrollo Económico) define los residuos como aquellas materias generadas en las actividades de producción y consumo que no alcanzan, en el contexto en que son producidas, ningún valor económico; ello puede ser debido tanto a la falta de tecnología adecuada para su aprovechamiento, como a la inexistencia de un mercado para los productos recuperados. [11]

La CEE, en su directiva 75/442, especifica que se entenderá por residuo cualquier sustancia u objeto del cual se desprenda su poseedor o tenga la obligación de desprenderse, en virtud de las disposiciones nacionales vigentes. Los residuos urbanos comprenden todos los residuos que provienen de actividades animales y humanas, que normalmente se encuentran en estado sólido y son desechados como inútiles o superfluos. Genéricamente se entiende por residuos urbanos los que son producidos por cualquier actividad en los núcleos de población o en su zona de influencia; esto implica que los residuos urbanos son algo más que los residuos generados en el ámbito domiciliario, ya que se debe contemplar el conjunto de otras actividades generadoras de residuos dentro del ámbito urbano. [11] [8]

Cantidad de desechos generados por país (kilogramos / per cápita / al día)

0 a 0,49 kg. 0,50 a 0,99 kg. 1 a 1,49 kg. Más de 1,50 kg. Sin información

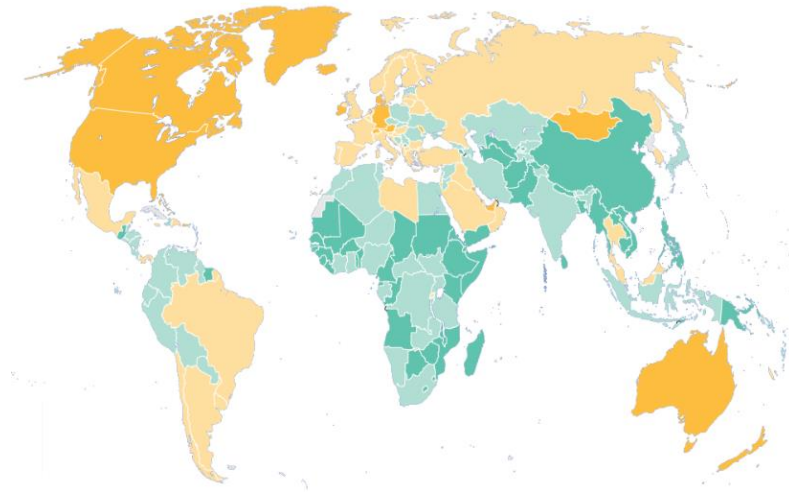


Fig. 2.1. Panorama mundial de la gestión de desechos sólidos hasta el 2050.
Fuente Banco Mundial 2018

2.1.1. Clasificación

Un Residuo puede clasificarse de varias maneras, ya sea por su composición, estado, procedencia o método de tratamiento. Sin embargo, podemos encontrar 3 grupos generales de acuerdo con su estado de agregación siendo residuos urbanos:

- Residuos sólidos de origen doméstico, de mataderos, mercados de alimentación, etc.
- Aguas residuales, cuando no existen sistemas de depuración, o lodos, si se aplican los sistemas adecuados.
- Gases de diversa procedencia expulsados a la atmósfera en el proceso de incineración de residuos sólidos y que además incluyen escorias y cenizas.

Lo anterior es de forma general sin embargo considerando solamente los RSU podemos dar la clasificación presente en el artículo 18 de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (LGPGIR), la cual establece que los residuos sólidos urbanos podrán subclasificarse en orgánicos, inorgánicos y peligrosos con objeto de facilitar su separación primaria y secundaria, de conformidad con los Programas Estatales y Municipales para la Prevención y la Gestión Integral de los Residuos, así como con los ordenamientos legales aplicables. [8]

Dado lo anterior podemos clasificar los RSU como:

- Residuo orgánico: todo desecho de origen biológico, que alguna vez estuvo vivo o fue parte de un ser vivo, por ejemplo: hojas, ramas, cáscaras y residuos de la fabricación de alimentos en el hogar, etc.
- Residuo inorgánico: todo desecho de origen no biológico, de origen industrial o de algún otro proceso no natural, por ejemplo: plástico, telas sintéticas, metales, etc.
- Residuos peligrosos: todo desecho, ya sea de origen biológico o no, que constituye un peligro potencial y por lo cual debe ser tratado de forma especial, por ejemplo: material médico infeccioso, residuo radiactivo, ácidos y sustancias químicas corrosivas, etc.

Los RSU están formados por un conjunto de materiales heterogéneos. Casi la mitad de los RSU están constituidos por materiales no fermentables llamados inorgánicos, la mayor parte de los cuales son envases o embalajes. Dentro de los residuos inorgánicos encontramos: papel/cartón, plásticos, vidrios, textiles, chatarra y otros (materiales tóxicos derivados de productos de limpieza, pilas, etc.). Gran parte de estos materiales se pueden reciclar y recuperar, volviendo después a incluirse en la cadena productiva y de consumo, ahorrando energía y materias primas, además de contribuir a la calidad ambiental. El resto de los materiales son los residuos orgánicos, que también se puede recuperar para devolvérsela a la tierra como abono y ayudando a mantener el nivel de fertilidad de esta. [9] Más de la mitad de los RSU son restos de comida. Esta materia constituye una fuente importante de abonos de alta calidad. Esto es relevante puesto que además de eliminar más de la mitad de los residuos supone un importante aporte de nutrientes y fertilidad para los cultivos evitando el uso de abonos químicos que producen contaminación de las aguas. [9]

Si bien en la mayoría de las legislaciones abordan una clasificación de los residuos solo por su biodegradabilidad, esto no es del todo correcto pues materiales diferentes pueden estar clasificados en la misma categoría y tener procesos de tratamiento totalmente distintos. Una clasificación más específica sería:

- Papeles y cartones. Incluye periódicos, revistas, hojas, facturas, formularios, carpetas, folletos, guías telefónicas, envases de cartón. Antes de tirarlos es importante eliminar por completo elementos extraños como grapas, cintas adhesivas o plásticos. Por lo general, no son reciclables los siguientes tipos de papeles: Papel de fax y carbónico, papeles plastificados, celofán, envases de comida, servilletas y papel de cocina, vasos usados, papel de fotos y etiquetas.
- Vidrios: Cuentan entre sus materias primas con sílice, alcaloides y estabilizantes como la cal. Suelen ser reciclables eternamente. La mayor parte de los vidrios se desecha de los hogares en forma de botellas de bebidas y envases de alimentos, y cristales de ventanas. Por lo general, no son reciclables: focos, tubos de luz, lámparas, espejos, lentes, tazas, macetas y otros objetos de cerámica.
- Chatarra y metal: En los hogares se encuentran en las tuberías, el cobre en los cables eléctricos, el estaño en las soldaduras y el aluminio en las ventanas y en los utensilios que se emplean en la cocina. Latas de aluminio y de acero: normalmente pueden ser recicladas para elaborar nuevas latas, sin perder la calidad del material. Latas con sustancias tóxicas, por ejemplo, pintura.
- Pinturas y aceites. Cuentan con sustancias químicas como aglutinantes y pigmentos diferentes. La mayoría de los residuos provienen de negocios automotrices. Debido a que son muy inflamables no deben desecharse junto con la demás basura.
- Plástico. Existen más de cien tipos de plásticos derivados del petróleo. En el hogar los podemos ver en envases de productos de limpieza, bolsas de plástico, juguetes, entre otras cosas.
- Botellas de plástico PET. Millones de botellas de plástico terminan en los basureros cuando perfectamente pueden ser recicladas y volver a elaborar plástico nuevo. Por lo general, no son reciclables los plásticos de envases de comida y bebida, los de vasos y cubiertos desechables o macetas, sillas, mesas, etc.
- Botellas de plástico HDPE. Este tipo de plástico lo encontramos principalmente en las botellas de detergentes, blanqueadores, envases de leche. Textiles: algodón y lino suelen ser residuos reutilizables. No son reciclables las telas impregnadas con contaminantes como pintura, combustible, etc.
- Baterías y pilas. Cuentan con materiales como cobre, aluminio y litio. Se encuentran en una gran cantidad de aparatos eléctricos, móviles y otros. E-waste: es considerado la basura del siglo XXI, y abarca los componentes electrónicos equipos de computadores, celulares, fax, impresoras y otros equipos automatizados.

En la figura 2.2 podemos ver el porcentaje de residuos en México durante un censo de la SEMARNAT en el 2017, si bien notamos que los residuos orgánicos ocupan el 53%, solo el 63% de los residuos totales son tratados mediante algún proceso como depósito en relleno, incineración o reciclaje.



Fig. 2.2. Tipos de residuos en México según las estadísticas de la SEMARNAT en el 2017.

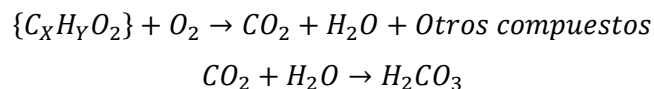
2.1.2. Problemática de los residuos sólidos urbanos

Los residuos correctamente tratados no deberían representar peligros ambientales, al menos no de forma directa, pues el simple hecho de la recolección o movimiento de los RSU genera contaminantes. Sin embargo, en la mayoría de las ciudades, la trata de residuos es sumamente limitada llevando al almacenamiento temporal de RSU antes de aplicar algún método de tratamiento. El almacenamiento temporal conlleva varios problemas principalmente en temas de salud social pues un RSU entrara en descomposición generando bacterias y focos de infección.

En caso más común es en el cual un RSU será trasladado para recibir algún método de tratamiento, el método más utilizado en la actualidad para la trata de residuos es el relleno sanitario, estos lugares sufren un alto impacto, en vista de que se elimina la vegetación del suelo que queda expuesto a la erosión y la misma basura lo contamina, combinando esto con el agua de lluvia la cual distribuye las secreciones de los RSU conformadas por líquidos tóxicos que se filtran al suelo y llegan a los mantos acuíferos, además la materia orgánica favorece la proliferación de roedores, insectos y microorganismos que son transmisores de enfermedades.[12]

2.1.3. Contaminación de mantos acuíferos

Un RSU mal tratado puede contaminar en varias formas los mantos acuíferos tanto superficiales como subterráneos. La materia orgánica proveniente de los RSU puede ocasionar, en los mantos acuíferos superficiales, la presencia de bacterias y microorganismos, que en conjunto generan compuestos que acidifican el agua, eliminan el oxígeno necesario para la vida acuática y contaminan el agua para consumo humano. Esto lo podemos comprobarlo en las reacciones mostradas a continuación, donde podemos ver que el resultado H_2CO_3 es ácido carbónico.



La presencia de materia inorgánica en los mantos acuíferos genera otro tipo de problemas como el taponamiento de los caudales naturales o artificiales, además al no ser materia biodegradable permanece en el agua durante más tiempo y causa un deterioro ambiental en las costas, orillas y playas, se amenaza la flora y la fauna marina y fluvial y se afecta el turismo y las actividades económicas relacionadas, como la pesca y la recreación, entre otras.

En el caso de los mantos acuíferos subterráneos ocurre una filtración de lixiviados a través del suelo, que absorbe estos líquidos y los lleva hasta donde se encuentran las fuentes de agua. El tratamiento de estas fuentes de agua es altamente costoso y puede llegar a afectar comunidades que dependen únicamente de ellas para obtener este recurso, como sucede en las zonas desérticas.

2.1.4. Contaminación de suelos

El suelo es uno de los recursos que más directamente se ve afectado por el inadecuado manejo de los RSU, ya que el ser humano a través de los años ha dispuesto en el suelo los residuos sólidos que ha generado.

La contaminación de los suelos ocurre a través de diferentes elementos, como los lixiviados que se filtran a través del suelo afectando su productividad y acabando con la microfauna que habita en ellos (lombrices, bacterias, hongos y musgos, entre otros). Esto lleva a la pérdida de productividad del suelo, incrementando así el proceso de desertificación del suelo. La presencia constante de basura en el suelo evita la recuperación de la flora de la zona afectada e incrementa la presencia de plagas y animales que causan enfermedades, como ratas, palomas, cucarachas, moscas y zancudos.

2.1.5. Contaminación de atmosfera

Los RSU en su proceso de descomposición generan malos olores y gases, como metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂), que ayudan a incrementar el efecto invernadero en el planeta, aumentando la temperatura y generando deshielo en los polos. Este proceso de descomposición se puede controlar con una correcta disposición de los residuos sólidos a través de su incineración tecnificada, de su ubicación en rellenos sanitarios y/o en botaderos especializados. También los residuos sólidos pueden afectar el aire cuando son quemados de manera descontrolada, pues generan humos y material particulado que afectan el sistema respiratorio de los seres humanos y contribuyen al efecto invernadero, entre otros efectos negativos.

2.1.6. Manejo y tratamientos

Los RSU necesitan procesos adecuados de gestión y manejo para su tratamiento, pues como se ha mencionado anteriormente en este capítulo, la mala gestión puede ser la principal causa de la contaminación que se genera con los RSU. Hasta hace algunos años la recolección, transporte y tratamiento de los residuos sólidos eran actividades consideradas marginales y a las que no se les prestaba atención. [13]

De forma general el manejo y tratamiento de residuos se limitaba a la recolección domiciliaria y a su posterior acumulación en vertederos locales, esto si bien fue una solución en su momento demostró tener varias repercusiones a largo plazo, que afectaron de distinta forma al entorno social y ambiental.[13]

Sin embargo, el fuerte incremento que se ha experimentado a nivel global en la producción de residuos, en las últimas décadas, los ha convertido en uno de los mayores problemas con los que se han enfrentado todas las ciudades del mundo principalmente las ciudades más desarrolladas o con mayor población como puede ser la ciudad de México la cual es la más poblada en Latinoamérica. Sin embargo, esta situación llevo al aumento de conciencia ambiental por parte de diversos organismos los cuales normaron las prácticas de gestión y tratamiento de RSU, en México la SEMARNAT es el organismo que se encarga de todas estas prácticas y propone 3 tipos de tratamiento; plantas de reciclaje, plantas incineradoras y rellenos sanitarios. [14]

2.1.7. Rellenos sanitarios

En México se generan diariamente 102,895.00 toneladas de residuos, de los cuales se recolectan 83.93% y se disponen en sitios de disposición final 78.54%, reciclando únicamente el 9.63% de los residuos generados. [14]

En el país, sigue predominando el manejo básico de los RSU que consiste en recolectar y disponer los residuos en rellenos sanitarios, desaprovechando aquellos residuos que son susceptibles a reincorporarse al sistema productivo, lo que disminuiría la demanda y explotación de nuevos recursos, a diferencia de países como Suiza, Países Bajos, Alemania, Bélgica, Suecia, Austria y Dinamarca; donde la disposición final de los residuos es de menos del 5% en rellenos sanitarios. [14]

El relleno sanitario es una técnica de disposición final de los residuos sólidos en el suelo que de ser implementada correctamente causa un bajo impacto para la salud o la seguridad pública. Esta técnica utiliza principios de ingeniería para confinar la basura en un área lo más estrecha posible, cubriéndola con capas de tierra diariamente y compactándola para reducir su volumen. Además, prevé los problemas que puedan causar los líquidos y gases producidos por efecto de la descomposición de la materia orgánica, mediante membranas que se colocan en el fondo del relleno o en algunos casos entre las capas.

En áreas relativamente planas, donde no sea factible excavar fosas o trincheras para enterrar la basura, esta puede depositarse directamente sobre el suelo original, el que debe elevarse algunos metros, previa impermeabilización del terreno. En estos casos, el material de cobertura deberá ser transportado desde otros sitios o, de ser posible, extraído de la capa superficial. Las fosas se construyen con una pendiente suave en el talud para evitar deslizamientos y lograr una mayor estabilidad a medida que se eleva el relleno.

Sirve también para rellenar depresiones naturales o canteras abandonadas de algunos metros de profundidad. El material de cobertura se excava de las laderas del terreno o, en su defecto, de un lugar cercano para evitar los costos de acarreo. La operación de descarga y construcción de las celdas debe iniciarse desde el fondo hacia arriba.

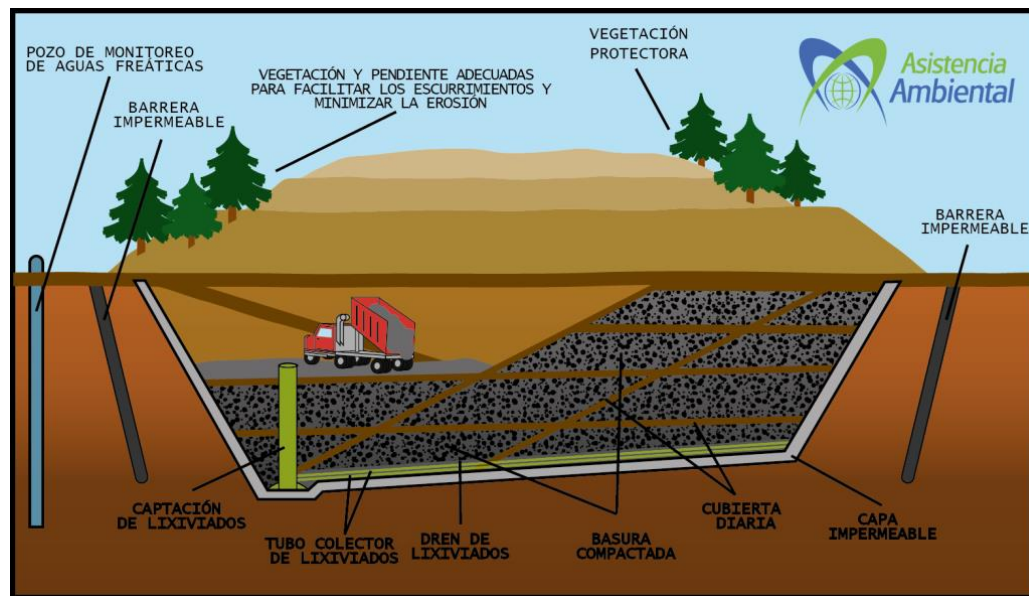


Fig. 2.3. Corte transversal de un relleno sanitario. <http://asistenciaambiental.com/que-es-un-relleno-sanitario/>

El relleno se construye apoyando las celdas en la pendiente natural del terreno; es decir, la basura se descarga en la base del talud, se extiende y apisona contra él y se recubre diariamente con una capa de tierra. Se continúa la operación avanzando sobre el terreno, conservando una pendiente suave de unos 18,4 a 26,5 grados en el

talud; es decir, la relación vertical/horizontal de 1:3 a 1:2, respectivamente, y de 1 a 2 grados en la superficie, o sea, de 2 a 3,5%. Los rellenos sanitarios deben construirse bajo las especificaciones de la NOM-083-SEMARNAT-2003.

2.1.8. Recolección selectiva y plantas recicladoras

La recolección selectiva consiste en la separación de los residuos dependiendo su composición para ser recolectados de forma separada y por tanto tratados individualmente. La separación más común, y la que tiene una presencia mayor en México, es la separación por elementos inorgánicos y orgánicos. Al recolectar de forma separada se puede revalorizar los RSU mediante el reciclaje que se realiza en plantas recicladoras las cuales recuperan los materiales con un alto valor de reciclaje como pueden ser metales, plásticos y fibras.



Fig. 2.4. Interior de la planta de reciclaje de Sims Municipal Recycling, en Brookling, <https://conectica.com/2016/07/19/explora-una-planta-de-reciclaje/>

2.1.9. Plantas incineradoras

La incineración de residuos sólidos orgánicos es una tecnología de tratamiento de los residuos sólidos orgánicos provenientes de la basura. Consiste en la incineración a altas temperaturas los residuos, lo que permite reducir su volumen un 95% y su peso hasta un 80%. Si no se implantan sistemas de filtros en la combustión resultan cenizas, escoria o residuos inertes y gases tóxicos que pueden afectar gravemente a la salud de las personas.



Fig. 2.5. Esquema general de una planta incineradora Gloriselle Negrón Ríos, MS, JD Catedrática Asociada en Salud Ambiental Programa de Agricultura, Mercadeo y Recursos Naturales diciembre 2012

2.1.10. Procesos de tratamiento de RSU por descomposición

Desde el punto de vista ambiental y de salud pública, el manejo adecuado de los residuos en las etapas que siguen a su generación permite mitigar los impactos negativos sobre el ambiente, la salud y reducir la presión sobre los recursos naturales. El reúso y reciclaje de materiales son fundamentales para reducir la presión sobre los ecosistemas y otras fuentes de recursos de las que se extraen. Paralelamente disminuye el uso de energía y de agua necesarios para su extracción y procesamiento, como la necesidad de espacio para disponer finalmente los residuos.

El tratamiento por descomposición son una serie de procesos que pueden reducir la cantidad de materia orgánica de los RSU, además de descomponer en otros compuestos reusables, como aceites y gases, y algunos casos estos procesos pueden realizar la separación de materia inorgánica.

A. Incineración

La incineración es el proceso de reducción de los Residuos sólidos, del orden de 90% en volumen y 75% en peso, a material inerte como escoria y cenizas además de obtener productos oxidados mediante la combustión. La incineración provoca la descomposición de las sustancias por vía térmica, mediante la oxidación a temperaturas elevadas (760°C o más) destruyendo la fracción orgánica de los residuos y reduciendo su volumen considerablemente.

El proceso general puede resumirse en los siguientes pasos:

- Entrada, pesado y descargue de residuos en fosa de almacenamiento.
- Selección de residuos para la introducción en el horno a través de conducto de alimentación.
- Quemado en el horno mínimo a 850°C según la resolución 0058 de 2002 (Combustión óptima en el horno: 980°C) y en la cámara de combustión secundaria a más de 1200°C para evitar olores y generación de dioxinas y furanos.
- Recuperación de calor de gases calientes para la conversión del calor en electricidad por medio de caldera (generador de turbina).
- Flujos de aire y suministro de oxígeno.

- Control de la contaminación del aire (óxidos de nitrógeno, de azufre y gases ácidos y material particulado).
- Tratamiento de cenizas y rechazos no quemados.

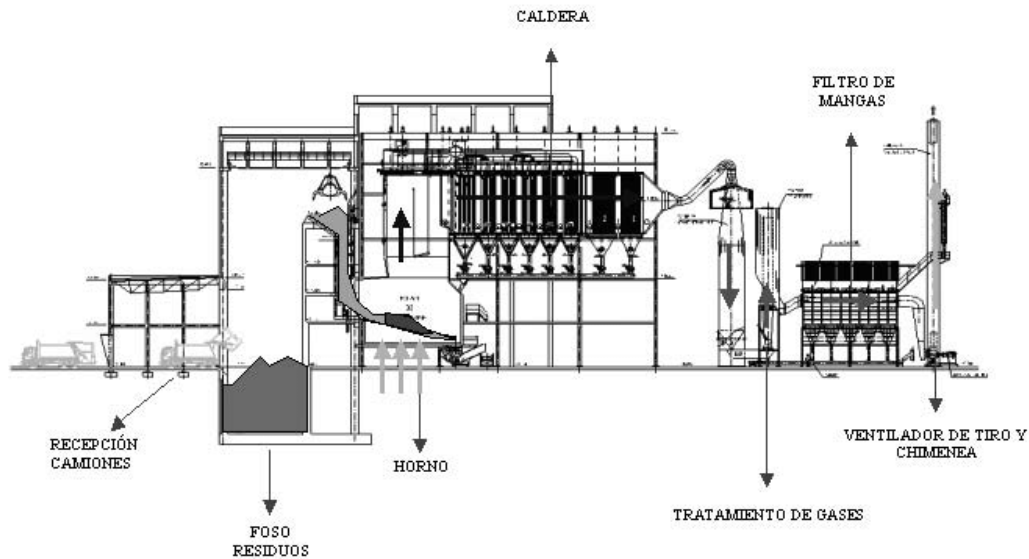


Fig. 2.6. Esquema de una planta de incineración de basura. Tomada de <http://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/20940/25-1-16906.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Para el proceso de incineración se requiere cierto equipo dependiendo de las propiedades físicas de los residuos así:

- Los de Inyección líquida, para tratar líquidos orgánicos y acuosos, contaminados con hidrocarburos, grasas, pinturas, etc.
- Hornos de base fija (aire controlado), para todos los tipos de residuos excepto lodos.
- Hornos de lecho fluidizado, los que continuamente mantienen partículas suspendidas de arena, alúmina y carbonato de calcio a través de la inyección de aire a presión; funcionan para gases líquidos y sólidos, a excepción de sólidos irregulares y de gran tamaño y de residuos que contengan compuestos aromáticos halogenados.
- Hornos rotatorios, sistemas versátiles para todo tipo de residuos

La temperatura de combustión en los incineradores alimentados sólo con residuos es alrededor de 760°C (1400°F) en el horno propiamente dicho (insuficiente para quemar e incluso para fundir el vidrio) y de más de 870°C (1600°F) en la cámara de combustión secundaria, temperaturas necesarias para evitar el olor desprendido por una combustión incompleta y la generación de gases tóxicos. Las guías para incineradores de combustión en masa recomiendan una temperatura de horno de 980°C (1800°F) para una combustión óptima. El uso de combustibles complementarios permite alcanzar temperaturas de hasta 1600°C (3000°F), las cuales reducen el volumen en 97% y convierten el metal y el vidrio en cenizas.

B. Pirolisis

La pirolisis se define como la descomposición térmica del carbón en una atmósfera exenta de oxígeno. Como consecuencia de la destilación destructiva del carbón, se obtienen:

- Gases combustibles (que contienen hidrogeno, metano, monóxido de carbono y diversos gases).
- Aceite (que contiene, ácido acético, acetona, metanol e hidrocarburos complejos).
- Coque que es carbón casi puro con materiales inertes.

En todos los procesos de utilización y conversión del carbón, tiene lugar algún tipo de pirolisis. La pirolisis es una técnica muy antigua, data del siglo XVIII, donde se permitía ya la separación de los fueles hidrocarbonados.

Para que la pirolisis se lleve a cabo es necesario la presencia de alguna sustancia con contenido de carbón como las biomásas, los vidrios o metales no pueden utilizarse para dicho proceso.

El proceso consta de 3 etapas claramente diferenciadas:

1. Primera etapa se produce una descomposición lenta con producción de pequeñas cantidades de agua, óxidos de carbono, hidrógeno y metano. Esto es consecuencia de la ruptura de enlaces debido a alta temperatura a la que se lleva el proceso y consecuencia también de la liberación de gases retenidos en el carbón.
2. Segunda etapa se conoce como descomposición térmica activa. La temperatura aumenta y se produce una fragmentación más profunda de la molécula de carbón con la formación de hidrocarburos condensables y alquitranes. Esta etapa comienza alrededor de los 360 °C y finaliza cuando se han alcanzado temperaturas alrededor de los 560 °C aproximadamente.
3. Tercera etapa que transcurre a temperaturas superiores a los 600 °C, se caracteriza por la eliminación gradual de hidrógeno y otros heteroátomos.

TEMPERATURA (°C)	• REACCIONES QUÍMICAS
100-120	• Deshidratación.
250	• Desoxigenación y desulfurización, disociación molecular de agua y dióxido de carbono, comienza la liberación de sulfuro de hidrógeno.
340	• Rotura de enlaces en compuestos alifáticos, comienza la liberación de metano y otros compuestos alifáticos ligeros.
380	• Fase de carbonización: concentración de carbono en los residuos.
400	• Rotura de enlaces C-O y C-N.
400-600	• Descomposición de los materiales bituminosos: generación de aceites y alquitranes. Carbonización de baja temperatura.
600	• Cracking de los materiales bituminosos. Generación de hidrocarburos gaseosos de cadenas cortas e hidrocarburos aromáticos (derivados del benceno).
> 600	• Dimerización de las olefinas (etileno) a α -butileno; reacción de etileno a ciclo hexano; generación de compuestos aromáticos volátiles.

Tabla 2.1. Proceso de descomposición en el tratamiento térmico.

<http://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/20940/25-1-16906.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Durante el proceso, la cantidad de componentes tanto gaseosos como líquidos puede variar desde un 25 a un 70% en peso aproximadamente. Esta cantidad depende de una serie de factores y variables que se mencionan a continuación

El carbón sufre una gran variedad de cambios tanto físicos como químicos cuando se incrementa la temperatura, desde la temperatura ambiente hasta el final de la última fase, 1000 °C aproximadamente. Si la temperatura de reacción es demasiado baja, las reacciones de descomposición no se producirán con la extensión debida y la obtención de gases y alquitranes será incompleta y, por tanto, el rendimiento en estos productos será bajo. A

temperaturas de reacción altas, se producirán rupturas térmicas de los alquitranes y será por tanto pequeño el rendimiento en líquidos.

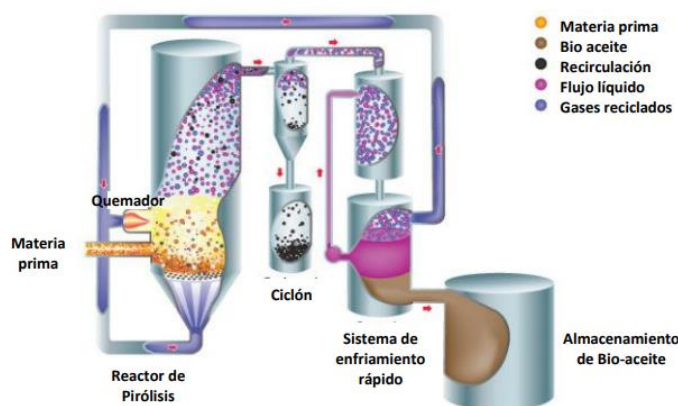


Fig. 2.7. Proceso de pirólisis.

<http://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/20940/25-1-16906.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Así pues, existe una temperatura idónea a la cual se produce el máximo rendimiento. En la tabla 2 se muestra los cambios y reacciones que se llevan a cabo según rangos de temperatura.

El tipo de carbón influye fuertemente en el comportamiento de la pirólisis. Los carbones de bajo rango (lignitos) contienen oxígeno que durante el proceso de pirólisis se desprenden como agua y óxidos de carbono. Los carbones con alto rango (bituminosos) contienen una menor cantidad de oxígeno y, por tanto, producen un menor volumen de agua y de óxidos de carbono que hidrocarburos gaseosos cuando se pirolizan.

El tipo de reactor es otro de los parámetros más influyentes en el proceso. Su importancia se basa en aspectos claves como los tiempos de residencia y la transferencia de calor, influyendo en los mecanismos que pueden controlar la velocidad de pirólisis.

En reactores de lecho fijo, la etapa controlante de la velocidad es la transferencia de calor. Esto supone una limitación en la velocidad de calentamiento y un tiempo de residencia elevado. Los reactores de lecho fluidizado se adaptan mejor a los procesos continuos. En ellos la transferencia de calor a las partículas de carbón es muy rápida y pueden alcanzar altas velocidades de calentamiento. La presión es un parámetro importante dentro del reactor el cual en atmósfera inerte a presión reducida aumenta el rendimiento en alquitranes.

Dentro del proceso de pirólisis podemos tener varios tipos de acuerdo con ciertos cambios en el proceso o añadidos a la reacción, algunos tipos son; anhidra, flash, acuosa y al vacío.

La pirólisis es normalmente anhidra (sin agua). Este fenómeno ocurre cuando un compuesto orgánico sólido se calienta fuertemente en la ausencia de oxígeno, como, por ejemplo, los productos de materia orgánica, que al freír o asar producen hidrocarburos aromáticos policíclicos, aminas heterocíclicas y amino imidazol azarenos. Aunque estos procesos se llevan a cabo en una atmósfera normal, las capas externas del material conservan el interior sin oxígeno.

El proceso también ocurre cuando se quema un combustible sólido compacto, como la biomasa. De hecho, las llamas de un fuego a base de madera se deben a la combustión de gases expulsados por la pirólisis, no por la combustión de la madera en sí misma.

Un antiguo uso industrial de la pirólisis anhidra es la producción de carbón vegetal mediante la pirólisis de la madera. Más recientemente la pirólisis se ha usado a gran escala para convertir el carbón en carbón de coque para la metalurgia, especialmente en la fabricación de acero.

Se piensa que la pirólisis anhidra tiene lugar durante la catagénesis, la conversión de querógeno a combustible fósil.

En muchas aplicaciones industriales este proceso es llevado a cabo bajo presión y a temperaturas por encima de los 430°C. La pirólisis anhidra también se puede usar para producir un combustible líquido similar al gasoil a partir de biomasa sólida o plásticos. La técnica más común utiliza unos tiempos de residencia muy bajos (menos de dos segundos) y temperaturas de entre 350°C y 500 °C.

La Pirólisis flash también se conoce como Pirólisis rápida o Pirólisis extrema o en su caso como en el país de Ecuador, donde es considerada un caso especial de la Termólisis, es reconocida por la alta velocidad de proceso

No obstante, para la Pirolisis flash no solo la cinética juega un rol importante, sino que también son importantes los procesos de transferencia de calor y de masa. En este proceso, la biomasa se descompone para generar, principalmente, vapores, aerosoles y una determinada cantidad de coque. Después del enfriamiento y de la condensación, se forma un líquido de color marrón oscuro (bioaceite) con un valor calórico que es la mitad del valor correspondiente al del diésel.

El producto principal, el bioaceite, es obtenido en un rendimiento mayor al 75% en peso sobre base de alimentos seco, junto con los subproductos gas y coque. El proceso incluye el secado de la materia prima (que debe contener menos de 10% de agua). Los subproductos pueden proveer el calor requerido en todo este proceso, de modo que los residuos solo sean gas de escape y cenizas. Es importante notar que el bioaceite es una mezcla líquida de compuestos carbonílicos y fenólicos.

En algunos países como Ecuador el término Pirólisis se utiliza en ocasiones para denominar también a la Termólisis con presencia de agua, tal como el craqueo por vapor de agua del petróleo o la despolimerización térmica de los residuos orgánicos en crudo pesado.

En la Pirólisis al vacío, el material orgánico se calienta en el vacío para reducir el punto de ebullición y evitar reacciones químicas adversas.

Mediante procesos térmicos comunes podemos generar energía por biomasa, sin embargo, presenta ciertas limitaciones como; la manipulación de los materiales con respecto a su eficiencia, además al estar presente un proceso térmico se generan elementos contaminantes como gases de efecto invernadero. Cabe destacar que los problemas antes mencionados pueden atenuarse mediante técnicas como pirolisis o gasificación, las cuales, aunque generan residuos, no son tan contaminantes o simplemente no se genera tanto como en otros procesos.

Un ejemplo de un proceso donde se queme biomasa, pero con efectos contaminantes reducidos es la pirolisis rápida. No obstante, en este proceso no solo la cinética juega un rol importante, sino que también son importantes los procesos de transferencia de calor y de masa, tales como los fenómenos de cambio de fase. En este proceso, la biomasa se descompone para generar, principalmente, vapores, aerosoles y una determinada cantidad de coque. Después del enfriamiento y de la condensación, se forma un líquido de color marrón oscuro (bioaceite) con un valor calórico que es la mitad del valor correspondiente al del diésel.

A diferencia de los procesos tradicionales, la pirolisis flash es un proceso avanzado con parámetros cuidadosamente controlados para la obtención de altos rendimientos del líquido. [Bridgwater,2001] Para llevar a cabo este proceso, se debe observar detenidamente lo siguiente: (a) someter las partículas de biomasa a una temperatura óptima para que reaccionen y (b) minimizar su exposición a temperaturas intermedias bajas que estimulen la formación de coque. Un método para lograr estos objetivos es usar pequeñas partículas como, por ejemplo, las que están presentes en procesos de lecho fluidizado (un lecho fluidizado es un lecho empaquetado con un sólido de grano fino). Otra posibilidad es transferir calor rápidamente solo a la superficie de las partículas que estén en contacto con la fuente de calor, lo cual se aplica en procesos de ablación. [Bridgwater, 2008]

El producto principal, el bioaceite, es obtenido en altos rendimientos, mayores al 75% en peso sobre base de alimento seco, junto con los subproductos gas y coque. Los subproductos podrían ser usados para proveer el

calor requerido en todo este proceso, de modo que no haya otros residuos, solo gas de escape y cenizas. Es importante notar que el bioaceite es una mezcla líquida de compuestos carbonílicos y fenólicos. (IEA, 2012)

Este proceso tiene algunas ventajas debido al control que se ejerce en él, pues variando parámetros podemos obtener distintos tipos de rendimientos y por ende obtener distintos tipos de productos finales de acuerdo con nuestros requerimientos.

Modo	Condiciones	Líquido	Carbón	Gas*
Gasificación	~ 800 °C	5 %	20 %	85 %
Flash/rápida	~ 500 °C, corto tiempo de residencia de vapor caliente ~1s	75 %	12 %	13 %
Intermedio	~ 500 °C, tiempo de residencia del vapor caliente ~10 – 30 s	50 %	25 %	25 %
Carbonización lenta	~ 400 °C, largo tiempo de residencia del vapor ~horas - días	30 %	35 %	35 %
Torrefacción lenta	~ 290 °C, tiempo de residencia de sólidos ~30 min	-----	82 %	18 %

Tabla 2.2. Rendimiento de la pirolisis rápida.

Como se puede ver en la tabla 2.2 podemos, dependiendo de la temperatura, variar el contenido de líquido, carbón y gas que podemos tener en la reacción.

El proceso de pirolisis rápida incluye el secado de la materia prima (que debe contener menos de 10% de agua), de modo que el contenido de agua sea mínimo en el aceite líquido producido. Además, se necesita moler adecuadamente el material para producir partículas lo suficientemente pequeñas para asegurar una reacción rápida, es decir, la reacción de pirolisis. Una de las principales ventajas de este proceso es que, en teoría, cualquier forma de biomasa podría ser considerada para un proceso de pirolisis rápida. (IEA, 2012)

El corazón del proceso es el reactor. Este es el lugar donde ocurren todas las reacciones. No obstante, para realizar la pirolisis flash es necesario contar con reactores especiales. Para este proceso se requiere una atmósfera sin oxígeno en el reactor y un rango de temperaturas entre 475°C y 550°C. En el proceso aquí presentado, el reactor ha sido diseñado con un lecho fluidizado. Cuando el gas fluye a través del lecho, el sólido se comporta como un líquido. Las ventajas de un lecho fluidizado son las siguientes (Prabir, 2006):

- Excelente intercambio entre el gas y las partículas en el lecho.
- Excelente transmisión de calor y transporte de masa.
- Una mezcla homogénea en el reactor.
- Fácil impermeabilización debido a que sólo algunas partes del reactor son móviles.

El reactor tiene que estar construido de manera tal que se garantice que no hay ingreso de oxígeno gaseoso, pues de otro modo podría ocurrir una incineración de la biomasa sin producir aceite. Por esa razón, es importante el uso de un gas inerte como fluido de transporte. (Kunii, 1991)

• Ventajas y desventajas

Siendo la pirolisis un proceso relativamente nuevo tanto en su desarrollo como en su implementación presenta algunas desventajas frente otros procesos de tratamiento. A continuación, se enlistan posibles ventajas y desventajas del proceso.

Ventajas

- Procesamiento de todo tipo de residuos: domésticos, industriales y tóxicos.
- No produce emisiones gaseosas contaminantes, ni cenizas o partículas volátiles.
- Los residuos sólidos del proceso no necesitan disposición final, ya que pueden ser reutilizados constituyéndose en una fuente de ingresos.
- El gas sintético producido también se puede utilizar en múltiples aplicaciones.
- De los métodos térmicos convencionales, es el que presenta más ventajas en términos de desarrollo tecnológico.

Desventajas

- Tecnología reciente, que todavía no ha alcanzado su plena madurez comercial y, por lo tanto, conlleva un factor de inseguridad.
- La cantidad de residuos finales es mayor que la de un incinerador.
- Incluye componentes especializados como prensa de alta capacidad y una planta de producción de oxígeno.
- Es necesario hacer separación de residuos problemáticos como metales, pilas y baterías entre otros.
- Las altas temperaturas de operación imponen altos requisitos técnicos y físicos a los materiales utilizados, aumentando el desgaste y los costos de mantenimiento.

C. Termólisis

El principio de la Termólisis es la reducción por efecto combinado de la presión y la temperatura debidamente controladas, de moléculas orgánicas complejas a otras más simples, como carbono, hidrógeno, biogás e hidrocarburos ligeros y aromáticos.

La Termólisis es un proceso similar a la Pirólisis sin embargo existen diferencias significativas entre ellas. Mientras la Pirólisis quema el residuo para obtener el producto final, la Termólisis consiste en la degradación-disociación térmica de materiales a temperaturas bajas con una total ausencia de oxígeno de tal forma que el contacto entre la fuente de calor y el producto a termolizar es indirecto.

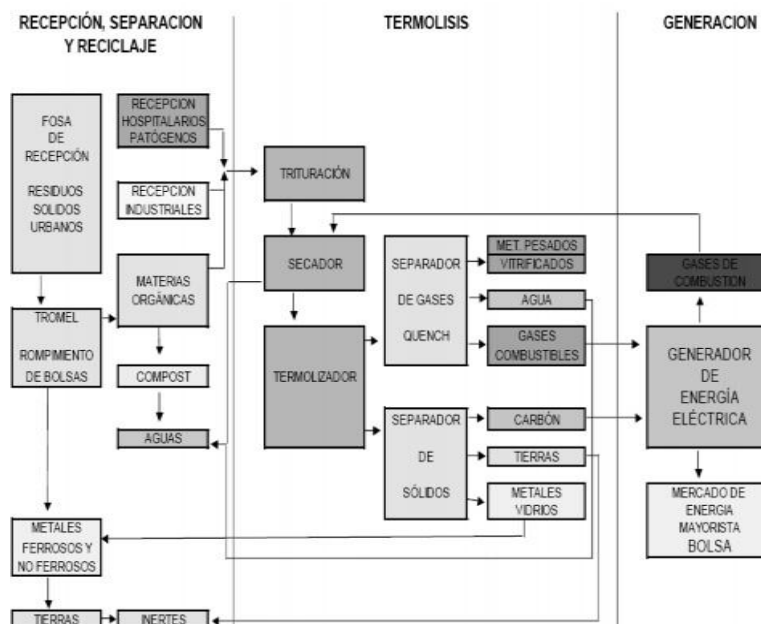


Fig. 2.8. Proceso de Termólisis para la generación de energía eléctrica con biomasa. Tomada de

www.repors.eea.eu.int/topoc-report_2001-15/en

La termólisis también conocida como descomposición térmica, permite obtener combustibles de segunda generación, principalmente biocarbons y bioaceite, así como donde la materia inorgánica queda inalterada y resulta muy sencillo separarla al final del proceso en cualquiera de sus formas: metales, vidrio y arenas, los lodos son vitrificados y salen bajo la forma de rocas no contaminantes.

- **Principios de la termólisis**

Todas las moléculas orgánicas que provienen de la naturaleza (biomasa), o de una reacción química (química del carbono), pueden ser progresivamente descompuestas y reducidas en moléculas más simples o en átomos, por el efecto combinado de la temperatura y de la presión.

El control de temperatura y de presión es suficiente para impedir la formación de otras reacciones químicas.

No es necesario añadir otro tipo de átomos a la reacción, sino que se elija una temperatura adecuada y una presión pequeña, además de darle a la materia el tiempo necesario y suficiente para su disgregación.

La reacción de la termólisis se explica fácilmente: las largas y complejas moléculas orgánicas, organizadas en cadenas almacenan la energía térmica recibida en forma de calor y vibran (las vibraciones se traducen en un aumento de su temperatura. Cuando la energía de vibración iguala a la energía de unión de las cadenas más débiles en su estructura molecular, estas cadenas se rompen y se liberan en moléculas más simples.

- **Generalidades del proceso.**

Los residuos sólidos se colocan en un compactador que los reduce hasta sólo un diez por ciento de su volumen original (una densidad de 2 000 kg/m³), sin separación ni tratamiento previo.

Con una fuerza de compresión de 1 000 toneladas los residuos se forman en tapones impermeables al gas y se introducen a presión en un canal de extracción de gases para luego ser sometidos a un proceso de calentamiento

a temperaturas que alcanzan los 2 000°C, que permite separar los componentes orgánicos e inorgánicos para obtener, primordialmente, gas y materias primas minerales.

Estas condiciones permiten simular las condiciones del centro de la tierra para producir una Fusión, en la cual, ningún tipo de material comúnmente hallado en los residuos pasa inalterado.

El gas de síntesis se somete a limpieza total en varias etapas, recuperándose sales industriales, azufre y agua pura. El gas puede ser utilizado para generar energía, así de cada tonelada de basura se obtienen más de 400 KW.

El proceso no permite la reformación de compuestos orgánicos, la formación de óxido de azufre - ozono por las características que este sistema particular posee, sin que para esto se requieran filtros de control.

Entre los metales y minerales resultantes del proceso, se destaca un granulado mineral que, mezclado con asfalto, se puede usar en la pavimentación de calles.

Todos son reutilizables y quedan nuevamente a disposición de la industria metalúrgica. Del tratamiento de una tonelada de basura, con la utilización de 500 kg de oxígeno, se obtiene los siguientes elementos, sin la necesidad de tratamientos posteriores:

- 890 kg de gas de síntesis (poder calorífico: 7.2 a 8.6 mJ/m³).
- 350 kg de agua (utilizable como refrigerante).
- 230 kg de granulados minerales para la construcción
- 29 kg de granulados metálicos para la metalurgia
- 10 kg de sales (cloruro de sodio calidad industrial)
- 3 kg de metales pesados concentrados.
- 2 kg de azufre de calidad industrial.

- **Ventajas y desventajas**

Algunas ventajas del proceso de termólisis

- No se presenta un impacto ambiental significativo, ya que no genera emisiones tóxicas y molestas para la población, no produce ni olores ni ruido.
- Demanda baja disponibilidad de espacio.
- Los productos que genera pueden ser reutilizados en la industria
- Presenta un interesante ahorro financiero que se traduce en un menor costo de tratamiento por tonelada en comparación con los sistemas conocidos al presente.
- Produce valores de emisión de sustancias dañinas (dioxinas, furanos y metales pesados) muy por debajo de los límites especificados por las leyes internacionales de la Unión Europea y de los límites que impone la EPA en los Estados Unidos".
- Garantiza la destrucción total de dioxinas y otros compuestos orgánicos sin producir cenizas, escorias o polvos de filtración

Algunas desventajas

- Fundamentalmente elevados costos de adquisición y mantenimiento.

Impacto ambiental

- positivo: Manejo ecológico con prácticamente cero emisiones atmosféricas.

- Negativo: Baja utilización de mano de obra.

Las instalaciones son modulares y sus dimensiones se adaptan a las necesidades del usuario, todos los módulos que se requieran comparten un depósito de residuos y una planta de purificación de aguas del proceso. Estas plantas pueden ser ubicadas dentro del casco urbano, a causa de que no producen emisiones como olores, ruidos y humos, por lo tanto, se optimiza la recolección de residuos reduciendo así los costos de esta.

D. Gasificación por plasma

Uno de los procesos más nuevos para la trata de residuos es la gasificación por plasma, la cual consiste en la incineración de residuos orgánicos mediante la utilización de un arco de plasma para elevar la temperatura.

Esta tecnología se utiliza en la actualidad principalmente para destruir desechos peligrosos, por su manera limpia y eficaz de acabar con ellos. Por ello, algunas empresas están trabajando para utilizar este sistema como sistema de valorización de residuos urbanos. [21]

El sistema consiste en un reactor con sopletes de plasma los cuales utilizan un gas inerte, como oxígeno, nitrógeno o argón. Los electrodos varían desde cobre o tungsteno a hafnio o circonio, junto con otras aleaciones. Una poderosa corriente eléctrica de alto voltaje circula entre los dos electrodos en forma de arco eléctrico. El gas inerte presurizado es ionizado cuando circula a través del plasma creado por el arco eléctrico. La temperatura del soplete varía desde 1500°C a 14000°C, de hecho, dada la naturaleza del proceso las temperaturas pueden llegar a ser cercanas a las de la superficie del sol. [23]

En estas condiciones, la disociación molecular puede ocurrir mediante la ruptura de los enlaces moleculares. Los elementos resultantes están en estado gaseoso. Las moléculas complejas son separadas en átomos individuales. La disociación molecular por plasma es conocida como pirólisis por plasma. [22]

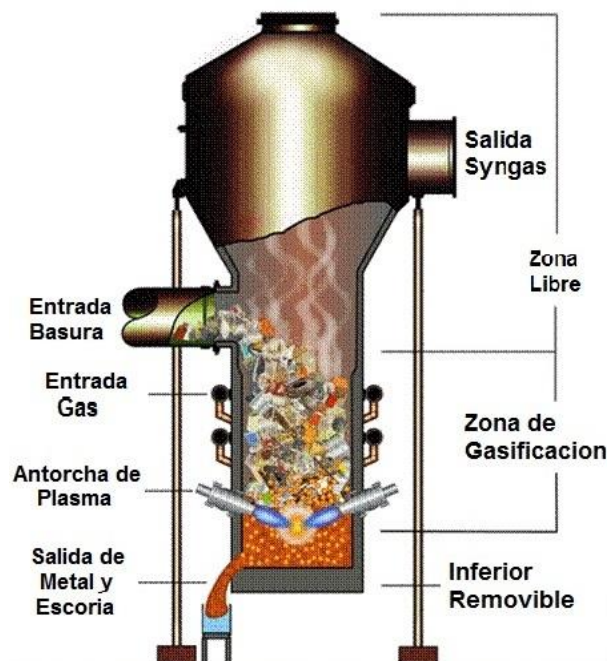


Fig. 2.9. Reactor de gasificación por plasma. http://plasma.ietec.org/ip_reactor.php

Posteriormente, la materia orgánica del residuo se convierte en un gas de síntesis (syngas) compuesto por hidrógeno y monóxido de carbono que puede ser utilizado para producir energía o combustibles líquidos. Los residuos inorgánicos se funden en el fondo del reactor, obteniendo un material vitrocerámico que se puede destinar a la fabricación de productos abrasivos, como aislantes de alta temperatura (lana mineral) o relleno para bases de carreteras. [21]

La materia prima para la gasificación con plasma es generalmente residuos sólidos y desechos orgánicos. También puede utilizarse desechos biomédicos y materiales peligrosos. El contenido y la consistencia del residuo impacta directamente en el rendimiento de la planta de gasificación por plasma. El separado y reciclaje antes de la gasificación mejora la consistencia. Una mayor cantidad de materia inorgánica como metales incrementa la cantidad de escoria metálica, y por consiguiente reduce la producción de gas sintético. De todas formas, el beneficio es que la escoria metálica en sí es químicamente inerte y segura de manejar. La trituración del residuo previa al ingreso a la cámara de gasificación incrementa la producción de gas sintético. Esto crea una transferencia de energía eficiente que asegura que más material sea descompuesto. [21]

Este proceso de calentamiento extremo sin oxígeno es distinto a la incineración y no genera las emisiones problemáticas de gas de escape que se produce cuando se incineran desechos, por tanto, se considera ecológicamente limpio. En países como Japón y Costa Rica se han implementado sistemas de este tipo para el tratamiento de residuos, los cuales han demostrado tener una buena eficiencia en la producción de energía.

La gasificación por plasma es un sistema ecológicamente limpio sin embargo en algunos casos se ha demostrado la presencia de furanos en los productos del reactor, los furanos son compuestos orgánicos heterocíclicos aromáticos de cinco miembros con un átomo de oxígeno. Es un líquido claro, incoloro, altamente inflamable y muy volátil, con un punto de ebullición cercano al de la temperatura ambiente, es tóxico y puede ser carcinógeno. Por este compuesto es la principal razón por la que se oponen a esta tecnología algunos expertos ya que los productos generados no podrían utilizarse para actividades como la agricultura.

Por otro lado, la implementación de un reactor de gasificación por plasma representa un gasto superior a otro tipo de tratamientos, dado que el equipo necesario tiene un costo económico superior, además para alcanzar las temperaturas deseadas el gasto energético se incrementa superando a la energía producida por el proceso. Por estas razones no se cataloga como un proceso productor de energía si solo un proceso de reducción de residuos sólidos.

E. Reactores químicos

Como se mencionó en las secciones anteriores la mayoría de los tratamientos para los RSU por descomposición requieren el uso de un reactor químico o biorreactor por ende es necesario conocer el funcionamiento de este equipo para el desarrollo de este trabajo

Antes de definir el termino reactor químico es necesario mencionar la definición de reacción química. Una reacción química, es todo proceso termodinámico en el cual dos o más sustancias se transforman, cambiando su estructura molecular y sus enlaces, en otras sustancias. Las sustancias que interactúan para la reacción son conocidas como reactivos o reactantes.[19]

Los reactantes pueden ser elementos o compuestos. Un ejemplo de reacción química es la formación de óxido de hierro producida al reaccionar el oxígeno del aire con el hierro de forma natural, o una cinta de magnesio al colocarla en una llama se convierte en óxido de magnesio, como un ejemplo de reacción inducida.[19]

Los productos obtenidos a partir de ciertos tipos de reactivos dependen de las condiciones bajo las que se da la reacción química. No obstante, tras un estudio cuidadoso se comprueba que, aunque los productos pueden variar según cambien las condiciones, determinadas cantidades permanecen constantes en cualquier reacción química. Estas cantidades constantes, las magnitudes conservadas, incluyen el número de cada tipo de átomo presente, la carga eléctrica y la masa total.[19]

Sabiendo lo anterior podemos definir un Reactor Químico como el equipo capaz de desarrollar una reacción química en su interior. En su interior ocurre un cambio químico y están diseñados para maximizar la conversión y selectividad de la reacción con el menor costo, tiempo, y mayor eficiencia posibles.[18]

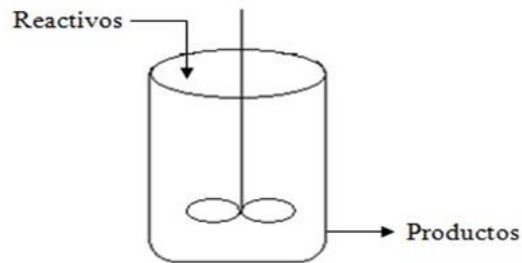


Fig. 2.10. Esquema general de un reactor químico

Los reactores deben de cumplir funciones específicas como el asegurar el tipo de contacto o modo de fluir de los reactantes en el interior del tanque, para conseguir una mezcla deseada con los materiales reactantes. Un reactor también debe de proporcionar el tiempo suficiente de contacto entre las sustancias y el catalizador, para conseguir la extensión deseada de la reacción, además deben permitir condiciones de presión, temperatura y composición de modo que la reacción tenga lugar en el grado y a la velocidad deseada, atendiendo a los aspectos termodinámicos y cinéticos de la reacción.[20]

Si la reacción química es catalizada por el organismo que la contiene o por una enzima purificada, hablamos de un tipo de reactores distintos denominados biorreactores. Un biorreactor puede ser también un dispositivo o sistema empleado para hacer crecer células o tejidos en operaciones de cultivo celular, En términos generales, un biorreactor busca mantener ciertas condiciones ambientales propicias como; pH, temperatura y concentración de oxígeno sobre el elemento que se cultiva. [19]



Fig. 2.11. Diagrama de un biorreactor conocido como biodigestor, donde se busca la obtención de Metano.

• Tipos de reactores químicos

Existen infinidad de tipos de reactores químicos, y cada uno responde a las necesidades de una situación en particular, entre los tipos más importantes, más conocidos, utilizados en la industria se puede mencionar los siguientes:

- REACTOR DISCONTINUO. Es aquel en donde no entra ni sale material durante la reacción, sino más bien, al inicio del proceso se introducen los materiales, se lleva a las condiciones de presión

y temperatura requeridas, y se deja reaccionar por un tiempo preestablecido, luego se descargan los productos de la reacción y los reactantes no convertidos. También es conocido como reactor tipo Batch.

- REACTOR CONTINUO. Mientras tiene lugar la reacción química al interior del reactor, éste se alimenta constantemente de material reactante, y también se retira ininterrumpidamente los productos de la reacción.
- REACTOR SEMICONTINUO: Es aquel en el cual inicialmente se carga de material todo el reactor, y a medida que tiene lugar la reacción, se va retirando productos y también incorporando más material de manera casi continua.
- REACTOR TUBULAR. En general es cualquier reactor de operación continua, con movimiento constante de uno o todos los reactivos en una dirección espacial seleccionada, y en el cual no se hace ningún intento por inducir al mezclado. Tienen forma de tubos, los reactivos entran por un extremo y salen por el otro.
- TANQUE CON AGITACIÓN CONTINUA. Este reactor consiste en un tanque donde hay un flujo continuo de material reaccionante y desde el cual sale continuamente el material que ha reaccionado. La agitación del contenido es esencial, debido a que el flujo interior debe estar en constante circulación y así producir una mezcla uniforme.
- REACTOR DE LECHO FLUIDIZADO. Se utiliza para reacciones donde intervengan un sólido y un fluido (generalmente un gas). En estos reactores la corriente de gas se hace pasar a través de las partículas sólidas, a una velocidad suficiente para suspenderlas, con el movimiento rápido de partículas se obtiene un alto grado de uniformidad en la temperatura evitando la formación de zonas calientes.
- REACTOR DE LECHO FIJO. Los reactores de lecho fijo consisten en uno o más tubos empacados con partículas de catalizador, que operan en posición vertical. Las partículas catalíticas pueden variar de tamaño y forma: granulares, cilíndricas, esféricas, etc. En algunos casos, especialmente con catalizadores metálicos como el platino, no se emplean partículas de metal, sino que éste se presenta en forma de mallas de alambre. El lecho está constituido por un conjunto de capas de este material. Estas mallas catalíticas se emplean en procesos comerciales como por ejemplo para la oxidación de amoníaco y para la oxidación del acetaldehídico ácido acético.
- REACTOR DE LECHO CON ESCURRIMIENTO. En estos reactores el catalizador sólido está presente como en el lecho fijo. Los reactivos se hacen pasar en corrientes paralelas o a contracorriente a través del lecho.
- REACTOR DE LECHO DE CARGA MÓVIL. Una fase fluida pasa hacia arriba a través de un lecho formado por sólidos. El sólido se alimenta por la parte superior del lecho, se mueve hacia abajo de la columna y se saca por la parte inferior.
- REACTOR DE BURBUJAS. Permiten hacer burbujear un reactivo gaseoso a través de un líquido con el que puede reaccionar, porque el líquido contiene un catalizador disuelto, no volátil u otro reactivo. El producto se puede sacar del reactor en la corriente gaseosa.
- REACTOR CON COMBUSTIBLE EN SUSPENSIÓN. Son similares a los reactores de burbujeo, pero la fase líquida está formada por una suspensión de líquidos y partículas finas del catalizador sólido.
- REACTOR DE MEZCLA PERFECTA. En este reactor las propiedades no se modifican ni con el tiempo ni con la posición, ya que suponemos que estamos trabajando en estado de flujo estacionario y la mezcla de reacción es completamente uniforme. El tiempo de mezcla tiene que ser muy pequeño en comparación con el tiempo de permanencia en el reactor. En la práctica se puede llevar a cabo siempre que la mezcla fluida sea poco viscosa y esté bien agitada
- REACTORES DE RECIRCULACIÓN. Pueden ser con dispositivo separador, cuando se toma parte de la corriente de salida y se llevan directamente a la entrada del reactor. Sin dispositivo

separador, cuando en la salida del reactor colocamos un dispositivo separador que hace que se separen reactivos y productos, luego los reactivos se recirculan de nuevo al reactor.

- REACTORES DE MEMBRANA. Son aquellos que combinan la reacción y la separación en una sola unidad; la membrana selectivamente remueve una (o más) de las especies reactantes o productos. Estos reactores han sido comúnmente usados para aplicaciones en las cuales los rendimientos de la reacción están limitados por el equilibrio. También han sido propuestos y usados para otras aplicaciones; para incrementar el rendimiento y la selectividad de reacciones enzimáticas y catalíticas influyendo a través de la membrana sobre la concentración de una (o más) especies intermedias, removiéndolas selectivamente (o ayudando a mantenerlas en una concentración baja), evitando la posibilidad de que dichos compuestos envenenen o desactiven el catalizador y para proveer una interfase controlada entre dos o más reactantes.
- FERMENTADORES. Este tipo de reactores utilizan hongos, los cuales forman un cultivo, el cual a su vez se transforma en una sopa espesa que contiene crecimientos filamentosos. Un ejemplo se encuentra en la fabricación de antibióticos como la penicilina.
- REACTOR TRICKLE BED. Este tipo de reactor supone la existencia de un flujo continuo de gas y otro de líquido hacia abajo sobre un lecho fijo de partículas sólidas catalíticas, las características de las partículas sólidas y de su empaquetamiento, junto con los caudales y propiedades de las dos corrientes defluidos determinarán el régimen de flujo del reactor y también sus propiedades fluido-dinámicas. También se pueden mencionar los reactores ISOTÉRMICOS, que son aquellos que trabajan u operan a una misma temperatura constante; y también los reactores ISOBÁRICOS, que son aquellos que trabajan u operan a una misma presión constante

- **Partes generales que componen un reactor químico**

Un reactor está compuesto por varias partes y estas partes dependen enteramente de la función y tipo de reactor sin embargo podemos generalizar algunos componentes que están presentes en la mayoría de los reactores pues son esenciales para el funcionamiento del mismos.

Dentro de los componentes generales tenemos:

- 1) Cuerpo principal del reactor, en el que se lleva a cabo la reacción.
- 2) Chaqueta de calentamiento/enfriamiento
- 3) Entrada hombre, para labores de limpieza y mantenimiento
- 4) Agitador
- 5) Motor del agitador con moto reductor
- 6) Boquillas de alimentación de reactivos
- 7) Boquillas de descarga de productos
- 8) Punto de muestreo
- 9) Boquillas de alimentación de aditivos (catalizador, iniciador, finalizador)
- 10) Equipos periféricos (condensador, cambiador de calor, bombas)
- 11) Sistema de seguridad (válvulas de alivio, discos de ruptura, etc.)
- 12) Sistemas para la indicación, registro y control de las variables de proceso
- 13) Mirilla
- 14) Conexiones para instrumentos diversos
- 15) Termo pozos para medición de temperatura
- 16) Mamparas para favorecer la turbulencia y el mezclado

F. Plantas de termovalorización

A nivel mundial en los últimos años se empezaron a crear plantas de termovalorización bajo el lema en inglés “Waste to Energy”, esto significa la creación de tecnología que pueda convertir la basura en energía aprovechable para las ciudades, esta idea surge como alternativa a los procesos comunes de desecho de basura como pueden ser los rellenos sanitarios.

La termovalorización transforma la basura inorgánica que ya no se puede reciclar en energía, a través de un proceso sofisticado y favorable para el ambiente, haciendo eficiente el manejo de la basura al convertirla en un recurso aprovechable. Esencialmente se basa en tres etapas:

- Abrasión: Fase en la que los residuos se carbonizan a 850°C durante al menos dos segundos.
- Conversión a electricidad: Se produce electricidad pasando el vapor por una turbina.
- Distribución: gestión de la energía producida

A diferencia de la incineración, la termovalorización, consiste en un proceso de alimentación continua de residuos inorgánicos, con combustión controlada, recuperación de energía y muy bajo nivel de emisiones. Para evitar la liberación de sustancias tóxicas, una de las fases del tratamiento de los residuos en la termovalorización consiste en el lavado y filtración de los gases producidos, de esta manera se impide que dioxinas o furanos - compuestos aromáticos tóxicos - se emitan al ambiente. Las plantas de termovalorización contienen reactores de termólisis, pirolisis o incineración por plasma, como los tratados anteriormente.

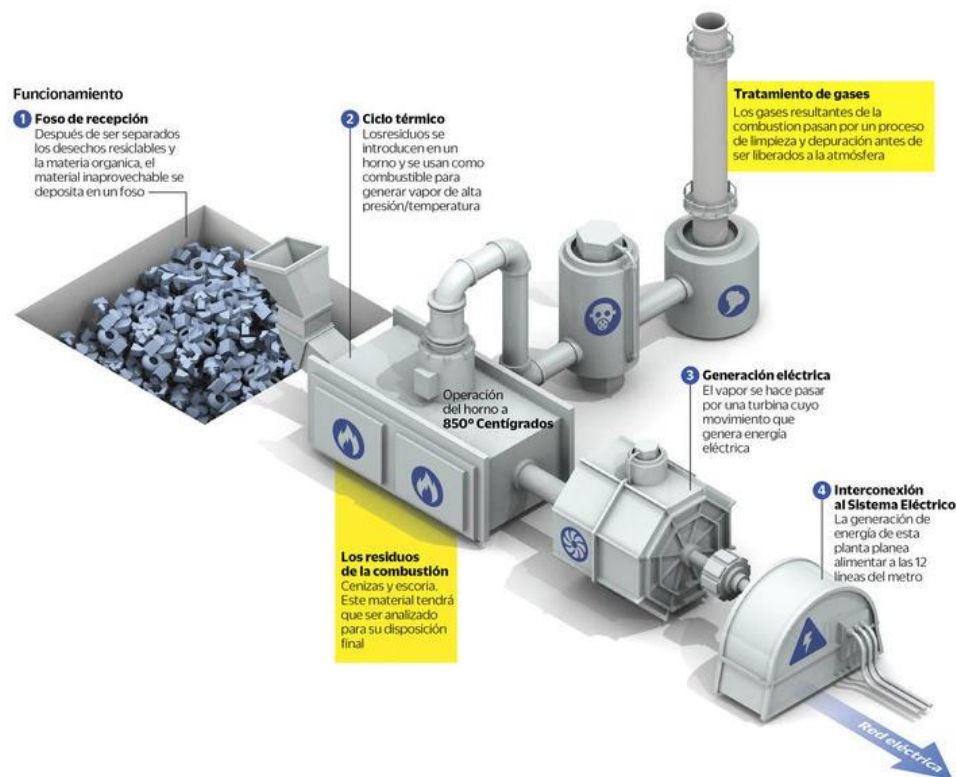


Fig. 2.12. Planta de termovalorización propuesta por la empresa francesa Veolia para la CDMX.

La planta funciona con la eliminación de óxidos de nitrógeno (NOx) la cual se realiza mediante su reacción con agua amoniacal al 24% de concentración, lo que genera nitrógeno molecular y vapor de agua. También se lleva a cabo una depuración de gases en seco mediante la neutralización de ácidos (HCL, HF y SO2) con Cal (CaOH) y la adsorción de metales pesados y dioxinas y furanos sobre carbón activado.

Se utilizan filtros de mangas para la separación de sólidos del gas de combustión, eliminando los productos de las reacciones y partículas suspendidas. Las cenizas que son captadas en los filtros de mangas y las escorias que se generan en el proceso se manejan de acuerdo con la normatividad ambiental vigente en cada ciudad o país.

La temperatura de combustión superior a los 850 grados Celsius por más de 2 segundos, evita la formación de dioxinas y furanos. La caldera utiliza este calor para evaporar agua y el vapor a su vez se utiliza para mover una turbina y generar energía eléctrica. Posteriormente es enfriado mediante una condensación por aire y permite que se recicle el agua.

Estas plantas cuentan con un sistema de medición continua de emisiones por línea y miden en tiempo real la concentración de los componentes de los gases de combustión (partículas, H₂O, O₂, CO, HCl, SO₂, NO_x, CO₂, NH₃) en cada chimenea. También en algunos casos incluyen sistemas de procesamiento de datos que pueden ser transmitidos “on line” y de forma transparente para la autoridad ambiental y público en general. Las dioxinas, furanos y metales pesados son muestreados periódicamente de acuerdo con la norma europea IED 2010/75 y operan bajo sistemas que cumplen con los estándares de calidad más avanzados del mundo: EN-14181. Lo anterior debido a que el mayor porcentaje de plantas se encuentran en Europa central.

2.2. Colector solar

Un concentrador solar es un dispositivo capaz de coleccionar energía solar enfocándola en un punto específico para lograr la mayor concentración de luz y por ende generar calor.

Existen varios tipos de concentradores solares, en su mayoría utilizan lentes y espejos para realizar la tarea de redirigir la radiación solar a un punto específico. Los concentradores deben tener una forma parabólica, aun los concentradores planos como los utilizados en las turbinas de vapor que en conjunto forman una parábola, esto es necesario pues al tener una forma parabólica existe un punto focal que es donde se realiza la concentración. En la figura 2.13 podemos apreciar los diferentes tipos de concentradores existentes y probados en varias implementaciones de generación de energía.

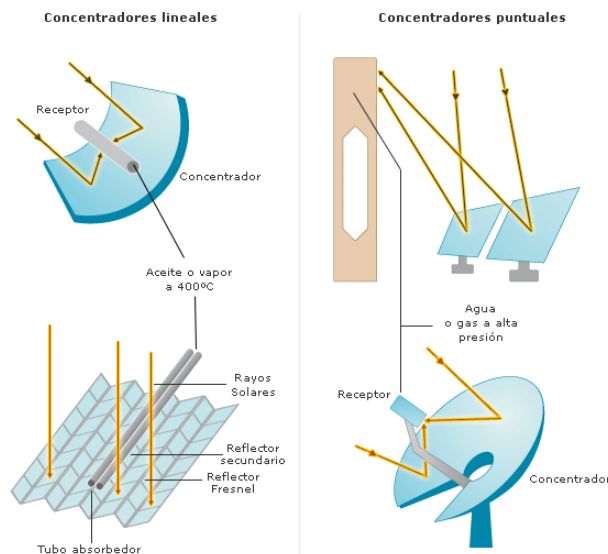


Fig. 2.13. Tipos de concentradores

El uso generalizado a gran escala de los concentradores solares es para la generación de vapor por medio del calor obtenido del sol, este calor se convierte en energía mecánica a partir de un motor térmico (típicamente

una turbina de vapor) al que se conecta el eje de accionamiento para montar dinamos u otros dispositivos (ya sea de manera integral o mediante una transmisión mecánica).

En un sistema de concentración solar, en comparación con los colectores solares planos clásicos, se obtienen las siguientes ventajas:

- Energía: expresable en términos de eficiencia de conversión solar-térmica (ya que las pérdidas por convección y radiación son directamente proporcionales al área del receptor, que por definición es más pequeña que el área del reflector). De acuerdo con las leyes de la termodinámica.
- Económico: los costos de construcción se mueven principalmente en las superficies reflectantes y en los dispositivos señaladores relativos.

2.2.1. Concentrador lineal de tubo

Los concentradores lineales de tubo son el tipo más usado para instalaciones de generación de energía limpia a gran escala, debido principalmente a su eficiencia y forma lo cual los hace más fáciles de producir e instalar además de su control el cual es más simple.

Estos colectores están formados, como se muestra en la figura 2.14, de un espejo de forma parabólica, pero alargado a manera de medio cilindro con un tubo que pasa a todo lo largo y colocado en el punto focal de la parábola formada por el espejo.[41]



Fig. 2.14. Colector lineal de tubo.

Los espejos concentraran la radiación en el tubo, el cual recibe el nombre de tubo absorbente, esto se logra gracias a la forma de los espejos y capacidad de refracción por ende los espejos están fabricados en un material con propiedad ópticas adecuadas como pueden ser aluminio pulido, acero pulido o con recubrimiento de cromo o plata y en algunos casos cristales los cuales son la mejor opción, pero sumamente caros de fabricar. En la figura 2.15 se muestra como los rayos solares inciden en la superficie y son redirigidos al tubo absorbente.

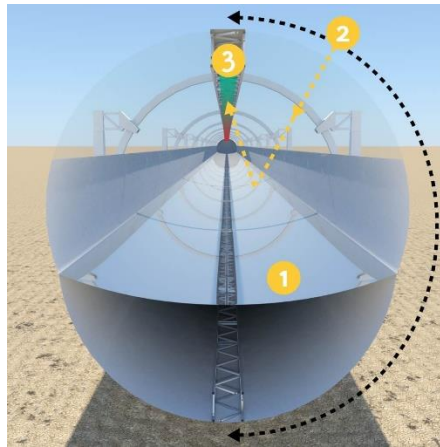


Fig. 2.14. Funcionamiento de un colector lineal; 1-superficie reflejante, 2- dirección de rayo solar, 3- tubo absorbente.
<https://ecoinventos.com/heliotube-concentrador-solar>

El tubo absorbente es una de las partes más importantes de este tipo de colectores pues de él depende la recolección de energía. El tubo normalmente es fabricado con cuarzo en el exterior y un segundo tubo en el interior fabricado de algún metal con buenas propiedades térmicas como aluminio cobre o acero, este tubo interno lleva en su interior sales o aceites los cuales se calientan y se envían a un intercambiador de calor para su aprovechamiento.[41]

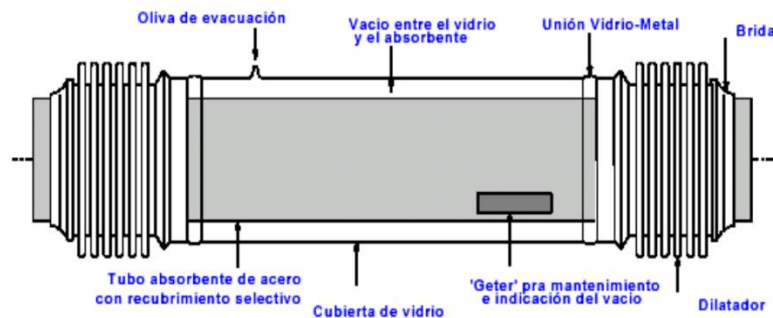


Fig. 2.15. Construcción de un tubo absorbente.

2.2.2. Concentrador puntual

Los colectores puntuales son dispositivos orientados al redireccionamiento de la radiación solar siendo su característica principal que el redireccionamiento se da a un único punto. Dentro de esta clasificación tenemos dos tipos de colectores; los colectores centrales o heliostatos y colectores de disco.

- Colector central

Un conjunto de heliostatos se ubica para concentrar los rayos del sol en la parte superior de una torre fija. Esto permite temperaturas más altas y mayor eficiencia que los sistemas lineales. Estos receptores pueden generar vapor saturado o sobrecalentado directamente, utilizando sales fundidas, aire u otros medios como fluidos de transferencia térmica. Campos solares de miles de pequeños heliostatos se proponen como una alternativa barata de diseño [42]. En la figura 2.16 se puede ver un diagrama de la función de un heliostato.

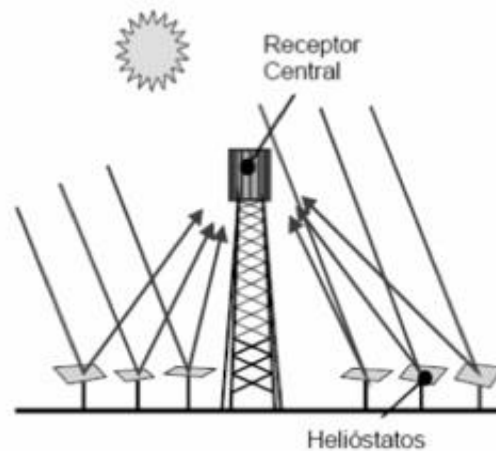


Fig. 2.16. Heliostato para torre de vapor. UTFSM, Estudio de contribución de ERNC al SIC al 2025 (2008)

Normalmente los colectores centrales tienen una forma rectangular plana lo que obliga a tener un sistema de orientación y seguimiento solar muy pulido con sistemas de control distribuido. Estos sistemas en la parte mecánica son fáciles de construir debido a su forma, pero más difíciles de controlar.

- Colector de disco

Concentran los rayos del sol en un punto focal que se mueve junto con el disco siguiendo al sol, ofreciendo la más alta eficiencia óptica en capacidades mucho más pequeñas (por lo general decenas de kW). La producción masiva permitiría competir con los sistemas más grandes, que se benefician de economías de escala. Los sistemas de discos son menos compatibles con almacenamiento térmico que otras tecnologías, pero su ventaja es que no requieren agua de refrigeración [42]. En la figura 2.17 se puede un diagrama de los colectores de disco.

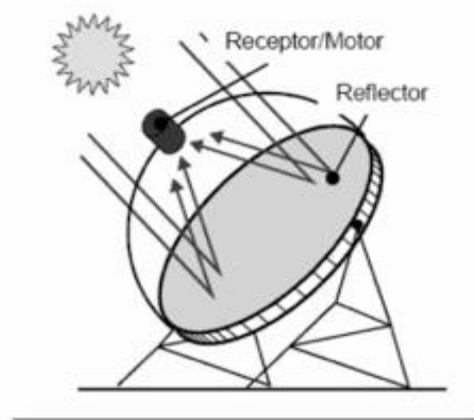


Fig. 2.17. Colector parabólico de disco. UTFSM, Estudio de contribución de ERNC al SIC al 2025 (2008)

Este tipo de colectores son muy usados para aplicaciones más pequeñas debido a incompatibilidad con sistemas de intercambio de calor o almacenamiento de calor, sin embargo, dado su alta eficiencia podrían sustituir en un futuro a los demás sistemas.

2.2.3. Control de colectores solares

Una planta solar tiene el mismo objetivo de una planta convencional de producción de energía, sin embargo, representa un reto mayor. La diferencia fundamental entre una planta convencional y una planta tradicional es que la energía en la planta solar no puede ser manipulada por el hombre, es intermitente y cuando se encuentra disponible resulta cara de transformar. Por todo ello, en una planta solar se requiere un sofisticado sistema de control capaz de mantener unas especificaciones más rigurosas que en el caso de un control clásico. Durante los últimos treinta años, muchos investigadores han dedicado un esfuerzo considerable para mejorar la eficiencia de las plantas de energía solar térmica con colectores distribuidos desde los puntos de vista de control y optimización.

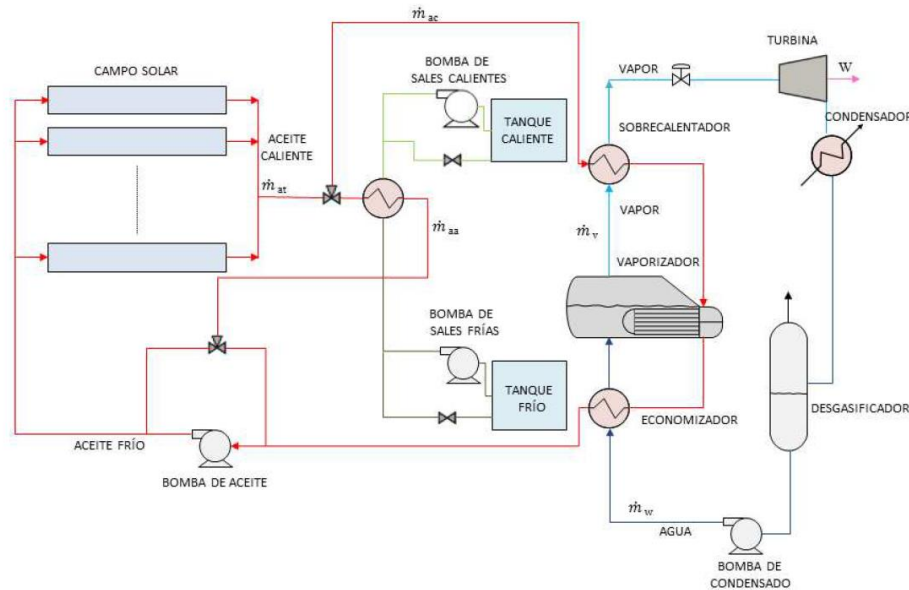


Fig. 2.18. Diagrama de una planta solar térmica.

El sistema de control preferido para este tipo de sistemas es un sistema de control distribuido, siendo este utilizado en mayor medida en procesos industriales de tipo control de químicos como en la petroquímica.

Un sistema de control distribuido (DCS) utiliza bucles de control distribuidos por toda una fábrica, maquinaria o área de control. Es un sistema industrial automatizado y digital que se utiliza para controlar los procesos industriales y aumentar su seguridad, rentabilidad y fiabilidad. A diferencia de los controladores lógicos programables (PLC), un sistema de control distribuido utiliza una serie de herramientas de configuración para configurar la base de datos, la lógica de control, los gráficos y la seguridad del sistema.

Estos controles utilizan bases de datos con toda la información de las variables y distintas mediciones hechas, esto obliga a la utilización de protocolos de comunicación. En la figura 2.19. se puede observar un diagrama con las partes básicas del sistema de control.

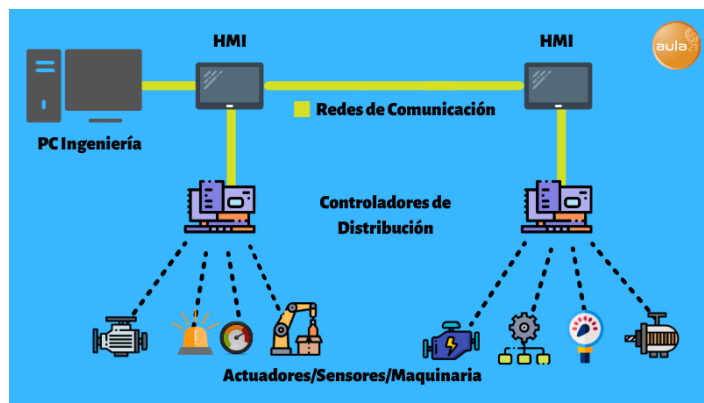


Fig. 2.19. Diagrama básico de las partes de un control distribuido.

Sin embargo, a pesar de las varias ventajas que representa este tipo de sistemas de control, siempre existe una desventaja real cuando se habla de energía solar, ya sea activa o pasiva, y es la variabilidad del entorno y por ende la intermitencia de la radiación solar. Por lo anterior se han buscado estrategias para el control de las plantas solares creando modelos de campos solares completo e incluso tomando en cuenta áreas sombreadas por nubes u otros obstáculos.

En recientes estudios e investigaciones se plantean sistemas como los controladores predictivos multivariable, los cuales han tenido un éxito significativo en procesos industriales [43]. Esto se debe a las propiedades de esta técnica de control dentro de las cuales podemos destacar:

- Formulación en el dominio del tiempo, flexible e intuitiva
- Permite tratar con sistemas variados como lineales y no lineales, monovariable y multivariados, sin cambios en la formulación.
- La ley de control responde a criterios óptimos
- Permite la incorporación de restricciones en la síntesis del controlador

De lo dicho anterior la característica de incluir restricciones en el cálculo de los actuadores, es la más atractiva de todas pues es algo que no pueden realizar técnicas clásicas de control. Sin embargo, dentro de sus inconvenientes podemos citar:

- Se requiere un modelo dinámico preciso
- Se requiere un algoritmo de optimización que solo puede realizar un computador
- Requiere un alto coste computacional lo cual limita la velocidad del sistema
- Aunque en menor incidencia y con el avance de los estudios de este controlador se ha podido disminuir, pero existe una inestabilidad en este controlador más cuando se aplican restricciones. Esto hace que el ajuste del controlador fuese heurístico y sin conocimiento de cómo podían influir los parámetros en la estabilidad
- Resulta compleja la consideración de incertidumbres

A pesar de ser controladores que han dado buenos resultados, son sistemas con un alto coste computacional y se requiere una adecuada sintonización que puede no depender de un proceso analítico. En el presente trabajo se intenta ofrecer una técnica que pueda realizar el control de un sistema de colector solar sin tantos inconvenientes, manteniendo las ventajas de otros sistemas.

2.3.Red neuronal

Las redes neuronales artificiales (RNA) son un acercamiento hacia la inteligencia, representada por un programa computacional, en el que el procesamiento es fruto de la auto organización de datos. Cumplen con tareas de procesamiento de bajo nivel, como el reconocimiento de patrones, percepción, control, etc., por lo tanto, la idea de partida de las redes neuronales artificiales constituye en la actualidad un activo campo multidisciplinar, en el que confluyen investigadores procedentes de muy diferentes áreas del conocimiento.

Los sistemas neuronales artificiales imitan la estructura hardware del sistema nervioso con la intención de construir sistemas de procesamiento de la información paralelos, distribuidos y adaptativos, que puedan presentar un cierto comportamiento inteligente similar al cerebro humano. Por lo tanto, la idea que subyace en los sistemas neuronales artificiales es que, para abordar el tipo de problemas que el cerebro resuelve con eficiencia, puede resultar conveniente construir sistemas que emulen en cierto modo la estructura de las redes neuronales biológicas con el fin de alcanzar una funcionalidad similar. Como es descrito en [44], las neuronas biológicas son muchos más simples, lentas y menos fiables que una CPU, a pesar de ello, existen problemas difícilmente abordables mediante un computador convencional, que el cerebro resuelve eficazmente (reconocimiento del habla, visión de objetos inmersos en ambiente natural, respuesta ante estímulos de entorno). Una red neuronal está compuesta por un número de entradas, un procesamiento matemático y un número de salidas, como se muestra en la figura 2.20.

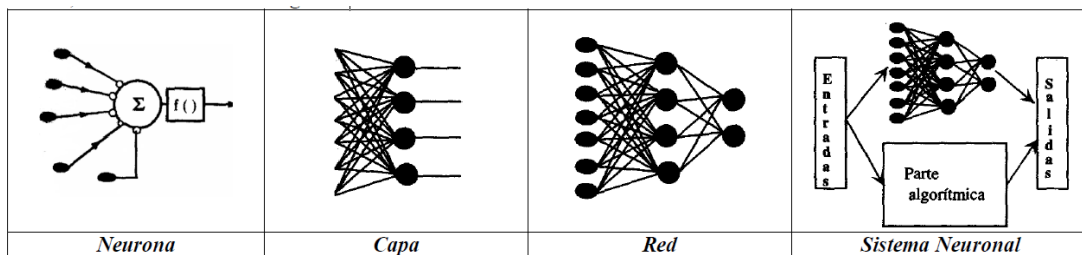


Fig. 2.20. Estructura de una red neuronal.

Una red neuronal se compone de neuronas y capas, las redes pueden formar sistemas neuronales, como se muestra en la figura 2.20.

Antes de explicar en consiste una red neuronal artificial se debe definir el concepto de neurona biológica siendo esta el modelo a partir del cual se crea la red artificial. Una neurona se define como; una célula componente principal del sistema nervioso, cuya función principal es recibir, procesar y transmitir información a través de señales químicas y eléctricas gracias a la excitabilidad eléctrica de su membrana plasmática como se menciona en [45]. Están especializadas en la recepción de estímulos y conducción del impulso nervioso en forma de potencial de acción entre ellas mediante conexiones llamadas sinapsis, o con otros tipos de células como, por ejemplo, las fibras musculares. Altamente diferenciadas, la mayoría de las neuronas no se dividen una vez alcanzada su madurez; no obstante, una minoría sí lo hace.[45]

Las neuronas presentan unas características morfológicas típicas que sustentan sus funciones: un cuerpo celular, llamado soma o central; una o varias prolongaciones cortas que generalmente transmiten impulsos hacia el soma celular, denominadas dendritas; y una prolongación larga, denominada axón, que conduce los impulsos desde el soma hacia otra neurona u órgano diana.[46]

En la figura 2.21 podemos observar la forma de una neurona, así como la identificación de sus partes principales. Cabe mencionar que una neurona al ser una célula tiene una serie de componentes propias de su naturaleza

biológica sin embargo para la aplicación de este trabajo solo se requiere el conocimiento sobre las tres partes antes mencionadas.

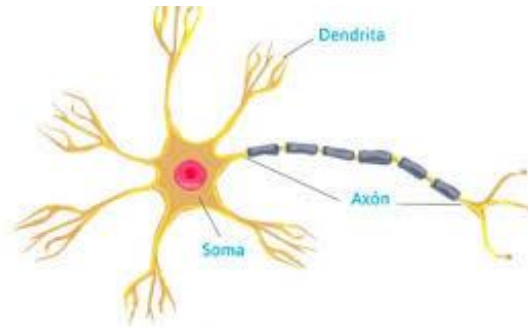


Fig. 2.21. Partes principales de una neurona biológica.[46]

De forma simple podemos explicar el funcionamiento de una neurona estableciendo una entrada de datos siendo la parte que recibe esta entrada la dendrita, una etapa de procesamiento de la cual se encarga el soma y finalmente una salida siendo el axón el encargado de los impulsos de salida. Con lo anterior podemos explicar el modelo de una red artificial el cual contiene casi las mismas partes que una red biológica.

Una red neuronal artificial esta modela de acuerdo con el modelo de Rumelhart y McCulloch (1986) que define un elemento de proceso, o neurona artificial, como un dispositivo que, a partir de un conjunto de entradas “p”, genera una única salida “a”.

$$a = f(\mathbf{w} \mathbf{p} + \mathbf{b})$$

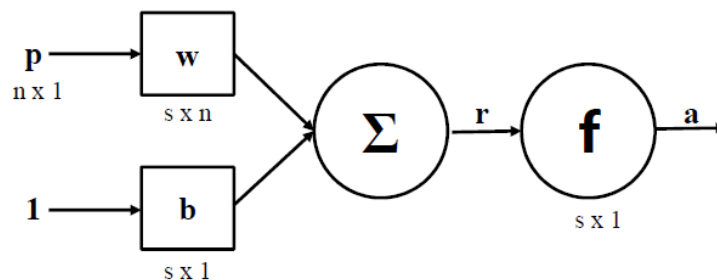


Fig. 2.21. Red neuronal artificial.

McCulloch y Pitts parten de cinco consideraciones acerca del comportamiento de las neuronas. [49] Dichas consideraciones las plantean de la siguiente forma:

- i. La actividad neuronal es un proceso "todo o nada".
- ii. Un cierto número fijo de sinápsis debe ser excitado dentro de un período de adición latente en orden de excitar una neurona en cualquier intervalo de tiempo, y este número es independiente de la actividad previa y la posición de la neurona.
- iii. El único retardo significativo dentro del sistema es el retardo sináptico.
- iv. La actividad de cualquier sinápsis inhibitoria previene absolutamente la excitación de la neurona en ese intervalo de tiempo.
- v. La estructura de la red no cambia con el tiempo.

Estas consideraciones describen a lo que se ha conocido como la neurona "McCulloch-Pitts". De las consideraciones mostradas podemos extraer y resaltar lo siguiente. La neurona McCulloch-Pitts es un dispositivo binario, es decir, solo puede estar en uno de dos posibles estados. Cada neurona puede recibir entradas de sinápsis excitadoras, las cuales tienen un mismo peso. También pueden recibir entradas de sinápsis inhibitorias, cuya acción es absoluta; es decir, si la sinápsis inhibitoria está activa, la neurona no puede encender. Hay un lapso dado fijo para la integración de las entradas sinápticas, basado en el retardo sináptico observado; esto le da a la neurona su carácter de trabajo en tiempo discreto.[48]

Al hacer estas consideraciones, los autores comienzan trabajando con arreglos lineales de neuronas, es decir, consideran que no hay vías de retroalimentación entre neuronas, y parten de una serie de simplificaciones en las que consideran que el umbral de disparo en las neuronas adopta valores discretos, y que estos umbrales también se mantienen inalterados. Estas últimas consideraciones les permiten demostrar el funcionamiento de su neurona, para posteriormente demostrar que, mediante la realización de diversos arreglos y conexiones de neuronas de este tipo, entre los que se encuentran algunos arreglos cíclicos de neuronas, es posible producir los mismos resultados que con neuronas con umbrales cambiantes con el tiempo.

El modo de operación de la neurona McCulloch-Pitts es simple. Durante el tiempo de integración, la neurona responde a la actividad de su sinápsis, la cual refleja el estado de las células presinápticas. Si no hay sinápsis inhibitorias activas, la neurona suma sus entradas sinápticas y verifica si la suma de ellas alcanza o excede su nivel de umbral. Si lo hace, entonces la neurona se vuelve activa. Si no, la neurona permanece inactiva. En caso de que exista alguna sinápsis inhibitoria activa, la neurona permanece inactiva.[50]

Una red artificial está formada al igual que una red biológica y siguiendo el modelo McCulloch-Pitts por varias partes que en conjunto generan el conjunto de salidas "a". A continuación, se describe cada parte y su función de acuerdo con el modelo presentado en la figura 2.21.

- Patrones de entrada (p): conjunto de datos que dependerán de la naturaleza del problema, podrá ser cualquier impulso externo que pretenda generar una respuesta de la red. Estos patrones pueden estar agrupados por vectores o incluso dependiendo el tipo de red y numero de capas podría ser una matriz.
- Regla de propagación (Σ): es el procesamiento de la red, en este punto es donde se calcula la posible salida de la red y por ende la clasificación.
- Pesos sinápticos (w): es la interacción entre la neurona presináptica y postsináptica, básicamente son valores que relacionan las entradas con lo que se espera de salida. La obtención de este parámetro es objetivo de un entrenamiento de la red neuronal que no es otra cosa que el propio aprendizaje de la red.
- Polarizador (b): También llamado bias. Para que una neurona esté en condiciones de reiniciar la transmisión y recepción de impulsos es necesario despolarizar la neurona y el vector b se encarga de eso para regresar al estado inicial la neurona. Este conjunto de valores también se calcula en la etapa de aprendizaje de la red.
- Función de activación (f): Proporciona el estado de activación de la neurona en función del estado anterior y del valor postsináptico. La función de activación no suele tener en cuenta el estado anterior de la neurona, sino sólo el potencial. Suele ser una función determinista y, casi siempre, continua y monótona creciente. Las más comunes son la función signo (escalón, impulso, lineal), la función semilineal y las funciones sigmoides.
- Función de salida (a): Es la salida de la red y suele ser la identidad. En algunos casos es un valor umbral dado que la neurona no se activa hasta que su estado supera un determinado valor.

Con lo anterior podemos decir que la función principal de una red neuronal es la clasificación, por ende, se suele ocupar para problemas de clasificación sin embargo esto, aunque parece limitante no lo es pes dado su capacidad de aprendizaje se pueden implementar en varios sistemas.

2.3.1. Clasificación por capas

Las RNA se pueden clasificar de varias maneras sin embargo en esta ocasión abarcaremos solo dos tipos de clasificación; de acuerdo con sus capas y de acuerdo con el tipo de aprendizaje.

Una RNA puede ser monocapa y multicapa, cuando se refiere a una red monocapa se habla de una o varias neuronas ordenas en paralelo, para que se tenga la característica de monocapa las neuronas deberán recibir la entrada y proporcionar la salida, en la figura 2.21 se muestra esta configuración. Una red multicapa es cuando se agrupan las conexiones de las neuronas en serie, la característica principal de esta red es que se tiene una capa de entrada, una capa oculta y una capa de salida, por ende, una no habrá neuronas que reciban una entra y tengan asociada una salida del sistema. En la figura 2.22 se muestra esta configuración.

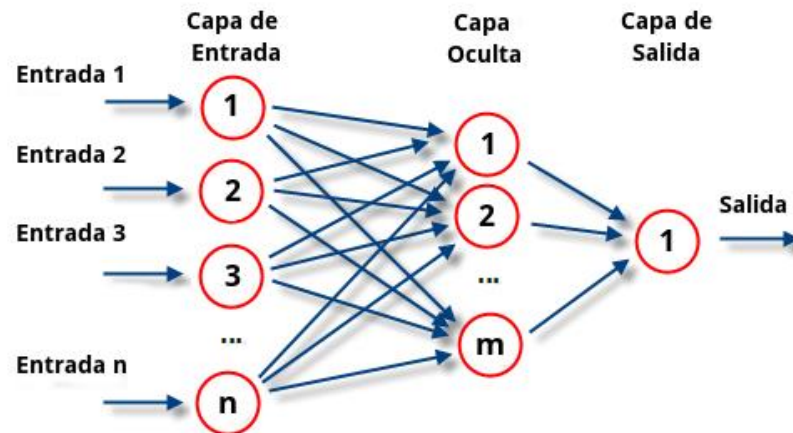


Fig. 2.22. RNA multicapa.

La mayoría de los problemas pueden resueltos con redes de no más de 3 capas, sin embargo, problemas con datos que no presenten una separación lineal deberán abordarse mediante redes multicapa. Siendo la prueba de separación lineal una de las principales para elegir el tipo de red con el cual trabajar y el método de aprendizaje.

2.3.2. Aprendizaje

El aprendizaje de las redes neuronales es el proceso de presentar los patrones a aprender, a la red y el cambio de los pesos de los pesos sinápticos usando una regla de aprendizaje o entrenamiento.

La regla de aprendizaje consiste en algoritmos basados en fórmulas matemáticas, que, usando técnicas como minimización del error o la optimización de alguna función de energía, modifican el valor de los pesos sinápticos en función de las entradas disponibles y con ello optimizan la respuesta de la red a las salidas que deseamos. En pocas palabras el entrenamiento de una red es dejar que busque valores para los pesos sinápticos donde el error sea mínimo en la clasificación de la salida.

El aprendizaje se basa en el entrenamiento de la red con patrones, que usualmente son llamados patrones de muestra o entrenamiento. El proceso usual del algoritmo es que la red ejecuta los patrones iterativamente, cambiando los pesos de las sinapsis, hasta que convergen a un conjunto de pesos óptimos que representan a los patrones aceptablemente, entonces mostrará una respuesta satisfactoria para esos patrones. De una forma resumida sus pesos sinápticos se ajustan para dar respuestas correctas al conjunto de patrones de entrenamiento que se le han proporcionado. Sin embargo, hay que destacar que algunas redes no tienen un aprendizaje iterativo, si no que los pesos de las sinapsis son calculados previamente a partir de los patrones,

como en la red de Hopfield presentada en [47] y mostrada en la figura 2.23 donde si se compara a la figura 2.22 podemos notar la recurrencia de la red de Hopfield y por tanto en esta red no se garantiza la convergencia como en las redes iterativas.

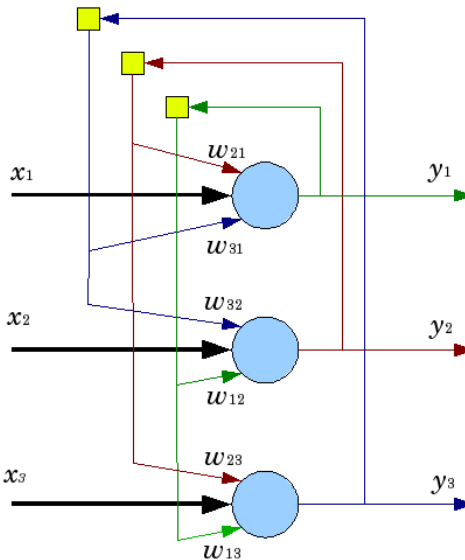


Fig. 2.23. Modelo de la red neuronal propuesta por Hopfield. <https://www.mql5.com/es/articles/1103>

Podemos describir tres tipos de aprendizaje para las RNA descritos a continuación:

- Aprendizaje supervisado: Consiste en que la red dispone de los patrones de entrada y los patrones de salida que deseamos para esa entrada y en función de ellos se modifican los pesos de las sinapsis para ajustar la entrada a esa salida. Es el tipo más intuitivo de aprendizaje.
- Aprendizaje no supervisado: Consiste en no presentar patrones objetivos, si no solo patrones de entrada, y dejar a la red clasificar dichos patrones en función de las características comunes de los patrones.
- Aprendizaje reforzado: Se puede considerar un aprendizaje híbrido pues el supervisor no enseña patrones objetivos si no que solo le dice se acierta o falla en su respuesta ante un patrón de entrada.

Dentro del entrenamiento de la red se tienen los algoritmos de aprendizaje los cuales son la aplicación real del aprendizaje, si bien al paso de los años y con los avances en la investigación de las RNA se han desarrollado nuevos algoritmos, podemos identificar los siguientes como los más comunes:

- Minimización del error: Es un método de cálculo del gradiente utilizado en algoritmos de aprendizaje supervisado. El método emplea un ciclo propagación y adaptación de dos fases. Una vez que se ha aplicado un patrón a la entrada de la red como estímulo, este se propaga desde la primera capa a través de las capas siguientes de la red, hasta generar una salida. La señal de salida se compara con la salida deseada y se calcula una señal de error para cada una de las salidas. Las salidas de error se propagan hacia atrás, partiendo de la capa de salida, hacia todas las neuronas de la capa oculta que contribuyen a la salida. Sin embargo, las neuronas de la capa oculta solo reciben una fracción de la señal total del error, basándose aproximadamente en la contribución relativa que haya aportado cada neurona a la salida original. Este proceso se repite, capa por capa, hasta que todas las neuronas de la red hayan recibido una señal de error que describa su contribución relativa al error total.
- Boltzmann: para redes estocásticas, es un generador estocástico de red neuronal artificial que puede aprender una distribución de probabilidad sobre su conjunto de entradas. Se le llama máquina de

Boltzmann y es uno de los primeros algoritmos en desarrollarse con la misma naturaleza de una red Hopfield.

- Hebb: cuando el disparo de una célula activa otra, el peso de la conexión entre ambas tiende a reforzarse (Ley de Hebb).
- Competitivo: sólo aprenden las neuronas que se acercan más a la salida deseada.

Los algoritmos, y en general el proceso de aprendizaje, son complejos y suelen llevar bastante tiempo computacionalmente. Su ventaja es que una vez ha aprendido, la red puede congelar sus pesos y funcionar en modo recuerdo o ejecución esto sirve se requiere implementar en sistemas de bajos recursos o portátiles, lo que lo hace ideal su aplicación en sistemas industriales.

Capítulo 3

Estado del arte

3. Estado del arte

Durante los últimos años se ha buscado la implementación de nuevas fuentes de energía, o la sustitución de procesos altamente contaminantes con procesos sustentables. En este rubro entra la energía solar, la cual se postula como una de las mejores formas de suministro de energía a las que puede acceder la humanidad actualmente.

En este trabajo se habla de la posibilidad de la creación de un reactor de termólisis utilizando como fuente de calor de apoyo un concentrador solar, esto para disminuir el impacto ambiental que podría generar la incineración de residuos orgánicos para la producción de energía. Sin embargo, en los últimos años varias investigaciones han abordado temas similares, siendo el campo de los concentradores solares el más explorado, pues la humanidad tuvo acceso a esta tecnología desde el siglo 17.

La energía solar térmica tiene lugar en la historia a partir del año 1767. En este año el científico suizo Horace Bénédict De Saussure (físico, geólogo y alpinista) inventó el heliothermómetro, un instrumento con el que se podría medir la radiación solar. El desarrollo posterior de su invento dio lugar a los instrumentos actuales para medir la radiación solar. Horace Bénédict De Saussure había inventado el colector solar, cuya forma podemos verla en la figura 3.1.[26]

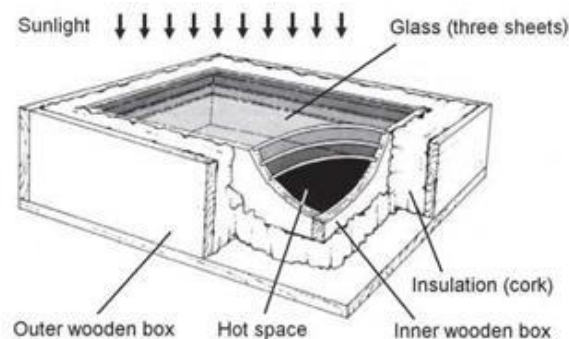


Fig. 3.1. "The hot box" el primer horno solar funcional. <http://energyprofessionalsymposium.com/?p=5693>

Desde el descubrimiento de la energía solar térmica por parte de Saussure, han existido muchos desarrollos intentando aprovechar dicha energía. La situación actual de los concentradores es la implementación en sistemas de calentamiento de líquidos ya sea para generar vapor o alimentar intercambiadores de calor, pocas son las aplicaciones donde se utilicen como fuente calor para procesos industriales como se pretende en esta investigación.

A continuación, se presenta una selección de los trabajos en la bibliografía consultada que tratan sobre la implementación de un sistema de control automático para un colector o concentrador solar además de su aplicación en procesos industriales, específicamente reactores químicos.

En el año 2016 Mejía Burgallo y Torres Chávez plantean el control de un colector solar mediante la implementación del sistema Girasol con el seguimiento del punto de máxima potencia, utilizando como sensores

de radiación paneles fotovoltaicos, en su artículo plantean un incremento del 35% en la eficiencia del colector solar. [27]

Así mismo Vázquez Calero y Mora Roble en el 2016 desarrollan su tesis “Diseño, construcción y control de una central didáctica termo solar de alta temperatura mediante el generador Stirling”, donde plantean un sistema de girasol de 2 grados de libertad para aumentar la eficiencia del motor Stirling y así poder generar energía eléctrica [28]. Durante el mismo año Batista y Urquiza realizan un análisis de la máxima eficiencia de un seguidor solar, aunque en este estudio no se propone un diseño de seguidor es interesante el análisis de la eficiencia de estos pues de eso depende su implementación, como ganancia máxima se encontró un 50.1% para los seguidores de 2 ejes móviles. [31]



Fig. 3.2. Colector solar diseñado para impulsar un motor Stirling.

Durante el año 2018 Recalde Arechúa, desarrolla un sistema de colector solar para el calentamiento de agua por medio de tubos de vacío incrementando la eficiencia en un 5%, el sistema además de contar con un control de seguimiento para poder reflejar la mayor cantidad de rayos solares a los tubos de vacío cuenta con un sistema de monitorización por una red punto a punto el cual permite llevar un registro de la potencia del sistema.[29]

De igual forma durante el año 2018 Hernández Velázquez desarrollo un sistema de seguidor solar para aplicaciones de solarimetria, utilizando un diseño mecánico tipo esfera con 3 grados de libertad, sensores opto resistivos y se utiliza una tarjeta Rapsberry Pi para el control del sistema, se muestra un incremento de eficiencia del 5%. [30] Durante el mismo año Rubio, Navas, Ollero y Lemos proponen un sistema de concentrador solar cilíndrico parabólico implementando un sistema de control de optimización de potencia, para mitigar los efectos de las nubes y distintas variaciones de la radiación solar. En este trabajo se modela el paso de las nubes en el campo solar pudiendo determinar la temperatura de cada zona del campo y regular el caudal de aceite, el cual se utiliza para el intercambiador de calor, de esta forma el aceite siempre se mantiene a una temperatura adecuada para el proceso. En este caso se espera que el aceite se mantenga a 400°C y se genere una potencia de 1200W sin importar las condiciones nubosas.[32]

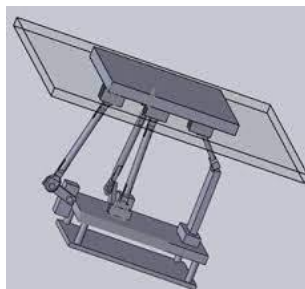


Fig. 3.2. plataforma de seguidor solar con 3 grados de libertad. Trabajo de Hernández Velázquez. [30]

Si bien la revisión anterior solo se centra en los trabajos que presentan un sistema de control para colectores o concentradores solares, en el contexto de la presente investigación se busca la unión de la energía solar con los reactores químicos, los siguientes párrafos presentan una revisión de los trabajos donde se realiza esta relación.

Los procesos de termólisis no son surgen en la época actual, pues se llevan a cabo desde épocas antiguas y varias culturas han documentado procesos similares a la termólisis para obtener carbón por la quema de biomasa, sin embargo, los reactores de termólisis no han tenido aplicaciones variadas hasta hace dos décadas donde se comenzó a utilizarlos para distintos procesos industriales y de eliminación de residuos.

En el año 2009 Santamaria, Amezcua y Carrillo realizan un estudio para el Instituto Mexicano del petróleo donde se establece la viabilidad de obtener petróleo simulando las condiciones naturales dentro de un reactor de pirolisis mediante la descomposición de materia orgánica. Este trabajo establece precedentes en México para el uso de reactores químicos en el proceso de obtención de energía o combustibles.[34]

Durante el año 2012 Klug establece la viabilidad para derretir biomasa mediante un reactor de pirolisis una variación de la termólisis, para obtener combustibles de segunda generación como coque, gas y aceite. En este trabajo se presenta la construcción de una planta de pirolisis flash montada en la Pontificia Universidad Católica de Perú, la cual será alimentada por los desechos orgánicos de la propia universidad. El reactor propuesto puede trabajar en un rango de 400°C a 600°C, con una alimentación superior a 300W/h para un correcto funcionamiento. Con estos parámetros se consiguió aceite con un 50% de agua que representa el 80% de los resultados del reactor siendo el otro 20% coque.[33]

En el 2013 Martínez Salas en su tesis de maestría propone un diseño de un reactor para la producción de biodiesel utilizando como fuente de calentamiento un concentrador solar de baja temperatura. El concentrador solar es de tipo cilíndrico, concentrando los rayos solares en sales minerales para el intercambiador de calor, este concentrador puede alcanzar temperaturas de entre 400°C a 500°C.[37]

Así mismo en el año 2014 Morales, Miranda, Bustos y Cazares realizan un estudio sobre la descomposición de la piel de naranja mediante pirolisis, lo destacable de esta investigación es que la pirolisis utiliza como fuente de calor un colector solar parabólico logrando el 79% de la descomposición de los residuos orgánicos a una temperatura de 465°C con una radiación promedio de 12.55 KW/m². Este es el primer estudio que se encuentra en esta investigación que describe un sistema de pirolisis mediante colectores solares.[36]

En Colombia durante el año 2015 Aragonez propone realizar la descomposición de biosólidos obtenidos por el tratamiento de aguas residuales mediante la pirolisis. El trabajo se centra en analizar los residuos de la pirolisis para ver su potencial como materia prima para procesos secundarios. Los sedimentos en las aguas residuales están compuestos en su mayoría por elementos orgánicos lo que permitirá que el reactor con una baja temperatura(400°C), obtenga gases y aceites.[35]

De igual manera el año 2017 Zeng, Gauthier, Soria, Mazza y Gilles realizan una revisión del proceso de pirolisis para materia prima carbonosa mediante una fuente de calor de origen solar. En este trabajo se establece las ventajas de realizar un proceso de pirolisis mediante energía solar, poniendo como principal ventaja la baja generación de CO₂, algo disruptivo en este trabajo es que establecen que la energía solar es intermitente y por tanto proponen almacenar dicha energía en combustibles solares como aceites o sales, dejando en claro la viabilidad del proceso para la producción de combustibles. El tipo de generador usado es parabólico cilíndrico que concentra los rayos solares en tubos de cuarzo los cuales almacenan las sales o aceites, este proceso se propone para cualquier deshecho orgánico con la intención de obtener carbón para abono, aceites que se pueden refinar en diésel y gas metano.[40]

Durante el año 2018 Roni, Mosiman, Sun, Qin, Zheng y Boman, establecen en su investigación la capacidad de los reactores de pirolisis solar para la obtención de combustibles líquidos. En esta investigación se propone un sistema de concentración de energía solar mediante lentes, tipo proyector de cinema, logrando una concentración de 700 soles por cada área circular de 10mm de diámetro, con lo anterior se reporte a una

temperatura de 750°C suficiente para la obtención de combustible líquido obtenido de residuos sólidos orgánicos.[39]

En la bibliografía consultada se puede notar que existen varias investigaciones que proponen el uso de energía solar como fuente de calor para reactores químicos de termólisis y pirolisis, así mismo existen varios trabajos buscando la optimización de los concentradores y colectores solares; Sin embargo, podemos observar que la mayoría de ellos se desarrollan antes o durante del año 2018 esto se debe a que durante el último año se ha notado un sesgo de las investigaciones hacia la optimización de materiales o la implementación de nuevos materiales como capacitores, baterías y semiconductores de origen orgánico, por tal razón no se pudo encontrar trabajos actuales en la misma línea de la presente investigación.

Podemos notar que en los casos presentes en las investigaciones revisadas se toca el tema de control para el aumento de la eficiencia del colector solar así mismo se exponen parámetros de interés como la intermitencia de la luz solar y por ende la baja de eficiencia. Sin embargo, solo se abordan sistemas de control simple y aunque robustos, no presentan un sistema de aprendizaje o adaptabilidad que permitan mantener la eficiencia del sistema ante condiciones no deseadas.

De igual manera los sistemas de control se centran en el posicionamiento del colector solar y no en aumentar la eficiencia del reactor mediante un control que mejore los parámetros para obtener el mejor resultado posible a la salida de los reactores. Si bien se entiende que la implementación de los reactores conlleva a la aplicación de un sistema de control de proceso, este sistema es el mínimo para el control y no presenta adaptabilidad ante cambios bruscos en los parámetros ni permite el acople del sistema de calentamiento por medio de energía solar.

Tomando en cuenta todo lo anterior en este trabajo se propone abordar el problema de optimización de sistema de concentración de energía solar mediante la implementación de un sistema de control por redes neuronales acoplado a un sistema cuyo diseño mecánico beneficie y se adapte al propio control. Así mismo se pretende desarrollar un sistema mediante redes neuronales para el control del reactor de pirolisis, esto para lograr la máxima eficiencia posible y que trabaje en conjunto con el colector solar para que se cree un sistema orgánico en cuanto a funcionamiento.

Capítulo 4

Desarrollo

El desarrollo del presente trabajo es un estudio de varias partes las cuales aportarán variables que repercutirán tanto en el diseño mecánico de los elementos como el desarrollo del sistema de control.

Para la obtención de las variables que determinaran el diseño mecánico y el desarrollo del software de control se analizó los diferentes fenómenos involucrados determinando que la parte fundamental es el estudio de la geometría solar de la cual dependerá el diseño del sistema mecánico, sistema de sensores y desarrollo de la red neuronal para el control. Así mismo se decidió analizar diferentes procesos de combustión para determinar las variables presentes en la quema de materia orgánica y presentar un sistema de control de reactor tentativo.

Todo lo descrito en el párrafo anterior se desglosará de manera específica en los siguientes apartados de este capítulo. Sin embargo, es importante saber el desarrollo que se ha tenido en este tipo de sistemas por tanto se realizara una revisión de trabajos anteriores relacionados con el actual desarrollo.

4.1. Geometría solar y estructura

Un colector solar deberá enfocar la radiación solar en un área determinada, para esto es necesario conocer el movimiento solar y como es que la radiación interactúa con la superficie terrestre.

El sol se mueve relativo a la tierra en función de los ejes y planos terrestres; la tierra gira alrededor de su propio eje, conocido como el eje Polar P' . Los puntos donde este eje intercepta la tierra son el (Np) Polo Norte y el sur (Sp). El gran círculo $EIWI'$ normal a dicho eje se llama Ecuador y el plano que contiene al Ecuador es el plano ecuatorial que divide la tierra en hemisferios norte y sur. El gran círculo $ESWN$ normal al eje ZZ' se llama horizonte, todo lo anterior descrito se puede apreciar en la figura 4.1.

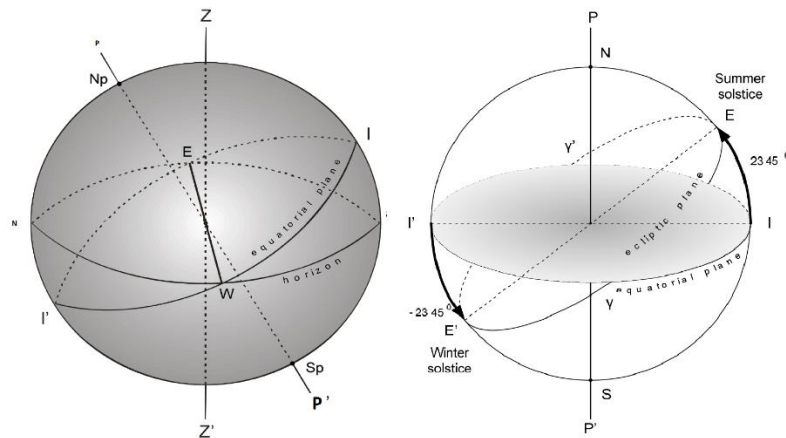


Fig. 4.1. Ejes y planos terrestres [28]

La posición del sol en el cielo varía durante el día y la temporada debido a la rotación de la tierra alrededor de su eje una vez al día. Del mismo modo, cambia su órbita elíptica alrededor del sol una vez al año, con el sol en uno

de los focos de la elipse como se muestra en la figura 4.1. El plano que contiene a la órbita elíptica de la tierra se llama el plano eclíptico las estaciones son debido a que el eje de la tierra, que es perpendicular al plano ecuatorial, está inclinado con respecto al plano de la eclíptica.[28]

Lo anterior describe los ejes y planos de los cuales se pueden medir ángulos que representaran la inclinación de la tierra y por ende la orientación de la radiación solar. La radiación solar varía en cada territorio a lo largo del año debido a que el eje de rotación de la tierra tiene una inclinación de 23.45° , esto también permite el trazo de meridianos y paralelos que dan origen a la latitud (ϕ) y longitud(L) siendo estos los parámetros más utilizados para proporcionar las coordenadas terrestres, como se muestra en la figura 4.2.

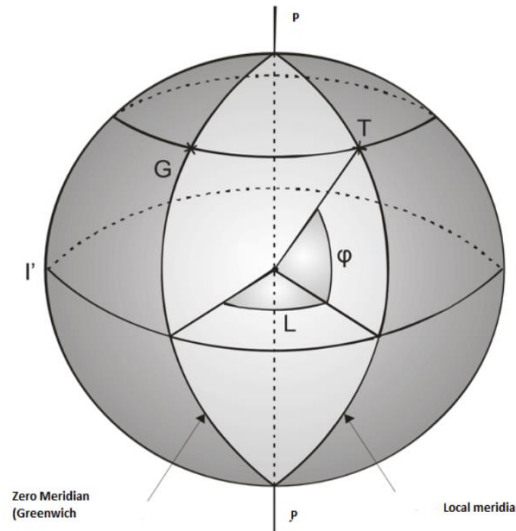


Figura 4.2. Latitud y longitud con respecto al meridiano cero y el plano ecuatorial.[28]

Todo lo descrito anteriormente se utiliza en este proyecto para encontrar los ángulos solares los cuales se relacionarán con los grados de libertad del colector solar el cual integrará un sistema de seguimiento, así mismo se utilizará para el diseño del sensor de posición solar que se describe en el apartado siguiente.

4.1.1. Ángulos solares

Para encontrar los ángulos solares y relacionarlos con los grados de libertad del seguir solar a construir, se debe trazar un sistema que se conoce como esfera celeste, esta esfera imaginaria tendrá como centro la ubicación del observador, o en este caso del colector solar, y un radio indefinido pero lo suficientemente grande para cubrir la zona específica a estudiar, también, si se mide a partir de la tierra la esfera celeste tendrá como centro la intersección del eje rotación norte-sur con el plano ecuatorial. El plano horizontal u horizonte será definido por la ubicación del observador y la línea normal de la intersección de este plano con la esfera celeste se le conoce como zenit (Z).

Para determinar la posición a partir de la esfera celeste solo se necesitan dos ángulos; el ángulo de altitud solar (L) y el ángulo acimutal(ϕ). El ángulo de altitud solar es el ángulo cuya proyección es la distancia entre el centro del sol y el centro del observador de forma perpendicular al plano horizontal, mientras que el ángulo acimutal es la distancia angular entre el sur y la proyección horizontal de los rayos del sol. Un ángulo acimut positivo indica la posición este-sur y uno negativo indica una posición oeste-sur.

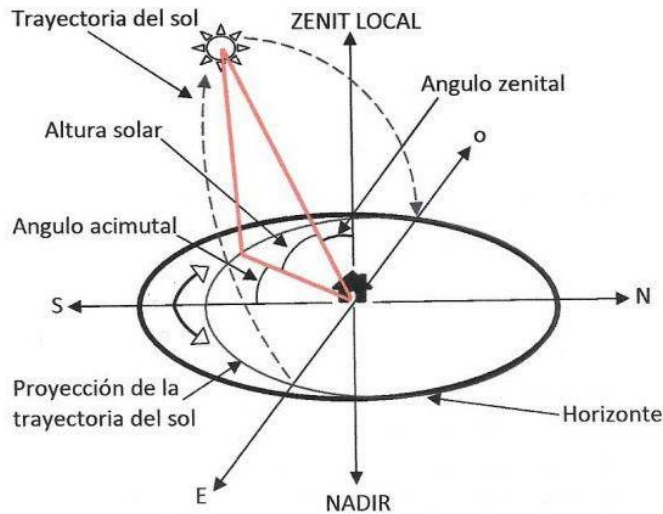


Fig. 4.3. Ángulo de altura solar y ángulo acimutal. <https://www.aulafacil.com/cursos/medio-ambiente/energia-solar-termica-1/angulo-cenital-y-la-elevacion-solar-l37810>

Definidos los ángulos de la geometría solar podemos determinar un mínimo de 2 grados de libertad para el sistema siendo estos grados otorgados por juntas de rotación para poder variar su posición de acuerdo con los ángulos de altura y acimut, sin embargo, por la aplicación para un colector solar es necesario la inclusión de un tercer ángulo que dará el ajuste individual a los espejos para que mantenga enfocados los rayos solares. Por tanto, se escoge un sistema de 3 grados de libertad.

En la figura 4.4 se muestra el esqueleto cinemático propuesto para la solución del problema, en donde se contempla dos grados de libertad para la estructura base y un grado libertad para cada posible espejo, recordemos que un planteamiento previo se busca que el sistema sea modular pues podría adecuarse a diferentes requerimientos de potencia

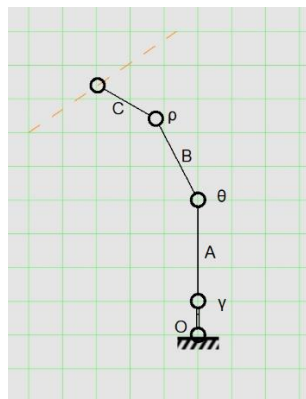


Fig. 4.4. Esquema cinemático del seguidor solar acoplado al colector.

Se desarrollo el diagrama (figura 4.5) para obtener la cinemática directa e inversa del sistema basando en el cálculo mediante la matriz de Denavit-Hartenberg [29]. Esta matriz permite agrupar las variables de ángulos de rotación y desplazamientos de los eslabones y es ampliamente usada en robótica para el cálculo de cinemáticas. Para este caso no se cuentan con juntas de deslizamiento por ende las distancias de los eslabones serán fijas y solo se tendrán como variables los ángulos de las juntas de rotación

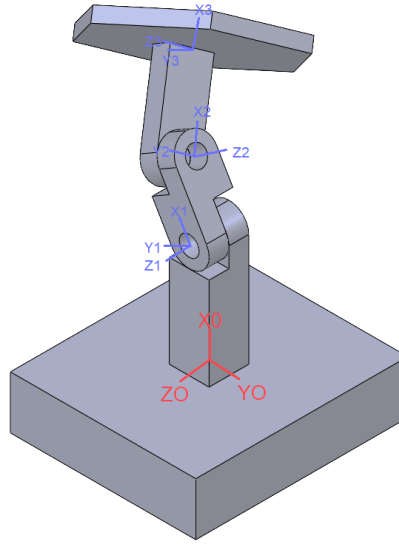


Fig. 4.5. Ejes de movimiento entre eslabones y juntas.

L	θ	d	a	α
1	γ	0	A	90
2	θ	0	B	-90
3	ρ	0	C	0

Tabla 4.1. Parámetros D-H para el seguidor solar.

Como se puede en la matriz de parámetros D-H de la tabla 4.1 se dejaron las distancias en el eje X (a) como constantes pues dependerá de la elección de motores y estructura de soporte para colocar una distancia final, sin embargo, en el cálculo se podrá dejar indicado y no afectará a la ecuación, recordando que las medidas son tomadas de eje de rotación a eje de rotación entre las articulaciones. Tomando los parámetros D-H se utiliza la matriz D-H (figura 4.6) para obtener las diferentes transformaciones del sistema y así obtener las ecuaciones para la ubicación de las coordenadas finales. Se toma como efector final el punto de la base del espejo que correspondería al origen de la parábola

$$: \begin{pmatrix} c\theta_k & -s\theta_k c\alpha_k & s\theta_k s\alpha_k & a_k c\theta_k \\ s\theta_k & c\theta_k c\alpha_k & -c\theta_k s\alpha_k & a_k s\theta_k \\ 0 & s\alpha_k & c\alpha_k & d_k \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Fig. 4.6. Matriz D-H generalizada

Se toma como efector final el punto de la base del espejo que correspondería al origen de la parábola, en los siguientes apartados se describirá el proceso de diseño del espejo parabólico, resolviendo la matriz se obtiene

las siguientes ecuaciones correspondientes a las coordenadas X, Y Z trazadas como ejes imaginarios en la esfera celeste antes descrita y tomando como origen el sistema de referencia "O" mostrado en la figura 4.5.

$$X = \cos\gamma[A + \cos\phi(B + C\cos\gamma)] - C\sin\gamma\sin\phi \quad (1)$$

$$Y = \sin\gamma(A + B\cos\phi) + C\cos\gamma\sin\phi + \cos\phi\sin\phi \quad (2)$$

$$Z = \sin\gamma(B + C\cos\phi) \quad (3)$$

4.2. Sensor solar

Dado que el sistema de control del colector solar será realizado mediante una red neuronal, es necesario tener patrones de entrada para realizar el entrenamiento de la red neuronal y así obtener un sistema de control más robusto. Por tal motivo se decidió crear un sensor de posición solar que independientemente de donde sea colocado pudiera suministrar datos para los patrones de entrada de la red.

El sensor propuesto se diseñó mediante el estudio de la geometría solar, tomando los ángulos de altura solar y acimutal, pero considerando que no deberá moverse pues de esa forma se aumentará la precisión de los patrones de entrada. En la figura 4.7 podemos ver el diseño de la estructura del sensor propuesto.

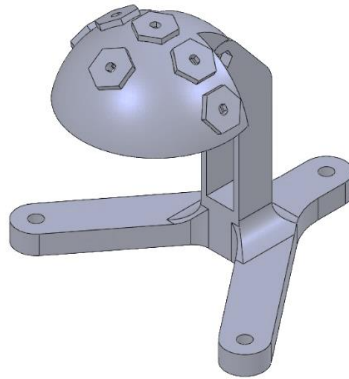


Fig. 4.7. Sensor de posición solar

El sensor permite ser ajustado en cuanto al ángulo de altitud solar, con un rango de 90° siendo esto suficiente de acuerdo con los datos de geometría solar. Este ajuste es necesario debido a que el centro debe ser alineado de acuerdo con la latitud en la que se desee recopilar datos pues el ángulo derivado de la latitud cambiara de posición geográfica a posición geográfica, en este caso se ajusta a 19° siendo la latitud del centro del estado de Puebla México, que es donde se realizaran las primeras pruebas, todo lo anterior se puede ver en la figura 4.8. La estructura del sensor en cuanto al ángulo acimutal no requiere ajuste pues tendrá 5 celdas fotosensibles para seguir la trayectoria ordenadas con una separación de 30° cubriendo un rango de 150°, a pesar de que el ángulo acimutal tiene un rango de 180°, no se decidió hacer de esta forma debido que en cualquier posición geográfica (donde el sistema sería implementado) nunca se alcanzara los 180° de visibilidad pues existen declives, relieves, estructuras hechas por el hombre y demás cosas que evitan la total vista del horizonte.

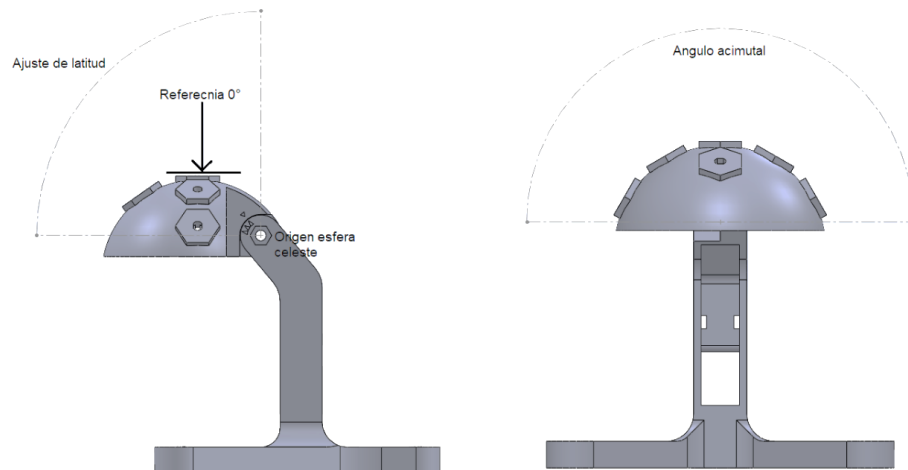


Fig. 4.8. Orientación del sensor de posición solar

En total el sensor cuenta con 6 celdas fotosensibles correspondientes a fotoresistencias, se eligió de esta manera debido a que una fotoresistencia permite más flexibilidad en el diseño del circuito, así como la programación del sistema de adquisición de datos, y su costo es reducido.

En la figura 4.9 podemos ver el diagrama eléctrico del sensor de posición solar, donde se aprecia que existen 6 entradas analógicas al datalogger las cuales serán procesadas antes de formar la matriz de patrones de entrada para el entrenamiento de la red neuronal.

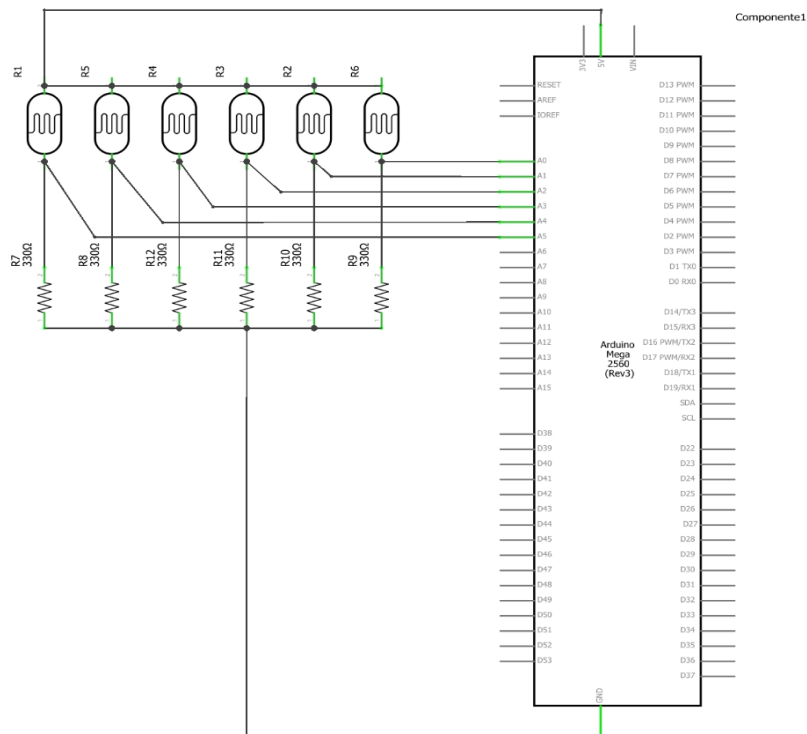


Fig. 4.9. esquema eléctrico del sistema de adquisición de datos.

Dado que el sensor tiene fotoresistencias que serán acondicionadas para una lectura analógica inicialmente, varios errores de orientación no serán relevantes debido a que el arreglo de 6 fotoresistencias podrá fácilmente dar una lectura adecuada para la orientación del espejo debido a que la red neuronal para el control podrá ser entrenada sin que le afecten posibles errores de orientación.

El sistema para el sensado completo funciona mediante la adquisición de datos provenientes de las fotoresistencia, cabe aclarar que este tipo de sensor mide la luz y no la radiación sin embargo a mayor radiación solar existirá una mayor iluminación por tal motivo es adecuado el uso de estos transductores. Los transductores cambian su propiedad de resistencia eléctrica dependiendo la intensidad de luz, es necesario que la señal sea voltaje por tanto se realizó un puente linealizador que funciona para medir una señal de voltaje y estabilizar mejor la medición, esta señal tomara valores entre 0V y 5V, esto se decidió así para el tratamiento en la tarjeta de adquisición.

Una vez adquirida la señal esta se envía a convertidor analógico-digital el cual puede muestrear la señal en 1024 partes dando una resolución de 0.0049V suficiente para la aplicación que se busca. En el sistema se notó que por cada grado el convertidor analógico digital varia 4 datos esto quiere decir que se puede muestrear la posición con una resolución 0.25°.

Después de la adquisición y conversión de la señal proveniente del transductor, la señal se mapea para normalizar los datos y que ningún valor obtenido sobrepase el valor de 1, esto es necesario porque se ha demostrado que la matriz de patrones para entrenar una red neuronal funciona mejor con valores comprendidos entre 0 y 1.

Por ultimo los datos obtenidos del sensor se agrupan en una matriz que después será completada con los datos provenientes de la posición de los espejos los cuales serán obtenidos mediante encoders de posición, siendo estos datos los resultados a los que se espera llegue la red de forma automática. Todos los datos son pasados a MATLAB en donde se realizará el agrupamiento para formar la matriz y normalización de los datos.

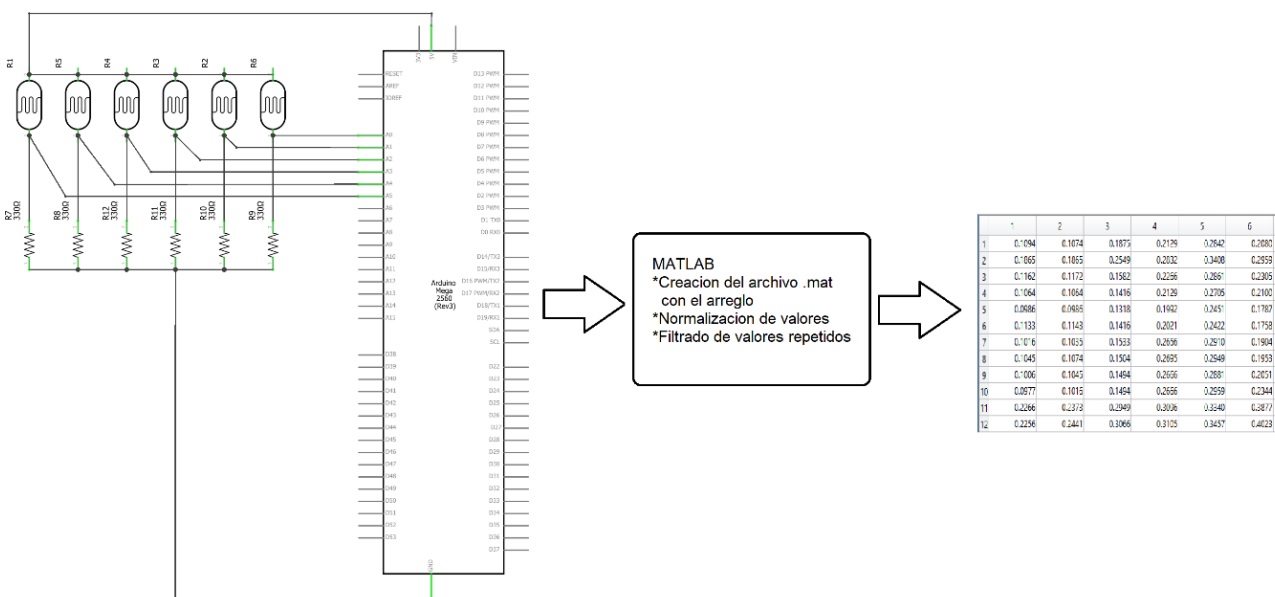


Fig. 4.10. Esquema de conexión con Matlab.

Para las pruebas se muestro la posición solar durante un total de 40 días distribuidos en 3 meses para poder obtener una cantidad de datos variada. En total se obtuvo una matriz de 33X6, originalmente esta matriz tendría más datos, pero se filtró para eliminar datos repetidos más de dos veces y así aligerar la carga de procesamiento que conlleva el entrenamiento de la red.

La estructura del sensor demostró generar una matriz de patrones adecuada sin embargo también presento una ventaja no planeada del todo pues dada su configuración de fotoresistencias es posible tomar en cuenta no solo la radiación directa si no también la radiación difusa y el albedo.

4.3. Espejos reflectantes

Los espejos son una parte importante en el desarrollo del colector solar pues de estos depende la cantidad de radiación que se puede dirigir. Si bien todos los apartados anteriores describen sistemas que podrían implementarse a escala mayor sin mayores cambios más que el ajuste de motores y cambio de materiales estructurales, los espejos son una parte donde el escalamiento o utilización de materiales diferentes repercute directamente en la eficiencia. Lo anterior es una limitación muy grande en el desarrollo de la presente tesis pues no se contó con los recursos suficientes para la fabricación de espejos idóneos, pero si se llevó a cabo el diseño completo de los mismos.

El diseño de la forma del espejo reflectante se basó en dos premisas; se debía buscar un diseño que pudiera tener un área máxima de reflexión y a la vez permite manipular dicha área para un control adecuado, la segunda premisa tiene que ver con la capacidad del espejo para concentrar la radiación solar que reciba en su superficie en un punto específico. Como consecuencia de lo anterior se buscó un diseño hexagonal parabólico el cual se explicará a continuación.

En cuanto a la forma del espejo se buscó una forma que maximizara el área efectiva de reflexión así mismo que permitiera el diseño modular planteado anteriormente, en la figura 4.11 podemos ver una comparación entre espejos tradicionales circulares y espejos en forma hexagonal, se puede notar el área desperdiciada entre los espejos circulares la cual no se desperdicia en los espejos hexagonales, además el hexágono representa una forma más fácil de agrupar en paneles circulares o cuadrados por lo que presenta una ventaja para diseños modulares. Por tanto, los espejos a utilizados serán en forma de hexágono.

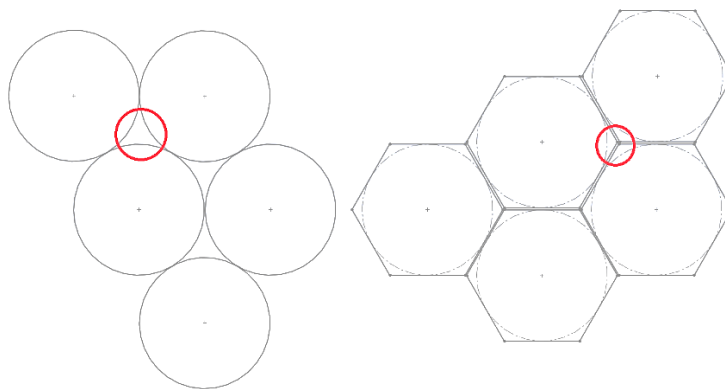


Fig. 4.11. Configuración circular comparada con una configuración hexagonal.

Una vez definida la forma es necesario el cálculo del área efectiva de reflexión y para ello se utilizarán cálculos sobre la potencia necesaria para el calentamiento de la materia orgánica, hay que recordar que este sistema se

pretende como un auxiliar del calentamiento y no como un sustituto de los sistemas actuales de calentamiento para reactores.

Para el planteamiento del cálculo del área de reflexión se tomó el calentamiento de 100Kg de materia orgánica a 800°C. Lo primero es calcular la potencia necesaria para llevar a cabo el calentamiento de la materia en un tiempo aceptable para la pirólisis.

Para el cálculo de energía requerida se necesita el calor específico de la materia orgánica y esta al estar compuesta por varios sólidos, aceites, lixiviados y demás residuos no se puede hacer un cálculo exacto sin embargo se determinó utilizar un valor relacionado a materiales orgánicos como aceites o carbón, ubicando este dato entre 850Kcal/Kg°C a 1300Kcal/Kg°C, se decidió usar un valor intermedio de 1075Kcal/Kg°C.

$$Q_r = m * C_e * \Delta t \quad (4)$$

Utilizando la ecuación 4 con una masa de 100Kg cuyo calor específico sería 1075Kcal/Kg°C y una diferencia térmica de 773°C, cabe mencionar que el dato de temperatura se obtiene de la gasificación en pirólisis flash, se obtiene un valor de 83.1×10^6 J si se busca este calentamiento en un rango de 3600s entonces se requieren 23082W para realizar el trabajo.

El colector solar proporciona una potencia calculada en base a la radiación solar que incide en la superficie terrestre y el coeficiente de emisividad (ϵ) del que serán fabricados los espejos, todo esto relacionado al ángulo de incidencia de la radiación solar. Podemos observar lo antes descrito en la ecuación 5 del cálculo de la potencia generada por un colector solar parabólico, donde S es el área efectiva de la superficie reflectiva, K es la potencia recibida en la superficie terrestre debido a la radiación solar, la cual equivale a 1350W/m² (según datos suministrados por la NASA) y θ es el ángulo de incidencia. En la ecuación 6 podemos ver una ecuación similar a la ecuación 5, pero esta vez haciendo uso de la emisividad, esta ecuación será utilizada para comparar resultados pues la ecuación 5 arroja el dato en base al área sin tomar en cuenta el material el cual generará pérdidas las cuales se puede saber con la ecuación 6.

$$Q_s = S * K * \cos \theta \quad (5)$$

$$Q_e = K * \epsilon * S \quad (6)$$

La constante K obtenido de los estudios de la NASA sobre la superficie terrestre es de 1350W/m² sin embargo este dato está medido en un máximo solar y concentrando la radiación, por ende, toma muy poco en cuenta de los efectos de radiación difusa y el albedo, además de condiciones geográficas, por esto cuando se habla de energía solar se dice que un SOL equivale a 1000w/m² este es un valor más real. Sin embargo, se decidió realizar una medición, ya que se contó con un piranómetro el cual es un dispositivo para medir la radiación solar. La radiación solar medida en el techo del edificio de Rectoría de la UPAEP ubicado en el centro del estado de Puebla México, en los meses de máxima radiación solar dio como resultado un valor promedio de 850W/m² siendo este valor el tomado para el siguiente cálculo. Como comentario adicional la UPAEP cuenta con una planta solar fotovoltaica que monitorea datos como la radiación solar, según estos datos la radiación sobre la superficie de Puebla oscila en un rango de 700W/m² a 990W/m², esto avala el valor promedio tomado de 850 W/m².

Se utiliza la ecuación 5 para calcular el área efectiva necesaria para obtener la potencia deseada, esto se logra igualando los valores de la potencia requerida (Q_r) con la potencia obtenida del colector (Q_s), el ángulo de

incidencia se llevó a 0° siendo que el sistema cuenta con un seguidor solar siempre debería proporcionar este ángulo, y la constante K se iguala a los 850 W/m^2 . Todo lo anterior da como resultado que se requiere un área efectiva de 27.15 m^2 . Con el resultado anterior y la ecuación 6 tomando una emisividad para espejos fabricados en vidrio de 0.94 se calcula que la potencia suministrada por un colector de 27.15 m^2 sería 21692 W esta es la potencia neta del colector.

En base a los datos anteriores se propone un espejo individual hexagonal parabólico de 0.25 m de apotema y 0.29 m de lado, se decidió usar estas medidas puesto que se ha demostrado que es posible la fabricación de un espejo de estas dimensiones con curvatura sin necesidad de recurrir a técnicas de facetado que disminuirían la eficiencia. La forma del espejo se puede apreciar en la figura 4.12.

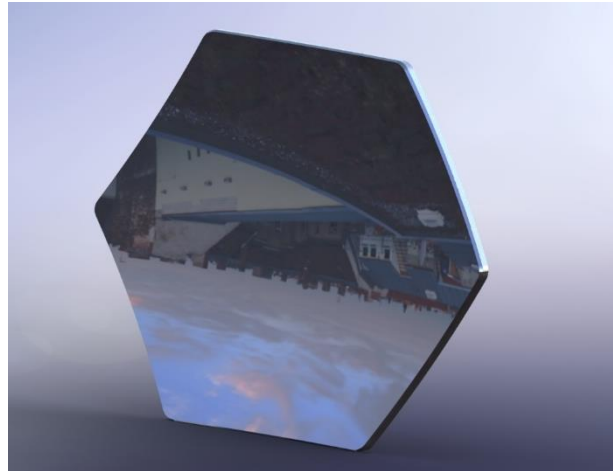


Fig. 4.12. Espejos propuestos para el colector solar

Una vez definida la forma y dimensiones del espejo es necesario determinar la curvatura que llevara, en este caso se decidió una parábola, pues se pretende aprovechar las características de la parábola en cuanto a su punto focal. En una superficie parabólica toda radiación o partícula que rebote sobre la misma se dirigirá a su punto focal como se puede ver en la figura 4.13, esta propiedad es aprovechada por los sistemas de comunicación y colectores solares pues permite la concentración de las ondas de radio o radiación solar en un solo punto sin importar donde las ondas reboten siempre y cuando sea en la superficie parabólica.

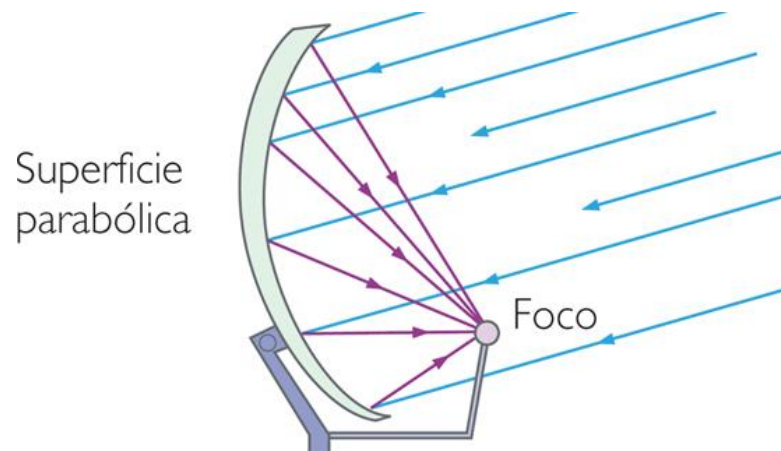


Fig. 4.13. Antena parabólica donde las señales convergen en su punto focal. <http://ayudafta.blogspot.com/2012/02/hello-world.html>

Para el cálculo de esta superficie solo se requiere saber la distancia focal deseada, en este caso se fijó a 80cm puesto que es una distancia manejable para las pruebas, cabe destacar que para su aplicación en un sistema industrial es necesario el recalcu de esta distancia de acuerdo con el área de aplicación. Esta distancia no está limitada de alguna forma física más que por las posibles interfaces que atraviere la radiación antes de llegar al punto caliente, siendo estas interfaces el propio aire o impurezas en el ambiente.

$$y(x) = Ax^2 + Bx + C \quad (7)$$

$$y(x) = \frac{x^2}{4P} \quad (8)$$

Una curva parabólica sigue la ecuación 7 que está en una forma general, dado que nos interesa conocer la ecuación sin desplazamiento en el eje Y el eje X, la ecuación se puede reducir como se muestra en la ecuación 8 donde P es la distancia focal deseada, en este caso 80cm.

Sustituyendo la distancia focal de 80cm en la ecuación 8 se obtiene la ecuación 9, que se muestra a continuación:

$$y(x) = 0.003125x^2 \quad (9)$$

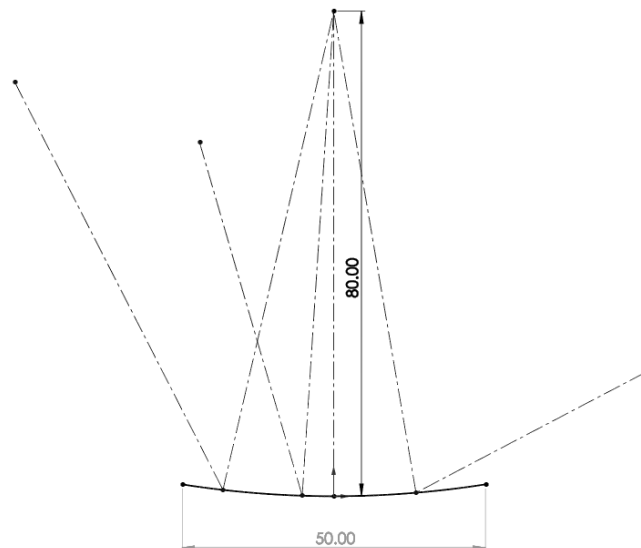


Fig. 4.14. Esquema obtenido a partir de la ecuación 9 donde se muestra la curva del espejo, las medidas están dadas en cm.

Como podemos observar en la figura 4.14 utilizando la ecuación 9 obtenemos una curva parabólica tenue la cual llevarán los espejos para garantizar que toda la radiación solar converja en el punto focal ubicado a 80cm del origen de la parábola. Con las dimensiones anteriores en cuanto a área total efectiva de reflexión, forma hexagonal y la curvatura dada de acuerdo con el punto focal se logra construir la forma final del espejo que es la que se muestra en la imagen 4.15.

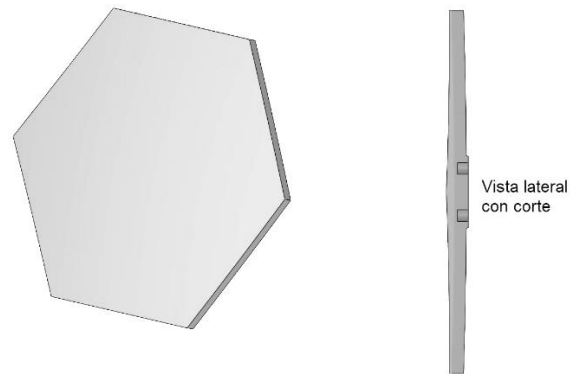


Fig. 4.15. Forma final del espejo parabólico

4.4. Sistema para pruebas

Una vez que se realizaron los cálculos pertinentes sobre el diseño del espejo, así como los grados de libertad y respectivas articulaciones que compondrán al seguidor solar, se decidió la construcción del prototipo para efectuar las primeras pruebas. Debido a limitaciones físicas y económicas se decidió escalar el sistema a un tamaño acto para la manufactura con la que se contó. El sistema se escaló 5 veces siendo que cada espejo tendrá un apotema de 5cm y una superficie efectiva de reflexión de 87cm^2 , no se modificó la parábola del espejo dado que los 80cm seguían siendo manejables.

En este sistema se busca mantener un punto caliente y no una superficie extensa pues esto disminuiría la temperatura aprovechable del colector. Lo anterior trajo un problema debido a que todos los espejos deberán converger en el mismo punto focal, dado que se eligió una configuración de 7 espejos como la mostrada en la figura 4.16. Para solucionar el problema se planteó inicialmente agregar una articulación más que pudiera orientar los espejos, sin embargo, esta articulación agregaría un grado más de libertad, un motor más y un dato de entrada más para la red neuronal.

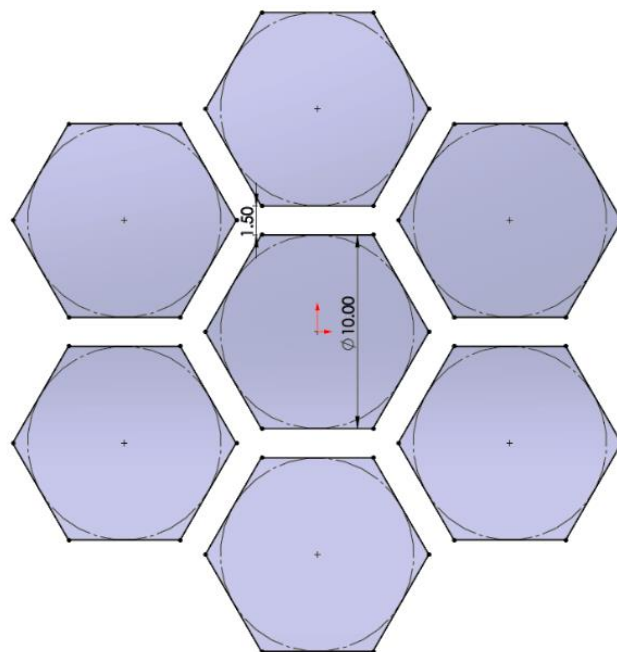


Fig. 4.16. Configuración para posición de los espejos en el colector solar. Cotas en cm.

El problema antes expuesto se solucionó dando una inclinación a los espejos inferiores y superiores, para conseguir que los puntos focales de todos los espejos converjan en uno solo, esta inclinación tiene un ángulo de 7.86° calculado a partir del triángulo rectángulo que se forma entre las distancias focales de los espejos y el eje central perpendicular a los espejos como se muestra en la figura 4.17.

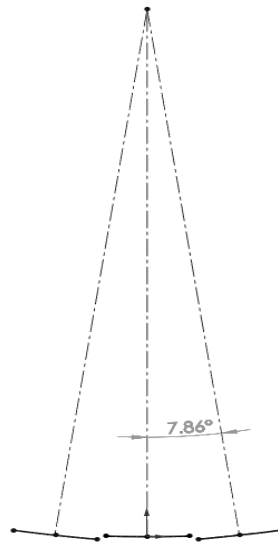


Fig. 4.17. Ubicación de los espejos superiores e inferiores del colector con un desfase de 7.86° .

Al realizar este desfase de 7.86° la distancia focal se incrementa a 80.66cm por tanto se ajusta la ecuación para los espejos que lleven esta inclinación, pero esto no represente mayor problema.

Conjunto lo anterior en un solo diseño se obtendría la plataforma de pruebas como se muestra en la figura 4.18, donde a propósito no se montan los 7 espejos para permitir la visualización del sistema, de esta forma se puede ver la estructura que sigue la forma hexagonal del espejo esto no solo por estética si no permite la adición de nuevos paneles para un diseño modular.

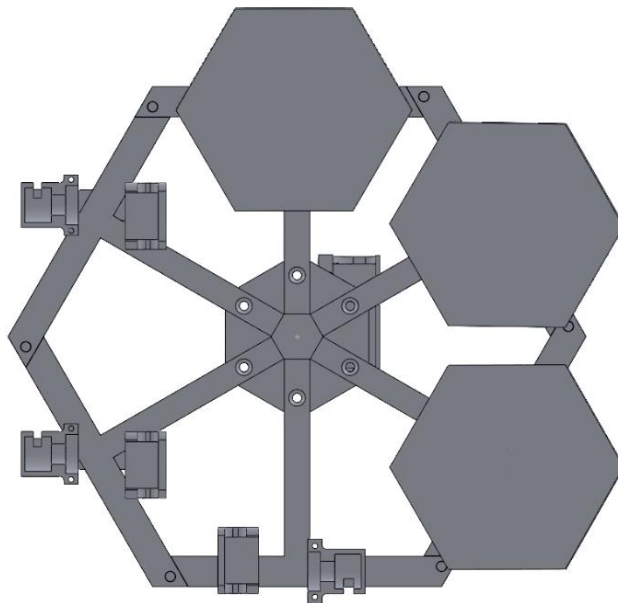


Fig. 4.18. Vista frontal del panel de montaje de los espejos.

Cada espejo está conectado a una articulación manipulada por un servomotor que a su vez está conectado a una encoder analógico absoluto el cual permitirá verificar la posición del espejo en todo momento. En la figura 4.19 podemos ver como los puntos focales de los espejos convergen en un solo, mostrado en color azul en la figura.

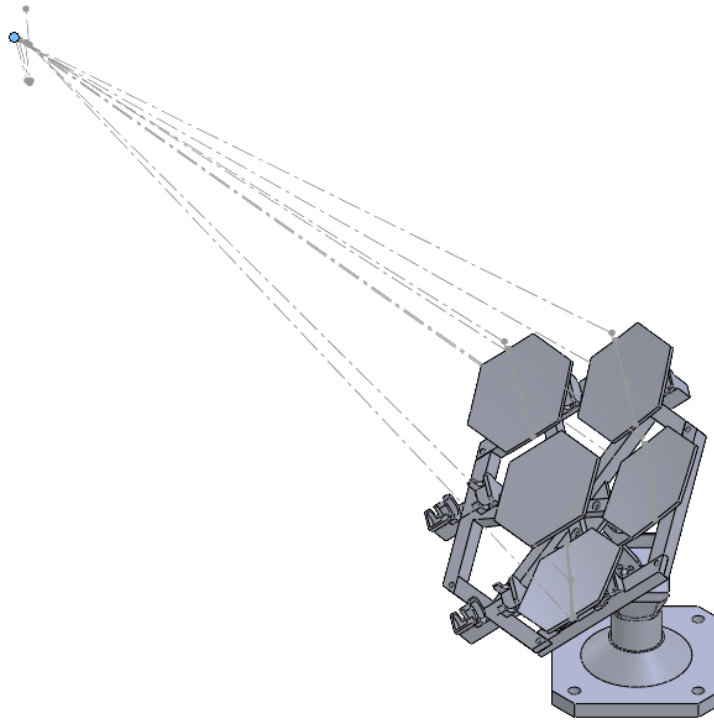


Fig. 4.20. Colector solar completo demostrando la convergencia de los puntos focales.

El sistema se manufacturo mediante impresión 3d con el método FDM utilizando diversos materiales. En el caso de la estructura se realizó en T-ABS a una resolución de 0.2mm por capa y una solidez del 65%, se escogió este material por su punto de fusión elevado para evitar problemas con los calentamientos debido a la radiación solar y los tiempos de exposición del sistema. En el caso de los espejos se escogió el material de PLA a una resolución de 0.1mm por capa y una solidez del 85%, este material con estos parámetros se eligió debido a la forma del espejo ya que para conseguir la curvatura calculada antes fue necesario un material con la correcta fluidez, así como una resolución alta. En la figura 4.20 podemos apreciar el resultado final. Para el caso de los espejos se tuvo que utilizar un material reflectante que no es precisamente un espejo óptico, esto debido al costo de producción de los mismos, se utilizó una tela de aluminio pulido con un coeficiente de emisividad de 0.88 lo cual es menor al de 0.94 de un espejo óptico de vidrio así que se espera un decremento del 8% en la eficiencia del sistema, cabe destacar que este material es el mismo que se utiliza para la creación de espejos como los utilizados en cualquier casa o automóvil.

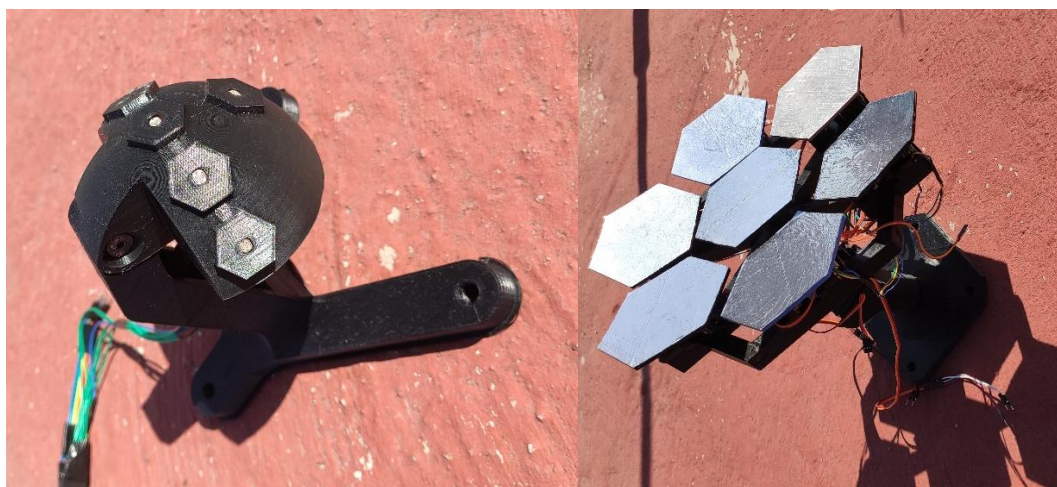


Fig. 4.20. Colector y sensor solar impresos por FMD

La plataforma completa para realizar las pruebas consta del sensor solar descrito en la sección 4.4 más el colector descrito en esta sección, debido a que el colector también contiene sensores de posición que serán incluidos en la matriz de entrenamiento para la red neural como patrones de salida se decidió unir todo en un solo sistema, teniendo en cuenta que este sistema servirá para la recolección de datos, así como probar el control. En la figura 4.21 podemos ver el esquemático de todo el sistema donde se incluyen los encoders absolutos y los 8 servomotores utilizados; 2 servos para mover el panel de espejos y coincidir con las dos primeras articulaciones descritas en la sección 4.3 y 1 servo por cada espejo para la orientación individual de estos y lograr el efecto mostrado en la figura 4.19 de la convergencia de los puntos focales.

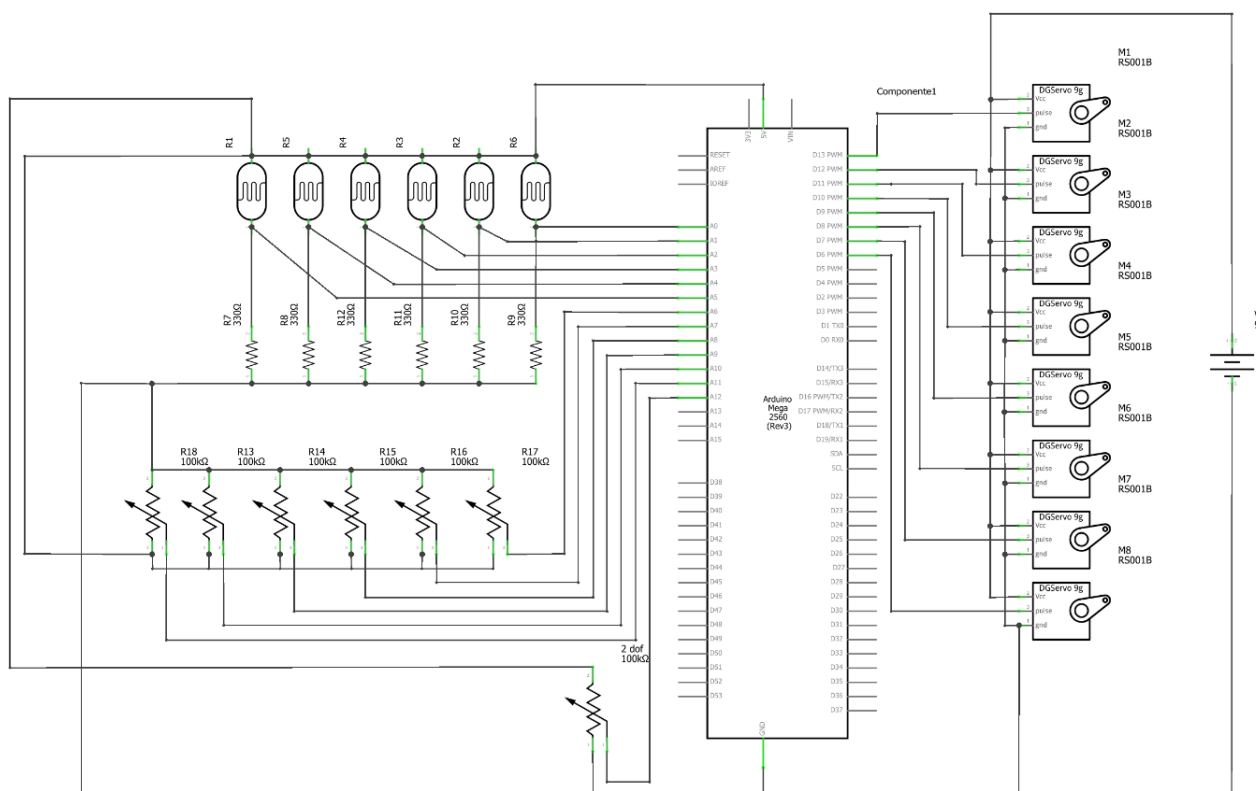


Fig. 4.21. Esquema electrónico de la plataforma de pruebas y control.

En la figura 4.22 podemos ver el sistema completo que se utilizó para realizar las mediciones y las pruebas físicas del sistema de control.

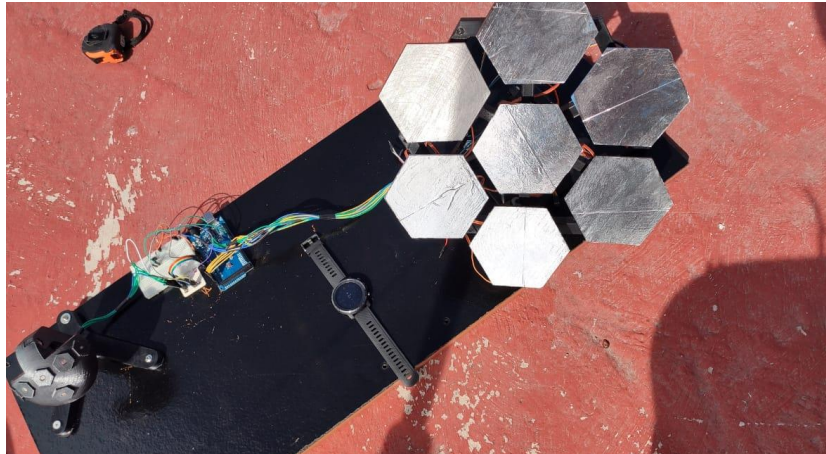
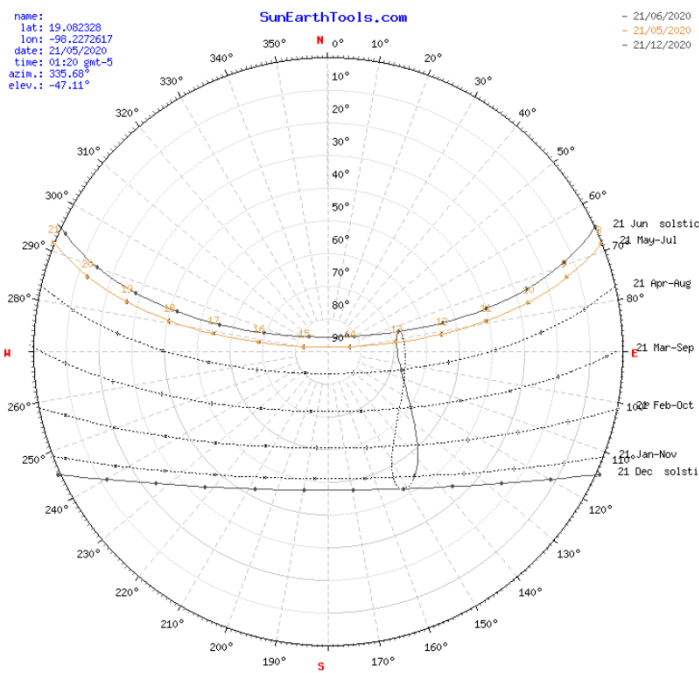


Fig. 4.22. Sistema montado para medición y pruebas.

Se realizó un procedimiento para poder realizar las mediciones y crear la matriz de patrones de entrenamiento, el cual se describe a continuación:

- a) Orientar el sensor solar de acuerdo con las coordenadas del área donde se realizarán las pruebas, que en este caso fue a longitud de -98.22° y una latitud de 19.08°N . Considerar que el sensor será nuestro origen de la esfera celeste para el sistema por ende la fotoresistencia central debería estar alineada de forma perpendicular al sol en su punto más alto de altitud sobre el horizonte, esto servirá para posicionar la estructura del sensor. Para este caso se utilizó un chip de GPS con magnetómetro, el chipset SONY GNSS, montado en un tracker de actividad física Amazfit Stratos 3, hoy en día uno de los mejores chips de tracking obtenibles en el mercado.
- b) Una vez ajustado la posición de la estructura se calibra el ángulo de inclinación de las fotoresistencias para lograr una buena orientación perpendicular, este ángulo se ajusta a los 19.08°N de latitud, recordemos que el ángulo acimutal no requiere ajuste debido a la configuración del sensor.
- c) Finalizando el ajuste del sensor se coloca el colector solar con la misma orientación, pero separado de forma lineal al menos un metro, esto se hace para evitar generar sombras y a su vez la separación resulta despreciable y podrá ser corregida por la propia red neuronal.
- d) Se conectan los sensores y comienza el registro, el sensor no necesitará cambios de ningún tipo, pero para el caso del colector se deberá ubicar donde se desea el punto caliente respetando la distancia focal antes calculada.
- e) Antes de tomar una lectura del sistema los espejos deberán ser alineados para la convergencia de los puntos focales, esto se puede realizar de forma manual debido al lento cambio del sol. El ángulo de la primera articulación que corresponde al ángulo de latitud se ajusta sin necesidad de tener un encoder esto es debido a que se usaron datos de posición solar. Como los mostrados en la figura 4.23, los datos pueden ser obtenidos por hora así que en la figura se representa el día 25 de mayo del 2020 momento en que se escribe esta sección.



sol' posición	Elevación	Azimet	latitud	longitud
21/05/2020 01:20 GMT-5	-47.11°	335.68°	19.0823280° N	98.2272617° W
crepúsculo	Sunrise	Puesta de sol	Azimet Sunrise	Azimet Puesta de sol
crepúsculo -0.833°	07:56:17	21:03:03	68.11°	292°
crepúsculo civil -6°	07:32:32	21:26:47	66.04°	294.08°
Náutica crepúsculo -12°	07:04:27	21:54:55	63.29°	296.84°
El crepúsculo astronómico -18°	06:35:37	22:23:48	60.07°	300.08°
la luz del día	hh mm ss	diff. dd+1	diff. dd-1	Mediodía
21/05/2020	13:06:46	00:00:37	-00:00:40	14:29:40

Fig. 4.23. Datos solares para la orientación del colector. https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php?lang=es

- f) Se toma el registro cuando se desee. El sistema está programado para acomodar los registros en una matriz donde las primeras 6 columnas representan los datos del sensor y las siguientes 8 columnas los datos de la posición de los servos.

Para obtener los datos se buscó que fueran en días separados por semanas, así como a diferentes horas debido que una diversidad mayor de datos dará un mejor entrenamiento de la red. Una vez obtenida la matriz de patrones se procede a la elección y entrenamiento de la red neuronal que se describirá en la siguiente sección.

Al final del proceso que se describe anteriormente se obtiene nuestra matriz de patrones con 14 columnas fijas y en la primera prueba 64 renglones siendo este un numero variable pues depende de la cantidad de registros que se tomen. A en la figura 4.24 se muestra una parte de la matriz.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	0.1094	0.1074	0.1875	0.2129	0.2842	0.2080	0.1191	0.4307	0.8936	0.9170	0.1758	0.1807	0.2778	0.4167
2	0.1865	0.1865	0.2549	0.2832	0.3408	0.2959	0.1172	0.3662	0.8945	0.9063	0.1738	0.1797	0.2778	0.4167
3	0.1162	0.1172	0.1582	0.2266	0.2861	0.2305	0.1240	0.4219	0.9072	0.9160	0.1787	0.1865	0.2778	0.4167
4	0.1064	0.1064	0.1416	0.2129	0.2705	0.2100	0.1162	0.3311	0.8945	0.9043	0.1729	0.1797	0.2778	0.4167
5	0.0986	0.0986	0.1318	0.1992	0.2451	0.1787	0.1191	0.2129	0.8760	0.9717	0.1709	0.1758	0.2778	0.4111
6	0.1133	0.1143	0.1416	0.2021	0.2422	0.1758	0.1191	0.2031	0.8750	0.9697	0.1670	0.1719	0.2778	0.4111
7	0.1016	0.1035	0.1533	0.2656	0.2910	0.1904	0.1455	0.2813	0.9102	0.9453	0.1602	0.1768	0.2778	0.3889
8	0.1045	0.1074	0.1504	0.2695	0.2949	0.1953	0.1484	0.2822	0.9219	0.9590	0.1631	0.1807	0.2778	0.3889
9	0.1006	0.1045	0.1494	0.2666	0.2881	0.2051	0.1494	0.2773	0.9053	0.9561	0.1631	0.1758	0.2778	0.3889
10	0.0977	0.1016	0.1494	0.2666	0.2959	0.2344	0.1475	0.2744	0.9053	0.9951	0.1650	0.1895	0.2778	0.3889
11	0.2266	0.2373	0.2949	0.3096	0.3340	0.3877	0.1445	0.1748	0.8838	0.9180	0.1563	0.1875	0.2778	0.3333
12	0.2256	0.2441	0.3066	0.3105	0.3457	0.4023	0.1445	0.1719	0.8984	0.9365	0.1572	0.1895	0.2778	0.3333

Fig. 4.24. Matriz de patrones para el entrenamiento de la red neuronal.

Podemos observar en la figura 4.24 la matriz resultado, las primeras 8 columnas remarcadas en rojo representan a los patrones de entrada provenientes del sensor solar y los encoder de las dos primeras articulaciones del seguidor solar y las ultimas 6 columnas remarcadas en azul son las posiciones esperadas en las articulaciones de los espejos. Con esta matriz se procedió a la construcción de la red neuronal.

4.5. Sistema de control

El sistema del control para el caso del colector solar es sencillo de explicar, pero difícil de desarrollar al menos buscando una eficiencia alta. En el control se necesita que el colector se mantenga la posición de un punto focal en base a la temperatura sin importar el movimiento del sol u otros factores externos. Si bien sistemas de este tipo ya existen no están aplicados a sistemas de energía solar pasivos o son sistemas con estrategias de control clásico cuya eficiencia es adecuada pero poco adaptable y sin habilidad de aprendizaje.

Para el sistema de control se decidió utilizar una red neuronal debido a sus ventajas las cuales son:

- a) Capacidad de aprendizaje, las redes neuronales artificiales pueden aprender mediante una etapa de entrenamiento la cual puede seguir aun durante su implementación.
- b) Capacidad de auto organización, una red neuronal puede crear su propia estructura sin intervención del usuario.
- c) Tolerancia a fallos, esta una de las ventajas más importantes para este proyecto, una red puede tolerar fallos en los datos de entrada y aun así ejecutar un trabajo aceptable o dependiendo de la red poder predecir o sustituir el dato faltante para el correcto funcionamiento.
- d) Flexibilidad, una red puede manejar variaciones en los datos de entrada no importantes actuando como una especie de filtro, esto ayudara debido a la intermitencia de la radiación solar.
- e) Actúa en tiempo real, gracias a su configuración de neuronas en paralelo y si es aplicada en un equipo de cómputo adecuado la red neuronal puede trabajar como un sistema en tiempo real.
- f) Funcionamiento en modo recuerdo, lo que permite montar el sistema en un hardware con limitaciones de procesamiento y aun así mantener la velocidad del sistema.

Las redes neuronales también cuentan varias desventajas, pero estas pueden no ser trascendentes dependiendo de la aplicación, ya que las desventajas radican en la capacidad de cómputo para el entrenamiento y la cantidad de datos a los que se tenga acceso.

4.5.1. Elección de la red neuronal

Una red neuronal funciona como un clasificador visto de forma simple y general, pero para realizar dicha clasificación es necesario varios parámetros que se explicaran más adelante. Una red se basa en la ecuación 10, donde la variable a representa la salida de la red, f representa la función de activación, las variables w y b representan los pesos sinápticos y las polarizaciones y finalmente la variable p representa los patrones o datos de entrada.

$$a = f(w * p + b) \quad (10)$$

La ecuación 10 representa la forma general de una red neuronal sin embargo cada red posee características distintas y dependiendo de los patrones de entrada se deberán tomar decisiones para obtener todos los parámetros contenidos en la ecuación, siendo esta la parte más crítica en la implementación de una red como sistema de control. Estos parámetros se enlistan a continuación:

- a) Tipo de red: existen varios tipos de redes dependiendo su rendimiento o su forma de entrenamiento, puede ser perceptrón, adaline, base radial, etc. La elección dependerá del tipo de problema a resolver.
- b) Numero de neuronas: las neuronas trabajan en paralelo y en función al número de datos que quieras analizar y las salidas deseadas. Esta característica puede ser la elección más fácil pues el propio problema dará el número de neuronas.

- c) Numero de capas: las redes neuronales tienen la capacidad de ser multicapa siendo representada por una función anidada que resultaría en una formación en serie, esta capacidad permite resolver problemas más abstractos y con una mejor precisión en la clasificación, sin embargo, a priori no se puede definir un numero de capas siendo esta elección dejada a la investigación y después de pruebas iniciales.
- d) Pesos sinápticos y polarizaciones: estos valores son en base a cada neurona y para su obtención es necesario el entrenamiento de la red en base a patrones de entrada y salidas deseadas, el entrenamiento dependerá del tipo de red elegida.
- e) Función de activación: esta función nos permite obtener un resultado adecuado pudiendo en esta etapa corregir o aumentar la precisión de la red, existen varios tipos y su elección dependerá del tipo de clasificación que necesitemos.

En base a la matriz de datos mostrada en la figura 4.24 se procedió a realizar la elección de la red neuronal y sus posibles parámetros. Una red neuronal tiene la estructura mostrada en la figura 4.25 donde se muestra una capa y una neurona siguiendo el modelo propuesto por la ecuación 10.

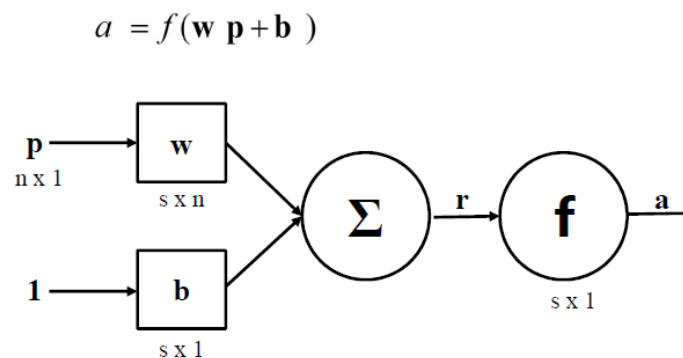


Fig. 3.25. Modelo general de una red neuronal.

Dado que el problema necesita ser resuelto para 6 salidas que corresponden a las posiciones de los espejos, se decidió utilizar una red de 6 neuronas (N) en una sola capa, cabe destacar que, si bien una red con un mayor número de capas podría resolver el problema de una forma más adecuada, es recomendable utilizar el menor número de capas dado el procesamiento requerido y la complejidad de la red. Con la configuración mencionada anteriormente se establece que además de las 6 neuronas se requiere un total de 6 polarizadores (b) para las neuronas y dado el número de entradas del sensor solar y la posición del seguidor se establece un total de 8 pesos sinápticos (W). Todo lo anterior se muestra en la figura 4.26 donde se ve la configuración general de la red mostrando las 6 salidas (A) que determinaran la posición de los espejos.

En la figura 4.26 también se muestra que después de cada neurona debe existir una función de activación (F) la cual nos ayudara a presentar los resultados de mejor manera y realizar una mejor clasificación. En este punto es difícil mencionar que tipo de función es necesaria pero dado que la clasificación no es en base a un criterio binario si no para obtener un dato de posición se considera funciones de tipo lineal o sigmoides.

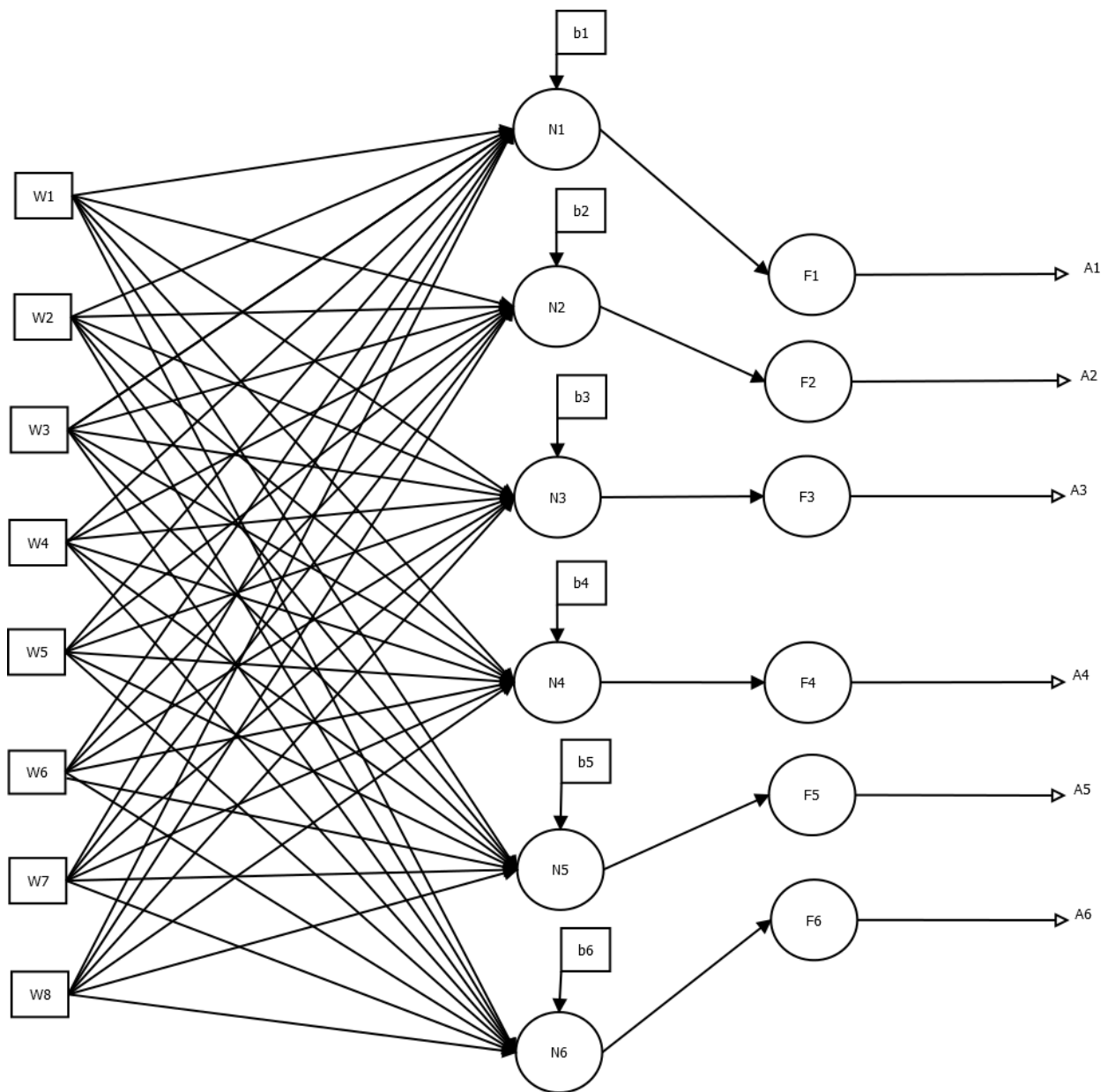


Fig. 4.26. Red neuronal monocapa con 6 neuronas y 8 pesos sinápticos.

Para elegir el tipo de red se debe realizar un ejercicio de separabilidad lineal sin embargo dado la alta dimensionalidad de los datos no es posible tal ejercicio o al menos no de una forma alcanzable para el presente proyecto, sin embargo, se decidió probar una red de tipo perceptrón y de esta manera verificar la separabilidad lineal.

La red perceptrón no tuvo éxito debido a la alta dimensionalidad de los patrones demostrando que la red no podría converger para dar un resultado adecuado. Se probó una red de varias capas, pero aun así no se consiguió un resultado favorable. Después de la primera prueba se decidió utilizar una red tipo Adaline (adaptive linear neuron) que, aunque tiene la misma limitante que la red tipo perceptrón, la separación lineal del problema, cuenta con un algoritmo más potente llamado LMS (least mean square) lo que minimiza el error cuadrado. Además, la red es lineal lo que permite tener una función identidad de salida siendo este caso el ideal para el problema.

4.5.2. Aprendizaje de la red neuronal

Como se explicó anteriormente se eligió la red tipo Adaline para realizar las pruebas y el entrenamiento de la red para el sistema de control. Este tipo de red fue desarrollada por Bernard Widrow y su alumno Ted Hoff y por tal motivo el algoritmo de aprendizaje se le conoce como regla de Widrow-Hoff.

La regla de Widrow-Hoff es una aproximación por descenso de gradiente cuya tasa de rendimiento es el error cuadrático medio. La estructura de la red se muestra en la figura 4.25, siendo la ecuación 11 su representación para la salida de la red. Donde W son los pesos sinápticos de la red, P son los patrones de entrada, T es la matriz de salidas deseada y b es la polarización de cada neurona.

$$a = \text{pureline}(n) = \text{pureline}(W^T * p + b) \quad (11)$$

$$W = \begin{bmatrix} w_{i,1} \\ w_{i,2} \\ \vdots \\ w_{i,R} \end{bmatrix} \quad (12)$$

La red Adaline tiene una frontera de decisión que a diferencia del perceptrón es cuando $n = 0$ esto se ejemplifica en la figura 4.27, donde podemos ver la frontera de decisión con el respectivo vector W .

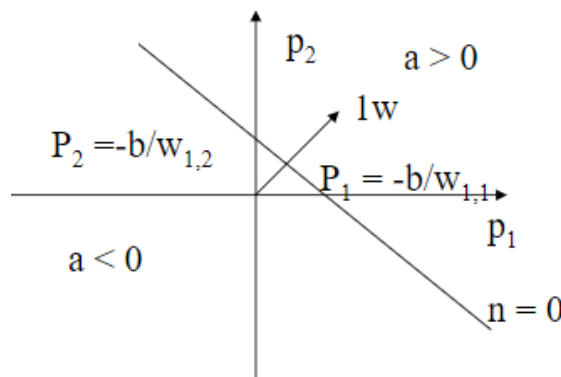


Fig. 4.27. Frontera de decisión de la red Adaline.

El algoritmo de error cuadrático medio (LMS) es un tipo de entrenamiento supervisado, en el cual la regla de aprendizaje cuenta con un conjunto de patrones de ejemplos del comportamiento deseado, esto quiere decir que cada patrón de entrada de la red se compara con una salida deseada. El algoritmo LMS ajusta los pesos y sesgos de la red con el fin de minimizar el error. A la diferencia entre la salida de la red y la salida deseada es el índice de rendimiento.

Sea un vector X compuesto por los parámetros que se ajustaran:

$$X = \begin{bmatrix} w_1 \\ b \end{bmatrix}$$

Y el vector Z sea las entradas de la red, los patrones antes evaluados:

$$Z = \begin{bmatrix} P \\ 1 \end{bmatrix}$$

La salida de la red será la ecuación 11 sin embargo si la ponemos en términos de los vectores anteriores sería:

$$a = w^T p + b = X^T Z$$

El error cuadrático medio será para este caso:

$$F(X) = E[e^2] = E[(t - X^T Z)^2]$$

Expandiendo la expresión anterior tenemos:

$$F(X) = E[(t^2 - 2tX^T Z + X^T Z Z^T X)^2] = E[t^2] - 2tX^T E[tZ] + X^T E[ZZ^T]X$$

Si utilizamos $c = E[t^2]$, $h = E[tZ]$ y $R = E[ZZ^T]$ tenemos la siguiente expresión:

$$F(X) = c + 2X^T h + X^T R X$$

Con lo anterior se desarrolló el algoritmo para el aprendizaje de la red. Se utilizó la matriz de patrones y salidas deseadas mostrada en la figura 4.24 aunque de forma completa con un total de 100 muestras en distintas horas del día y diferentes meses.

Se automatizó el proceso mediante el software Matlab que permite realizar operaciones matriciales. Aunque existen librerías para realizar este tipo de trabajo se decidió realizar el algoritmo con herramientas básicas para permitir su migración a diferentes plataformas y además mantener el tamaño del sistema más contenido en cuanto a uso de memoria. En la figura 4.28 se puede ver un segmento de código que ejemplifica todo lo descrito anteriormente.

```
%Aprendizaje RED ADALINE para colector solar
%José Gilberto Montaña Marques
%UPAEP
%Febrero 2020
clc, clear, close all
%patrones
load('msolarn.mat');
P=msolarn(:,1:6)';
%resultados esperados
T=msolarn(:,7:14)';
Z = [P; ones(1,32)];
Q=size(P,2);
S=size(P,1);
% Regla de Widrow-Hoff
R = 1/Q*(Z*Z');
H = 1/Q*(Z*T');
X = inv(R)*H;
W = X(1:S,:)';
b = X((S+1),:)'
ap=[];
```

Fig. 4.28. Segmento de código para el aprendizaje de la red Adaline.

Con este algoritmo se obtuvo una matriz de pesos sinápticos y un vector de polarizadores los cuales se someten a una prueba para validar la eficiencia de la red neuronal y posterior implementación, en el siguiente capítulo se expondrán los resultados de dicho entrenamiento. Cabe mencionar que para el entrenamiento se normalizaron los valores obtenidos de los sensores debido que se ha comprobado que el algoritmo de aprendizaje funciona mejor con valores menores a 1.

4.6. Colector solar controlado por una red neuronal

En las secciones anteriores pudimos observar cómo se desarrolló cada una de las partes del sistema de control de un colector solar mediante el uso de las redes neuronales. En este apartado se presenta el sistema final que

se utilizara para las pruebas del prototipo, este prototipo no solo abarca la parte de sensado y diseño mecánico si no también la implementación de la red neuronal en la tarjeta embebida.

El sistema final tendría una arquitectura como la mostrada en la figura 4.29, donde podemos observar el flujo de información entre todos los módulos.

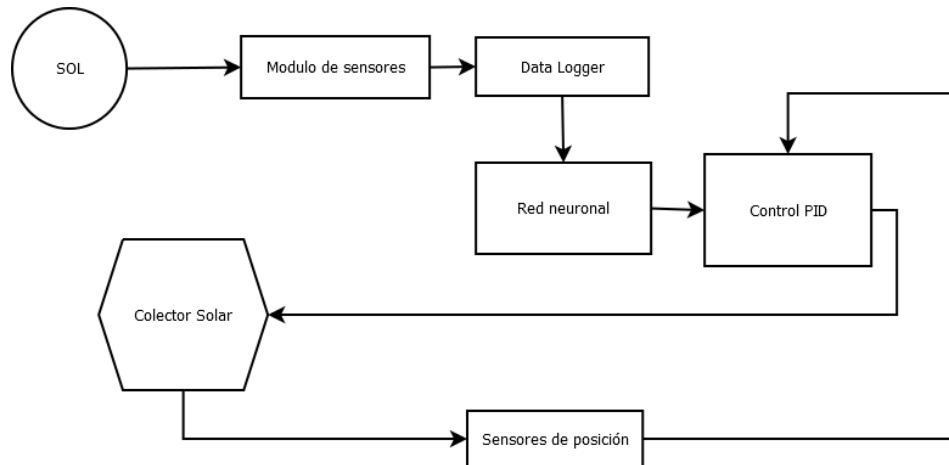


Fig. 4.29. Arquitectura principal del sistema de control.

En la arquitectura podemos observar que el módulo de sensores se encarga de recopilar los datos de posición solar, estos datos serán enviados al Data-Logger donde se acondicionará la señal y se hará la respectiva conversión de los datos para ser enviados a la red neuronal. La red neuronal ya no tendrá contenido el algoritmo de aprendizaje y solo contendrá la función presentada en la ecuación 10, esta función estará alimentada con los pesos sinápticos y polarizadores obtenidos en el entrenamiento explicado en la sección anterior. La red se encargará de procesar la información y realizar la elección de los mejores valores para posicionar los motores del colector solar y mandar estos valores como salida.

En este punto se notó un problema en el posicionamiento de los motores, pues debido a la precisión de la red siempre se están recibiendo datos de posicionamiento cuando suceden fenómenos temporales como nubes o algo que interfiera con la luz solar, sin embargo, estos fenómenos no duran lo suficiente para necesitar un reposicionamiento en los motores, sin embargo, la red si reacciona a estos elementos. Por lo anterior se decidió interconectar un sistema de control solo para posicionar los motores y buscar el valor obtenido por la red, de esta forma se obtiene un mejor rendimiento en los motores pues se evitan micro movimientos innecesarios y poco relevantes para el funcionamiento, así como se controla un umbral en el error de posición lo que elimina las vibraciones del sistema y lo hace más estable.

En el siguiente capítulo se exponen los resultados obtenidos después de la aplicación del prototipo descrito en esta sección.

Capítulo 5

Pruebas y resultados

5.1. Pruebas

Para evaluar el diseño mostrado en la presente tesis se utilizó la arquitectura descrita en la figura 4.29 como prototipo de pruebas, el sistema de procesamiento está a cargo de un microprocesador AVR ATMEGA2560, acoplado a una placa de prototipado que añade puertos digitales y analógicos para entradas y salidas, además de conversores analógicos/digitales y salidas tipo PWM lo que lo hace ideal para este trabajo de control de servomotores. Adicionalmente se agregó un controlador de servos PCA 9685, esta decisión se tomó para la correcta gestión de los servos pues al contar el sistema con 6 servos SG90 y 2 servos S3004 es difícil mantener un control adecuado y mediante esta placa se eliminan conexiones físicas y se pueden tratar a los servos mediante direcciones y por medio de comunicación serial. El sistema cuenta con las siguientes características:

- Velocidad del procesador de 16MHz
- Memoria tipo Flash de 256KB para programar
- SRAM de 8MB
- EEPROM 4MB
- Rango de voltaje de 1.8V a 5.5V
- Corriente máxima 40mA
- Soporta protocolos UART, SPI, I2C
- Convertidor Analógico/Digital de 1024 bits
- Temporizadores de hasta 16bit
- 54 I/O de las cuales 14 son PWM
- 16 entradas analógicas con conversor a digital de 1024bits

La decisión de utilizar una placa comercial de capacidades limitadas en comparación a otros sistemas existentes en el mercado se tomó debido al objetivo de implementar un control mediante una red neuronal de bajo coste computacional, esto significa que el sistema es capaz de correr en una gama muy amplia de dispositivos embebidos y no necesita la intervención de un sistema computacional robusto para el funcionamiento. En este punto hay que destacar que su implementación en un ámbito industrial si requerirá el estudio y elección cuidadoso del sistema de procesamiento pues además del costo y capacidad se debe evaluar la estabilidad de este y por ende la robustez para la aplicación que se requiera.

Una vez elegido el sistema embebido para la implementación del control por red neuronal, se procedió a la programación de la red, hay que destacar que la tarjeta no realizara ninguna actividad de aprendizaje solo ejecutara la red con los parámetros preestablecidos por un entrenamiento previo. El entrenamiento siguió la regla de Widrow-Hoff y se obtuvo los pesos sinápticos (W) y el vector de polarización (b) mostrados en la figura 5.1, así mismo se diseñó un programa para validar la red, el cual toma los patrones validos sensados en las pruebas anteriores y realiza una prueba comparativa de cada uno, en pocas palabras se prueba cada valor en la función de la red con la matriz "W" y el vector "b" si la salida de la red coincide con los patrones validados se toma como acierto y si no se suma como error. De un total de 260 patrones se tuvieron 27 errores dando como

resultado una eficiencia de la red del 89.45%, este valor en el ámbito de redes neuronales es bastante bueno pues una red resulta valida después del 85% de eficiencia.

W =						b =	
0.2787	-0.5294	0.0256	0.4599	-0.1437	0.0740	0.0731	
4.0568	-9.4900	2.9613	-1.7197	1.8164	1.1616	0.1087	
-0.1919	-0.9641	0.5100	0.5667	-0.3893	0.2905	0.8591	
0.5341	0.3185	-0.8073	0.0785	0.4048	-0.2571	0.9055	
-0.2406	-0.2069	0.2474	-0.0168	-0.1388	0.1341	0.1913	
0.0165	0.5606	-0.4146	-0.2429	0.2363	-0.0384	0.1830	
0.3694	-0.2033	-0.0501	0.0032	-0.0903	-0.0223	0.2979	
0.0099	0.0414	0.2292	-0.0207	-0.8782	-0.1569	0.6428	

Fig. 5.1. Matriz de pesos sinápticos (W) y vector de polarización (b)

Con la funcionalidad probada de la red neuronal se procedió al cálculo del error cuadrático medio (EMC) el cual se ajusta bien con el tipo de entrenamiento dando como resultado un valor promedio de 1.98×10^{-4} , la evolución de este error lo podemos observar en la figura 5.2 donde se grafica durante las 260 pruebas que se realizaron, como podemos observar el ECM nunca se eleva más halla de 0.1 siendo esto adecuado para la red pues podemos decir que la red es eficiente en todos los aspectos.

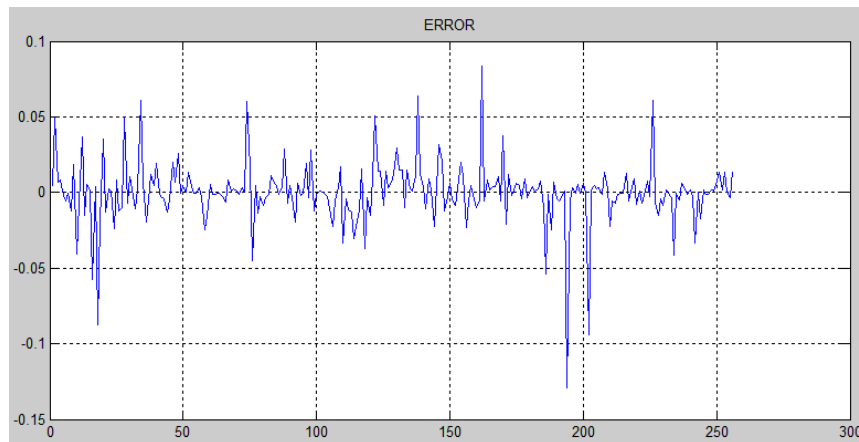


Fig. 5.2. Grafica del error cuadrático medio.

El umbral para el cálculo del error en la red es elegido por el usuario y en este caso se especificó 1.5% para considerar valida la salida de la función de la red, sin embargo, para la aplicación de orientación solar para la cual esta creada la red podría admitir un error de un 3%, con esto la eficiencia escala al 95.31% siendo este dato más que excelente para validar la eficiencia. Sin embargo, un objetivo particular de este trabajo es lograr un control preciso y por este motivo se decidió bajar el umbral del error al 1.5%, siendo que a pesar de esto la red presenta una eficiencia aceptable.

En la figura 5.3 podemos observar un segmento de código de la forma en que se incluyó los datos del entrenamiento de la red en el sistema de prueba, en este caso no se utilizó alguna librería matemática o similar, pues se buscó que el código pudiera ser migrado a cualquier plataforma sin limitaciones.

```
float W[8][6]={0.2787,-0.5294,0.0256,0.4599,-0.1437,0.0740},
{4.0568,-9.49,2.9613,-1.7197,1.8164,1.1616},
{-0.1919,-0.9641,0.51,0.2667,-0.3893,0.2905},
{0.5341,0.3185,-0.8073,0.0785,0.4048,-0.2571},
{-0.2406,-0.2069,0.2474,-0.0168,-0.1388,0.1341},
{0.0165,0.5606,-0.4146,-0.2429,0.2363,-0.0384},
{0.3694,-0.2033,-0.0501,0.0032,-0.0903,-0.1569},
{0.0099,0.0414,0.2292,-0.0207,-0.8782,-0.1569}};

float B[8]={0.0731,0.1087,0.8591,0.9055,0.1913,0.183,0.2979,0.6428};
float R[8]={0,0,0,0,0,0,0,0};
```

Fig. 5.3. Código de los pesos sinápticos y vector de polarización.

En el sistema embebido se carga la matriz de pesos sinápticos, así como el vector de polarización, los cuales se pueden ver en la figura 5.3, estos se usarán en la función de la red neuronal, después el sistema lee los valores provenientes del sensor de posición solar, los cuales se convierten en valores digitales normalizados puesto que el algoritmo de entrenamiento fue pensado de esta manera. Una vez completado la conversión de los datos del sensor la función de la red calcula la posición de los servos motores y envía este dato a un controlador PID el cual a su vez envía los datos a los servos, en este punto el sistema solo espera correcciones provenientes de los encoders en los servos y del sensor solar. En la siguiente sección se mostrará los resultados obtenidos del prototipo de pruebas antes descrito.

5.2. Resultados

La arquitectura descrita con anterioridad para el sistema de pruebas se montó sobre un prototipo a escala 1:25, esto tiene relación directa en la concentración de radiación solar lo que significa que el cálculo obtenido en el capítulo 4 mediante la ecuación 5 y 6 se ve afectado y debe ser escalado, en dicho cálculo se considera un valor de 21692W obtenidos por un área aproximada de 25m², sin embargo, el prototipo tiene un área de 1m² y una posible potencia máxima de 800W. Con el dato anterior podemos esperar que el prototipo alcance temperaturas de 120°C sin embargo no se pudo contar con espejos adecuados y se utilizó una tela de aluminio pulido reflectante que baja la eficiencia aproximadamente en un 30% por lo cual el prototipo en condiciones óptimas podría alcanzar un máximo de 70°C.

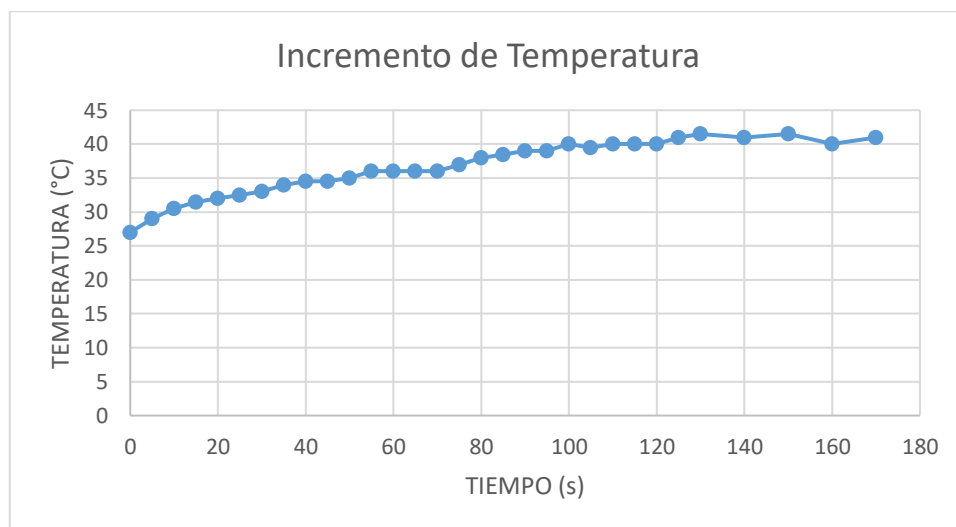


Fig. 5.4. Grafica del comportamiento del sistema de colector solar.

Con la configuración antes descrita se graficó el comportamiento del sistema durante 170s, esta grafica se puede observar en la figura 5.4. Los datos obtenidos para graficar el comportamiento fueron medidos a través de una cámara térmica HTI HT-102 con un rango de temperatura de -30°C a 220°C . En este caso podemos notar que durante los primeros 5 segundos el sistema se ubica y crea el punto focal para incrementar la temperatura, esto se muestra en la figura 5.5 donde se compara el estado de la superficie a calentar antes de iniciar el enfoque.

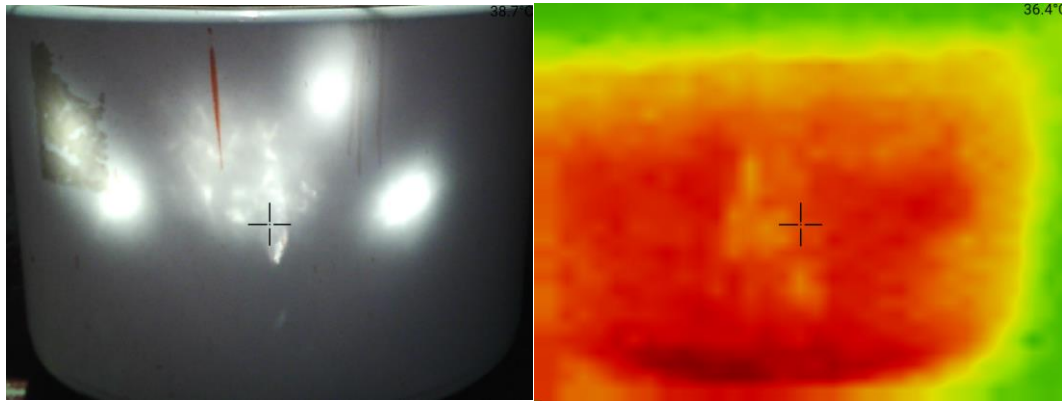
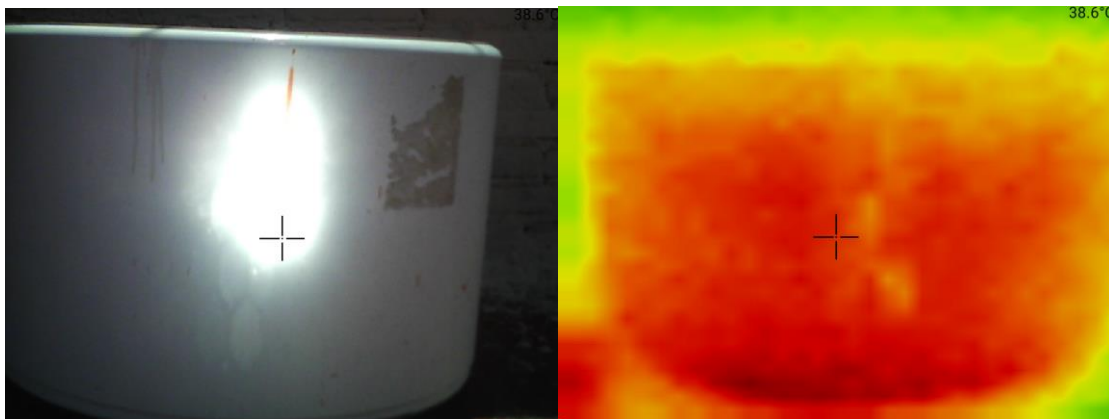


Fig. 5.5. imágenes de una cámara normal y la cámara térmica en la superficie antes de calentar.

En la figura 5.6 podemos observar el sistema 15 segundos después del inicio donde los espejos comenzaron a ubicarse para la convergencia de los puntos focales, en este momento la temperatura comenzó a subir de los 36°C registrados en la superficie del contenedor alcanzo los 38°C .



La superficie de prueba inicialmente tiene una temperatura de 30°C , podemos notar después de 10s un incremento de temperatura de 5°C en la superficie, cabe destacar que la superficie de prueba es un contenedor de aluminio de dimensiones 50cm de largo por 25cm de ancho con una profundidad de 50cm dando una superficie de calentamiento de 1250cm^2 . Al ser aluminio el material presenta un coeficiente de conductividad térmica de $205 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$, este dato es elevado en comparación a otros materiales por ende el contenedor incrementara su temperatura relativamente rápido.

Transcurrido un tiempo de 15s podemos notar una estabilización del sistema en 38°C por lo cual solo existió un incremento de 3°C , sin embargo, en las imágenes térmicas podemos apreciar la concentración de la radiación solar en la superficie probando el diseño del colector solar para enfocar la radiación. En la figura 5.7 podemos apreciar la imagen térmica a 38.6°C y a 47.4°C esto después de 100s, como podemos ver el punto focal se mantiene con éxito.

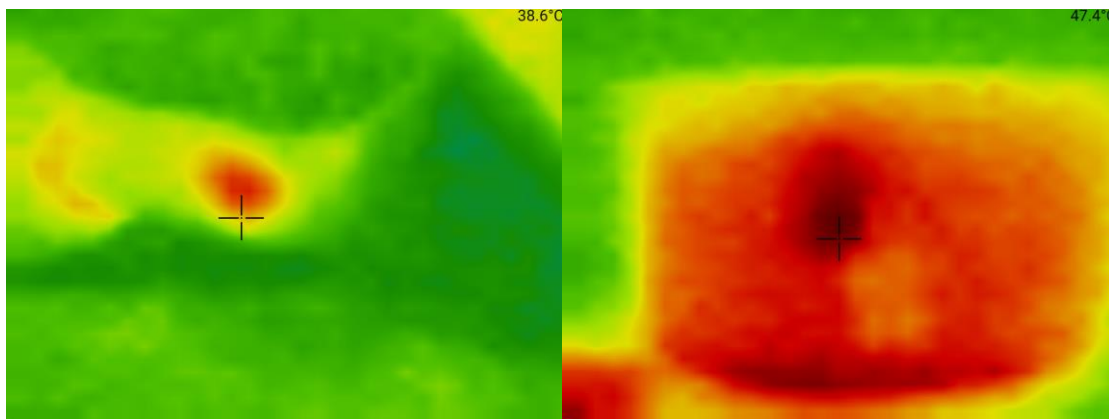


Fig. 5.7. Imagen térmica mostrando la concentración de radiación solar.

Al término de la prueba él se alcanzó un máximo de temperatura de 55.5°C y el punto focal obtenido es de 8cm de diámetro mantenido con éxito durante esta primera prueba, en la figura 5.8 podemos observar la imagen térmica final del experimento.

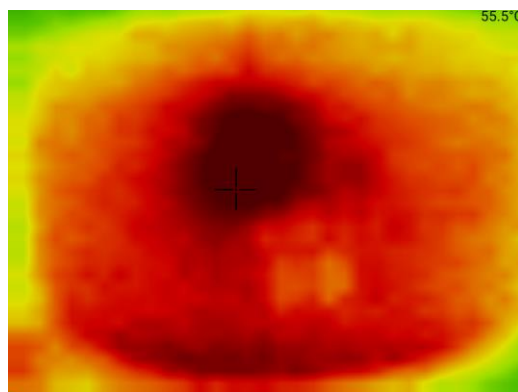


Fig. 5.8. imagen térmica final de la primera prueba del prototipo de colector solar.

Con el éxito de la primera prueba se decidió mantener el sistema por un periodo de tiempo más largo. Se utilizó un día completo de luz solar, debido a la ubicación donde se realizó la prueba el día con luz solar aprovechable es de solo 8hrs a pesar de que se puede mantener la visibilidad con luz natural por 12 horas, esto debido a los diferentes obstáculos naturales y artificiales que limitan la incidencia de la luz solar.

En la figura 5.9 podemos ver la gráfica obtenida de la prueba mencionada en el párrafo anterior. Como podemos notar el colector tiene un comportamiento casi lineal, solo presentando 4 picos importantes, estos picos se debieron a la alta nubosidad que se presentó durante la prueba siendo que a red no tenía el entrenamiento suficiente para adaptarse a esa situación, esto se esperaba debido a que el entrenamiento sucedió en los meses de noviembre, diciembre y enero, y la prueba se llevó a cabo en el mes de agosto por ende los ángulos solares cambian y las condiciones climáticas también. El problema antes mencionado se puede solucionar mediante la inclusión de más datos de entrenamiento durante periodos más variados, sin embargo, lo destacable es la capacidad de la red para adaptarse, aun cuando no cuenta con los datos suficientes y dar una salida aceptable.

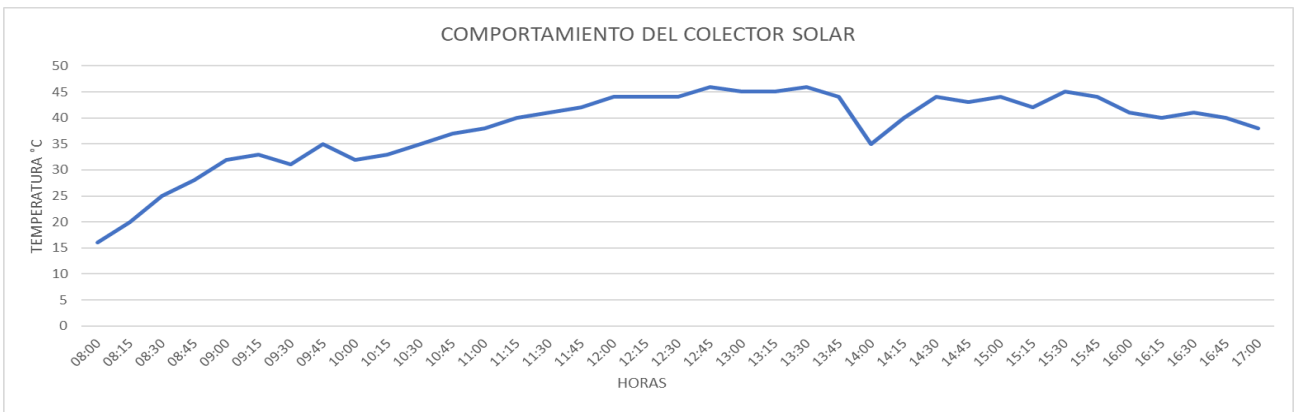


Fig. 5.9. comportamiento del colector solar durante un periodo de 9 horas.

Como se puede observar en la gráfica de la figura 5.9 una vez alcanzada la temperatura máxima para el colector se mantiene estable en un rango aceptable, pues la temperatura oscila entre 47°C y 40°C siendo que en las horas de mayor radiación solar se mantiene la temperatura estable con oscilaciones de solo 1°C. Lo anterior comprueba la capacidad del colector solar para orientarse y mantener un punto focal sobre una superficie utilizando el sistema de control antes propuesto.

Una de las características destacables de las redes neuronales es su capacidad de aprendizaje, el sistema propuesto con anterioridad utiliza un algoritmo de aprendizaje supervisado, donde se requiere que el sistema tenga tanto patrones de entrada como patrones de salida válidos, sin embargo, los patrones de salida se deben obtener de forma manual y ser medidos con instrumentos ajenos al sistema de control. En el siguiente apartado se describe un sistema automático para el aprendizaje continuo de la red.

Capítulo 6

Conclusiones y trabajo a futuro

6.1. Conclusiones

En este trabajo se abordan dos problemas; el control industrial mediante redes neuronales y la creación de un sistema que beneficie de alguna forma a la sociedad, en este se casó se eligió el tratamiento de residuos sólidos urbanos mediante la creación de un sistema de control para un colector solar que complemente el funcionamiento de un reactor de pirolisis. En los siguientes párrafos se explicarán las conjeturas y conclusiones obtenidas del sistema presentado en el actual trabajo.

El sistema presentado durante esta tesis pretende posicionarse como un nuevo sistema de control para procesos industriales, que si bien el control de procesos en la actualidad es bastante robusto y con muy buenos resultados carece de 2 características principales, que si posee una red neuronal; las redes son adaptables a condiciones no estudiadas anteriormente por tal motivo podrán expresar un resultado a pesar no haber tenido la secuencia de patrones de entrada en estudios previos y por lo tanto podrán sobreponerse a variaciones del sistema o pérdida de información. La otra característica es su capacidad de aprendizaje con lo cual cada vez que se entrena una red subirá su eficiencia y puede aprender ajustes y variaciones hechas por el usuario para aumentar la tasa de eficiencia.

Por lo anterior mencionado, se eligió proponer una red neuronal como un sistema de control orientado a procesos industriales y se le dio la aplicación de controlar un colector solar para la implementación en un reactor de pirolisis. En la actualidad se presenta a las redes neuronales con un enfoque hacia el reconocimiento óptico o la navegación y se expone su potencial, pero siempre manejado como un proceso que requiere mucho poder de cómputo. En este trabajo se intentó demostrar que no solo se puede usar un sistema de bajo rendimiento para correr una red neuronal si no que es posible su aplicación a problemas simplificados con un resultado optimo, lo cual abre un abanico de posibilidades nuevas para la implementación de la red neuronal como sistema de control industrial.

A pesar de todas de las ventajas de una red neuronal hay que reconocer que el desempeño de sistema depende enteramente de la calidad del entrenamiento y esta parte representa una desventaja sobre otros sistemas de control ya que se requiere periféricos y las condiciones adecuadas para realizar un buen entrenamiento, debido a esto la puesta a punto de la red podría llevar un tiempo considerablemente más largo en relación con otros sistemas de control actuales. Sin embargo, al final de todo el entrenamiento y la propia corrección de su aprendizaje continuo la red demostraría ser más eficiente y adaptable.

Hoy en día se habla de sistemas flexibles de manufactura, manufactura asistida por computadora e industria 4.0, sin embargo, la mayoría de los sistemas en los que se basa estos conceptos siguen teniendo etapas de control rígidas y solo se les dota de una mayor cantidad de parámetros para manejar y una mayor capacidad de conexión, pero distan de poseer inteligencia para adaptarse a varios entornos y considerarse realmente inteligentes o flexibles. Lo anterior se denota con la propia definición de inteligencia a la que nos atenemos hoy en día y en ella se establece que la memorización de un texto no es inteligencia si no el entendimiento del propio texto y el reconocimiento de los patrones dentro del texto para su posterior interpretación y aplicación de conocimiento. Entonces los sistemas industriales actuales pueden considerarse como memorizadores de texto con gran capacidad conectiva pero no así mismo como verdaderos sistemas inteligentes.

Entonces la combinación de los sistemas actuales con el tipo de control expuesto en esta tesis podría dar como resultado un verdadero sistema inteligente y flexible capaz de adaptarse y aprender según los requerimientos de la industria sea cual sea esta industria. Esto quedó demostrado en el sistema propuesto en este trabajo pues el control de todo el sistema se efectúa mediante una red, sin embargo, el control para el posicionamiento de los servos se efectúa mediante un control tradicional como lo es el PID, esto se decidió así debido a la imprecisión inherente al prototipo pues los servos y estructura no permite que se alcance el valor propuesto por la red y con el control PID se puede efectuar una calibración de este error.

El sistema de control propuesto tiene características como una velocidad de respuesta alta, predicción de posiciones, posicionamiento aun con la falta de información previa y capacidad de aprendizaje por ende es perfectamente aplicable a la aplicación propuesta en este trabajo la cual es el control de temperatura en un reactor de pirolisis.

Para la incineración de residuos orgánicos por medio de reactores de termólisis y pirolisis se requiere el control preciso temperatura y presión debido a la ausencia de oxígeno. Recordemos que estos reactores generan 3 tipos de residuos aprovechables; carbón (sólido), metano (gas) y aceites (líquido). En esta situación un cambio de 2°C a 5°C en el reactor podría propiciar que se obtenga diferentes proporciones entre los residuos, esto es de suma importancia para la finalidad del reactor. Si un reactor se construye para proporcionar abono y diésel entonces se favorecerá las proporciones de carbón y aceite requiriendo temperaturas y presiones más bajas. Sin embargo, el reactor que se tomó para realizar este trabajo es orientado a la generación de energía, y para esto se debe obtener un mayor porcentaje de gas y por ende el reactor deberá realizar el proceso de gasificación el cual se lleva a cabo en el máximo de temperatura de 800°C donde podremos obtener un 85% de metano, 20% de carbón y 5% de aceite si esta temperatura baja se generara una mayor cantidad de carbón y aceite limitando la eficiencia del reactor. El control del reactor se efectúa por un equipo de control lógico programable el cual funciona mediante una retroalimentación de un sensor de temperatura, si la temperatura disminuye entonces se ajusta la fuente de calor, la cual suele ser la propia quema del carbón o diésel obtenido, este proceso es lento y contaminante, por tal motivo el colector podría realizar el calentamiento mediante energía solar y anticipar al requerimiento de temperatura antes de que la retroalimentación lo solicite, además añadiendo más parámetros al entrenamiento de la red se podría tomar en cuenta fenómenos como la presión atmosférica, temperatura ambiente y tipo de clima, los cuales afectarían el desempeño del reactor pero nunca se tomarían en cuenta en los sistemas de control tradicionales por el coste computacional o periféricos necesarios.

En cuanto al colector su diseño permite mantener un mayor control sobre la temperatura a diferencia de los diseños actuales que no permiten el desenfoque selectivo en sus espejos. De esta forma es posible no solo alcanzar temperaturas superiores debido a la concentración de la radiación debido a los espejos parabólicos si no regular dicha temperatura si se llegara a cambiar los parámetros del reactor o se requiriera menor energía. Debido a los 3 grados de libertad presentes en la estructura del colector se permite un seguimiento solar mas preciso pudiendo tomar una mayor cantidad de posiciones y por ende generar un enfoque de los rayos solares más eficiente, así mismo el diseño permite la inclusión de espejos sobre la misma estructura lo que hace un sistema modular o replicable de ser necesario, funcionando todos con el mismo sensor solar y la misma red.

El sistema creado representa la aplicación de una red neuronal a un control de tipo industrial aplicado a un sistema de calentamiento mediante energía solar para un reactor de pirolisis. Este sistema demostró tener una velocidad de reacción ante cambios del ambiente realmente alta, así como la flexibilidad suficiente para aprender y adaptarse a la aplicación necesaria o al rendimiento esperado en el reactor. Todo lo anterior corriendo en una tarjeta de bajo poder computacional lo que representa una reducción de costos en la parte del control. La capacidad de aprendizaje es la ventaja más destacable del sistema pues cada vez que se realice un nuevo entrenamiento se aumentara la eficiencia y el sistema mejorara, evolucionando para ser un sistema de control más avanzado.

Este tipo de desarrollos en la actualidad son necesarios pues llegamos a un punto tecnológico donde varias disciplinas, principalmente las disciplinas aplicadas al ámbito industrial se consideran completas y solo dan paso al aumento de eficiencia, mejora de los materiales y mejora en la eficiencia energética. Sin embargo, con la implementación de sistemas de control realmente inteligentes se abre un eje rector distinto que podrá cambiar el panorama de lo que entendemos como manufactura. Así mismo el que se busquen implementaciones en proyectos que mejoren la calidad de vida y ayuden a la conservación de la biodiversidad y sustentación de sistemas naturales es una prioridad dada la situación en la que se encuentra el planeta al día de hoy. El presente proyecto plantea una solución viable para el reciclaje de residuos orgánicos y la generación de energía, así como da una opción nueva para el control de procesos industriales.

6.2. Trabajo a futuro

Dado los estudios presentados en los apartados anteriores y como consecuencia de los experimentos presentados se puede plantear un diseño para el proceso de entrenamiento autónomo de la red sin supervisión humana, como una idea para desarrollos futuros, el cual constaría de una etapa de procesamiento de imágenes para garantizar la correcta orientación del sistema antes de proceder al entrenamiento de la red con nuevos patrones. El esquema de conexión de este sistema se presenta en la figura 5.10 y será explicado en los siguientes párrafos.

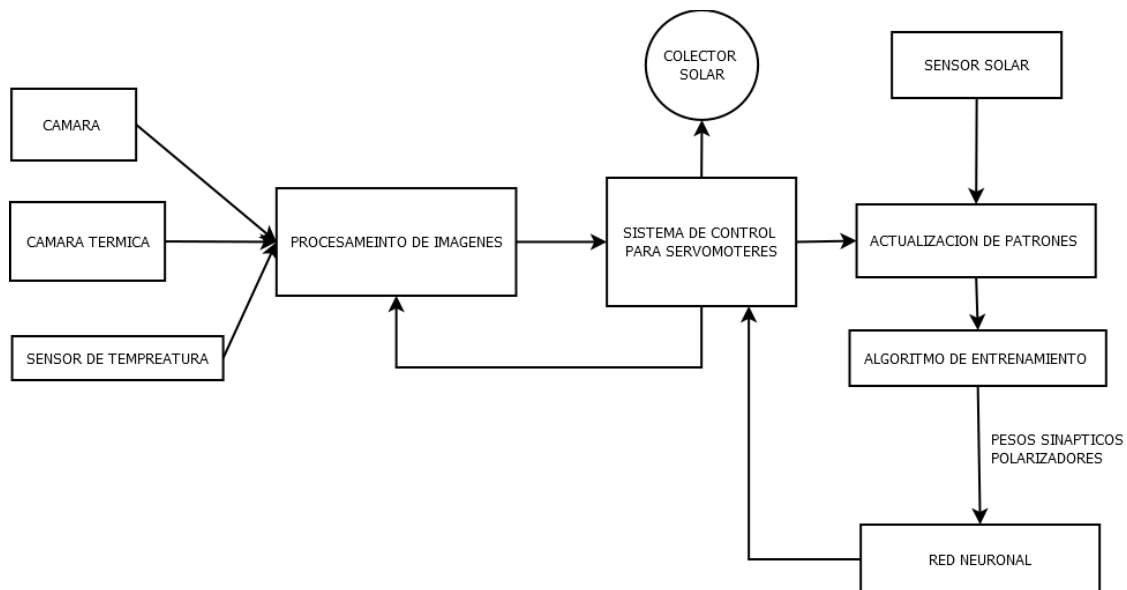


Fig. 5.10. Diagrama de conexión entre los sistemas para un aprendizaje automático.

El sistema contará con sensores ópticos y sensores superficiales. En cuanto a los sensores ópticos se usará una cámara sensible al espectro visible y una cámara infrarroja para detectar puntos calientes, adicionalmente se contará con un sensor de temperatura superficial, como lo es un termistor para altas temperaturas, el cual solo será para la comprobación de la posición de los espejos. Estos sensores enviarán datos al sistema de procesamiento de imágenes que se encargará de verificar la posición de los espejos y mandar datos al sistema de control para realizar la corrección de posición.

Lo anterior explicado conformará un sistema de visión el cual podrá suministrar datos de posición, esto se logrará mediante técnicas de detección de bordes y centroide en las imágenes. Primero la imagen se despoja del ruido como brillo o colores innecesarios esto es mediante la eliminación de una matriz de píxeles en la imagen, en la

figura 5.11 podemos la imagen original sin calibrar la posición del colector solar dejando que los espejes reflejen en puntos aleatorios y también se puede apreciar la imagen después del filtrado de ruido.



Fig. 5.11. Aplicación de filtrado para eliminar ruido de la imagen y obtener una imagen binaria en la imagen obtenida de la cámara de espectro visible.

Con el filtrado se logra detectar los puntos focales donde incide la radiación por los espejos parabólicos, y como se muestra en la imagen estos puntos están dispersos y son un caso donde la red no pudo determinar la posición adecuado por ende necesita corrección. Este mismo proceso se efectúa con la imagen térmica, esto se puede observar en la imagen 5.12.

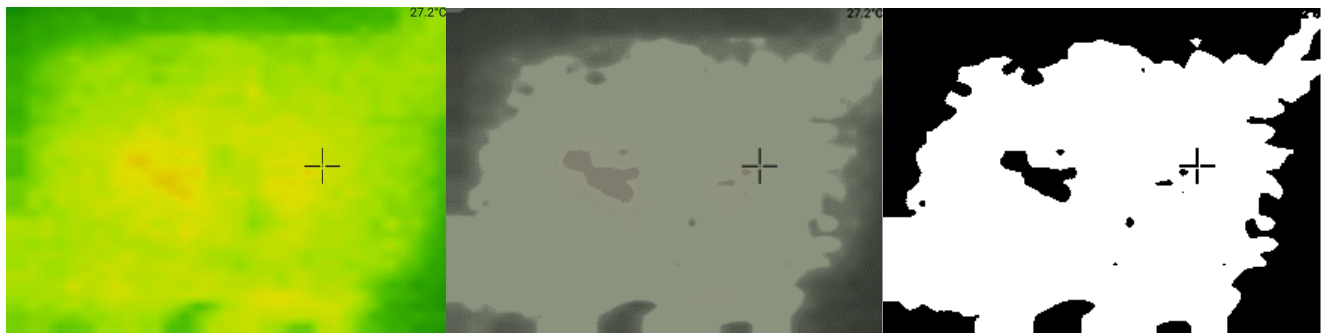


Fig. 5.12. Aplicación de filtrado para eliminar ruido de la imagen y obtener una imagen binaria en la imagen obtenida de la cámara de espectro infrarrojo.

Para evitar errores se puede realizar, antes de obtener la imagen binaria como la tercera imagen en las figuras 5.11 y 5.12, un filtrado mediante un umbral de píxel donde podemos modificar el valor del píxel para que no sea tan variable y se puedan delimitar los puntos focales con mejor precisión y así obtener la imagen binaria que es apta para un procesamiento digital bastante preciso. Se utilizan las imágenes de dos cámaras distintas para evitar errores y crear un sistema redundante ya que una se basa en el reflejo del punto focal y la otra en la diferencia de temperatura de la superficie.

En ambas imágenes se realiza una operación de detección de contornos y cálculo de centroide para determinar la distancia de los puntos focales con respecto al centro de la imagen que es donde estará apuntando el espejo central que sirve de referencia.



Fig. 5.13. Cálculo de centroide en la imagen binaria.

Una vez obtenido los centroides, mostrados en la figura 5.13 se puede medir la distancia que requiere corrección y utilizar el método de composición de matrices para determinar las coordenadas o en este caso el ángulo que debe tener el servo que controla el espejo, recordemos que previamente se calculó la cinemática del colector solar mediante los parámetros de Denavig-Hartenberg por ende se tiene la información para hacer la composición de matrices de transformación homogénea.

El resultado de lo anterior sería lo mostrado en la imagen 5.14 donde podemos ver la orientación de los espejos en un solo punto focal de 8cm de diámetro.



Fig. 5.14. Sistema corregido mediante visión

Una vez verificado la obtención del punto focal por medio de visión, se guardarán los datos del sensor solar y los datos de los encoders de los servos en una matriz de patrones como la explicada y mostrada en el capítulo anterior, con esto se obtendrá una actualización de patrones.

Cabe destacar que este sistema aunque pareciera análogo al control por medio de las redes neuronales la realidad es que solo funcionaría como apoyo ya que no es un sistema rápido en cuanto a reacción y depende de varios periféricos para funcionar además de necesitar un mayor poder de cómputo por ende solo se decidió plantearlo como un apoyo para entrenamiento en caso de que la red requiere alguna corrección o para alimentar de patrones nuevos que mejoren la precisión de la red, además de que la red con suficiente información puede tomar decisiones y predecir salidas sin que conozca previamente las entradas dadas.

Lo anterior se presenta como una opción a mejora del sistema tratado en la presente tesis, esta mejora debería incrementar la eficiencia y permitir un aprendizaje de la red durante periodos más largos de funcionamiento.

Bibliografía

- [1] Fischer-Kowalsk, Mark Swilling, Ernst Ulrich von Weizsäcker. (2011). Desacoplar el uso de los recursos naturales y los impactos ambientales del crecimiento económico. 2018, de PNUMA Sitio web: <https://www.zaragoza.es/contenidos/medioambiente/onu/349-spa-sum.pdf>
- [2] Daniel Hoornweg, Perinaz Bhada-Tata. (2012). WHAT A WASTE A Global Review of Solid Waste Management. 2018, de World Bank Sitio web: <http://documentos.bancomundial.org/curated/es/302341468126264791/pdf/68135-REVISED-What-a-Waste-2012-Final-updated.pdf>
- [3] <http://www.atlas.d-waste.com>
- [4] <http://sie.energia.gob.mx>
- [5] Alvaro Zurita. (2016). Experiencia alemana en el aprovechamiento energético de residuos municipales. 2018, de Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) Sitio web: <http://www.proyectomesoamerica.org:8088/emsa/documentos/Capacitaciones/ForoTecCDMX/Bloque%20III.%20Experiencia%20alemana%20en%20el%20aprovechamiento%20energetico%20de%20residuos%20municipales%20-%20Alvaro%20Zurita%20GIZ.pdf>
- [6] Gonzales, Rafael. 2018. Genera Puebla El 3% De Basura Diaria En México. Disponible en: http://www.milenio.com/puebla/Genera-Puebla-basura-diaria-Mexico_0_1111088993.html
- [7] Valdez, Ilich. (2017). Ciudad de México será ejemplo mundial de tratamiento de basura. Disponible en: http://www.milenio.com/df/basura_tratamiento-ciudad_mexico-reciclaje-planta_termovalorizadora-milenio-noticias_0_975502810.html
- [8] Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. México. 1988. (Última reforma 4 junio 2012).
- [9] Nancy Jiménez. (2015). La gestión integral de residuos sólidos urbanos en México entre la intención y la realidad. 2019, de Letras Verdes Sitio web: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5444145>
- [10] Hontoria García, E. y Zamorano Toro, M. (2000). Fundamentos del manejo de los residuos urbanos. Colección sénior 24. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. España. 756 pp.
- [11] TCHOBANOGLOUS, G.; THEISEN, H. y VIGIL, S. A. (1994). Gestión integral de residuos sólidos. Ed. Mc Graw-Hill. Madrid. 1107 pp.
- [12] Secretaria del medio ambiente, Curso interactivo de manejo responsable de los residuos sólidos del gobierno de la ciudad de Mexico, <http://cursoslibres.academia.mx/217/manejo-responsable-de-residuos-solidos-curso-interactivo>.
- [13] María Perona. (2016). Tendencias en el tratamiento de residuos urbanos en Europa. Marzo 2019, de Zero Waste Europe Sitio web: <http://www.vidasostenible.org/informes/tendencias-en-el-tratamiento-de-residuos-urbanos-en-europa/>
- [14] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2017). Información sobre residuos sólidos urbanos. Enero 2019, de SEMARNAT Sitio web: <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/residuos-solidos-urbanos-rsu>
- [15] D. Czajczynska, L. Anguilano, R. Krzyzyska. (21 de abril 2017). Potential of Pyrolysis processes in the waste managment sector. Thermal Science and Engineering Progress, 3, 171-197.
- [16] Michael Klug. (2012). Pirolisis un proceso para derretir la biomasa. Revista Química PUCP, 26, 37-41.

- [17] Álvaro Zurita. (2016). Experiencia alemana en el aprovechamiento energético de residuos municipales. 3 de mayo del 2018, de Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) Sitio web: <http://www.proyectomesoamerica.org:8088/emsa/documentos/Capacitaciones/ForoTecCDMX/Bloque%20III.%20Experiencia%20alemana%20en%20el%20aprovechamiento%20energetico%20de%20residuos%20municipales%20-%20Alvaro%20Zurita%20GIZ.pdf>
- [18] Schmidt, Lanny D., The Engineering of Chemical Reactions. New York: Oxford University Press, 1998. ISBN 0-19-510588-5.
- [19] Gayé, Jesús Biel (1997). Curso sobre el formalismo y los métodos de la termodinámica. Reverte. ISBN 9788429143430. Consultado el 4 de marzo de 2018.
- [20] Stanley M. Walas, Chemical Process Equipment, Selection and Design cap.17 ISBN 0-7506-9385-1
- [21] Moustakasa, K.; Fattab, D.; Malamisa, S.; Haralambousa, K.; Loizidoua, M. (31 de agosto de 2005). «Demonstration plasma gasification/vitrification system for effective hazardous waste treatment». Journal of Hazardous Materials 123 (1–3): 120-126. doi:10.1016/j.jhazmat.2005.03.038. Plantilla:Required subscription. Consultado el 8 de marzo de 2012.
- [22] Kalinenko, R. A.; Kuznetsov, A. P.; Levitsky, A. A.; Messerle, V. E.; Mirokhin, Z. B.; Polak; Sakipov, L. S.; Ustimenko, A. B. (1993). «Pulverized coal plasma gasification». Plasma Chemistry and Plasma Processing 13 (1): 141-167. doi:10.1007/BF01447176. Plantilla:Required subscription. Consultado el 8 de marzo de 2012.
- [23] Huang, H.; Lan Tang, C. Z. Wu (2003). «Characterization of Gaseous and Solid Product from Thermal Plasma Pyrolysis of Waste Rubber». Environmental science & technology 37 (19): 4463-4467. Consultado el 12 de marzo de 2013.
- [24] aboada-González, P., Aguilar-Virgen, Q., Armijo-de Vega, C., La tecnología de plasma y residuos sólidos. Ingeniería [en línea] 2009, 13 (Mayo-Agosto) : [Fecha de consulta: 20 de mayo de 2019] Disponible en:<<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46713053006>> ISSN 1665-529X
- [25] <https://www.cronista.com/columnistas/Termovalorizacion-la-ciencia-de-generar-energia-con-basura-20180413-0021.html> Copyright © www.cronista.com
- [26] https://www.um.es/cepoat/pantarei/wp-content/uploads/2014/11/2007_articulo3.pdf
- [27] Diego Armando Mejía Bugallo, Ivaldo Torres Chávez, Jorge Luis Díaz Rodríguez. (2016). CONTROL MPPT APLICADO A SISTEMAS GIRASOL PARA LA MÁXIMA EFICIENCIA. Revista Colombiana de Tecnología Avanzada, Vol 1, 27. http://ojs.unipamplona.edu.co/ojs_viceinves/index.php/RCTA/article/view/2546
- [28] <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/5577>
- [29] <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/8447>
- [30] Joel Hernández Velázquez. (2018). DESIGN AND CONSTRUCTION OF A SOLAR TRACKER FOR SOLARIMETRY APPLICATIONS. Revista Iberoamericana de producción académica y gestión educativa, vol. 5, 10.
- [31] Batista, C. R. y Urquiza, R. I. Cálculo y análisis de la máxima eficiencia anual de los seguidores solares, Entre Ciencia e Ingeniería, vol. 12, no. 24, pp. 25-31, julio-diciembre, 2018. DOI:<http://dx.doi.org/10.31908/19098367.3812>.
- [32] Francisco R. Rubio, Sergio J. Navas, Pedro Ollero, Joao M. Lemos, Manuel G. Ortega. (2018). Control Óptimo Aplicado a Campos de Colectores Solares Distribuidos. junio 2019, de Universidad Politécnica de Valencia Sitio web: <https://polipapers.upv.es/index.php/RIAI/article/view/8944>

- [33] KLUG, Michael. Pirólisis, un proceso para derretir la biomasa. Revista de Química, [S.l.], v. 26, n. 1-2, p. 37-40, apr. 2012. Disponible en: <<http://revistas.pucp.edu.pe/index.php/quimica/article/view/5547>>. Fecha de acceso: 27 june 2019
- [34] Demetrio Marcos Santamaría Orozco^{1*}, Myriam Adela Amezcua Allieri¹ y Teresita de Jesús Carrillo Hernández¹. (diciembre 2009). Petroleum generation through pyrolysis experiments: a review. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Vol. 61, pag. 3.
- [35] Aragonéz González, Martha Patricia. (2015). Análisis Termogravimétrico de la Pirólisis de Biosólidos de la Planta de Tratamiento de Agua Residual El Salitre. Junio 2019, de Universidad Nacional de Colombia Sitio web: <http://www.bdigital.unal.edu.co/48357/>
- [36] Sergio Morales, Rosa Miranda, Diana Bustos, Thania Cazares, Honghi Tran. (septiembre 2014). Solar biomass pyrolysis for the production of bio-fuels and chemical commodities. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, vol. 109, 65-78.
- [37] Martínez Salas, José Daniel. (2013). Reactor solar para la producción de biodiesel. Junio 2019, de UNICACH Sitio web: <https://repositorio.unicach.mx/handle/20.500.12114/1993>
- [38] M.U.H. Joardder, P.K. Halder, M.A. Rahim, M.H. Masud. (2017). Clean Energy for Sustainable Development: Comparisons and Contrasts of New Approaches. Australia : Elsevier.
- [39] Asif H. Rony, Daniel Mosiman, Zhao Sun, Dengfeng Qin, Yuan Zheng, John H. Boman, Maohong Fan. (Junio 2018). A novel solar powered biomass pyrolysis reactor for producing fuels and chemicals. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, vol. 132, 19-32.
- [40] Kuo Zeng, Daniel Gauthier, José Soria, Germán Mazza, Gilles Flamant. (noviembre 2017). Solar pyrolysis of carbonaceous feedstocks: A review. Solar Energy, vol. 126, 73-92.
- [41] Proaño Ricardo, Gube Gisela, Paucar Luis (Julio 2019). Elaboración de una normativa para el diseño y diagnóstico de sistemas fotovoltaicos residenciales autónomos para el Ecuador. Sitio Web: https://www.researchgate.net/figure/Figura-119-Concentrador-cilindro-parabolico_fig12_45234985
- [42] Mercados Eléctricos - IEE3372, Junio 2012
- [43] Sendoya Diego. (2012). ¿Que es el control predictivo y hacia donde se dirige? Junio 2020, de Universidad Neiva Colombia Sitio web: <http://oaji.net/articles/2017/5082-1501183303.pdf>
- [44] MARTÍN DEL BRÍO, Bonifacio, Redes Neuronales y Sistemas Difusos, 2ª ed, México DF, Editorial Alfa Omega, 2002, p. 41 – 84.
- [45] Cayre, Myriam; Jordane Malaterre, Sophie Scotto-Lomassese, Colette Strambi and Alain Strambi. The common properties of neurogenesis in the adult brain: from invertebrates to vertebrates. Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology. Volume 132, Issue 1, May 2002, Pages 1-15.
- [46] Kole, Maarten HP; Stuart, Greg J (2012). Signal processing in the axon initial segment. Neuron (Revisión) 73 (2): 235-247.
- [47] Gurney, K. (1997) An Introduction to Neural Networks. London: Routledge. ISBN 1-85728-673-1
- [48] W. S. McCulloch y W. Pitts, "A logical calculus of the ideas immanent in neurons activity", Bull. Math. Biophys., 5, 115-133, (1943).
- [49] M. L. Minsky, Computation: Finite and Infinite Machines, (Prentice Hall, N. J.), 286, (1967).
- [50] L. Zhang y B. Zhang, "A Geometrical Representation of McCulloch-Pitts Neural Model and Its Applications", IEEE Transactions on Neural Networks, 10, (4), 925-929, (1999).

[51] W. S. McCulloch y W. Pitts, "A logical calculus of the ideas immanent in neurons activity", Bull. Math. Biophys., 5, 115-133, (1943). 2. M. L. Minsky, Computation: Finite and Infinite Machines, (Prentice Hall, N. J.), 286, (1967). 3. L. Zhang y B. Zhang, "A Geometrical Representation of McCulloch-Pitts Neural Model and Its Applications", IEEE Transactions on Neural Networks, 10, (4), 925-929, (1999).