

**Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”**

Facultad de Ingeniería Química-Mecánica

Departamento Ingeniería Química



## *Trabajo de Diploma*



***Título:*** Simulación de fotobiorreactor para biocombustible microalgal, combinado con un combustor para la Central Termoeléctrica Antonio Guiteras Holmes.

***Autor:*** Yacquel García Palacio.

***Tutor:*** DrC. Julio Ernesto Díaz Díaz.

***Cotutor:*** Lic. Yatali Montero Sánchez Rojas.

Matanzas, junio 2013.  
"Año 55 de la Revolución"

*Opinión del Tutor:*

---

---

---

---

---

**DrC. Julio Ernesto Díaz Díaz.**

*Nota de Aceptación:*

---

---

---

---

---

---

---

---

*Presidente del Tribunal*

---

*Secretario del Tribunal*

---

*Vocal del Tribunal*

*Matanzas,      \_\_\_\_\_  de      \_\_\_\_\_  de      \_\_\_\_\_*

### *Declaración de Autoridad.*

Yo Yacquel García Palacio declaro que soy el único autor de esta Tesis de Diploma que lleva por título “Simulación de fotobiorreactor para biocombustible microalgal, combinado con un combustor para la Central Termoeléctrica Antonio Guiteras Holmes” concediéndole autorización a la Facultad de Ingeniería Química-Mecánica de la Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos” a hacer uso de la misma con la finalidad que estime necesaria.

*Pensamiento*

*“El riesgo varía inversamente con los conocimientos”*

*Irving Fisher, 1930.*

***Dedicatoria:***

*A mi abuelito, donde quiera que estés te sientas orgulloso de mí.*

*A mi motor impulsor : mi mamá, mi papa y mi hermano que siempre han estado  
ocupándose de mí.*

*A mi papá porque este día es su cumpleaños.*

*A toda mi familia por apoyarme siempre.*

*A mi mujer, por su ayuda y todo el amor que me brinda..*

## ***Agradecimientos:***

*A mi Tutor Julio, por su ayuda incondicional.*

*A Judyt Díaz por su dedicación en todo momento.*

*Al el ICINAZ, en especial a Yatali por brindarnos su apoyo.*

*A mi prima Ivvia por su colaboración.*

*A mis amistades.*

*A todas las personas que de una forma u otra aportaron un granito para hacer realidad  
este sueño.*

*A mí mismo por ser perseverante ante las dificultades.*

## *Resumen*

*Ocean Thermal Energy Conversión (OTEC)* consiste en una tecnología donde usa el gradiente de temperatura del océano para producir electricidad. Se basa en el Ciclo de Rankine Orgánico, una variación del anterior en el cual se sustituye el agua por un fluido con un punto de ebullición muy bajo, por ejemplo, el amoníaco. Para enfriar el líquido y reiniciar el ciclo, se usa el agua más fría del océano. ¿En qué consiste la fuente de calor?, el sol calienta la superficie del océano y este calor es aprovechado por la *OTEC*. Precisamente el presente trabajo de diploma tiene como objetivo principal el empleo de esta ciencia aplicada y simular en el software profesional MATLAB la producción de biomasa microalgal de *Chlorella vulgaris* en fotobioreactor para satisfacer la demanda energética de un Ciclo OTEC en la Central Termoeléctrica “Antonio Guiteras Holmes”, está última como aportadora de calores residuales para el funcionamiento del evaporador.

Además, se demuestran las posibilidades de utilizar esta tecnología y es evaluado el desarrollo de la misma. Entre los objetivos específicos del trabajo se encuentra analizar la variante tecnológica de acoplamiento entre la combustión del biocombustible microalgal y la tecnología OTEC. También se realiza un cálculo preliminar del costo de inversión inicial de la planta nombrada por el autor como BIOTEC, basado en valores reportados en la literatura. Finalmente, la generación eléctrica propuesta de 10 MW se logra, en una simulación empleando el *software Aspen Hysys2006*.

## *Summary*

Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) it consists on a technology where it uses the gradient of temperature of the ocean to produce electricity. It is based on the Cycle of Organic Rankine, a variation of the previous in the one which the water is substituted by a fluid with a very low point of boil, for example, the ammonia. To cool the liquid and to restart the cycle, the coldest water in the ocean is used. On what does it consist the source of heat?, does the sun heat the surface of the ocean and is east heat taken advantage of by OTEC. The present diploma work has as main objective the employment of this applied science and to simulate in the professional software MATLAB the production of biomass microalgal of *Chlorella vulgaris* in fotobioreactor to satisfy the energy demand of a Cycle OTEC in the Thermoelectric Power Station "Antonio Guiteras Holmes main contribution of residual heats for the evaporador of the Cycle OTEC.

Also, the possibilities are demonstrated of using this technology and the development of the same one is evaluated. Among the specific objectives of the works finds to analyze the technological variant of joining between the combustion of the biocombustible microalgal and the technology OTEC. Is also carried out a preliminary calculation of the cost of initial investment of the plant named by the author like BIOTEC, based on values reported in the literature. Finally, the generation electric proposal of 10 MW is achieved, in a simulation using the software Aspen Hysys2006.

# Índice

<i>Resumen</i> .....	8
<i>Summary</i> .....	9
<i>Índice</i> .....	10
<i>Introducción</i> .....	1
<i>Capítulo I: Estado del Arte</i> .....	6
I.1 Consumo excesivo de combustible y energía.....	6
I.1.1 Fuentes alternativas .....	7
I.2 Antecedentes de los Sistemas OTEC .....	11
I.3 Fundamento de la energía OTEC .....	12
I.3.1 Ventajas de la tecnología OTEC.....	14
I.3.2 Costos de los sistemas OTEC.....	14
I.4 Sistema OTEC: Biocombustibles microalgal .....	16
I.4 .1 Calores de rechazo en procesos industriales .....	17
I.4 .2 Beneficios de los biocombustibles .....	17
I.4 .3 Ventajas del biocombustible microalgal .....	18
I.5.1Caracterización de la microalga <i>Chlorella vulgarises</i> .....	19
I.5.2 Estanques de microalgas .....	20
I.5.3Los fotobiorreactores. ....	21
I.5.3 .1Tipos de fotobiorreactores. ....	22
I.6. Herramientas computacionales .....	23
I.7Software Aspen HYSYS 2006.....	24
<i>Capítulo II: Materiales y Métodos utilizados en la investigación</i> .....	26
II.1 Descripción del objeto de estudio .....	26
II.2.2 Materiales .....	30
II.2.3 Diseño experimental .....	30
❖ Descripción: .....	30
II.2.4 Determinación de la biomasa .....	30
II.2.5 Cinética de crecimiento .....	32
❖ Descripción .....	32
II.3 Modelación –simulación de procesos.....	32
II.3.1 Descripción del modelo matemático.....	32
II.3.2 Software MATLAB (MATrix LABoratory).....	33

II.4 Estimación del poder calórico .....	35
II.5 Orden cronológico para el cálculo de los parámetros de diseño fotobiorreactor ....	36
II.6 Validación del paquete de propiedades .....	36
II.7 Metodología para la simulación en HYSYS.....	37
II.8 Estimación de costos .....	40
II.8.1 Costo aproximado fotobiorreactores.....	40
II.8.2 Costo aproximado del Sistema OTEC propuesto .....	41
II.8.3 Estimado del tiempo de la recuperación de la inversión inicial.....	41
II.9- Determinación de la emisión de sustancias contaminantes durante su combustión .....	42
II.10- Beneficios .....	42
<i>Capítulo III: Resultado y Análisis</i> .....	43
III.1 Estudio para la determinación del crecimiento de la microalga <i>Chlorella</i> .....	43
III.1.1 Cinética de crecimiento .....	45
III.2 Resultados de la simulación del crecimiento celular en el software Matlab.....	47
III.2.1.....	48
III.3. Cálculo del valor calórico de la microalga. ....	49
III.4 Validación del paquete de propiedades.....	49
III.5 Simulación del ciclo de acople.....	50
III.6 Estimación económica .....	51
III.6.1 Cálculos de los parámetros de diseño fotobiorreactor .....	51
III.6.3 Análisis del estimado del tiempo de recuperación de la inversión .....	55
<i>Conclusiones:</i> .....	58
<i>Recomendaciones:</i> .....	59
<i>Bibliografía:</i> .....	60
<i>Anexos:</i> .....	64

## *Introducción*

El momento donde se comenzó a notar la necesidad imperiosa del aprovechamiento renovable de los recursos naturales para un medio de locomoción, calefacción para un hogar, o simplemente transformar la energía encontrada en el medio ambiente en un bien útil para el hombre; comienza con fuerza internacional a finales del siglo pasado y principio del actual. Las aplicaciones más lejanas de las fuentes renovables, sitúan a la navegación a vela y la primitiva hidráulica en transformar el movimiento del agua terrestre en energía de cinética para diversos fines, dentro de las primeras utilizadas por el hombre para su bienestar. La posterior aparición de los molinos de viento reforzaba el uso de las fuentes renovables; también otro aspecto, utilizado por los antiguos egipcios, fue un diseño de los edificios para aprovechar la energía solar durante el día. El posterior progreso de las energías renovables se vio principalmente afectado por el fenómeno de la Revolución Industrial, la mayor utilización de combustibles fósiles y las mejoras aplicadas a los motores térmicos, lo cual en sus primeros años contaban en apariencias con una fuente inagotable de recursos.

Durante los últimos tres siglos, la industrialización de todos los países del mundo se ha basado esencialmente en la combustión de carbón e hidrocarburos. Las mayores exigencias de calidad de vida de los países más avanzados, ha acarreado una fuerte dependencia y consumo de estas fuentes de energía. La consecuencia de tal despilfarro, ya es conocida: las fuentes tradicionales de energía, que necesitaron millones de años para formarse, provenientes en su mayor parte de la descomposición de materia orgánica, se están agotando, y emiten elevados niveles de contaminación a la atmósfera y los ecosistemas marinos y terrestres.

La producción y consumo de energía en el mundo presentan grandes desigualdades, las cuales están directamente relacionadas con el desarrollo de cada país. El rápido desarrollo de las sociedades industriales durante el siglo XX estuvo íntimamente unido con la disponibilidad de energía a bajo precio. Se ha

mantenido, por tanto, una estrecha relación entre el crecimiento económico y consumo de energía; el mundo se enfrenta al reto de suministrar energía a una población creciente, con el mayor incremento del crecimiento en los países actualmente considerados pobres.

En la actualidad se ha llegado a la conclusión que la producción de energía no sólo se puede basar en criterios puramente económicos, ni es suficiente con añadir los criterios medioambientales; ya que la producción de energía también debe basarse en criterios éticos, es decir, en una distribución más justa de los recursos energéticos y la riqueza.

Hoy, las condiciones sostenibles para el desarrollo global de la humanidad sólo son compatibles con el uso de las energías renovables. El Mundo se encuentra a la derecha del punto de inflexión entre aquellas energías que significaban un impacto ambiental, y aquellas denominadas como energías limpias, por su baja o nula condición contaminante, en un principio llamadas “energías alternativas”.

Un ejemplo internacional reciente sobre la importancia del uso de las fuentes renovables, fueron los Juegos Olímpicos y Paralímpicos de Londres 2012, en los cuales desde su concesión constructiva hasta su funcionamiento y final fueron una magnífica oportunidad para compartir experiencias sobre el tema de las energías renovables.

Cuba, se proyecta a inclinar la balanza hacia el uso de la energía renovable. En la VII Conferencia Internacional de Energía Renovable, Ahorro de Energía y Educación Energética, CIER 2011, investigadores cubanos y extranjeros brindaron un amplio resumen de las principales inversiones ejecutadas en Cuba desde el año 2006 y hasta el 2010 con las siguientes acciones: funcionamiento de tres parques eólicos de prueba con una potencia de generación total de 11,25 MW, se instalaron 100 estaciones de medición del viento para el estudio del potencial eólico, se inauguró la fábrica de calentadores solares de tubos al vacío con una capacidad de producción de más de 30000 equipos al año y se construyeron 133 digestores de biogás.

El grupo multidisciplinario *OTEC (Ocean Thermal Energy Conversion)* de la Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos” ha venido desarrollando diversas investigaciones y trabajos en el marco de la energía renovable para una Producción Más Limpia (P+L). Las nuevas variantes técnicas propuestas por el grupo incluyen desde la utilización de diferentes fuentes de calor adicionales al foco caliente del agua de mar superficial, ciclos mixtos y agentes de trabajo de mayor eficiencia hasta la disminución de los costos medioambientales, por la disminución o la eliminación de la quema de combustibles, y además, la alternativa que representa las microalgas para la obtención de biocombustible y su combinación con la propia tecnología OTEC.

El Grupo *OTEC* trabaja con diferentes entidades, entre ellas la Central Termoeléctrica “Antonio Guiteras Holmes” de la provincia de Matanzas con incidencias negativas y afectaciones a los ecosistemas del área productiva; además, cuestionado su proceso productivo por el alto consumo de petróleo.

Por tanto; la situación problemática permite formular el **problema científico**: Existe la necesidad imperiosa de validar tecnologías renovables para su implementación en la Central Termoeléctrica “Antonio Guiteras Holmes”.

Expuesto lo anterior se puede establecer para la investigación la siguiente **hipótesis**: La simulación de un fotobiorreactor para el cultivo de *Chlorella vulgaris* para su combustión posterior como biocombustible, combinado con un ciclo OTEC; pudiera proyectarse en la Central Termoeléctrica “Antonio Guiteras Holmes”, como variante tecnológica en su aplicación en el procesamiento de ahorro de combustible.

Teniendo en cuenta la hipótesis anterior, se plantea como **objetivo general** el siguiente: Simular en software profesional MATLAB la producción de biomasa microalgal de *Chlorella vulgaris* en fotobiorreactor para satisfacer la demanda energética de un Ciclo OTEC en la Central Termoeléctrica “Antonio Guiteras Holmes”.

Para lograr el mismo se plantean los siguientes objetivos específicos:

- 1- Profundizar en la bibliografía en relación con la temática a tratar.
- 2- Evaluar la cinética de crecimiento de la ***Chlorella vulgaris*** a escala de laboratorio y la producción del biocombustible microalgal.
- 3- Simular la obtención de biomasa en el software Matlab analizando la posibilidad de uso a partir de los requerimientos energéticos de la Central Termoeléctrica “Antonio Guiteras Holmes”.
- 4- Analizar una variante tecnológica de acoplamiento entre la combustión del biocombustible microalgal y la tecnología OTEC.
- 5- Calcular aproximadamente la factibilidad técnico económica de la variante simulada.

Las principales tareas a desarrollar son las siguientes:

- Procesamiento de los resultados en los últimos dos años sobre el combustible microalgal.
- Búsqueda del costo actual de los fotobiorreactores.
- Búsqueda de la información reciente de la tecnología OTEC.
- Caracterización y selección del tipo de microalga.
- Diseño del ciclo del biocombustible microalgal a utilizar.
- Obtención de biomasa microalgal en el ICINAZ.
- Montaje y funcionamiento del escalado al nivel de laboratorio en la UMCC.
- Cálculo del valor calórico del biocombustible microalgal a partir de datos de la literatura.
- Evaluación el diseño de un fotobioreactor.
- Entrenamiento en los softwares simuladores.
- Modelación y simulación.
- Análisis técnico y económico.

Novedad científica:

Simulación de un sistema de obtención de biomasa de *Chlorella vulgaris* para la obtención de biocombustible microalgal y aporte calorífico para el sobrecalentador de un Ciclo OTEC.

## *Capítulo I: Estado del Arte*

En el capítulo se aborda el marco teórico referencial con el objetivo de facilitar la comprensión de esta investigación, el cual contiene conceptualmente los diferentes tipos de energía renovable, con especial énfasis en la energía OTEC en su historia, recursos necesarios, invenciones, costos y beneficios de la tecnología en cuestión.

### **I.1 Consumo excesivo de combustible y energía.**

Según Echevarría (1). El medio ambiente es todo aquello que nos rodea, y de donde el hombre obtiene los recursos necesarios para su desarrollo en las actividades que realiza diariamente. Por otro lado, la interacción del ser humano con la naturaleza es el factor más relevante que ha impactado de manera drástica en el equilibrio ambiental. Desde que el ser humano apareció sobre la Tierra, ha sido capaz de modificar el medio ambiente con sus actividades. Gracias a sus capacidades mentales y físicas ha modificado el ecosistema natural para adaptarlo a sus necesidades de vida.

El uso excesivo de combustibles fósiles, es la causa de diversos problemas ambientales que se ven presente en el planeta, tales como el calentamiento global, efecto invernadero; debido a la acción producida por las emisiones de gases contaminantes y excesivo consumo de combustibles fósiles, no dejan escapar los rayos del sol que entran al planeta.

La lluvias acidas, según Echevarría (1), es un problema causado por el uso de combustibles fósiles y se debe a la emisión de dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno por las centrales térmicas y por los escapes de los vehículos a motor, que al entrar en contacto con el vapor de agua en la atmósfera, al momento de condensarse el agua, cae en forma de precipitación.

“En 1985 se descubrió la existencia de un gran agujero ubicado sobre la Antártida. En el año 2001 el agujero alcanzó una superficie de 26. 000.000 km<sup>2</sup>; tamaño similar al de los últimos tres años.

Este problema de la desaparición y adelgazamiento de la capa de ozono expone a la vida terrestre a un exceso de radiación ultravioleta, que puede ocasionar cáncer de piel y cataratas, debilitamiento del sistema inmunológico, interferir con el proceso de fotosíntesis de las plantas y afectar con el crecimiento del fitoplancton en el océano. El deterioro de la capa de ozono en la Antártida, se ha ido incrementando a grandes niveles”.

Debido a los males causados por el excesivo consumo de combustibles fósiles se hace imprescindible la búsqueda y desarrollo de fuentes alternativas para la sustitución a corto plazo de los recursos fósiles.

### I.1.1 Fuentes alternativas

La utilización de las fuentes alternativas para producir energía son la solución a corto plazo para resolver los problemas causados por el consumo excesivo de combustibles fósiles. A continuación serán mencionadas algunas alternativas de energía renovable.

#### ❖ Biomasa

Según González (2), la biomasa es un recurso ampliamente distribuido que incluye, la biomasa forestal y los residuos de la industria de elaboración de la madera, cultivos energéticos, residuos agrícolas y efluentes agroalimentarios, estiércoles y la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales y los lodos de aguas residuales. La energía procedente de la biomasa es versátil ya que puede servir para producir electricidad, calor o carburante de transporte según convenga y, al contrario de la electricidad, puede almacenarse de forma sencilla y normalmente económica. Además, las unidades de producción pueden variar de escala desde las más pequeñas hasta las de varios megavatios.

La explotación de la biomasa ofrece el doble beneficio de explotar una fuente importante de energía renovable y de mejorar al mismo tiempo la situación medioambiental y climática. Claramente, el desarrollo de la explotación de la biomasa exigirá un cuidado especial para proteger la diversidad biológica adoptando estrategias y soluciones que minimicen los efectos negativos en este

ámbito. Según Biofiedls (3).A diferencia de los combustibles fósiles que provienen de la energía almacenada durante largos períodos en los restos fósiles, los biocombustibles provienen de la biomasa o materia orgánica que constituye todos los seres vivos del planeta. La biomasa es una fuente de energía renovable, pues su producción es mucho más rápida que la formación de los combustibles fósiles. Entre los cultivos posibles de utilizar para la elaboración de biocombustibles, están los de alto contenido de carbohidratos caña de azúcar, maíz, mandioca, la oleaginosa soja, girasol, palmas, y los microorganismos micro algas.

#### ❖ Energía hidráulica

Según Bond (4), una aplicación muy interesante para pequeñas instalaciones cerca de saltos de agua es la mini central hidráulica, con potencias entre 100 W y 5 KW, pudiéndose combinar con otras energías. Las aplicaciones son enormes, ya que las tres cuartas partes de la humanidad carecen de energía eléctrica con la que obtener agua potable, iluminación, herramientas eléctricas, conservación de los alimentos o acceso a la cultura. Actualmente estos sistemas constituyen la mejor ayuda directa para el tercer mundo.

#### ❖ Energía solar-fotovoltaica.

Uno de los métodos para la captación solar es el de la conversión fotovoltaica, el cual consiste en convertir la energía solar en energía eléctrica por medio de células solares. Estas células están elaboradas a base de silicio puro con adición de impurezas de ciertos elementos químicos, y son capaces de generar una corriente cada una de 2 a 4 A, o un voltaje de 0.46 a 0.48 V, utilizando como materia prima las radiaciones solares. Admiten tanto la radiación directa como la difusa, lo que quiere decir que se puede conseguir energía eléctrica incluso en días nublados. Las células se montan en serie sobre paneles o módulos solares para conseguir un voltaje adecuado a las aplicaciones eléctricas; los paneles captan la energía solar transformándola directamente en eléctrica en forma de corriente continua, que será preciso almacenar en acumuladores para poder utilizarla fuera de las horas de luz Según Bond (4).

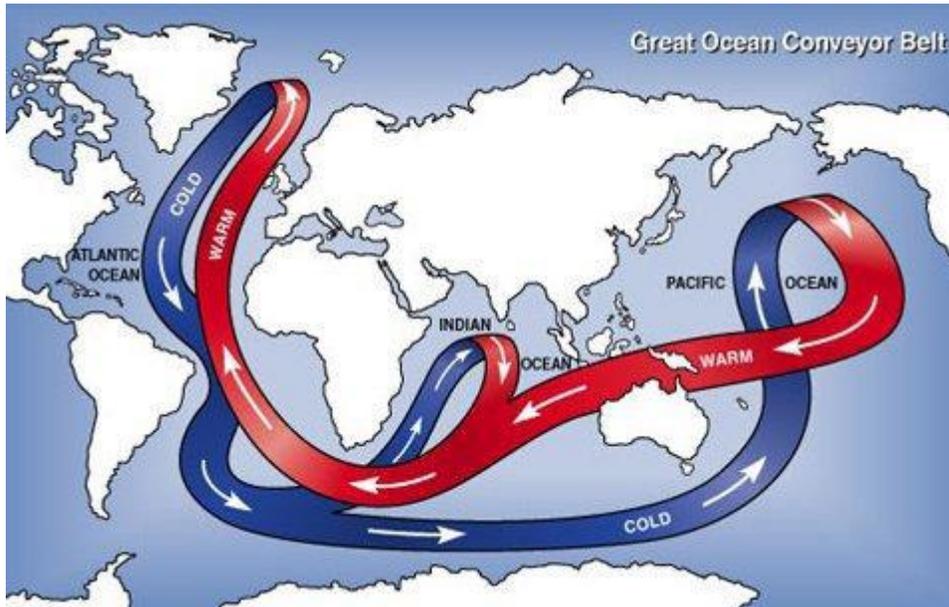
### ❖ Energía eólica

Otra alternativa para producir electricidad es a partir de la energía eólica: la proporcionada por el viento. El dispositivo capaz de realizar esta conversión se denomina aerogenerador o generador eólico, y consiste en un sistema mecánico de rotación, provisto de palas a modo de los antiguos molinos de viento, y un generador eléctrico con el eje acoplado al sistema motriz. De esta forma el viento, al hacer girar las palas, hace también girar al generador eléctrico, que puede ser un dinamo o un alternador. Al igual que en el caso de la energía solar, es necesario disponer de acumuladores para almacenar la energía en los períodos sin viento. Según Biofiedls (3).

### ❖ Energía del mar Termo-oceánica.

La energía acumulada producto al calentamiento del sol sobre la superficie del mar y las temperaturas existentes en las profundidades del mismo constituye una fuente inagotable de energía; la cual es conocida precisamente como energía termo-oceánica, conocida internacionalmente como *Ocean Thermal Energy Conversión*, (OTEC) por sus siglas en inglés, encargada de aprovechar la diferencia de temperatura marina con el fin de generar electricidad. Este tipo de energía también es conocida como la distribución de temperatura versus profundidad o termoclina, también es definida como la diferencia de temperatura existente entre el agua superficial y el agua fría de la profundidad del mar. Este fenómeno ocurre producto a que el 70 % de la superficie de la Tierra está cubierta por agua y de esta, el 97.4% de ella se encuentra en los océanos, según OIA Inc. (5); almacenando una cantidad de calor mil veces mayor que en la atmósfera. Las capas superficiales del océano tropical, acumulan 300 veces más calor que las necesidades de producción mundial, con el fin de generar la electricidad del mundo actual. Este potencial se distribuye a lo largo de la Tierra, causado fundamentalmente por la circulación de una corriente marina producto a la temperatura, el movimiento rotacional del planeta y la existencia de los vientos. Esta corriente fluye a lo largo de los océanos pasando por diferentes procesos térmicos al interactuar con las zonas tropicales y polares. En la zona del Ecuador

se produce la mayor absorción de calor del océano producto al Sol, encontrándose en el mar Pacífico las mejores condiciones de aprovechar por el hombre este tipo de energía, debido a la relación del calentamiento superficial y las profundidades de la región.



**FIGURA Nº 1. Corriente Oceánica.**

**Fuente: Xenexys**

Según Avery (6), en un día promedio el agua marina absorbe del Sol mucho más calor en una milla cuadrada, en comparación con el posible calor generado en la combustión de 7000 barriles de petróleo. Siendo el área del Océano Tropical como ya se ha mencionado la mayor receptora de calor, lo cual significa una acumulación energética, en la superficie, mayor a 10000 veces la consumida diariamente en los Estados Unidos. Si solo el 0,01% de esta potencia acumulada es convertida en electricidad el impacto medio ambiental sería sumamente beneficioso; porque en esta transformación no se consumen combustible fósiles y por ende no se afecta o contamina la atmósfera, tan importante para el hombre actual y su existencia.

Según Claude (7), el primer científico en darse cuenta de la posibilidad de aprovechar este fenómeno para generar electricidad fue el francés D'Arsonval en el año 1885, los estudios realizados por sus antecesores le permitieron postular teóricamente este fenómeno y además la forma de aprovecharla, siendo

considerado el Padre de esta tecnología, la que será analizada posteriormente en este mismo capítulo.

En Cuba las potencialidades para extraer esta potencia del mar son muy favorables, producto a su ubicación geográfica, formando parte de la ya mencionada zona de mayor potencial en el Mundo. Otra evidencia de las posibilidades de los mares cubanos, fue escoger por George Claude el sitio como primicia en demostrar la posibilidad del aprovechamiento de las temperaturas del mar en el Planeta, para generar electricidad, según Díaz (8).

## **1.2 Antecedentes de los Sistemas OTEC**

Según el Martí (9), estimulado por los resultados del balance energético demostró que el método teórico fue positivo, Claude decide hacer la demostración en condiciones reales, construyendo una planta en la Bahía de Matanzas, Cuba. El 6 de octubre de 1930, arrancó un generador de 22 KW y encendió un grupo de lámparas. Sin embargo, la planta solo operó por 22 días porque las tuberías y la instalación fueron destruidas en una tormenta. Claude entonces propone construir una central comercial en Santiago de Cuba para generar 25 MW netos, a un costo estimado de entre 3 y 4 millones de dólares en el año 1930. Pero la crisis económica le impide obtener financiamiento. Cabe señalar que, ajustado por la inflación, el estimado de costo es comparable (e incluso mayor) al costo estimado de una planta OTEC de esa capacidad en la actualidad. De nuevo, usando sus fondos personales, en 1935 construye una nueva planta OTEC abordo del buque Tunisie, con el propósito de fabricar hielo para la venta. Sin embargo, otra tormenta le hace perder la tubería de agua fría y se ve obligado a abandonar la Empresa por falta de fondos. Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE) durante el período 1979-1990, realizo múltiples experimentos sobre configuración, materiales, diseño. La DOE suministró fondos para varios diseños detallados de sistemas OTEC, entre ellos los realizados General Electric y Westinghouse, pero los mismos nunca fueron construidos. Las empresas norteamericanas reclaman que esta fue la primera vez que un sistema OTEC produjo energía neta. Sin embargo, Claude reportó a sociedades científicas en

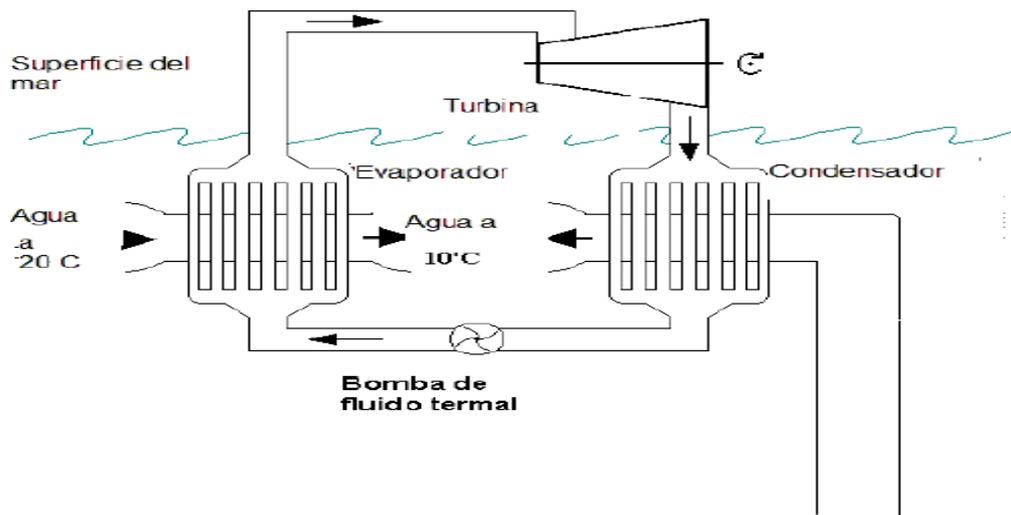
Francia y Cuba que tanto la planta de Ougréé en Bélgica como la de Matanzas en Cuba produjeron electricidad neta.

En 1980 el DOE construyó la planta OTEC-1, de ciclo cerrado, abordo de un buque tanque. La misma sirvió de plataforma de pruebas para intercambiadores de calor de ciclo cerrado, demostró que los sistemas OTEC pueden trabajar desde barcos en movimiento y la viabilidad de los diseños para tuberías suspendidas de agua fría. En 1980-1981, un consorcio compuesto de las empresas japonesas Toshiba y Tokyo Electric Power construyó una planta experimental de ciclo cerrado de 100 KW en la República de Nauru, la cual operó exitosamente como experimento. El grupo Toshiba Tokyo Electric Power pasó a diseñar una planta de 2500 KW la cual nunca fue construida. El Laboratorio de Energía Natural del estado de Hawai, realizó diversos experimentos con tecnologías OTEC entre 1982 y 1999. La culminación de los mismos fue la construcción y operación de una planta de ciclo abierto de 210 KW de capacidad bruta, la cual fue usada para diversos experimentos hasta que fue demolida en 1999 porque el programa de investigación terminó.

### **I.3 Fundamento de la energía OTEC**

Esencialmente, una planta OTEC consiste en una máquina térmica que convierte el calor en trabajo mecánico por medio del aprovechamiento del gradiente de temperatura entre una “fuente” caliente y un “sumidero” frío.

En el llamado ciclo cerrado (el más común), la diferencia en temperatura entre el agua profunda y agua superficial se usa para vaporizar un fluido termal, el cual mueve una turbina y genera electricidad, según se muestra en la figura1:



figura° 1: Ciclo cerrado

Fuente: Martí, J., Plocek, T., Laboy, M.

En el llamado ciclo abierto, se introduce agua caliente de la superficie del mar en una cámara que opera al vacío, lo que hace que el agua hierva a baja temperatura y se vaporice. El vapor que se expande mueve un turbogenerador de baja presión y genera electricidad. Este vapor es, esencialmente, agua destilada, por lo que el ciclo abierto permite la producción de agua potable en adición a la de electricidad. El agua fría del fondo del mar se usa para condensar el vapor de agua y recuperar el líquido. Se ha desarrollado un ciclo híbrido, que combina características de un ciclo abierto y uno cerrado. En el ciclo híbrido, el vapor de agua generado en la cámara de vacío de un ciclo abierto es usado para vaporizar un fluido térmico que mueve una turbina para producir electricidad. Este ciclo promete mayores eficiencias en aplicaciones para la co-producción de agua y energía.

En todas las aplicaciones, es necesario obtener agua fría para que la condensación del vapor de agua o fluido termal ocurra. Esta agua se obtiene del mar, a profundidades de unos 1000 metros, donde la temperatura del agua está cerca de los 4°C. Según Martí (9).

### I.3.1 Ventajas de la tecnología OTEC

Se puede resumir las ventajas del ciclo OTEC tomando en consideración la bibliografía consultada Martí (10) en la investigación los diferentes aspectos. El autor plantea que: “A diferencia de la mayoría de las tecnologías renovables, OTEC genera de forma continua, con un factor de capacidad de un 85 % o más”. Estos factores de capacidad son sólo comparables con el uso de energía nuclear. Los factores de capacidad de otras tecnologías renovables están típicamente en la gama de 25 % a 40 %. Incluso la energía hidroeléctrica convencional rara vez tiene factores de capacidad de más de 60 %, debido a las variaciones en caudal de los cuerpos de agua. La tecnología OTEC no requiere de combustible para su funcionamiento, por lo que no produce emisiones y no genera residuos, como cenizas o materiales radioactivos. Además, otras oportunidades potenciales asociadas con la infraestructura OTEC podrían incluir: la producción de agua dulce (desalinización), investigación marina en las plataformas, marcadores de navegación y como centro de rescate de emergencias,”

Otras de los beneficios que aporta acuicultura y acuicultura marina, ya que los nutrientes extraídos de fondo marino sirven como nutrientes básicos en su alimentación, sin utilizar nutrientes sintéticos.

### I.3.2 Costos de los sistemas OTEC

Los sistemas OTEC entre las plantas actuales de generación de electricidad incluyendo las renovables y convencionales son las menos eficientes, siendo la eficiencia máxima lograda por una planta de este tipo de alrededor del 4%, los valores alcanzados por otras tecnologías de las ramas energéticas llegan hasta el 30% de eficiencia. Es primordial señalar esto porque representa la medida que permite disponer de una idea de las proporciones de los equipos utilizados para una misma generación entre diferentes tecnologías, un ejemplo en los dos extremos opuestos, sería una industria OTEC y una central termoeléctrica (CTE) convencional en cada caso las dimensiones de los equipos son muy diferentes, siendo el costo inicial de la inversión de una Planta OTEC mucho mayor que el de

una Central Termoeléctrica con la misma generación, producto precisamente a las dimensiones de los equipos.

Para realizar un análisis de este tipo se deben tener en cuenta otros factores como el costo de producción de la electricidad. En este aspecto, si se analizan las diferencias de los componentes económicos de estas tecnologías, el factor más discrepante es que la OTEC no consume combustibles fósiles, los cuales contaminan el medioambiente. Producto al agotamiento de sus reservas mundiales, y el reducido grupo poseedor en manos de las poderosas transnacionales, unido a las especulaciones; elevan cada día más el costo de los combustibles fósiles. Por lo tanto, asumiendo que entre ambas industrias la única diferencia es el uso de los combustibles fósiles por parte de una CTE; y tomando en cuenta que la OTEC no los consume, es fácil asumir que el valor del costo de generación de electricidad es mucho menor que para una CTE. Y aumentando esta diferencia en dependencia del costo del combustible fósil, debido tendencia del aumento de los precios de los combustibles fósiles. Otros de los factores a manejar a la hora de realizar un análisis entre las tecnologías podrían ser la contaminación ambiental. Los costos del sistema OTEC, radican principalmente en el valor de la toma de agua fría de las profundidades del mar, de aproximadamente el 30% de la inversión inicial, la construcción de la edificación, sea en tierra o en mar, y el costo de los aparatos de transferencia del calor según Inc, Xenesys (11). El estimado de los costos de inversión de estas plantas se plantea en la literatura, según Dylan (12), que mientras aumente la generación, el costo de la inversión disminuye para los MW producidos, debido a la disminución de la influencia del valor de la inversión por la toma de agua de las profundidades y al factor de la economía de escala.

Algunos de los estudios y plantas diseñadas señalan que según Avery (13), los datos recolectados del reporte final del diseño de una plataforma flotante OTEC de Ciclo Rankine en la isla de Oahu, Hawai, realizado por la Universidad Johns Hopkins con una generación de 40-50 MW netos de electricidad, ascendía a un costo de 419 millones de dólares en el año 1990. En este diseño, el sistema de generación tenía un valor de 107,2 millones de dólares para el año 1984, el cual incluía todos los equipamientos del ciclo termodinámico donde los aparatos de

transferencia del calor estaban hechos de aluminio y el fluido de trabajo era amoníaco; otros valores de la planta pertenecían al sistema de tubería del agua fría de las profundidades, el cual tenía un monto de 73,1 millones de dólares para el propio año 1984, para alrededor del 19% de la inversión inicial. Es importante señalar que la planta era flotante, es decir el costo de instalación de la tubería del agua fría es menor; producto a que no hay que sujetarla a lo largo del perfil marino, solamente al final de la misma, en el mismo lugar donde se encuentra la profundidad deseada, lo cual implica un largo menor.

Otra planta diseñada por SOLARAMCO según Avery (6), igualmente flotante, utilizando el ciclo cerrado y con una generación de 40 MW netos tenía un monto para el año 1990 de 269 millones de dólares. En esta planta flotante la tubería del agua fría era el 25% de la inversión.

Según Inc, Xenesys. (11) en la realización de un estudio en Cuba para una OTEC en tierra ubicada en la Bahía de Matanzas, utilizando el ciclo de Uehara, el costo de la inversión es de 37,7 millones de dólares para una generación de aproximadamente 1 MW.

#### **I.4 Sistema OTEC: Biocombustibles microalgal**

El Grupo OTEC de Matanzas Díaz (14) ha apostado por la introducción combinada de la tecnología OTEC con la novedosa producción de biocombustibles microalgal, integrando y compensándose ambas tecnologías renovables para conformar una Producción Más Limpia (P+L) de generación de corriente eléctrica y otras producciones o Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL).

El proceso de esta tecnología es el siguiente: la caldera quema el biocombustibles microalgal, líquido espeso verde; los gases de combustión entregan su calor en un intercambiador de masa al agua de mar, la cual a su vez cede el calor, en un intercambiador de placas dentro del ciclo OTEC, al fluido de trabajo elevando la eficiencia del ciclo OTEC. La dilución de los gases de combustión unido a los nutrientes requeridos alimentan al cultivador de microalgas para nuevamente producir el biocombustible microalgal y así completar el sistema de P + L. Véase anexo (1).

Las microalgas suelen cultivarse en sistemas abiertos y sistemas cerrados. En los sistemas abiertos están los estanques los cuales tiene poca eficiencia en la productividad microalgal pero constan con la tentativa de que sus costos de inversión son pequeños. Dentro de los sistemas cerrados se encuentran los fotobiorreactores que tiene una alta eficiencia pero los costos de inversión son altos; según Beilen (15), los costos de los fotobiorreactores (FBR) y los equipos asociados es 100 dólares por metro cuadrado ( $m^2$ ) estos costo son por lo menos 10 veces superior para los estanques abiertos, también plantea que los FBR tiene un costo capital \$50  $m^2$ -\$250  $m^2$ .

#### I.4 .1 Calores de rechazo en procesos industriales

En todos los procesos industriales existen corrientes de rechazo derivadas de la misma producción, estas corrientes no tienen ningún tipo de utilidad. Ejemplos de corrientes de rechazo son las emisiones de la chimenea de la CTE, el calor producido por la combustión de la biomasa microalgal a partir de la implementación de la tecnología OTEC y los biocombustibles. El aprovechamiento de estos calores nos permite aumentar la temperatura superficie del agua marina, esto representa un aumento de la eficiencia de la tecnología OTEC por consecuente produce una disminución en las dimensiones de los equipos y el costo de inversión de una planta OTEC. Linares (16)

#### I.4 .2 Beneficios de los biocombustibles

Según González (2), el uso de biomasa vegetal en la elaboración de combustibles podría beneficiar la realidad energética mundial con una significativa repercusión en el medio ambiente y en la sociedad, como se detalla a continuación:

- ❖ El uso de biocombustibles como fuente de energía renovable puede contribuir a reducir el consumo de combustibles fósiles, responsables de la generación de emisiones de gases efecto invernadero. Aunque son elementos combustionantes y producen emisiones gaseosas, tienen menor proporción de gases contaminantes ya que las moléculas de azufre y óxido de nitrógeno, entre otros, aparecen en pequeñas cantidades. Producen mucho menos emisiones nocivas para los seres vivos, el agua y el aire.

- ❖ Se producen a partir de cultivos agrícolas, como son: el maíz, la soja, el trigo y la caña de azúcar, por solo mencionar algunos, los cuales son fuentes renovables de energía.
- ❖ Pueden obtenerse a partir de cultivos propios de una región, permitiendo la producción local del biocombustible. Lo cual permite disponer de combustible independientemente de las políticas de importación y fluctuaciones en el precio del petróleo.

### **Desventajas de los biocombustibles.**

- ❖ Debido a que pueden ser producidos a partir de granos oleaginosos maíz, soja, trigo, entre otros provocan el encarecimiento del mismo, los que forma parte de la cultura alimenticia de los pueblos de América Latina y el Caribe.
- ❖ El desarrollo de los biocombustibles trae consigo la deforestación nativa, ya que es necesario la eliminación de zonas boscosas propias del lugar para sembrar plantas que contenga un alto contenido de aceites palma africana.
- ❖ En los climas fríos debido su alto punto de congelación es necesario un precalentamiento para su utilización.

#### **I.4 .3 Ventajas del biocombustible microalgal.**

Según Rubio (18), las microalgas tienen mayor rendimientos que los cultivos terrestres convencionales utilizados en la actualidad para producir biocombustibles; en función de la especie de alga y de la eficiencia del sistema, algunos expertos señalan que podría ser incluso de entre 30 y 250 veces superior a la del cultivo de soja, por ejemplo. En segundo lugar, estos microorganismos no requieren de terrenos fértiles, con lo que no interferirían en la producción alimenticia, tampoco requieren de exposición total a la luz solar, ni agua de buena calidad y pesticidas para crecer, algo que, por otro lado, hacen muy rápido. Además, el biodiesel procedente de las algas no es tóxico, no contiene sulfuros ni sulfatos, es muy biodegradable, se integra fácilmente en los actuales sistemas energéticos y es un recurso renovable. Pero, sobre todo, las microalgas capturan

dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) de la atmósfera o directamente de otras fuentes de emisión, como centrales térmicas y cementeras, con lo que, en este caso, consiguen, convertir un problema ambiental de primera magnitud en materia prima para la producción de combustible. Se estima que 100 toneladas de microalgas cultivadas absorben 180 toneladas de dióxido de carbono al año.

## **I.5 Cultivo de microalga**

Las microalgas son capaces de crecer en un amplio rango de condiciones por la que se las encuentra en cualquier zona del planeta: dentro de plantas acuáticas, sobre sustrato artificial como madera o botellas, en lagunas, ciénagas, pantanos, nieve, lagos de agua dulce o salina, sobre rocas, etc. Por lo que no es difícil encontrar zonas para cultivarlas. Jaramillo (17)

Las microalgas se caracterizan por presentar una amplia diversidad de tamaños, pigmentación, mecanismos reproductivos, composición química, hábitat y un bajo nivel de especialización celular. Son típicamente acuáticas y viven fijas a un sustrato o flotando libremente en el plancton. Las formas que adquieren son variadas y se organizan de forma unicelular y/o en colonias.

Según Machado (19) como todo alimento vivo utilizado en la acuicultura, las microalgas deben cumplir ciertas condiciones que justifiquen su cultivo, las principales son:

- ❖ Posibilidad de obtención de abundante biomasa.
- ❖ Cualidades nutritivas especiales o sean las mismas.
- ❖ Ausencia de emisión de metabolitos tóxicos.
- ❖ Pared celular fina que permita una fácil digestión.
- ❖ Obtención sencilla y a bajo costo.

### **I.5.1 Caracterización de la microalga *Chlorella vulgarises***

La especie de microalgas conocida como *Chlorella vulgarises* parte del objeto de estudio del presente trabajo, siendo esta una especie que contiene cerca de un 50% proteínas, 5% de clorofila y gran número de vitaminas y carotenos según Travieso, (20). Otras de las propiedades con las que cuenta *Chlorella* es que

posee beneficios terapéuticos, la capacidad de desintoxicar el cuerpo humano de metales pesados como son mercurio (Hg), el cadmio (Cd) y el plomo (Pb). se cree que esta especie tiene propiedades que previene el cáncer

Tiene una composición en base seca de un 51-52 % de proteínas, 12-17% en carbohidratos, 14-22 % de lípidos y 4-5% de ácidos nucleicos. Según Jaramillo (17)

### 1.5.2 Estanques de microalgas

Debido a que las algas necesitan de luz, CO<sub>2</sub> y agua para crecer, pueden ser cultivadas en estanques y lagos. A estos tipos de cultivos se los llaman "sistemas abiertos". El riesgo de este tipo de sistemas de cultivos es la alta probabilidad de ser contaminados por otros tipos de algas, ya que las algas que tienen el mayor componente en aceite no necesariamente son las que más rápido crecen, por lo que algunas cepas de algas contaminantes podrían invadir masivamente el cultivo. Por otro lado en este sistema se tienen poco control frente a condiciones ambientales tales como temperatura del agua, CO<sub>2</sub> e intensidad lumínica, por lo que el crecimiento del cultivo depende de las condiciones del medio y alcanza la cúspide en los meses de verano. En general, para el cultivo en sistemas abiertos se buscan cepas que puedan crecer bajo condiciones en las que otros organismos les resultaría difícil desarrollarse como pH altos o bajos, temperaturas T°C específicas y requerimientos nutritivos específicos. Es por esta razón que solo pocas especies fueron cultivadas con éxito en este tipo de sistemas como son: *Chlorellavulgaris*, *Nannocloropsisoculata*, *Tetraselmissuecica* e *Isochrysis galbana*. La ventaja que tienen los sistemas abiertos es que son muy baratos y fáciles de construir ya que básicamente hacen estanques o lagunas en el suelo. Machado (19).

Un sistema alternativo para el crecimiento de algas es mediante invernaderos también dentro de estanque, pero protegido. Se solucionan muchos problemas que poseen los sistemas abiertos: menor probabilidad de contaminación por especies no deseadas, pueden cultivarse un mayor número de especies, el

período de cultivo es mayor ya que hay control de la temperatura y puede incrementarse la cantidad de  $\text{CO}_2$  en el ambiente, con lo que también aumentaría la tasa de crecimiento de las microalgas. Los estanques poseen sistemas que permiten a las microalgas mantenerse en movimiento en el medio, de forma que todas reciban la misma cantidad de luz y nutrientes. Por otro lado se renueva continuamente la cantidad de  $\text{CO}_2$  y nutrientes del medio. Según Jaramillo (17)

### I.5.3 Los fotobiorreactores.

Otro tipo de sistema de cultivo son los fotobiorreactores (FBR): estos son conductos transparentes aislados del exterior en los cuales se desarrollan las microalgas. Estos tubos se colocan al exterior para captar mayor cantidad de radiación solar. En los fotobiorreactores las microalgas no sólo reciben la radiación natural, sino que pueden ser iluminadas con luz artificial al presentar un alto aprovechamiento de la misma. Esta es su gran ventaja frente a los estanques. Sin embargo, ello supone unas instalaciones y unos costos económicos y energéticos adicionales que son muy elevados. Los fotobiorreactores pueden ir situados también dentro de invernaderos de plástico o de cristal. Otra de sus ventajas es el ahorro de espacio en el lugar donde será ubicado el cultivador dado la posibilidad de una posición vertical del mismo. Machado (19).

Según Monthieu (21), la fotosíntesis genera oxígeno. En una alta irradiación, el rendimiento máximo de generación de oxígeno en un fotobiorreactor tubular típico puede ser  $10 \text{ g O}_2 \text{ m}^{-3} \text{ min}^{-1}$ . Una concentración alta del oxígeno disuelto en combinación con una alta luminosidad produce daño foto-oxidativo a las células de las microalgas. Para prevenir la inhibición y este daño, el máximo nivel de oxígeno disuelto no debe exceder alrededor de 400% del valor de la saturación del aire.

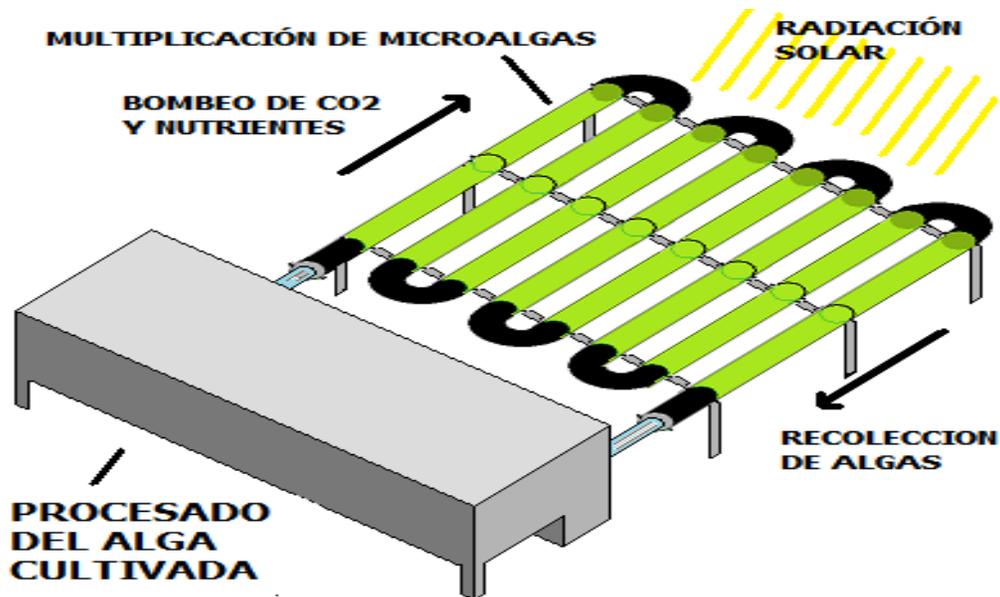


Fig. 2 Fotobioreactor.

### 1.5.3 .1Tipos de fotobiorreactores.

-Tubos plásticos o de vidrio de forma triangular: Gases como  $\text{CO}_2$  y  $\text{O}_2$  se hacen fluir en un sentido y algas con medio de cultivo se hacen fluir en el sentido opuesto.

-Fotobiorreactores tubulares en forma horizontal: Son tubos de acrílico en el que se hace circular en forma horizontal medio de cultivo más algas para que estas no precipiten y todas reciban la misma cantidad de luz y nutrientes.

-Columna vertical de burbujas: Se genera circulación del medio con algas en una columna vertical a través del flujo de gases como dióxido de carbono. Se ilumina a través de tubos de luz a lo largo del tubo, cuyo objetivo es disminuir el costo del cultivo de algas a gran escala y hacerlo más simple. Según Machado(19)

Equipos de fermentación: Algunas compañías obtuvieron aceite de algas sin crecimiento fotosintético, sino alimentando a las algas con azúcares que luego estas fermentaban y según expresa Barraza (22) una de estas compañías se llama Solazyme, que es una empresa de biotecnología que está desarrollando técnicas para producir combustible para autos y aviones a partir de algas en México.

La producción en los fotobiorreactores está sujeta a la intensidad lumínica por lo tanto, es necesario tener en cuenta que la relación entre el volumen y el área de incidencia de la luz debe ser elevada. Debido a que el espacio disponible es una limitante, la productividad del proceso está dada por la biomasa en unidad de área en el tiempo.

Según las granjas de cultivo (23), se conoce que la producción de algas en fotobiorreactores puede duplicar su masa en período de 24 h, según revisiones bibliográficas se obtienen producciones de hasta 50 gramos de alga/Día/M<sup>2</sup>. Esto equivale a: 18.25Kg. de Alga/Año/ M<sup>2</sup>. Y 182,500 Kg. de Alga/Año/Hectárea.

## **I.6. Herramientas computacionales.**

Según Colectivo de Análisis de Procesos (24), "El nombre de MATLAB proviene de la contracción de los términos **MatrizLAB**oratory y fue inicialmente concebido para proporcionar fácil acceso a las librerías LINPACK y EISPACK, las cuales representan hoy en día dos de las librerías más importantes en computación y cálculo matricial. MATLAB es un entorno de computación y desarrollo de aplicaciones totalmente integrado orientado para llevar a cabo proyectos en donde se encuentren implicados elevados cálculos matemáticos y la visualización gráfica de los mismos. Integra análisis numérico, cálculo matricial, proceso de señal y visualización gráfica en un entorno completo donde los problemas y sus soluciones son expresados del mismo modo en que se escribirían tradicionalmente, sin necesidad de hacer uso de la programación tradicional.

En los medios universitarios MATLAB se ha convertido en una herramienta básica, tanto para los profesionales e investigadores de centros docentes, como una importante herramienta para el dictado de cursos universitarios, tales como sistemas e ingeniería de control, álgebra lineal, proceso digital de imagen, señal, etc. En el mundo industrial MATLAB está siendo utilizado como herramienta de investigación para la resolución de complejos problemas planteados en la realización y aplicación de modelos matemáticos en ingeniería. Los usos más característicos de la herramienta los encontramos en áreas de computación y cálculo numérico tradicional, prototipaje algorítmico, teoría de control automático,

estadística y análisis de series temporales para el proceso digital de señal. Según colectivo de análisis proceso.

MATLAB es la disponibilidad de los toolboxes especializados. Estos son paquetes especializados, orientados a ingenieros, científicos y otros tipos de profesionales técnicos”.

### **I.7 Software Aspen HYSYS 2006.**

Según Díaz (8), la generación de electricidad mediante OTEC también pertenece a la clasificación según los programas computacionales existentes, como los programas que pertenecen a la rama estadísticas, matemáticas, simuladores numéricos con ambientes geográficos y carácter general se nombran TPPI que según la bibliografía consultada, dentro de los software más utilizados en el mundo son el *Aspen plus* y el *HYSYS*, abarcando el 70 % del mercado. Empleando el diagrama de Pareto, el cual establece que entre el 70 y el 80% de los elementos de un proceso, son los mayores influyentes, pudiéndose despreciar aquellos pertenecientes al porcentaje restante. Aplicando este concepto puede afirmarse sobre los fabricantes de estos dos softwares que son los dueños del mercado. Hace algún tiempo estas dos firmas se unieron, formando una potentísima herramienta de cálculo en beneficio del ingeniero. Tomando esto como aspecto determinante y la disponibilidad de este recurso para la elaboración del trabajo se seleccionó el software Aspen HYSYS 2006 para la simulación del ciclo OTEC.

## Conclusiones parciales:

- ❖ Las microalgas presentan gran potencial depurativo debido al aprovechamiento de los flujos de calor y corrientes de rechazo como son los gases de combustión
- ❖ Las investigaciones realizadas en el Mundo reportan la posibilidad real de aplicar la tecnología *OTEC*, y la posible factibilidad técnico-económica frente a las tecnologías convencionales de generación de energía a partir del incremento de la explotación de los combustibles fósiles y su agotamiento.
- ❖ Los softwares profesionales aludidos constituyen una potente herramienta computacional de cálculo y simulación que facilitan el trabajo del investigador.

## *Capítulo II: Materiales y Métodos utilizados en la investigación.*

El desarrollo de este capítulo tiene en su haber aspectos fundamentales como son: experimentación, modelación–simulación y la estimación económica. Como se expone secuencialmente es necesario realizar trabajo en los laboratorios para conocer parámetros esenciales para el desarrollo de la simulación del fotobiorreactor en el software comercial Matlab. Tales resultados permiten posteriormente la simulación mediante el software profesional, HYSYS. En este capítulo analizan los factores que se tienen en cuenta para realizar un análisis económico de un fotobiorreactor acoplado a una planta OTEC. La unión de las dos tecnologías renovables OTEC y los Biocombustible recibirá el nombre a lo largo del trabajo de BIOTEC.

Es necesario un correcto conocimiento del objeto de estudio, porque es muy difícil diseñar una metodología sin contar con el dominio del lugar donde se plantea la implementación futura de la investigación. Por lo tanto, se inicia la descripción detallada del objeto de estudio, la central termoeléctrica (CTE) “Antonio Guiteras Holmes”

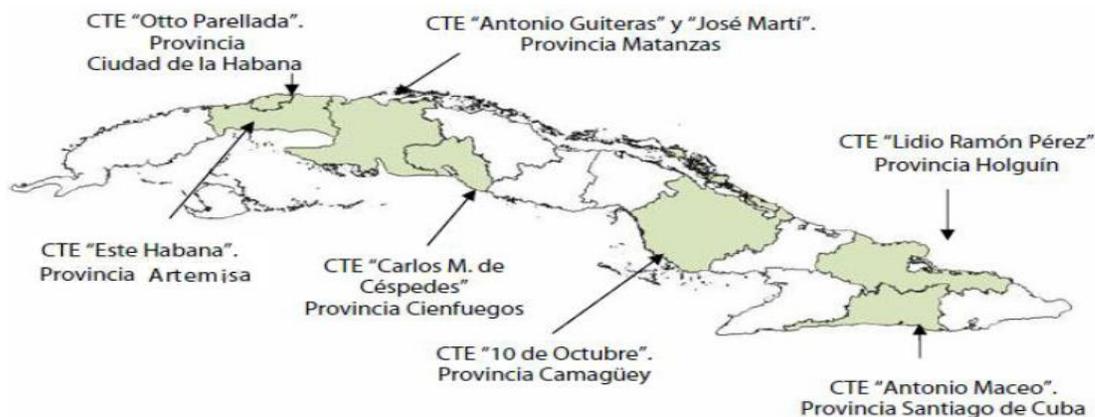
### **II.1 Descripción del objeto de estudio**

La energía eléctrica es un componente importante en la sociedad actual por lo que su utilización hace posible el desarrollo de la sociedad y mejora las condiciones de vida del hombre. Para la producción de la misma es necesario la utilización de combustibles fósiles en su mayor totalidad, se hace indispensable el ahorro de energía ya que Cuba es un país subdesarrollado el cual necesita invertir grandes cantidades de divisa para la obtención del petróleo pudiendo ser invertidas en otras ramas de la sociedad. En nuestro país existen yacimientos de petróleo pero los niveles de extracción no satisfacen las necesidades de consumo nacional.

Las termoeléctricas son las principales fuentes de obtención de energía eléctrica y las principales consumidoras de petróleo en el país. Existen 22 centrales generadoras de electricidad, 15 centrales termoeléctricas, 1 hidroeléctrica, 3

tuberías de gas que queman combustible diesel, numerosos grupos electrógenos y 4 turbinas de gas que queman gas acompañante, asociado del petróleo. Además existen pequeñas plantas con grupos electrógenos aisladas en diferentes cayos del país, por necesidades del desarrollo del turismo, por ejemplo: Cayo Coco y Cayo Largo del Sur.

Según Linares (16), la CTE "Antonio Guiteras Holmes" de la ciudad de Matanzas constituye la mayor del país en cuanto a la capacidad de generación por unidad y el grado de automatización, siendo la misma el objeto de estudio de la presente investigación. Está ubicada cerca de la costa en la zona industrial de la ciudad y su dirección es Central Termoeléctrica "Antonio Guiteras", carretera Zona Industrial, Punta Uvero, Matanzas, Cuba.



Fig°1: Provincias donde se encuentran ubicadas las centrales termoeléctricas

La industria fue diseñada para la producción de 330,3 MW a partir de fuel-oil, nombre correcto en el petróleo refinado para su consumo, su tecnología es francesa, la cual permite variar la carga para mantener la frecuencia del sistema electroenergético nacional, con lo que teóricamente se obtenía 340 MW como carga máxima para un flujo de combustible de 78 Ton/h (crudo y fuel-oil) y un flujo de vapor de 1022 Ton/h. Se consideró, durante el período especial, el cambio y modificación del tipo de combustible a utilizar, implicando variaciones en el sistema de almacenaje, preparación y suministro de combustible, así como del

generador de vapor para la combustión de mezclas de petróleo crudo nacional mejorado, lo cual ha sometido a condiciones de explotación más rigurosas a la instalación. Cuenta como equipos principales de: caldera, turbina, generador eléctrico, equipos auxiliares, tratamiento químico del agua, tanques, bombas de petróleo, bombas de alimentación, bombas de condensado, bomba de circulación, condensador, calentadores de agua, tiro forzado y recirculador de gases.

Sus cuatro subsistemas fundamentales son:

- ✓ Sistema de agua - vapor.
- ✓ Sistema de combustible.
- ✓ Sistema de aire - gases.
- ✓ Generador eléctrico

A continuación se describen sus equipos fundamentales:

La caldera es de fabricación francesa, marca *Stein Industries*, con circulación natural y horno presurizado auto soportado. Consta de un domo y un hogar conformado por paredes de tubos de agua, lográndose la impenetrabilidad a la fuga de gases en el horno a través de membranas entre los tubos que conforman la misma. La evaporación se logra en un ciclo cerrado normal y el vapor es separado y secado en el domo pasándose a través de los cuatro sobrecalentadores de la caldera para elevar la temperatura del vapor hasta los parámetros normales de diseño, siendo enviado posteriormente a la turbina. Para el aumento de la eficiencia del ciclo en cuestión está dotada de un sistema de recalentamiento de vapor, constituido por dos recalentadores encargados de aumentar la temperatura del vapor a la salida del cilindro de presión intermedia con el objetivo de elevar la entalpía del mismo, aprovechándose la energía remanente en los gases de escape de la combustión para incrementar así la potencia producida en el turbogenerador. Además, posee un sistema de aumento de la temperatura del agua antes de su entrada al domo para acercarla a los límites de la temperatura en este, para lo cual se emplea un economizador, el que está conformado por tubos con aletas, con el objetivo de disminuir su tamaño elevando la superficie de transferencia de calor. El control de la temperatura del vapor en los valores requeridos se logra a través de los atemperadores y el uso del ventilador de recirculación de gases. A la caldera el agua de alimentar entra a

una presión de  $183,2 \pm 5\%$  bar y a una temperatura de  $247,1 \pm 10\%$  °C y sale vapor sobrecalentado a un flujo de  $1005 \pm$  t/h a una presión de  $167 \pm 5$  bar y a una temperatura de 540 °C. Se utilizan 16 quemadores, 4 en cada piso de la edificación, cada uno de los cuales admite un flujo de 5 t/h de combustible para garantizar una carga de 330,3 MW, antes de la modificación, actualmente no supera los 300 MW.



Fig°2: vista satelital de la CTE Antonio guiteras Holmes

Fuente: GEOCUBA Estudios Marinos.

## II.2 Evaluación experimental del crecimiento de biomasa de microalgas *Chlorella vulgaris*

### II.2.1 Equipos

- Balanza analítica (ACCULAB: ALC-110.4)
- Autoclave (Selecta: Mediclave 4047725)
- Flujo laminar (Labotect GMBH)
- Incubadora (MLW: Type 8)
- Zaranda (Selecta: Rotabit 3000874 )
- pH metro (Crison: pH-metro BASIC 20)
- Microscopio óptico (Ivymen)
- Luxómetro (HQRP digital lux meter , LX1010BS, Osprey-TalonCompany)

## II.2.2 Materiales

### ❖ Medios de cultivo

Medio Bristol para inóculo:  $\text{NaNO}_3$  1 g/l;  $\text{CaCl}_2 \times 2 \text{H}_2\text{O}$  0,025 g/l;  $\text{MgSO}_4 \times 7 \text{H}_2\text{O}$  0,075 g/l;  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  0,075 g/l;  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  0,0175 g/l;  $\text{NaCl}$  0,025 g/l; EDTA 0,3980 g/l; Micronutrientes:  $\text{FeCl}_3$  0,1020 g/l;  $\text{Zn Cl}_2$  0,0053 g/l;  $\text{MnCl}_2$  0,0044 g/l;  $\text{CoCl}_2$  0,00046 g/l;  $\text{CuCl}_2$  0,0049 g/l;  $\text{MoO}_3$  0,0056 g/l; Tiamina 0,00162 g/l; Biotina 0,0080 g/l; Cianocobalamina 0,00008 g/l;

Medio alternativo elaborado FerCO: Fertilizante NPK (9:13:17) *blending*, según el diseño,  $\text{NaHCO}_3$  3 g/l;  $\text{NaCl}$  15 g/l; pH según el diseño.

## II.2.3 Diseño experimental

El diseño experimental tiene como objetivo determinar las coediciones de NPK y pH donde se obtiene el máximo decrecimiento de microalgas para este estudio.

### ❖ Descripción:

La determinación de las mejores condiciones de crecimiento para la microalga *Chlorella vulgaris*, se basó en un diseño experimental utilizando el software *Statgraphics Plus 5.1*, atendiendo a los siguientes requerimientos para un 95 % de confianza:

Cantidad de factores = 2

1. Concentración de NPK: (1.2 g/l – 4.5 g/l)
2. pH: (6.0 – 8.5)

Cantidad de variables de respuesta = 1

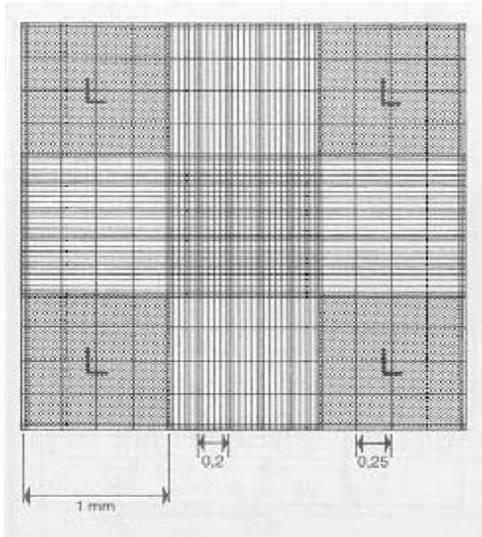
1. Crecimiento celular (células/ml)

Se seleccionó un diseño de superficie de respuesta con compuesto central  $2^2$  + estrella, rotatable, con dos réplicas al centro; para un total de 10 corridas. La intensidad media de luz utilizada fue de 3000 lx, 130 rpm y la lectura se realizó a los 6 días de cultivo.

## II.2.4 Determinación de la biomasa

Se realizara el conteo celular en una Cámara Neubauer en microscopio con lente de 40 X. Se utilizaran diluciones para garantizar una lectura de células de 10 a 50

células por cuadrante. El peso celular se establecerá a partir de una curva de número de células contra peso seco de las mismas, luego de 4 h en estufa. La lectura se realizó por un periodo de 14 días.



La Cámara de *Neubauer* según Montoya (24) comprende 4 cuadrantes (L) en lo que se añadió las diferentes diluciones aplicadas para cada muestra. Se leyó la cantidad de células existente en cada cuadrante para cada muestra, después de realizar la lectura se calculó la cantidad de células por mililitros por la siguiente ecuación.

$$\frac{cel}{ml} = \frac{\text{Numero total de celulas contadas} \cdot \text{fator de dilucion}}{4 \cdot \text{superficies contadas (mm}^2\text{)} \cdot \text{profundidad de la camara (mm)} \cdot 1ml} \quad .ec.[1]$$

## II.2.5 Cinética de crecimiento

### ❖ Descripción

Cinética de crecimiento tiene objetivo conocer la velocidad específica máxima de crecimiento para las condiciones de crecimiento establecidas, así como constatar las diferentes fases del mismo.

La cinética se realiza en las condiciones seleccionadas a partir del diseño experimental. Se realiza en un volumen de 200 ml por triplicado, recibiendo una intensidad media de luz de 3000 lx. Se evalúan por conteo celular en Cámara de Neubauer, por un período de 14 días con mediciones diarias.

## II.3 Modelación –simulación de procesos

### II.3.1 Descripción del modelo matemático

La modelación matemática se puede definir como la representación de ecuaciones matemáticas que permiten simular el comportamiento de la biomasa dentro de un fotobiorreactor. El modelo seleccionado para la modelación es el propuesto por Grima(26) utilizando la velocidad específica de crecimiento ( $\mu$ ) en función de la luminosidad, describe la relación existente entre las variables fundamentales dando como resultado un análisis detallado de crecimiento celular dentro de fotobiorreactor, los modelos se basan en el estudio de los valores de concentración en el sistema.

$$\frac{dX}{dt} = \mu * X \quad \text{ec.[2]}$$

Ecuación [2] nos es más que la variación de la concentración con respecto al tiempo en función de la velocidad específica de crecimiento

$$\mu = \frac{\mu_{max} * I_{AV}^n}{I_{AV}^n + K_I^n} \quad \text{ec.[3]}$$

Ecuación [3] la velocidad específica de crecimiento está en función de la luminosidad y la velocidad específica máxima crecimiento. (Kl) constante de saturación de luminosidad y (n) el exponente de la ecuación

$$I_{AV} = \frac{I_{0.5} + I_{1.5} + I_{2.5} + I_{3.5} + I_{4.5}}{5} \quad \text{ec.[4]}$$

Ecuación [4] es la media entre 5 puntos de luminosidad a lo largo del fotobiorreactor, desde 0.5 hasta 4.5 cm con paso igual 1cm.

$$I_z = I_0 * e^{-Kb \cdot X \cdot z} \quad \text{ec.[5]}$$

Ecuación [5] es el perfil de luminosidad en el interior de un sistema de cultivo, **X** es la concentración de la biomasa, **z** es la profundidad del camino óptico, **Kb** el coeficiente de extracción y flujo luminoso incidente (**I<sub>0</sub>**) en la superficie del FBR.

Los valores de **K<sub>i</sub>**, **n** y **Kb** planteado por el autor Arthur Lygeros Das Chagas

### II.3.2 Software MATLAB (MATrix LABoratory)

En la simulación de FBR se utilizará el software comercial Matlab el cual facilita la solución del sistema de ecuaciones diferenciales y algebraicas acopladas (Sistemas conocidos como DAE). Se desarrolla usa aplica un modelo matemático que describe el crecimiento de las algas dentro del FBR.

#### ❖ Funciones y comandos

Matlab proporciona diverso tipos de comandos y funciones con características únicas. A continuación se exponen las que se utilizaran para el desarrollo de la simulación

- **ode45:** se Utiliza para dar soluciones a ecuaciones diferenciales ordinarias aplicando el método numérico *Runge-Kutta* 4to.
- **Function :** Corresponden a subprogramas, subrutinas o funciones en lenguajes tradicionales.
- **Plot:** Crear gráfica de vectores ó columnas de matrices.

## ❖ Metodología propuesta para la utilización del Matlab

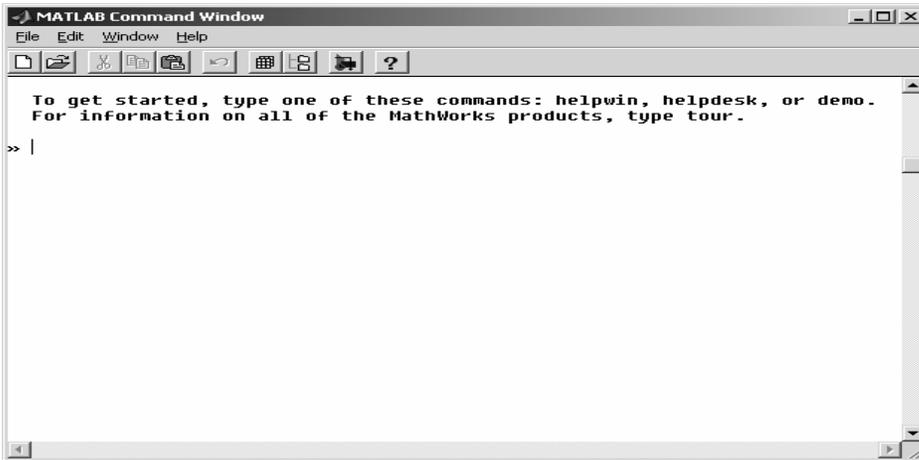
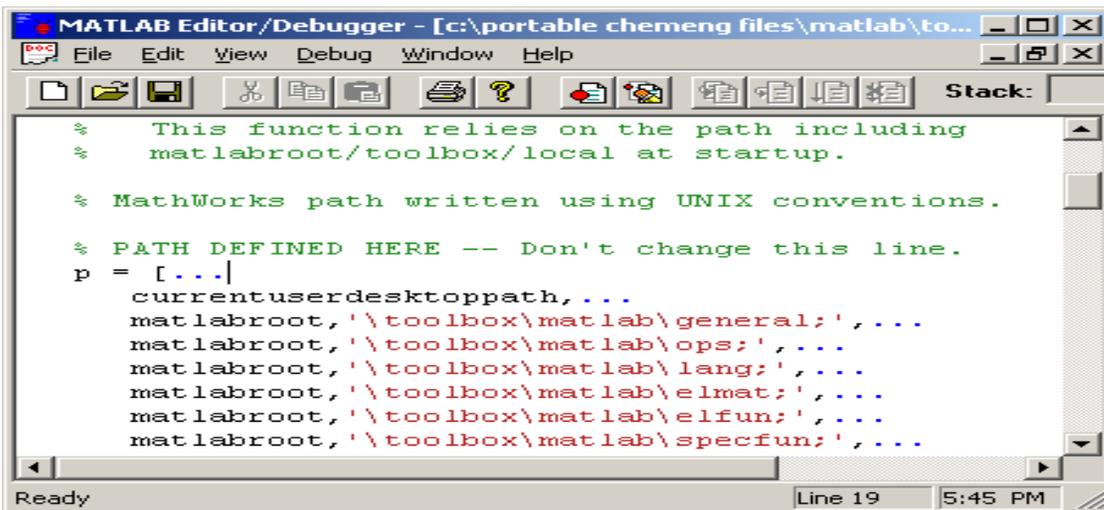


Fig N°3. Consola de comando

Fuente: tutoriales de MATLAB

Es el entorno de trabajo donde se realizan y se ejecutan las operaciones introducidas en forma de texto por el usuario. La consola de trabajo está compuesta por la barra de herramienta la cual comprende varias herramientas disponibles por el usuario.

Para activar el editor se escribe el comando *edit* seguido de (>>) *prompt*(aviso) característico de MATLAB o activar la herramienta 



FigN°4:El Editor/Debugger de MATLAB

Fuente: tutoriales de MATLAB

MATLAB dispone de un editor que permite escribir y modificar las ecuaciones, como ejecutarlas paso a paso para ver si contienen errores (proceso de Debug o depuración).

## II.4 Estimación del poder calórico

Según Fernández (27) el poder calórico es la cantidad de calor que entrega un kilogramo, o un metro cúbico, de combustible al oxidarse de forma completa. Expresa que el poder calórico de un combustible puede ser dividido en poder calórico superior (PCS) y poder calórico inferior (PCI).

Según la bibliografía se explica que se puede calcular de 2 formas por método analítico utilizado en la investigación y por método práctico.

Método analítico:

- ❖ Es el que se basan en la aplicación del principio de la conservación de la energía. Este método depende del tipo de combustible al que se le va a hallar el poder calórico.

Según la bibliografía para combustibles sólidos y líquidos el valor exacto no se puede calcular, las ecuaciones propuestas solo arrojan un valor que está en un perímetro de  $\pm 3\%$ .

Poder Calórico Superior:

$$PCS = 34.8 * c + 93.8 * h + 10.46 * s + 6.28 * n - 10.8 * o \quad , \quad \text{ec .[6]}$$

Dónde:

h-contenido de hidrogeno en kg

c-contenido de carbón en kg

s-contenido de sulfuro en kg

n-contenido de nitrógeno en kg

o-contenido de oxígeno en kg

Se consultó además la bibliografía especializada la cual arrojó un valor de calórico de la microalga *Chlorella vulgaris* para respaldar el cálculo realizado de este.

## II.5 Orden cronológico para el cálculo de los parámetros de diseño fotobiorreactor

La metodología utilizada en el cálculo para los parámetros de diseño comprende la determinación de área fotobiorreactores  $A_{fot}$  expresándose en  $m^2$  el cual depende calor suministrado ( $Q_{sum}$ ) en (kJ) y densidad de flujo de calor ( $g$ ) en ( $kJ / m^2$ )

$$A_{fot} = Q_{sum} / g . \quad \text{ec.}[7]$$

$g$  a su vez depende incidencia energética ( $I_{ener}$ ) en ( $kJ / m^2$ ) y de la eficiencia de conversión de la energía lumínica en (%).

$$g = I_{ener} * ef . \quad \text{ec.}[8]$$

El número de tubo se calcula por la ecuación [9] donde ( $A_{sup}$ ) en ( $m^2$ ) es el área superficial,  $A_{tc}$  en ( $m^2$ ) es el área de transferencia de calor.

$$N_{tub} = \frac{A_{sup}}{A_{tc}} \quad \text{ec.}[9]$$

El área de transferencia de calor es el área lateral de un cilindro y depende de la altura ( $m$ ) del tubo y del diámetro de tubo en ( $m$ )

$$A_{tc} = \pi * h_{tub} * d_{tub} . \quad \text{ec. [10]}$$

## II.6 Validación del paquete de propiedades

Según Díaz (8), la simulación del ciclo necesita la selección de la sustancia del ciclo, la cual puede ser el agua de mar evaporada en un ciclo abierto o una sustancia de baja temperatura de en el cambio de fase para un ciclo cerrado de trabajo, atendiendo al nivel de utilización en la tecnología *OTEC* y con el fin de disminuir las necesidades de las investigaciones se determinó que fuera el amoníaco ( $NH_3$ ). El próximo paso es la elección del paquete de propiedades de las sustancias, ya que en el programa existen diferentes tipos de ecuaciones, las cuales determinan el valor de cada propiedad en cuestión y son conocidas también, como termodinámica de la sustancia. Un método aproximado inicial podría ser pedirle al programa una sugerencia de la termodinámica a escoger, atendiendo a la sustancia seleccionada. No obstante para comprobar la fidelidad del paquete se hace necesario simular un proceso análogo existente, permitiendo

elaborar una comparación con la simulación del proceso y el existente. Si dicha confrontación de los resultados arrojan una diferencia permisible al criterio del investigador, menor del 5 % determinado mediante la ecuación [11] la que es comúnmente utilizada para determinar los márgenes de errores en cálculos de transferencia del calor con aproximaciones sucesivas, entonces puede escogerse finalmente esta termodinámica. En este paso se garantiza la seriedad de los resultados siempre y cuando no exista ningún error por parte de la información primaria recibida.

$$Error = \frac{[(X_{real} - X_{calculada})]}{X_{real}} * 100\% \quad .ec .[11]$$

Donde:

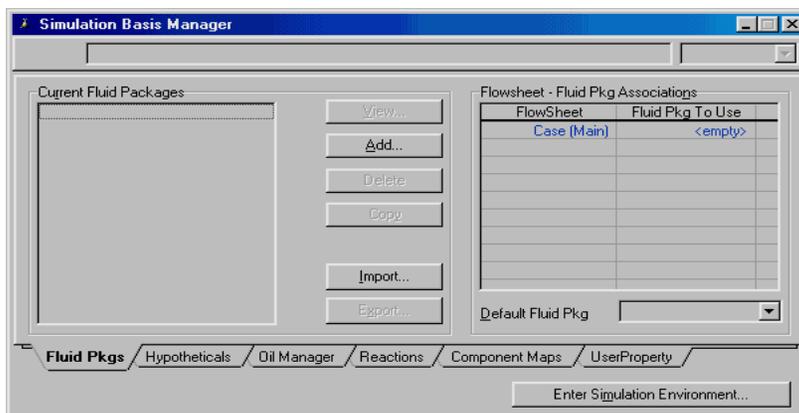
*Error* – por ciento de error entre los parámetros del Ciclo Vega y los de la simulación . [%]

$X_{real}$  – Parámetro del Ciclo Vega.

$X_{calculada}$  – Parámetro de la simulación.

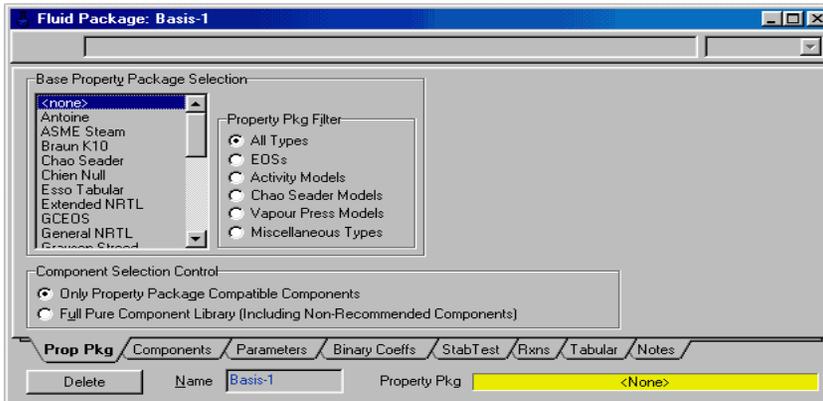
## II.7 Metodología para la simulación en HYSYS

- ❖ El primer paso es abrir el software, para crea un nuevo utilizando el primer botón de la barra de herramientas. 
- ❖ Se muestra automáticamente el formulario *Simulation Basis Manager*



FigN°5.Simulation Basis Manager  
Fuente: tutoriales de MATLAB

- ❖ Adicionar un paquete de fluido. Para ello utilizar la primera lengüeta del formulario (*Fluid Pkgs*) y presionar el botón *Add*



FigN°6 (Fluid Pkgs) con el paquete de fluido  
Fuente: tutoriales de MATLAB

- ❖ Seleccionar el paquete de estimación de propiedades físicas y termodinámicas. Para ello utilizarla primera lengüeta del formulario (*PropPkg*) y seleccionar de la lista un modelo adecuado seleccionar para el ejemplo *Peng Robison*
- ❖ Adicionar los componentes al paquete de fluido utilizando la segunda lengüeta del formulario (*Components*) y seleccionándolos de la lista (adicionar para el ejemplo: *Benzene, Hydrogen, Nitrogen y Cyclohexane*).
- ❖ Especificar los parámetros y/o coeficientes binarios del modelo termodinámico seleccionado utilizando las lengüetas *Parameters* y *Binary Coeffs* respectivamente.
- ❖ Comenzar a diseñar el DFI y entrar las corrientes. En el formulario *Simulation Basis Manager* (sise está en otro formulario presionar CTRL+B) presionar el botón *Enter Simulation Environment*.

#### Entorno de simulación

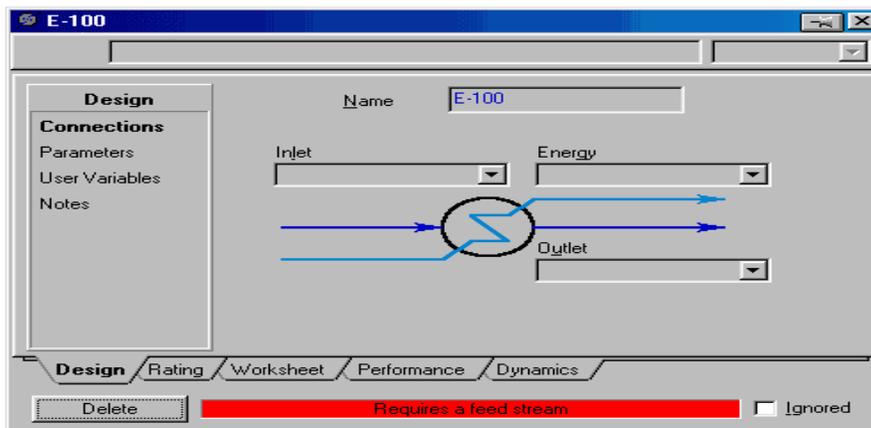
- ❖ En el entorno de simulación se puede trabajar de dos formas: con el diagrama de flujo de proceso (PFD) o con las tablas del libro de trabajo (*Workbook*). En ambos casos se puede alternar de uno a otro mediante la

barra de tarea con los botones respectivamente, o mediante las opciones PFD s... y *Workbooks...* del menú *Tools*.

- ❖ La ventana *Workbookse* muestra como una tabla con dos lengüetas, la primera (*Streams*) para definir los datos de las corrientes y la segunda (*UnitOps*) para definir las operaciones unitarias.

Enfriador:

- ❖ Presionar el botón *Add UnitOp* y seleccionar la operación *Cooler* en la categoría *Heat Transfer Equipment* para abrir el formulario del enfriador:



FigN°7 Enfriador:

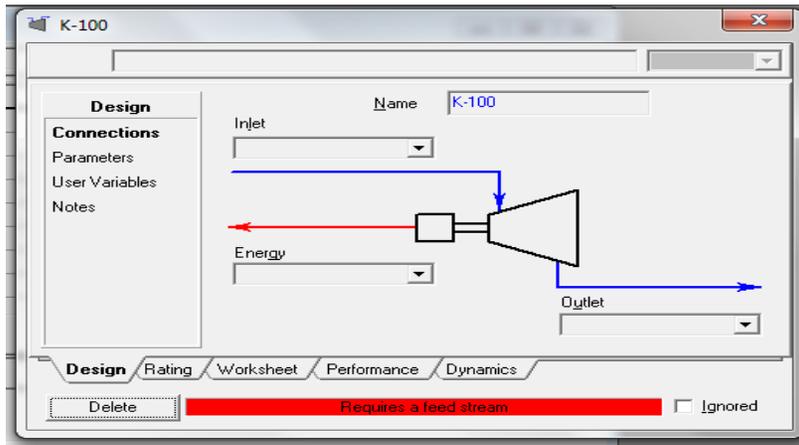
Fuente: tutoriales de MATLAB

- ❖ Seleccionar la corriente de entrada de la lista *Inlet* y escribir el nombre de la corriente de salida en la caja *Outlet*. De igual forma se debe seleccionar o crear una corriente energética en la caja *Energy* (CW en el ejemplo).
- ❖ Especificar en la categoría *Parameters* de la propia lengüeta *Design* el valor energético de la corriente (*Duty*) para que *HYSYS* calcule la temperatura de la corriente de salida o, por el contrario, ir a la lengüeta *Worksheet* (categoría *Conditions*) y especificar la temperatura de la corriente de salida para que *HYSYS* determine el flujo energético necesario para alcanzar esta temperatura (en el ejemplo S8 se enfría hasta 120 °F).
- ❖ Especificar la caída de presión en el equipo ( $\Delta P$ ) en la categoría *Parameters* de la lengüeta *Design* para que *HYSYS* calcule la presión de la

corriente de salida o ir a la lengüeta *Worksheet* (categoría *Conditions*) y especificar la presión de la corriente de salida para que *HYSYS* determine el DP a través del equipo (en el ejemplo S8 sale a 300 psia).

Turbina

- ❖ Presionar el botón *AddUnitOp* y seleccionar la operación *Expander* en la categoría *Rotatin Equipment* para abrir el formulario de la turbina:



FigN°7 .turbina

Fuente: tutoriales de MATLAB

- ❖ Seleccionar la corriente de entrada de la lista *Inlet* y escribir el nombre de la corriente de salida en la caja *Outlet*. De igual forma se debe seleccionar o crear una corriente energética en la caja *Energy*.
- ❖ Especificar en la categoría *Parameters* de la propia lengüeta *Design* el valor de Eficiencia, ir a la lengüeta *Worksheet* (categoría *Conditions*) y especificar la temperatura de la corriente de entrada y de salida. introducir la composición en el vapor en la corriente de salida.

## II.8 Estimación de costos

### II.8.1 Costo aproximado fotobirreactores

Los costos aproximados de los FBR son expuestos en el capítulo anterior tomando como referencia Beilen (15) permite dar un estimado para realizar los cálculos posteriores.

### II.8.2 Costo aproximado del Sistema OTEC propuesto

Los costos de la tecnología en cuestión fueron presentados en el capítulo anterior y tomando como referencia el costo de una planta diseñada por Inc, Xenesys. (11), se realizará el estimado para la propuesta en estudio.

Los costos de operación para una OTEC serán tomados de la información preliminar brindada por Xenesys en su primer encuentro (11), donde el índice para el costo de mantenimiento era 1500 euro por cada kW generado y el resto de los costos operacionales lo estiman en 7.5 euro por cada kW generado.

### II.8.3 Estimado del tiempo de la recuperación de la inversión inicial

El tiempo de la recuperación de la inversión para la planta BIOTEC propuesta se determina teniendo en cuenta la ganancia por la venta de electricidad, beneficio tangible de una planta BIOTEC solamente de generación eléctrica, planteado en el epígrafe anterior y el beneficio del ahorro de combustible y por eliminación del contaminante (beneficio medioambiental), el cual es un beneficio intangible pero importante como será demostrado en el próximo capítulo, en conjunto con el valor de la inversión inicial. Definido el tiempo de recuperación por el método estático según la ecuación.

$$T_{rec} = \frac{C_{inv}}{(GB - Cp)} \text{ec. [12]}$$

Donde:

Trec. inv. – Tiempo de recuperación de la inversión inicial. (año)

Cinv – Costo de la inversión. [Dólares]

GB – Ganancia por venta de electricidad, beneficios ahorro de combustible y Medioambiental. [Dólares/año]

Cp – Costo de producción de la electricidad. [Dólares /año]

## **II.9- Determinación de la emisión de sustancias contaminantes durante su combustión**

La contaminación ambiental es una problemáticas a resolver del siglo **XXI** por lo que es de suma importancia velar que las CTE reduzcan el flujo de emisiones de gases tóxicos a la atmósfera, es importante destacar que debido a la reducción emisiones anuales de gases y partículas sólidas al medio ambiente se proporcionara beneficios económicos a la CTE por concepto medioambientales. Para conocer los beneficios se utilizara la metodología programada en *Microsoft Excel* por el Dr.C Roberto Vizcón (26).

## **II.10- Beneficios**

Según Díaz (8) la integración de la tecnología del biocombustible microalgal, permitirá el establecimiento de una Producción Más Limpia de generación de electricidad. Adicionalmente, dada la escasez de agua para la agricultura y la población de la localidad cercana. No obstante, su producción de electricidad y agua desalinizada, el objetivo fundamental de la propuesta será convertirla en una Unidad de Ciencia y Técnica para la producción de tecnologías OTEC.

Conclusiones parciales:

- ❖ Se elaboro una metodología técnica que permite el acople de la tecnología BIOTEC con la CTE " Antonio Guiteras Holmes".
- ❖ Mediante el software utilizado se agiliza el estudio de la variante simulada.

## ***Capítulo III: Resultado y Análisis***

El acoplamiento de las corrientes de calor suministrado por la caldera producto de la combustión de la masa microalgal debido a la unión de un FBR con el sistema OTEC utilizado para generar electricidad, es sin duda una necesidad; porque permitiría disminuir el impacto medioambiental en el territorio, específicamente en la Zona Industrial de Matanzas y además trae consigo un ahorro de combustible fósil, así como nuevos ingresos por concepto de venta eléctrica. Los resultados alcanzados en la presente investigación se muestran en este capítulo.

El capítulo recoge los resultados del análisis experimental del crecimiento microalgal, se realizó la simulación del crecimiento de la biomasa utilizando el modelo propuesto por Grima (27) que relaciona la velocidad específica de crecimiento con la luminosidad. Se obtuvieron los valores del poder calórico de las microalgas procedente de la literatura internacional, fue ejecutada la simulación en el *software Aspen Hysys2006*, obteniéndose la generación de potencia del ciclo propuesto para el acople de la planta BIOTEC con la CTE. Además capítulo cuenta con cálculo preliminar del tiempo de recuperación de la inversión inicial y una estimación de los beneficios medioambientales.

### **III.1 Estudio para la determinación del crecimiento de la microalga *Chlorella vulgaris*.**

III.1.1 En el cultivo de las microalgas fue necesario determinar cuáles son los valores óptimos de concertación del medio de cultivo y pH donde se obtenga la mayor densidad celular en el menor tiempo posible, obteniendo se como resultados del estudio los valores iniciales de concentración de NPK y pH. No se vieron otros parámetros como la temperatura, la agitación o la luminosidad.

No.	Conc NPK	pH	Cre-celular
1	4,5	8,5	980000
2	2,85	7,25	12300000
3	2,85	9,01	2200000
4	0,516	7,25	6225000
5	1,2	6	11150000
6	5,183	7,25	200000
7	2,85	5,48	10775000
8	2,85	7,25	10150000
9	4,5	6	3075000
10	1,2	8,5	11400000

Tabla N°1. Tabulación de diseño estadístico **Statgraphics** Plus 5.1

Fuente: **Statgraphics**

Las mejores condiciones obtenidas en el diseño experimental, utilizando el software **Statgraphics** Plus 5.1 al introducir el número de células por mililitro, se obtuvieron como resultado fueron para la concentración de NPK y el pH son 2.12 g/l y 6.7 respectivamente para un crecimiento de  $1,23 \times 10^7$  células/ml. El diseño experimental se hizo para un 95% de confianza. Al realizar la comprobación de los valores óptimos se obtuvo un crecimiento real de  $1.75 \times 10^7$  células/ml. La figura N° 8 muestra a las superficies de contornos estimadas, las cuales se reducen hasta llegar al valor máximo.

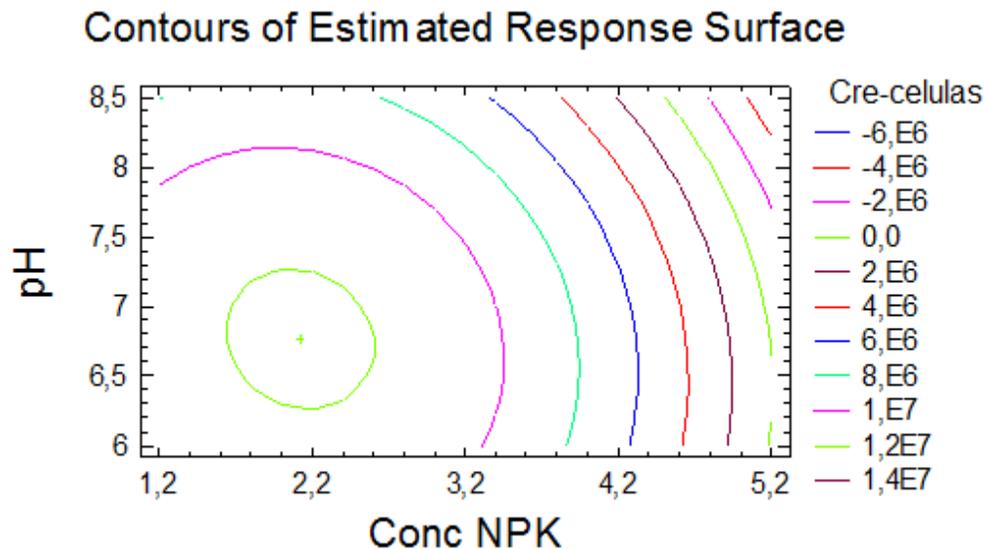


Fig N°8: Superficie de contorno

Fuente: **Statgraphics**

Es importante destacar que con la utilización del fertilizante NPK como medio de cultivo se observaron casos en los cuales no existió crecimiento celular, donde coincidieron los valores extremos de los rangos de pH y concentración de NPK seleccionados, los que resultaron desfavorables para las células. También se obtuvieron muestras que presentaban una concentración cercana al óptimo donde existía una coloración verde intensa lo cual ratifica que los nutrientes aportados por el fertilizante NPK en sus proporciones son adecuadas para el desarrollo microalgal. Ver anexo N° 2.

Este comportamiento es descrito por la siguiente ecuación que está en función de la concentración NPK y el pH, la misma describe el crecimiento celular con un valor de 83,6 % para un 95 % de confianza.

$$\text{Conce} \left( \frac{\text{células}}{\text{ml}} \right) = -5,38 * 10^7 + 7,45 * 10^6 * \text{Conc NPK} + 1,72 * 10^7 * \text{pH} - 1,30 * 10^6 * \text{Conc NPK}^2 - 284242,0 * \text{Conc NPK} * \text{pH} - 1,22 * 10^6 * \text{pH}^2 \quad \text{ec. [ 14]}$$

### III.1.1 Cinética de crecimiento

La cinética se realizó en las condiciones seleccionadas a partir del diseño experimental. Se evaluó por conteo celular en Cámara de Neubauer, se monitorio el crecimiento de las microalgas en un periodo de 14 días, la curva de crecimiento fue programada en el *Microsoft Excell* los resultados muestran el máximo crecimiento celular al cabo de 11 días como se observa en la figura N°9.

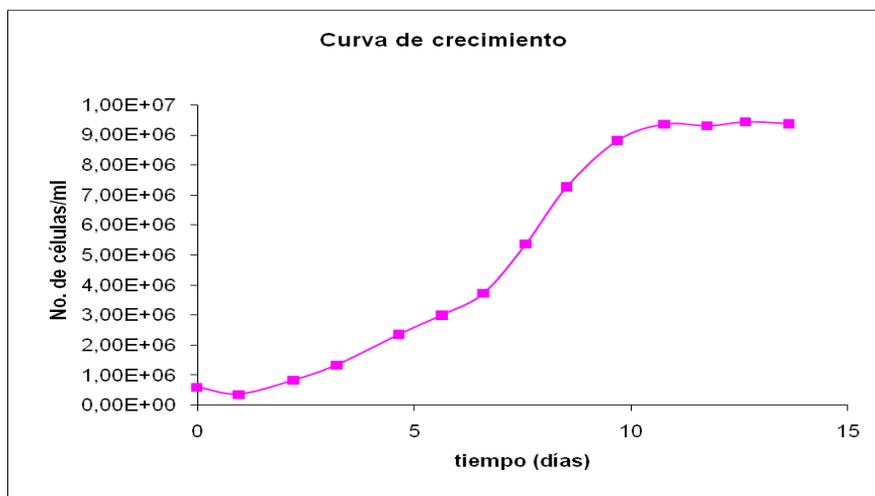


Fig N°9. Curva de crecimiento celular  
Fuente: Microsoft Excel

El tiempo de crecimiento obtenido fue comparado con los obtenidos por Gómez (28) en su investigación. Los autores establecen que el tiempo de crecimiento celular varía de 11 hasta 14 días; estos datos fueron obtenidos para distintos tipos de condiciones de cultivo, ver el anexo N° 3. Después de realizar la comparación se demuestra que los resultados obtenidos en la investigación se encuentran en el rango reportado por otros autores y que su variabilidad está determinada para las condiciones de cultivo y la especie de microalgas utilizada.

La velocidad específica máxima de crecimientos es  $0.013 \text{ h}^{-1}$  igual a  $0.312 \text{ d}^{-1}$ . En la figura N°10 la ecuación señalada representa la pendiente de la gráfica entre el logaritmo neperiano del crecimiento celular y el tiempo, su valor se determina para la fase exponencial de la cinética de crecimiento.

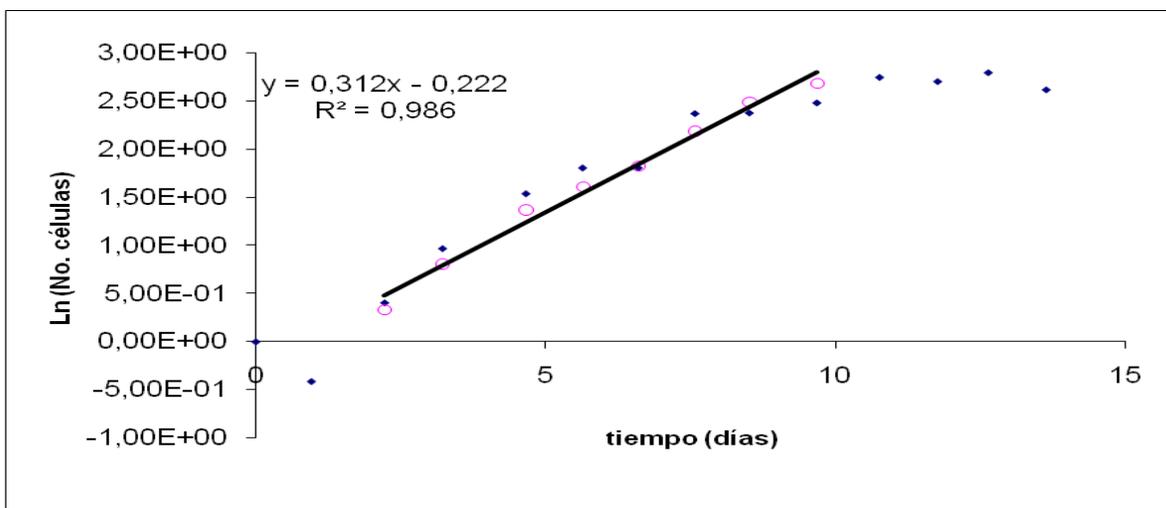


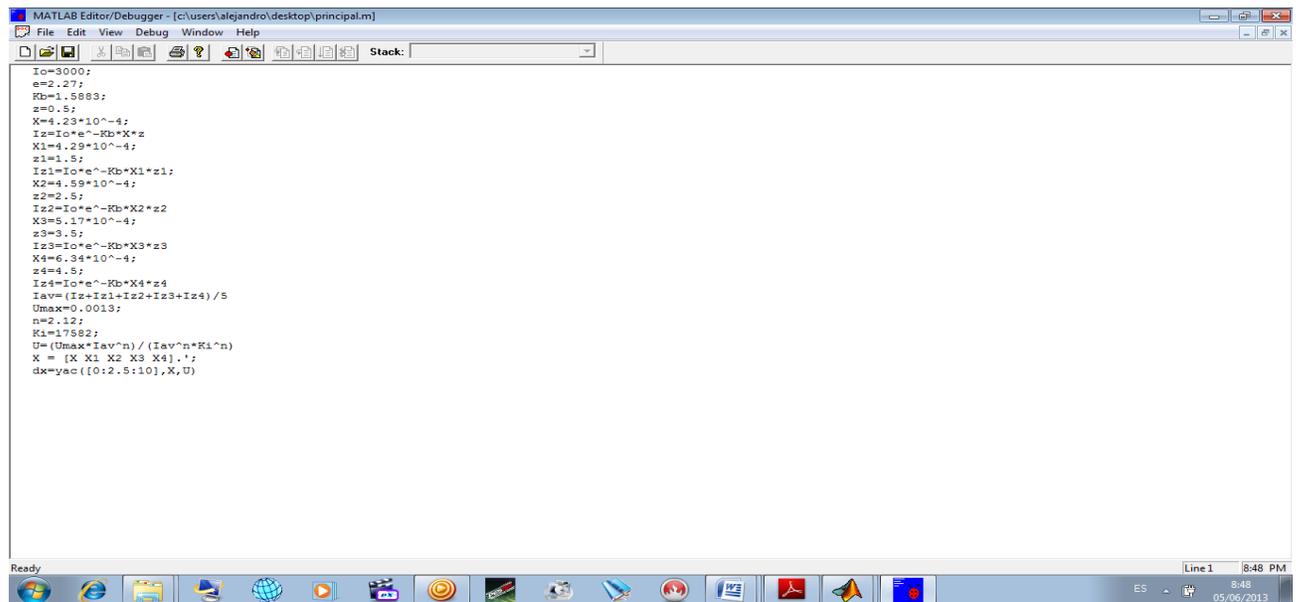
Fig N°10. Velocidad específica máxima de crecimientos  
Fuente: Microsoft Excel

Los resultados de velocidad máxima de crecimiento obtenida por la presente investigación se encuentra dentro del rango que expone Chagas (29), en su investigación, la velocidad máxima de crecimiento para *Chlorella* está dentro de un rango  $0.11 \text{ d}^{-1}$  hasta  $0.4 \text{ d}^{-1}$ . El valor obtenido en el trabajo de diploma es muy parecido a JinShui y colaboradores (30) que utilizan diferentes concentraciones de carbono y nitrógeno para el cultivo de *Chlorella* por lo tanto, se valida el resultado obtenido.

### III.2 Resultados de la simulación del crecimiento celular en el software Matlab

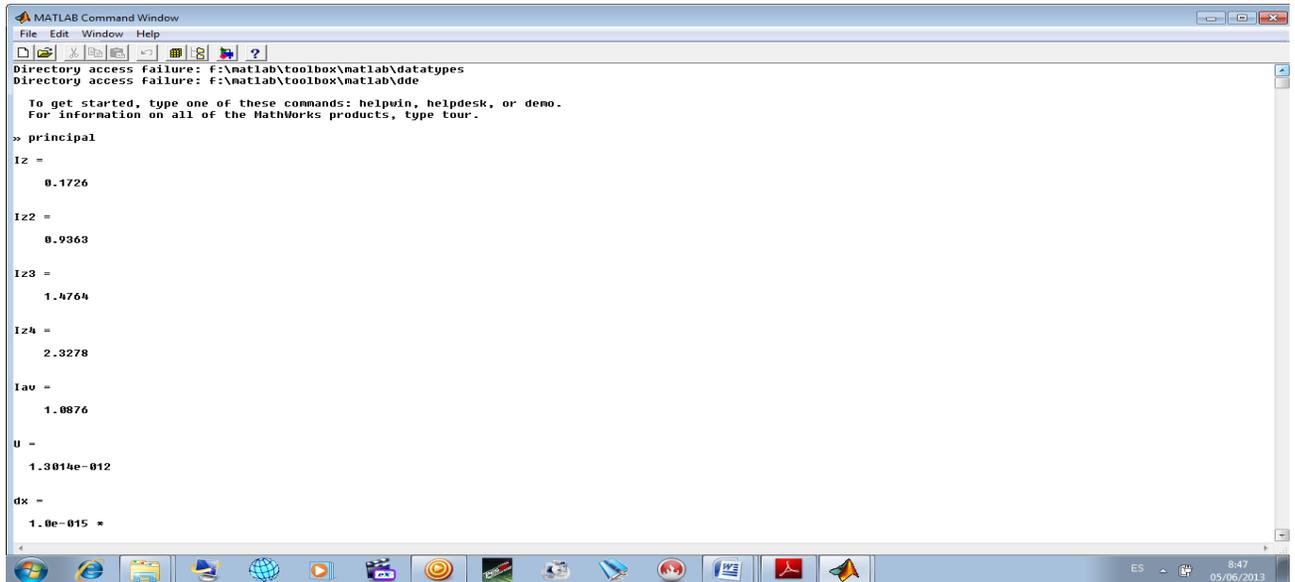
En el capítulo anterior se plantea la metodología que se utilizó para simular el FBR. En el software se utilizaron comando y funciones los cuales son mencionados en el capítulo anterior. Se muestran a continuación los datos que se utilizaron para la simulación.

El valor nombrado como  $I_0$  es el flujo luminoso incidente en la superficie, con un valor de 3000 lx, medido con un luxómetro, marca(HQRP digital lux meter , LX1010BS, Osprey-TalonCompany), es importante mencionar que este valor fue obtenido en condiciones climatológicas desfavorables como la sombra y en días ligeramente nublados, brindando un margen a favor para su utilización en mejores condiciones. Los valores  $K_I$ ,  $n$  y  $K_b$  son reportados por Chagas (29) y la concentración inicial de células es obtenida a partir de la cinética. Después de conocer la metodología se introducen en el editor (Fig N° 4) en secuencia y separados por punto y coma; ya que el Matlab no imprime los resultados en la pantalla aunque si realiza los cálculos, posteriormente se introdujo un perfil de concentración con 5 puntos y un paso de 2.5 para poder obtener la gráfica de crecimiento celular, con respecto al tiempo, véase en el anexo N°4. En la consola de comando, Fig N° 5, se muestran los resultados obtenidos.



```
Io=3000;
e=2.27;
Kb=1.5883;
z=0.5;
X=4.23*10^-4;
Iz=Io*e^-Kb*X*z;
X1=4.29*10^-4;
z1=1.5;
Iz1=Io*e^-Kb*X1*z1;
X2=4.59*10^-4;
z2=2.5;
Iz2=Io*e^-Kb*X2*z2;
X3=5.17*10^-4;
z3=3.5;
Iz3=Io*e^-Kb*X3*z3;
X4=6.34*10^-4;
z4=4.5;
Iz4=Io*e^-Kb*X4*z4;
Iav=(Iz+Iz1+Iz2+Iz3+Iz4)/5;
Umax=0.0013;
n=2.12;
Ki=17582;
U=(Umax*Iav^n)/(Iav^n+Ki^n);
X=[X X1 X2 X3 X4]';
dx=yc([0:2.5:10],X,U)
```

Fig N° 4. El Editor/Debugger de MATLAB  
Fuente: Elaboración propia



Fig°5 Consola de comando

Fuente: Elaboración propia

### III.2.1 Comparación entre los resultados

Se realizó la comparación entre los resultado expuesto por literaturas y los que se obtuvieron en la investigación en base a la concentración de la biomasa como se muestra en la tabla N°2

Bibliografía	Resultados
X=0.9795 g/l	X= 0.8251 g/l

Tabla N° 2. Concentración de biomasa

Fuente. Elaboración propia

Los resultados de la investigación, mostrados en la tabla N° 2, son diferentes a los planteados por el autor Chagas (29), el autor consideró como medio de cultivo una mezcla perfecta (); para la simulación se utilizó el modelo propuesto por el autor en función de la luminosidad y la velocidad máxima de crecimiento. Donde se utilizo como medio alternativo de cultivo Fertilizante NPK (9:13:17) el cual es diferente al utilizado por la literatura, otros aspectos que pueden influir en el aumento de la concentración son las condiciones iniciales establecidas, y características del FBR.

### III.3. Cálculo del valor calórico de la microalga.

Según Wassink (32), se realizó un estudio a la microalga *Chlorella vulgaris* bajo determinadas condiciones que propiciaron el conocimiento de determinadas características de dicha microalga con el fin de hallar sus propiedades químicas y energéticas. De dicho estudio, realizado escala de laboratorio a una masa de microalga de 88 mg, se obtuvieron las siguientes características:

C - 50,4%

H - 7,1%

N - 9,6%

ash - 6%

El valor calórico que obtuvo dicho autor en su estudio fue de 5770 Kcal/kg.

En los laboratorios de Universidad se realizaron evaluaciones con la muestra de *chorella vulgaris*, y los cálculos del valor calórico, utilizando la ecuación 6, se obtuvo el siguiente valor .

$$PCS = 34.8 * C + 93.8 * H + 10.46 * S + 6.28 * N - 10.8 * O \quad . \quad \text{ec.[6]}$$

$$PCS = 21.89668 \text{ MJ} / \text{kg} .$$

Convirtiendo este valor a las unidades de Kcal/kg se obtuvo:

$$PCS = 5238.4 \text{ Kcal} / \text{kg} .$$

El anterior valor, en base a la composición, comparado con el expresado por Wassink (32) es similar; por tanto se decidió trabajar con el valor 5238.4 kcal/kg.

### III.4 Validación del paquete de propiedades

La validación del paquete de propiedades del *software Aspen Hysys 2006* se realiza mediante el ciclo propuesto por Vega (33), según lo refiere Díaz (8).

En la tabla N° 4 se observan los principales parámetros resultados de la simulación y los valores del ciclo seleccionado para la validación, observándose también el porcentaje de error entre los resultados de Vega (33) y el resultado del *software* evaluado por Díaz (8), según la ecuación [12]

	Ciclo diseñado por verga	Ciclo simulado en HYSYS	Error(%)
Generacion bruta	7.92	7.98	0.757576
Agua de mar superficial (kg/s)	27000	27000	0
Agua de mar profunda (kg/s)	14240	13970	1.896067

Tabla N° 4. Validación del paquete de propiedades del *Aspen Hysys2006*

Fuente: Díaz Sáez

Los márgenes de errores son pequeños y admisibles, con este resultado queda validado el paquete termodinámico escogido para ambas sustancias del Ciclo OTEC, el cual es similar al establecido en la presente investigación.

### III.5 Simulación del ciclo de acople

Después de ser validado el paquete termodinámico se pasa a la simulación del Ciclo OTEC donde se añade un sobrecalentador. este equipo es alimentado una corriente de calor producida en el fotobiorreactor, según se muestra en el epígrafe III.3 el calor intercambiado con el fluido de trabajo,  $NH_3$ , en el equipo es de 507945600 kJ, el cual permite al ciclo OTEC producir una potencia de 10 MW.

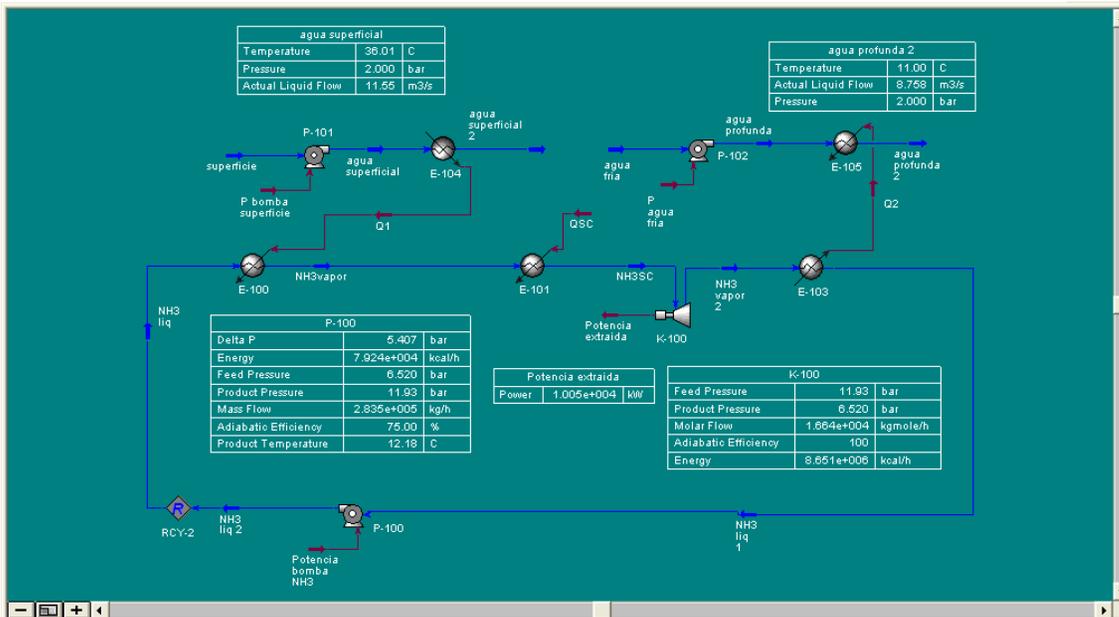


Fig N° 5. Es el ambiente de simulación

Fuente *Aspen Hysys2006* con sobrecalentador.

A continuación en el Workbook se muestran algunas variables calculadas donde los datos que aparecen en color azul son los introducidos por el autor y los de color negro son los resultados calculados por el software.

Name	NH3 liq	NH3vapor	NH3SC	NH3 vapor 2	NH3 liq 1	NH3 liq 2	superficie	agua superficial	agua superficial
Vapour Fraction	0.0000	1.0000	1.0000	0.9700	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Temperature [C]	12.18	31.00	60.00	12.00	12.00	12.18	36.00	36.01	34.00
Pressure [bar]	11.93	11.93	11.93	6.520	6.520	11.93	11.93	2.000	2.000
Molar Flow [kgmole/h]	1.664e+004	1.664e+004	1.664e+004	1.664e+004	1.664e+004	1.664e+004	2.96e+006	2.305e+006	2.305e+006
Mass Flow [kg/h]	2.835e+005	2.835e+005	2.835e+005	2.835e+005	2.835e+005	2.835e+005	4.153e+007	4.153e+007	4.153e+007
Liquid Volume Flow [m3/h]	460.1	460.1	460.1	460.1	460.1	460.1	4.161e+004	4.161e+004	4.161e+004
Heat Flow [kcal/h]	-2.703e+008	-1.843e+008	-1.792e+008	-1.879e+008	-2.704e+008	-2.703e+008	-1.569e+011	-1.569e+011	-1.569e+011
Molar Enthalpy [kcal/kgmole]	-1.624e+004	-1.107e+004	-1.077e+004	-1.129e+004	-1.625e+004	-1.624e+004	-6.801e+004	-6.801e+004	-6.805e+004

Fig N<sup>o</sup> 6. Workbook

Fuente Aspen Hysys2006 con sobrecalentador.

La simulación corroboró la posibilidad del sobrecalentamiento y obtener 10 MW como generación bruta, idéntico resultado logrado por Linares (16) en su tesis de diploma a partir de la recirculación del agua del condensador la diferencia en este caso radica en la utilización de una tecnología limpia que reduce la contaminación de los gases de combustión de la CTE y se logra similar generación.

A continuación se muestran algunas características del sistema propuesto.

Cantidad de H2O fría (kW)	32 150
Cantidad de H2O caliente(kW)	41 610
Potencia extraída (kW)	10 050
Eficiencia (%)	9,49

Tabla N<sup>o</sup> 5. Valores de parámetros principales

Fuente: Elaboración propia

### III.6 Estimación económica

#### III.6.1 Cálculos de los parámetros de diseño fotobiorreactor

En el diseño de un fotobiorreactor es necesario tener en cuenta parámetros fundamentales como son el cálculo de área y el número de tubos.

Cálculo del área FBR.

$$Q_{sum} = 507945600 \text{ KJ}$$

$$g = I_{ener} * ef$$

ec.[9]

$$I_{ener} = 2650 \text{ kcal/m}^2$$

$$ef = 25\%$$

Análisis de unidades de Kcal/m<sup>2</sup> a KJ/m<sup>2</sup>

$$g = 2769.808 \text{ KJ/m}^2$$

$$A_{fot} = Q_{sum}/g$$

ec.[8]

$$A_{fot} = 183386.57 \text{ m}^2$$

$$A_{fot} = 18.3 \text{ Km}^2$$

El área calculada resulta extensa pero es posible considerar otros tipos de reactores en la literatura, los cuales son más eficientes, permitiendo elevar la eficiencia de la fotosíntesis y el metabolismo adicionándole compuestos que contengan vitaminas del grupo B, recomendable para próximas investigaciones tener en cuenta las dimensiones del fotobioreactor versus la eficiencia del proceso.

Cálculo del área de transferencia de calor

$$A_{tc} = \pi * h_{tub} * d_{tub} \text{ ec.[11]}$$

$$\pi = 3.14$$

$$h_{tub} = 4 \text{ m}$$

$$d_{tub} = 0.5 \text{ m}$$

Numero de tubos

$$N_{tub} = \frac{A_{sup}}{A_{tc}}$$

ec.[10]

$$N_{tub} = 441$$

En la tabla N° 3 se muestra los resultados del número de tubos obtenidos por la bibliografía y la investigación.

bibliografía	Resultados
132	441

Tabla N° 3 Comparación del numero de tubos

**Fuente. Elaboración propia**

El número de tubos se comparó con los datos registrados en la literatura Monthieu (21) y el resultado obtenido es elevado ya que depende del área, por lo tanto deberá estar sujeto a cambios para investigaciones posteriores aplicar las sugerencias expuesta para reducir el área.

### III.6 .2 Costo aproximado de los sistemas propuestos

Los costos de los FBR y el sistema OTEC son elevados y su cálculo es necesario ejecutarlo según información de la literatura Beilen (15) para FBR y Inc, Xenesy (11) para el sistema OTEC, ver tabla N° 6. Los valores de los costos de los FBR están en dólares y los de los sistema OTEC en euro para la conversión a dólares se utiliza el tipo de cambio oficial de monedas extranjeras y peso convertible (CUC) con relación al peso cubano (CUP), según el Banco Central de Cuba(ver anexo 5).

Fotobiorreactores	Sistema OTEC
9169328.7 dólares	54861112 dólares

Tabla N° 6. Costo de las tecnologías

**Fuente: Elaboración propia**

Los resultados obtenidos son la validación de la propuesta de acoplar un FBR, el cual generó biomasa para ser combustionada en una caldera que suministrar el calor necesario al sobrecalentador, para producir una potencia de 10 MW en la Planta OTEC. Los resultados obtenidos fueron posibles teniendo en cuenta los indicadores propuestos por Banco Nacional de Cuba (ver anexo 5)

Consumo específico de 0.001516 barriles/kWh

Densidad del petróleo de 980 kg/m<sup>3</sup>

Costo del barril 104.3 dólares/barril

Tarifa por concepto de venta eléctrica al año (T<sub>CV</sub>) 0.10 \$/kW h

Corriente producida de 5.6 MW.

Benéficos eléctricos.

$$B_e = C_p + T_{CV} \quad \text{ec.[15]}$$

$$B_e = 560 \text{ \$/h}$$

$$B_e = 560 \text{ \$/h} * 8760 \text{ h} * 1 \text{ año} \quad \text{ec.[16]}$$

$$B_e = 4905600 \text{ \$/año}$$

Beneficios por concepto combustibles

$$B_c = C_b * C_e * P_g \quad \text{ec.[17]}$$

$$B_c = 885.46 \text{ \$/h}$$

$$B_c = 7756675.85 \text{ \$/año}$$

Beneficios por conceptos medioambientales

En el cálculo para los beneficios se utilizó la metodología programado en *Microsoft Excel* por DrC. Roberto Vizcón (26). La metodología está programada para un potencia de generación de 300 MW la cual se ajustó para una potencia de 10 MW producida por la CTE José Martí ya que es imposible que la CTE “Antonio Guiteras Holmes” pueda producir energía eléctrica por debajo de los 150 MW por desconexión de sus sistemas automatizados.

La presente metodología permitió el estimado de los beneficios medioambientales, al dejar de consumir el petróleo correspondiente a 10 MW. Los índices utilizados son derivados de estimados en países capitalistas, por lo tanto constituye un aproximado para las condiciones cubanas, ver tablas N<sup>os</sup>7 y 8.

VII a) RESULTADOS Y COMENTARIOS			
Parámetro	Valor	Unidad	Comentario
Pe CO	21,9661135	\$/año	perjuicio económico del CO
Pe SO2	6942,3034	\$/año	perjuicio económico del SO2
Pe Nox	1676,72	\$/año	perjuicio económico del NOX
PeMPs	7510,85781	\$/año	perjuicio económico de las partículas sólidas MPs
PeCO2	4946,03823	\$/año	perjuicio económico del CO2
<b>Pe total</b>	<b>21097,88</b>	<b>\$/año</b>	<b>PERJUICIO ECONOMICO TOTAL DE LAS EMISIONES DE GASES Y PARTICULAS SOLIDAS MEDIO.</b>

Tabla N° 7 Beneficios mediambiental

Fuente. Elaboración propia

VI.DETERMINACION DE LA EMISION DE DIOXIDO DE CARBONO			
M(CO2)	101,02 g/s	cantidad de partículas sólidas emitidas	
	2909,43 ton/año		
Mtotal	2,96 g/s	flujo total de contaminantes dañinos emitidos por el	
	186,41 ton/año	generador de vapor	

Tabla N°8. Cantidad de contaminantes

Fuente. Elaboración propia

Los resultados obtenidos establecen perjuicios medioambientales de más de 21000 \$/año, lo cual constituye el beneficio por dejar de producir 10 MW de electricidad sin el consumo de petróleo, causante de la contaminación.

### III.6.3 Análisis del estimado del tiempo de recuperación de la inversión

Se considera viable una inversión cuando el tiempo de recuperación de la inversión no sobrepasa los 10 años para plantas de generación de corriente eléctrica, los métodos empleados para este cálculo son mediante el método dinámico, el cual incluye todos los movimientos de caja, tasa de interés, entre otros. Estos aspectos son complicados en la obtención de sus valores de la literatura. Es por ello que se realiza el análisis por el método estático. Este último brinda una primera idea de cuánto sería dicho tiempo. El cálculo del plazo de recuperación de la inversión para la planta OTEC en conjunto con el FBR, partiendo de la unión del sistema OTEC y el fotobirreactor para producir el calor necesario y obtener la potencia deseada, se realizan sumando los dos costos inversión como uno solo. La ganancia es la unión de los benéficos por ahorro de combustible, medio ambientales y eléctricos.

Para determinar los costos de producción se tomó como referencia que el FBR cuenta con tres operarios, tabla N° 8; la Planta OTEC cuenta con 5 profesionales, según Xenexys (11), esta tecnología cuenta con poco personal porque en el

Mundo estos procesos están totalmente automatizados. En el caso del mantenimiento y otros costos de operación se estiman en un 20 %

Personal	Cantidad	salarios
Profesional	5	500\$
Especialista	1	400\$
Técnico	1	350\$
Obrero	1	225\$

Tabla N<sup>o</sup>9. Estimado de trabajadores

Fuente .Elaboración propia

Para hallar los costos de producción se utiliza la siguiente fórmula

$$C_p = \sum \text{salarios} * \text{cantidad de personas por especialidades} \quad \text{ec.[18]}$$

$$C_p = 42060 \text{ \$/año}$$

$$C_{mant_i} = I_{mant} * kW_{genr} = 1875000 \text{ \$/año}$$

$$C_{op} = I_{op} * kW_{genr} = 93750 \text{ \$/año}$$

$$C_{opt} = C_p + C_{mant} + C_{op} = 2010810 \text{ \$/año}$$

$$Tre = \frac{C_{intotal}}{Gb - C_{opt}} \quad \text{ec.[13]}$$

Dónde:

$$C_{INTOTAL} = 64030440.7 \text{ \$/año}$$

$$G_B = B_C + B_e + B_M \quad \text{ec.[19]}$$

$$G_B = 16536385.7 \text{ \$/año}$$

$$Tre = \frac{64030440}{16536386 - 2010810,00} \quad \text{ec.[13]}$$

$$Tre = 4.41 \text{ años}$$

Los cálculos expuestos demuestran que la unión entre los biocombustibles y la tecnología OTEC son factibles económicamente, tomando en consideración el

resultado anterior, donde el tiempo de recuperación de la inversión es menor de 10 años para la tecnología.

## ***Conclusiones:***

1. La simulación de un fotobiorreactor para el cultivo de *Chlorella vulgaris* para su combustión, combinado con un ciclo OTEC; se proyectó en la Central Termoeléctrica Antonio Guiteras Holmes, como variante tecnológica en su aplicación en el procesamiento de combustible produciendo 10 MW que generan ahorro de combustible.
2. Durante la investigación se obtuvo la curva de crecimiento de la *Chlorella vulgaris* a escala de laboratorio demostrando que los resultados alcanzados fueron satisfactorios, con una densidad máxima de crecimiento celular al cabo de 11 días.
3. La simulación del fotobiorreactor responde al aumento de la eficiencia de la tecnología OTEC aplicada en la CTE Antonio Guiteras, logrando producir 10 MW, lo cual conlleva a la disminución del consumo de combustible en la misma y al cuidado del medio ambiente.
4. El costo de inversión inicial de la Planta BIOTEC propuesta para disminuir el consumo de combustible de la CTE "Antonio Guiteras Holmes" es de \$64030440,7 y resulta económicamente viable, ya que la misma se recupera en aproximadamente 4 años.

## *Recomendaciones:*

1. Profundizar en el estudio de la implementación de la tecnología BIOTEC referida en esta investigación.
2. Aprovechar al máximo las bondades de la tecnología OTEC, explotando también las industrias derivadas de la misma, como la desalinización, acuicultura y extracción del titanio, litio, entre otras.
3. Realizar una simulación más completa de todo del acople CTE-OTEC-FBR.

## *Bibliografía:*

1. Echevarría, M., González y López, 2009. El uso excesivo de combustibles fósiles. Instituto Tecnológico de Sonora. Disponible en: <http://antiguo.itson.mx/Publicaciones/55.pdf>.
2. González, Raimundo. Diario El País Enero del 99. I. G. MARDONES, Madrid. Disponible en: <http://www.porquebiotecnologia.com>
3. De Biofields. Los biocombustibles a partir de microalgas. Disponible en: <http://www.biofields.com>.
4. Bond, Martín. Energía hidráulica, ventajas. Disponible en: <http://www.nodo50.org/panc/Ere.htm>.
5. Inc, OIA. An Energy Solution [CD-ROM]. Satellite images courtesy of NASA & Google. [San Juan, Puerto Rico].
6. Avery, W. RENEWABLE ENERGY FROM THE OCEAN A GUIDE to OTEC. 1era ed. Oxford: New York, 1994. ISBN 0-19-507199-9.
7. Claude, G. Conferencia leída en la Academia de Ciencias Médicas, Físicas y Naturales de La Habana. Revista de la Sociedad Geográfica de Cuba, 84-a, N° 4. 9 de octubre de 1930.
8. Díaz Sáez, Asbiel. 2010. Propuesta de acoplamiento de la Empresa Niquelífera Ernesto Che Guevara a una industria OTEC. Ingeniería Mecánica, UMCC. Matanzas: s.n., 2010. Tesis de diploma.
9. Martí, J., Plocek, T., Laboy, M. Implementación comercial de la conversión de energía océano termal: Aspectos ambientales e implicaciones socio económicas (2008). [CD-ROM].
10. Martí, J., Plocek, T., Laboy, M. Viabilidad de la conversión de energía océano termal (OTEC) para la producción de energía renovable y agua potable en países en desarrollo (2010). [CD-ROM].
11. Inc, Xenosys. Study on OTEC Demonstration Plant Construction Project in Cuba. Japan Consulting Institute. 2008.
12. Dylan, T., "Ocean Thermal Energy Conversion: Current Overview and Future Outlook," Revista Renewable Energy, Vol. 6, No. 3, 1995, pp. 367-373.

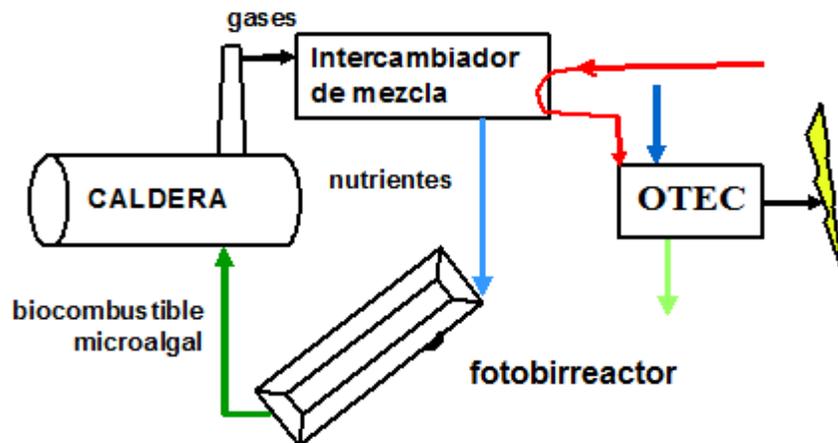
13. Avery, W. The influence of recent low interest rates on the estimated prices of OTEC fuels [CD-ROM]. Johns Hopkins University. 1984. Disponible en: <[www.methanol.org/fuelcell/fact/mfcv.efm](http://www.methanol.org/fuelcell/fact/mfcv.efm)>.
14. Díaz, J., Díaz, Y., y Martínez, J. (2008). Costo de la inversión en plantas (OTEC) alternativas. Grupo OTEC. Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”. Cuba.
15. Beilen, Jan B. van. (2010). Why microalgal biofuels won't save the internal combustion machine. University of Lausanne, Switzerland
16. Linares, Luis A. (2012) Propuesta de acoplamiento de la Central termoeléctrica Antonio Guiteras Holmes a una industria OTEC
17. Obando Jaramillo Juan Jacobo EVALUACION TECNO-ECONOMICA DE LA PRODUCCION DE BIOCOMBUSTIBLES A PARTIR DE MICROALGA Universidad Nacional de Colombia Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Maestría en Ingeniería-Ingeniería Química Manizales, Colombia 2011
18. C. Rubio, Manuel 2011. Microalgas, el petróleo verde. [CD-ROM]
19. Machado Llarena, Danny. 2010. Determinación de la factibilidad técnica de sustitución del combustible tradicional de la Cte. “José Martí” por biocombustible microalgal. Ingeniería Mecánica, UMCC. Matanzas: s.n., 2010. Tesis de diploma.
20. Travieso, L., Et Al., Batch Mixed Culture Of Chlorella Vulgaris Using Settled And Diluted Piggery Waste. Ecological Engineering, 2006. 28(2): P. 158-165
21. Monthieu, Chloé. 2010. Estudio técnico económico de la extracción de los lípidos de las microalgas para la producción de biodiesel. Ingeniería en Organización Industrial. Universidad PONTIFICIA COMILLAS. Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI). Proyecto fin de carrera.
22. Barraza, Camila; Collao, Vanessa; Espinoza, Camila; Moya, Francisco; Thun Gabriel; Torres, Mauro. Producción de biodiesel a partir de microalgas. Julio 2009. Disponible

- en:<http://www.monografias.com/trabajos-pdf2/produccion-biodiesel-microalgas/produccion-biodiesel-microalgas.pdf>.
23. Granjas para Cultivo de Micro-Algas. 2007 Disponible en: <http://www.tecnologiaparatodos.com.ar/bajar/algas2-2008.pdf>. [CD-ROM]
  24. Colectivo de Análisis de Procesos. Tutorial de MATLAB. Facultad Ingeniería Química. Universidad de Matanzas. Marzo, 2000.
  25. MONTOYA LOPEZ CYNTHIA Aplicación del ensayo cometa en la asignación del daño genómico por benzo[a]pireno en *Dunaliella tertiolecta*. OCTUBRE DE 2011
  26. Vizcón, Roberto. 2010. Metodología para el cálculo de los costos medioambientales. Matanzas, 25 de noviembre de 2010. software.
  27. GRIMA; E .; CAMACHO, F, G; PEREZ ,J ,A,S; SEVILLA, J.M.F; FERNADAZ; F,G,A; CONTRERAS GOMES ,A; mathematical model of micralgal growth in light-limited chemostat culture .J. Chem. Biotechnol,n.61 p167-173, 1994
  28. Gómez Luna Liliana, Inaudis Álvarez, Roger Rivero. Culture of *Chlorella vulgaris* using soy waste and applying a magnetic field. Cultivo de *C. vulgaris* con soja y CM. October, 2011
  29. Arthur Lygeros Das Chagas Modelagem e simulação do fotobiorreator Air-lift para o cultivo da microalga *Dunaliella Tertiolecta*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de engenharia. Departamento de engenharia química. Julho, 20
  30. JinShui Yang, Ehsan Rasa, PrapakornTantayotai, Kate M. Scow, HongLi Yuan, Krassimira R. Hristova. Mathematical model of *Chlorella minutissima* UTEX2341 growth and lipid production under photoheterotrophic fermentation conditions. 2011

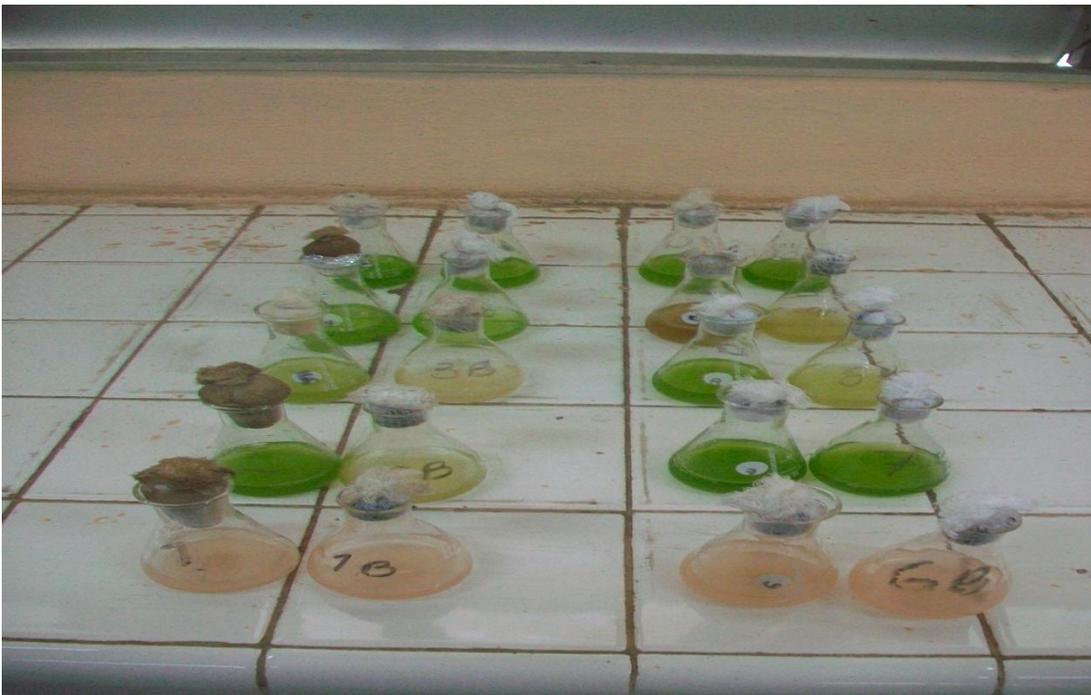
31. Fernández, Danis; Ramos, Larisa; Oropesa, Alberto; Miranda, Javier. Pruebas integrales después del mantenimiento CTE “José Martí” (matanzas) Unidad # 3. Diciembre/2008.
32. Wassink, E. C.; Kok, B; van Oorschot, J. L. P. Chapter 5 The efficiency of light-energy conversion in chlorella cultures as compared with higher plants. Solar Energy Research Group, sponsored by the Organization for Applied Scientific Research (T.N.O.), Laboratory of Plant Physiological Research, Agricultural University, Wageningen, Netherlands. Carnegie Institution of Washington publication.1976.
33. Vega, L. A. Ph. D, 2001, “Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC)” IOA Newsletter Vol.12, No.4/Winter 2001 disponible en Internet en: <<http://www.Newsletter.com>>.
34. Tasa de cambio. [on line]. Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos. [Citado 18 de junio 2013]. Disponible en Internet: julio.diaz@umcc.cu

## Anexos:

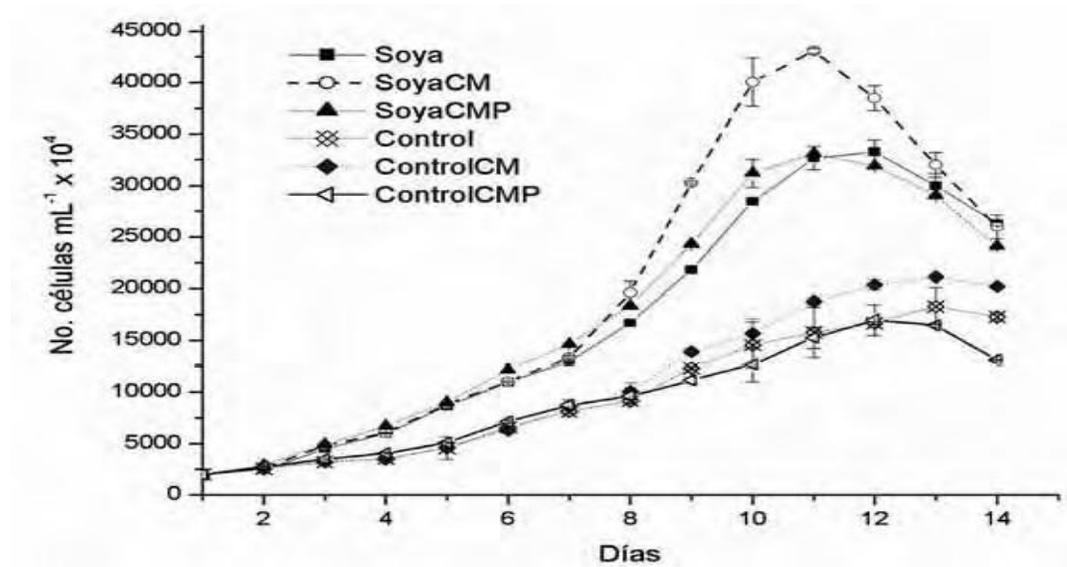
Anexo 1. Combinación de las tecnologías OTEC y Biocombustible microalgal.



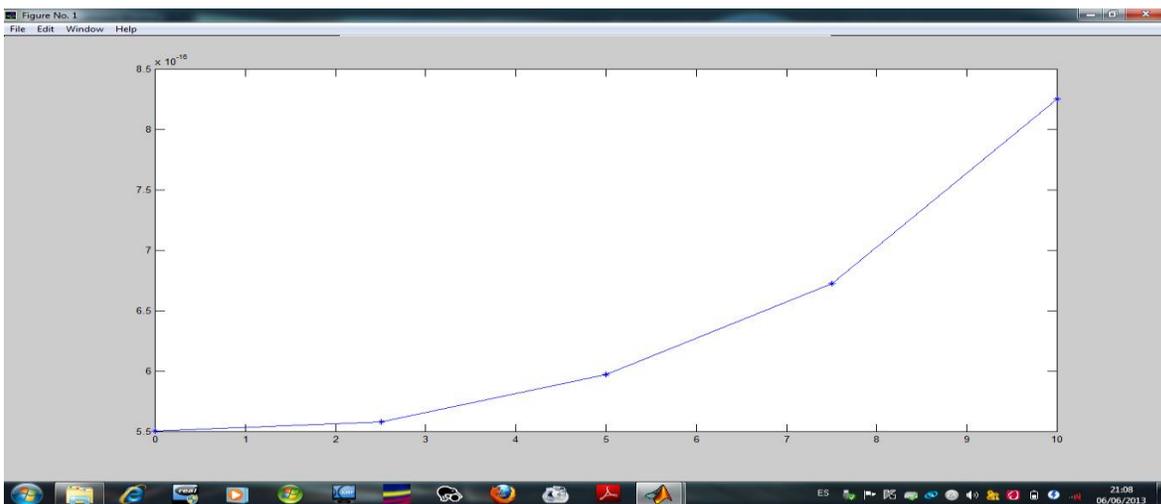
Anexo 2.



Anexo 3

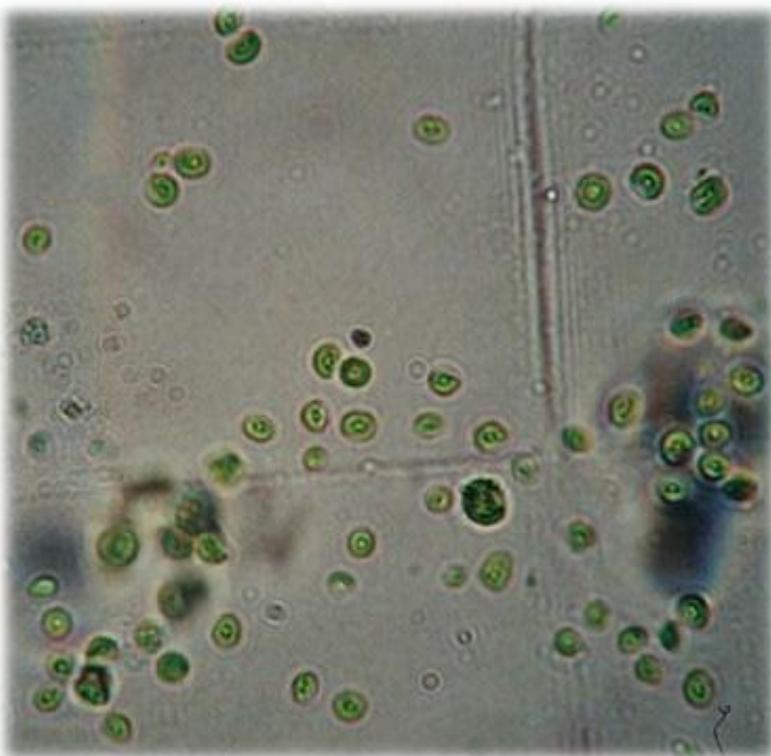


Anexo 4





Anexo 6: *Chlorella vulgaris*



Anexo 7: Fotobiorreactor tubular.

