

**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS**

ESCUELA DE PREGRADO

MEMORIA DE TÍTULO

**MODELO DINÁMICO PARA LA  
OPTIMIZACIÓN DE UN SISTEMA  
ELÉCTRICO EN BASE A BIODIESEL**

**MARCELO IGNACIO SÁNCHEZ RAMÍREZ**

**SANTIAGO - CHILE**

**2013**

**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS**

ESCUELA DE PREGRADO

MEMORIA DE TÍTULO

**DYNAMIC MODEL FOR OPTIMIZATION OF  
ELECTRICAL SYSTEM BASED ON  
BIODIESEL**

**MARCELO IGNACIO SÁNCHEZ RAMÍREZ**

**SANTIAGO - CHILE**

**2013**

**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS**  
ESCUELA DE PREGRADO

**MODELO DINÁMICO PARA LA  
OPTIMIZACIÓN DE UN SISTEMA  
ELÉCTRICO EN BASE A BIODIESEL**

Memoria para optar al Título Profesional de  
Ingeniero en Recursos Naturales Renovables

**MARCELO IGNACIO SÁNCHEZ RAMÍREZ**

**Profesor Guía**

**Calificaciones**

Ian Homer B.,  
Ingeniero Agrónomo, Dr.

\_\_\_\_\_

**Profesores Evaluadores**

Maruja Cortés B.,  
Ingeniero Agrónomo, Mg. Sc., Dr.

\_\_\_\_\_

Cristián Mattar B.,  
Ingeniero en Recursos Naturales Renovables, Dr.

\_\_\_\_\_

**SANTIAGO - CHILE**

**2013**

# CONTENIDO

Resumen.....	1
Abstract .....	1
Introducción.....	2
Objetivo General .....	4
Objetivos Específicos .....	4
Revisión Bibliográfica .....	5
Biodiesel .....	5
Simulación Dinámica de Sistemas .....	10
Proyecto Producción de Biodiesel.....	14
Materiales y Métodos.....	17
Definir Elementos, Relaciones y Límites del Sistema .....	17
Realizar Diagrama Casual.....	17
Definir las Magnitudes de los Elementos .....	18
Realizar Diagrama de Forrester.....	19
Determinar Ecuaciones .....	19
Calibrar el Modelo.....	21
Evaluación del Modelo: Contrastado .....	23
Resultados y Discusión .....	24
Elementos, Relaciones y Límites del Sistema .....	24
Diagrama Casual .....	27
Magnitudes de los Elementos .....	28
Diagrama de Forrester .....	28
Determinar Ecuaciones .....	29
Calibrado.....	32
Evaluación.....	33
Conclusión.....	37
Bibliografía.....	39
Anexos y Apéndices .....	42

## Figuras

<b>Figura 1.</b> Ecuación química de la transesterificación. ....	5
<b>Figura 2.</b> Correspondencias entre elementos y símbolos en el diagrama de Forrester..	12
<b>Figura 3.</b> Provincia de Cauquenes, Región del Maule.....	15
<b>Figura 4.</b> Procesos para la elaboración de una planta de biodiesel a pequeña escala. ....	24
<b>Figura 5.</b> Diagrama casual para planta de biodiesel a pequeña escala. ....	27
<b>Figura 6.</b> Ensayos realizados con 15, 20, 30, 45 y 60 minutos de reacción.....	32
<b>Figura 7.</b> Medición de proporciones de Glicerina y Metilester.....	32
<b>Figura 8.</b> Comparación en litros de biodiesel acumulado real y modelado. ....	34
<b>Figura 9.</b> Error Absoluto y Relativo en relación a cantidades de biodiesel. ....	35
<b>Figura 10.</b> Cálculo de excedente de biodiesel para 5,5 horas de energía en dos años...	36

## Cuadros

<b>Cuadro 1.</b> Comparación energética de combustibles.....	6
<b>Cuadro 2.</b> Propiedades legales del biodiesel.....	9
<b>Cuadro 3.</b> Recolección de aceite entre enero y abril de 2013 .....	33
<b>Cuadro 4.</b> Información de elementos utilizados en las comunidades beneficiadas.....	34

## Ecuaciones

<b>Ecuación 1.</b> Ecuación de variable de nivel general.....	20
<b>Ecuación 2.</b> Ecuación de variable de nivel para intervalos unitarios.....	20
<b>Ecuación 3:</b> Validación de valores con un error previamente dado. ....	23

## Anexos

<b>Anexo I.</b> Calcomanía entregada a los locales participantes del proyecto.....	42
<b>Anexo II.</b> Construcción de reactor de biodiesel.....	42
<b>Anexo III.</b> Motor diesel modificado para altas concentraciones de biodiesel.....	43
<b>Anexo IV.</b> Luminaria común. ....	43

## Apéndices

<b>Apéndice I.</b> Detalle de elementos en modelo de producción de biodiesel. ....	44
<b>Apéndice II.</b> Diagrama de Forrester para una planta de biodiesel a pequeña escala.....	50
<b>Apéndice III.</b> Diagrama de Forrester Subsistema Recolección de Aceite. ....	51
<b>Apéndice IV.</b> Diagrama de Forrester Subsistema Transformación Bioquímica. ....	52
<b>Apéndice V.</b> Diagrama de Forrester Subsistema Transformación a Energía Eléctrica. ....	53
<b>Apéndice VI.</b> Diagrama de Forrester Subsistema Consumo Eléctrico. ....	54

# RESUMEN

Las necesidades de energía eléctrica en áreas aisladas han requerido diversos mecanismos de solución, entre ellos el uso de generadores eléctricos en base a biodiesel. La gran cantidad de parámetros o elementos interrelacionados dificulta la toma de decisiones o proyecciones a futuro, y por lo tanto, la posibilidad de replicar iniciativas similares con una confiabilidad viable.

Por ello, se desarrolló un modelo computacional de simulación dinámica que permite interpretar la realidad en la producción de una planta de biodiesel, además de optimizar la producción de energía eléctrica e incluso la replicabilidad de proyectos similares frente a realidades distintas.

Los antecedentes de origen para la generación del modelo fueron obtenidos por el Proyecto FONDEF D10ER2002 ejecutado por la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile en la provincia de Cauquenes, región del Maule. Allí se utilizaron aceites reciclados provenientes de las principales ciudades de la provincia para satisfacer las necesidades energéticas de dos pequeñas comunidades rurales, promoviendo el reciclaje y el cuidado ambiental.

Durante enero y abril de 2013 se obtuvieron los antecedentes del aceite recolectado y el biodiesel generado para desarrollar un modelo de simulación dinámica en base al mecanismo desarrollado previamente, que presenta una serie de pasos previos establecidos y validados para la generación de este tipo de modelos.

El modelo se desarrolló tanto con el *Software Excel* como en *Stella*, y ambos entregaron el mismo resultado. Sin embargo en *Excel* se incluyó más información que podría ser relevante en proyectos similares, debido a la posibilidad de programación en *Visual Basic*, haciéndolo mucho más versátil y sencillo de utilizar para el usuario final.

El modelo fue validado por contraste a un error  $<10\%$ , y cercano al  $2,5\%$  en temporada baja cuando la producción de aceite disminuye y es más estable. Mediante este sistema, se logró optimizar los recursos para aumentar la energía eléctrica entregada a las comunidades beneficiadas por el Proyecto D10ER2002 desde 3 hasta 5,5 horas al día.

**Palabras Clave:** Simulación dinámica, biodiesel, diagrama de Forrester, Stella software.

# ABSTRACT

The needs for electric energy in isolated areas have required diverse solution mechanisms, among them the use of electric generators based on biodiesel. The great number of parameters and inter related elements makes difficult to take decisions or make future previews, and thus, the possibility to replicate similar initiatives with valid confidence.

Because of this, a PC software for dynamic simulation was developed to allow the interpretation of reality in the production of biodiesel plant, besides optimizing the production of electric energy, and even the replicability of similar projects in different conditions.

The input data to generate the model were obtained from the FONDEF D10ER2002 project developed by the College of Agronomic Sciences, University of Chile, in the Cauquenes Province, Maule Region. There, recycled oils from the main cities in the province were used to satisfy the energy needs of two small rural communities, promoting recycling and environmental care.

Date of the oil collected and biodiesel generated were obtained in January and April 2013, to develop a dynamic simulation model based on the mechanism developed previously, which presents a series of previous steps established and validated for the generation of this kind of models

The model was developed both with the *Excel* and *Stella* software, and both gave the same result. However, in *Excel* it was included more information that would be relevant in similar projects, due to the possibility of programming in Virtual Basic, making it more versatile and simple to use for the final user.

The model was validated by contrast to an error <10%, and near to 2.5% in low season, when oil production decreases and is more stable. With this system, the resources to increase the electric energy to the communities benefited by the D10ER2002 Project were increased from 3 to 5.5 hours daily.

**Key words:** Dynamic simulation, biodiesel, Forrester's diagram, *Stella* software.

# INTRODUCCIÓN

En Chile, no toda la población posee conexión a la red eléctrica. En el año 2008, el 3,9 % de la población en Chile carecía de este importante servicio (Fernández *et al.*, 2008). Para satisfacer esa necesidad existen diferentes alternativas, siendo la más utilizada por su disponibilidad inmediata, los generadores eléctricos a base de diesel o gasolina. Éstos presentan la limitante del precio de los combustibles pues hace restrictivo su uso. Por otro lado, el petróleo como base energética conlleva múltiples efectos negativos a nivel mundial, ya que corresponde a una energía no renovable y donde la disponibilidad y precio están regidos por el país productor y su situación política. Además, existe una relación directa entre el uso de combustibles fósiles y el aumento de enfermedades respiratorias crónicas (Barriga, 2011).

Para disminuir el uso del petróleo es posible utilizar biodiesel, un combustible renovable derivado de lípidos naturales, como el aceite vegetal o grasa animal (IICA, 2010). Este combustible puede ser elaborado en base a aceites usados, lo que permite el reciclaje del aceite casero. Lo anterior, permite superar una de las principales críticas de la fabricación del biodiesel: la utilización de cultivos con gran potencial energético para este fin, priorizándolo por sobre fines alimenticios (Bridgewater y Bridgewater, 2009).

Actualmente, existe un proyecto en ejecución en la Ciudad de Cauquenes desarrollado por la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile, donde se recolecta aceite usado de domicilios y restaurantes para alimentar una planta de biodiesel y generar el combustible necesario para proveer de energía eléctrica mediante un motor a las comunidades de Pilén Alto y Cabrería (FONDEF, 2011).

Dificulta la replicabilidad de iniciativas en este tema la existencia de múltiples variables que pueden afectar el diseño de un sistema bioenergético tales como: requerimientos energéticos, disponibilidad de materias primas, dimensionamiento del sistema, entre otros. Por dicha razón, el empleo de modelaciones sistémicas y dinámicas permitiría analizar la interrelación entre sus variables a través del tiempo para optimizar detalles sobre el diseño o producción en caso de que se requiera realizar adaptaciones al momento de replicar.

El poseer un modelo de simulación que incorpore los factores que intervienen en la generación de energía eléctrica a pequeña escala, provenientes de la utilización de biodiesel desde aceites vegetales usados, puede propiciar un mayor interés para gestionar proyectos similares donde otras alternativas se hacen inviables.

El uso potencial del modelo está dado por la capacidad de obtener múltiples salidas de información, por ejemplo: los materiales necesarios para construir la planta dependiendo del número de familias beneficiadas o viceversa; el consumo eléctrico posible de abastecer; cantidad de aceite a recolectar; características del motor necesario; dimensiones de la planta; entre otros.

El nivel de detalle del modelo depende directamente de las necesidades del mismo. Muchas veces el modelo más detallado no suele ser el mejor, de hecho, algunos autores insisten en que el detalle del modelo debe ser mínimo con tal de alcanzar los objetivos

del mismo (López y Martínez, 2000), ya que a mayor cantidad de detalle innecesario, genera un trabajo extra que puede llegar a ser varias veces el requerido, el cual no tiene incidencia en el objetivo final y en muchos casos puede producir errores si el detalle es muy minucioso e incierto. Idealmente se comienza con el desarrollo de modelos sencillos que se van complejizando a medida que sea requerido.

### **Objetivo General**

Desarrollar un modelo de simulación dinámica para el diseño y evaluación de sistemas eléctricos a pequeña escala a base biodiesel.

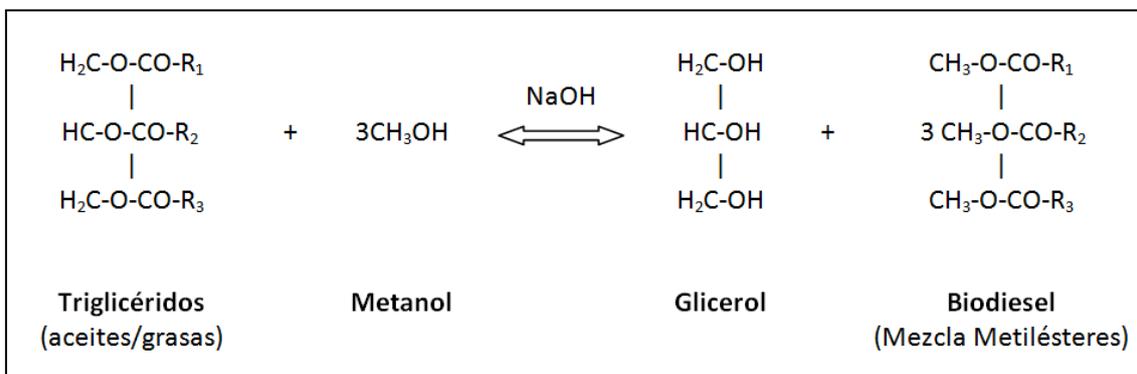
### **Objetivos Específicos**

1. Identificar y describir los procesos existentes en un sistema de producción eléctrica a pequeña escala en base a biodiesel.
2. Generar un modelo de simulación dinámica aplicado a la producción de electricidad a pequeña escala en base a biodiesel.

# REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

## Biodiesel

El biodiesel es un líquido combustible a base de fuentes orgánicas tanto de grasas animales como de aceites vegetales. Se produce de la reacción de la grasa o aceite vegetal con algún alcohol (como etanol o metanol) frente a un catalizador para producir metilester o dimetilester y glicerina, es común, por sus fácil acceso y nivel de producción, utilizar metanol y soda cáustica como catalizador, lo que permite la generación de metilester con glicerina (Velázquez, 2006) (Figura 1)



Fuente: Romano, 2005.

**Figura 1.** Ecuación química de la transesterificación.

Según la estequiometría, en la reacción anterior, el rendimiento másico es relativamente equivalente (aproximadamente 1:1), por ende, se obtiene la misma cantidad de masa de biodiesel que de aceite inicial, lo mismo ocurre entre la glicerina resultante y el metanol inicial (ARPEL e IICA, 2009).

Los esteres mencionados tienen cualidades en cenataje, viscosidad y poder calórico similares a los carburantes utilizados en motores, por ende es posible utilizarlos de igual forma, por lo que se denominan genéricamente Biodiesel (Velázquez, 2006).

Los aceites de origen vegetal pueden ser muy variados, existiendo sobre 300 especies con la capacidad de producir cantidades industriales (Velázquez, 2006), todos tienen una capacidad energética diferente, por ello, principalmente se utilizan por sus propiedades energéticas y de producción oleaginosas o árboles, tales como el raps, girasol, soya, palma, cocotero o jatrophas, como también es posible producirlos con grasas animales como el sebo. Es muy común y recomendado el uso de aceites de

cocina ya utilizados (Dufey, 2006) o el uso de aceites residuales de procesos industriales ya que presentan la no despreciable propiedad de ser más concentrados (Velázquez, 2006).

Los biocombustibles que tienen su orígenes en fuentes potencialmente alimenticias se denominan de primera generación, por otro lado, si su origen es de una fuente no alimenticia son denominados de segunda generación.

Los combustibles de segunda generación pueden provenir de distintas fuentes, como algas o biomasa forestal, y por sus características intrínsecas, pueden ser catalogados como hidrocarburos, por lo tanto, podrían ser utilizados en cualquier porcentaje de mezcla con petróleo diesel (ENAP, 2013), hecho no menor tomando en cuenta que la actual legislación chilena permite un máximo de 5% en la mezcla de biodiesel con petróleo diesel (Art. 12° de D.S. N°11 de 30 de enero de 2008). ENAP (2013) sostiene que los biocombustibles de segunda generación, específicamente el biodiesel de origen biomasa forestal será un componente fundamental de la matriz energética de Chile.

El biodiesel presenta una energía contenida muy alta, incluso mayor a la gasolina, siendo superado por el petróleo diesel en aproximadamente 10%. en el Cuadro 1 se muestra la energía contenida en algunos de los combustibles más comunes y su comparación con el diesel. El biodiesel es sólo superado por el petróleo diesel, pero en mezclas de B20 (80% de petróleo diesel) es posible llegar al 99% de la energía diesel equivalente (U.S. Department of Energy, 2012).

**Cuadro 1.** Comparación energética de combustibles.

	Diesel	Biodiesel	Gasolina	Propano (GLP)	Gas Licuado (GNL)
Estructura Química	C <sub>8</sub> a C <sub>25</sub>	Metilester de C <sub>12</sub> a C <sub>22</sub>	C <sub>4</sub> a C <sub>12</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> y C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	CH <sub>4</sub>
Diesel Equivalente <sup>1</sup>	100%	91,15%	88,5%	64,6%	56,6%
Energía (BTU/Gal <sup>2</sup> )	128,45	119,55	116,09	84,95	74,72

Fuente: Modificado de U.S. Department of Energy, 2012.

## Ventajas

La principal ventaja es que se trata de un combustible de origen animal o vegetal, por ende se trataría de un combustible renovable si su producción se desarrolla correctamente (Rojo y Acevedo, 2006), punto no menor si se considera al petróleo diesel (su combustible equivalente) como un recurso no renovable al ser de origen fósil.

<sup>1</sup> Porcentaje de cada compuesto equivalente energéticamente en petróleo.

<sup>2</sup> Se utiliza BTU/Gal para determinar la energía contenida en un galón de combustible. BTU (*British Thermal Unit*) es la energía necesaria para aumentar en un grado Fahrenheit una libra de agua.

Es biodegradable debido a que no presenta elementos residuales que persisten en los sistemas naturales, lo que reduce en gran medida las emisiones de hidrocarburos y material particulado. De esta forma es posible utilizarlo en ecosistemas frágiles (reservas naturales, mares, lagos, etc.) sin la preocupación de que existan residuos dañinos o prolongados del uso de biodiesel (Rojo y Acevedo, 2006).

El biodiesel que proviene de fuentes vegetales no altera el ciclo del carbono, por su naturaleza renovable, el CO<sub>2</sub> emitido al ambiente fue previamente capturado por la planta al momento que se efectuaba la fotosíntesis (Rojo y Acevedo, 2006).

Las emisiones de material particulado e hidrocarburos es notablemente menor que las mismas emisiones con petróleo diesel llegando incluso a 65% menos, siendo un 59% el valor promedio (Homer, 2006). Aunque no existen estudios serios sobre los efectos de hidrocarburos o material particulado en la ciudad de Santiago de Chile, las grandes concentraciones aéreas de estos compuestos sugieren que podría existir una vinculación con enfermedades gatilladas por daño celular, mutagénesis y carcinogénesis (Oyarzún, 2006)

Es posible utilizar biodiesel en motores diesel convencionales realizando pequeños cambios a algunas piezas susceptibles a ser ablandadas o degradadas por el compuesto, pero es posible utilizar motores diesel sin modificación alguna en mezclas con diesel de hasta un 20% de biodiesel (Homer, 2006).

El biodiesel posee un balance energético positivo, es decir que requiere menos energía el producir biodiesel a escala industrial que el potencial energético que se obtiene una vez finalizado el proceso. Se requiere una unidad de energía fósil para producir 3,2 unidades de biodiesel, en cambio con la misma unidad de energía fósil es posible obtener entre 0,8 y 0,85 unidades de diesel (Rojo y Acevedo, 2006).

## **Desventajas**

El biodiesel tiene aproximadamente 7% menos energía que el petróleo diesel. Dependiendo de la mezcla y su origen, es posible tener incluso un 12% menos de capacidad energética (Homer, 2006), este valor disminuye si se utilizan mezclas con petróleo, llegando hasta un 1% con mezclas B20 (U.S. Department of Energy, 2012).

Muestra un aumento considerable en los gases óxido nitrosos (NO<sub>x</sub>), llegando a superar al diesel en 15% de emisión para biodiesel en base de aceites de semilla de soya (U.S. Department of Energy, 2006).

Las mangueras y juntas pueden ser afectadas por las mezclas de biodiesel altas (U.S. Department of Energy, 2012), algunos autores señalan que el biodiesel puede ablandar o incluso degradar algunos componentes plásticos o metálicos como el cobre o zinc (Rojo y Acevedo, 2006). Para mezclas menores al 20% no debiese significar ningún daño a los motores (Homer, 2006)

El punto de congelación es mayor al del diesel, el biodiesel tiende a congelarse o transformarse en gel a temperaturas entre 0 y -5° (Jutglar y Galán, 2011), lo que implica que es incompatible con algunos lugares donde la temperatura sobrepasa estos valores. Es posible solucionar o mitigar este problema mediante el uso de mezclas o incorporando aditivos (Rojo y Acevedo, 2006).

## Marco Legal

En el Decreto Supremo N° 11 de 30 de enero de 2008, del Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción en su artículo 5° se define legalmente al biodiesel como: *“Todo combustible líquido compuesto por una mezcla de ésteres alquílicos obtenidos a partir de aceites vegetales, grasa animal o aceite comestible usado, según las especificaciones que se detallan en el artículo 7° del presente decreto”*.

Dentro de la legislación chilena actual sobre los biocombustibles es importante analizar los aspectos que tienen relación con el sector económico, otros aspectos más bien de composición y calidad de los biocombustibles y por último un aspecto de disposiciones finales de biocombustibles.

### Aspecto Tributario

La ley N° 18.502 del Ministerio de Hacienda establece los impuestos de los combustibles, pero en ningún lugar hace referencia al biodiesel como tal, de hecho, ningún biocombustible se menciona de manera directa, ya que la composición química, elaboración y origen de los biocombustibles más específicamente del biodiesel son completamente diferentes al diesel de origen fósil. La ex-presidenta Michelle Bachellet como medida de desincentivar el uso de combustibles fósiles detalló en un comunicado que se puede leer en el Decreto Supremo N° 128 de 23 de junio de 2008, del Ministerio de Minería, en la sección de Consideración, lo siguiente: *“por mensaje presidencial de fecha 21 de mayo de 2007, se anunciaron unas primeras medidas para impulsar la industria de los Biocombustibles en el país, éstas fueron: No aplicar el impuesto específico a los Biocombustibles”*, efectivamente el biodiesel carece del impuesto específico, pero solo cuando se tranza de manera pura, como estos temas caían en ambigüedades, el Servicio de Impuestos Internos (SII) (2007) publicó con la circular N° 30 Del 16 de mayo del 2007 una especificación de los impuestos tributarios del biodiesel. Éstas son:

- a) Por tratarse de un bien corporal mueble, al vender biodiesel éste se encuentra gravada con el impuesto al valor agregado (IVA) de acuerdo a las reglas generales que regulan el tributo.
- b) El impuesto especial a la primera venta o importación de gasolinas automotrices y de petróleo diesel establecido en el artículo 6° de la Ley N° 18.502, de 1986 no aplica para el biodiesel, debido a que es un producto químicamente diferente.
- c) Los impuestos establecidos en la Ley N° 19.030, de 15 de enero de 1991 y la Ley N° 20.063, de 29 de septiembre de 2005 prorrogada por la Ley N° 20.115 de 01 de julio de 2006, no son aplicables al biodiesel ya que no figura dentro del listado taxativo de los productos que se les aplica este impuesto señalados en el artículo 5° del Decreto Supremo N° 211 de 20 de Julio del 2000, Reglamento de la Ley N° 19.681, y artículo 1° y 5° transitorio de la ley N° 20.063, modificatorios de la Ley N° 19.030.
- d) El impuesto establecido en el artículo 42° del Decreto Ley N° 825 de 1974, aplicable a las bebidas alcohólicas y productos similares, no se aplica al Biodiesel debido a que en su artículo 5° Reglamento Sanitario de los Alimentos, las bebidas, entendidas como un tipo de alimento o producto

alimenticio, son sustancias destinadas al consumo humano, en cambio, el Biodiesel se utiliza de manera principal como combustible en motores diesel.

Para mezclas de biodiesel con combustibles convencionales (gasolina y petróleo diesel) en cualquiera sea su relación dentro del marco legal, la normativa señala que esta mezcla queda gravada con el impuesto específico que se aplican a combustibles derivados del petróleo, adicionalmente del impuesto al valor agregado (IVA) que corresponda.

### Aspecto de Composición y Calidad

En el Decreto Supremo N° 11 de 30 de enero de 2008 del Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción se detallan las especificaciones de calidad para la producción, importación, transporte, almacenamiento, distribución y comercialización de Biodiesel, donde se especifica, cuales son las características de composición que debe tener el producto tanto para importaciones como los productos nacionales. Las especificaciones de calidad para el Biodiesel se detallan el Cuadro 2.

**Cuadro 2.** Propiedades legales del biodiesel

Propiedad	Unidad de Medida	Valor Mínimo	Valor Máximo
Densidad a 15°C	g/cm <sup>3</sup>	0,86	0,90
Viscosidad a 40°C	mm <sup>2</sup> /s	3,5	5,0
Punto de Inflamación	°C	120	-
Punto de Escurrimiento	°C	-	-1,00
Azufre Total	% masa	-	0,00
Residuos de Carbono	% masa	-	0,05
Conradson (CCR) al 100%	% masa	-	0,02
Contenido de Ceniza Sulfatada	% masa	-	0,02
Agua y Sedimentos	% volumen	-	0,05
Corrosión de la Lámina de Cobre (3 horas, 50°C)	grado de corrosión	-	N° 2
Valor de Neutralización (valor de ácido mg KOH/g)	mg KOH/g muestra	-	0,5
Contenido de Éster	% masa	96,5	-
Contenido de Metanol	% masa	-	0,20
Glicerina Libre	% masa	-	0,02
Glicerina Total	% masa	-	0,25
Fósforo	mg/kg	-	10
Contenido de Alcalinos (Na+K)	mg/kg	-	5
Contenido de Metales (Ca+Mg)	mg/kg	-	5
Estabilidad a la Oxidación a 110°C	Horas	6	-

Fuente: Artículo 7° de D.S. N° 11 de 30 de enero de 2008.

### Disposiciones Finales

Según el artículo 1° del Decreto Supremo N° 174, de 25 de abril de 2001 del Ministerio de Economía, Subsecretaría de Economía, Fomento y Reconstrucción, establece que el Kerosene para cualquiera sea su uso no puede mezclarse con otros combustibles para

ser utilizados como tales, el único compuesto combustible que está autorizado para dicha mezcla es el Biodiesel.

En el artículo 12° de Decreto Supremo N°11 de 30 de enero de 2008, detalla: “*El biodiesel sólo podrá mezclarse con petróleo diesel en un 2% o en un 5% del volumen resultante de la mezcla.*” De otro modo, las mezclas tendrán que ser combustibles utilizados en pruebas experimentales temporales y autorizadas por resolución exenta de la Superintendencia previa consulta a la Comisión Nacional de Medio Ambiente (CONAMA), que desde el año 2010 cambia a calidad ministerial, llamándose Ministerio de Medio Ambiente (Ley 20.417). El combustible utilizado en dichas pruebas o puede ser tranzado en instalaciones de abastecimiento vehicular (Art. 14° de DS N°11 de 30 de enero de 2008).

## **Simulación Dinámica de Sistemas**

Para comprender el concepto de Simulación Dinámica es fundamental comprender previamente lo que es un sistema, cuya naturaleza recae en un conjunto de elementos que se relacionan de alguna u otra forma. Huggett (1993) define sistema como una estructura que es parte del mundo, en otras palabras existe y ésta tiene características y componentes interconectados de tal forma que funcionan como una sola unidad.

Cuando se hace referencia a sistemas que son una representación simplificada de un evento previamente definido, hablamos de modelos, que cuya forma acotada permite probar, medir y estimar de forma aproximada los hechos ocurridos en los sistemas. Los modelos son maquetas, representaciones a escala de lo que ocurre en la realidad, un modelo eficiente permite que con la menor cantidad de elementos y relaciones se satisfaga todas las necesidades que el autor o el usuario del modelo requiera.

La Simulación Dinámica es entonces una herramienta que permite mediante el uso de modelos matemáticos representar sistemas y simular su comportamiento a través del tiempo. “*Aunque el énfasis de este tipo de modelos no es la predicción propiamente dicha, sí permiten estudiar la evolución en el tiempo de las variables incluidas durante el período predefinido, que será aquel para el cual permanezca la validez de los supuestos empleados en la construcción del modelo*” (López y Martínez, 2000).

El enfoque del estudio de los fenómenos ocurridos puede dividirse en dos grupos, el enfoque analítico, que consiste en analizar detalladamente las diferentes partes del modelo y el enfoque sistémico que con pocos elementos dentro del modelo permite una visión general pero carece de detalles (López y Martínez, 2000). Ambos enfoques son igual de válidos y dependerá del objetivo del trabajo cual será el mejor a usar, el enfoque analítico puede ser muy detallado, pero si el objetivo es solo analizar una tendencia global, la cantidad de detalles lo hace poco eficiente, además existe el inconveniente de que no se conocerán a cabalidad los detalles de algunos elementos lo que podría llegar a perder parte del enfoque del modelo.

Obviamente, la simulación dinámica no es el único método para la resolución de problemas, es más, la historia nos ha demostrado que el método de ensayo y error resulta ser el comúnmente usado y más útil. La ventaja de la simulación dinámica es que requiere menor uso de los recursos, ya que un error en el modelamiento y su posterior

calibración no requieren grandes sumas de dinero al ser todo realizado mediante ecuaciones matemáticas, en cambio un error en el método mencionado anteriormente implica grandes sumas de dinero ya que se requiere realizar todo el mecanismo una y otra vez hasta lograr un objetivo (Grant *et al.*, 2001). Por otro lado el método científico como mecanismo para resolver problemas presenta una observación disciplinada y una manipulación de los elementos del mundo real que resultan interesantes en el contexto del problema de estudio. Posteriormente estas observaciones se interpretan usando medios cualitativos y cuantitativos, los primeros se enfocan a la descripción y clasificación, mientras que los segundos a los análisis matemáticos y estadísticos. Estas interpretaciones dependen del tipo del problema o de sistema (Grant *et al.*, 2001).

Los modelos de simulación dinámica constituyen un grupo particular dentro de los modelos matemáticos y gozan de todas las características generales de éstos además de integrar las ventajas de diferentes métodos de resolución de problemas. Por dicha razón poseen características propias que los hacen reconocidos. Estas peculiaridades son establecidas además de formales, y han sido enunciadas por primera vez por J. W. Forrester en el año 1961 considerado por muchos como el creador (o descubridor) de este tipo de modelado (Usó y Mateu, 2004).

Forrester introdujo un símil hidrodinámico para modelar gráficamente el comportamiento de un sistema, y a partir de ese punto, eligió símbolos para representar los diferentes elementos, características estructurales, funciones y relaciones (Usó y Mateu, 2004). Actualmente se conoce el trabajo realizado por J. W. Forrester en su libro *Industrial Dynamics* como “Diagrama de Forrester”.

## **Diagrama de Forrester**

El Diagrama de Forrester estipula una forma de realizar simulaciones dinámicas (a través del tiempo) de manera gráfica permitiendo visualizar todas las variables involucradas dentro del problema en cuestión. Forrester (1961) detalla principalmente mecanismos que ayudan a visualizar y optimizar los procesos industriales utilizando para ello la modelación dinámica, esto permitió un cambio sustancial en la forma que se conocía y usaban los modelos, donde primaba el modelo lineal “Si aumentamos la cantidad de vendedores, aumentaremos la cantidad de ventas”. Forrester permitió crear modelos no lineales donde se podían establecer una infinidad de ciclos o “Bucles” que crearían relaciones con otros elementos del sistema.

Este diagrama es utilizado para todo tipo de modelamientos por su simplicidad y versatilidad, siendo los modelos poblacionales, medio ambientales y productivos los más utilizados. Distintos *Software* se han creado para visualizar, interpretar y modelar el diagrama, como *VemSim*, *PowerSim*, *Stella*, *Ithink*, etc. que permiten además de la realización simple del Diagrama Casual (dibujo de los elementos importantes del modelo y sus relaciones), la visualización y análisis de los diferentes elementos a través del tiempo.

El Diagrama de Forrester contiene diferentes tipos de variables y elementos para representar las partes importantes del sistema dentro del modelo (Figura 2) y cada autor los representa de forma distinta, incluso los diferentes *Software* tienen cada uno un nombre y una simbología distinta para el mismo elemento. En algunos casos los *Software* no diferencian entre constantes o variables dentro del esquema y asumen que

ambas son “variables” aunque éstas no cambian a medida que avanza el modelo. Estos detalles no son de gran importancia, ya que íntegramente el modelo dará resultados iguales.

		Modelos generales	Modelos SD	
			Denominación	Representación
Elementos	Variables	Endógenas o dependientes	Nivel	
			Flujo	
			Variable auxiliar	
		Exógenas o independientes	Variable exógena	
			Fuente o sumidero	
	Parámetro	Tasa o parámetro		
	Redes de comunicación	Sistema	Canal de material	
			Canal de información	
	Retardo	Retardo		
	Bucles de realimentación	Bucles de realimentación		
Diagrama causal o de influencias	Diagrama de Forrester			
Ecuaciones	Ecuaciones	$A = A + DT (C);$ $C = F(A, B);$ $B = G(A, M)$		

Fuente: López y Martínez, 2000.

**Figura 2.** Correspondencias entre elementos y símbolos en el diagrama de Forrester.

El Diagrama de Forrester se conforma principalmente de tres grupos de variables:

- a) Variables de Nivel: También llamado Variable de Estado o Reservorios, generalmente son representados por rectángulos y son simplemente acumuladores de materia. Por ejemplo, un estanque donde, a medida que va entrando agua, ésta se acumula en ese lugar y no se pierde de un tiempo a

otro. La única forma de quitar el agua del estanque es que uno explícitamente agregue una o más salidas a ese estanque.

- b) Variables de Flujo: También llamados Tasas o Flujos de Decisión, se representan con una llave o grifo y son la cantidad de materia que entra o sale a través del tiempo, es decir la relación entre la cantidad de materia y la frecuencia con que ésta entra o sale de una variable de nivel.
- c) Variables auxiliares: Se representan con Círculos y se dividen en Constantes, Endógenas y Exógenas, las tres son elementos que proporcionan información relevante que influye dentro de las Variables de Flujo o de Estado. En la primera, ésta información no cambia a través del tiempo, por ejemplo, número de casas, potencia de un motor, etc. Por otro lado, las variables endógenas cambian dependiendo de múltiples factores internos y, por último, las variables exógenas que varían sin influenciar el resto del modelo, como el valor del dólar, IPC, UF, etc.

Existen otros elementos dentro de diagrama de Forrester que son importantes de mencionar, ya que son fundamentales para comprender el uso y desarrollo de los modelos de Simulación Dinámica:

- a) Canal de Material: es una conexión entre las variables de flujo y las variables de Nivel, que representa que existe un intercambio de material entre esas dos variables, generalmente representado con una flecha gruesa o doble.
- b) Canal de Información: Se representa con una flecha más delgada y en algunos casos punteada y conecta una variable auxiliar con una variable de flujo o una variable de flujo con una variable de nivel. Esta flecha determina sólo información y no intercambio de material.
- c) Retraso: Este elemento representa un *Delay* en el modelo es decir, retraso en la transmisión de información o material.
- d) Fuente Externa: También llamado Nube o Sumidero, la Fuente es una forma gráfica de mostrar que el material proviene de una fuente externa. Se caracteriza con el dibujo de una nube y representa un sistema ajeno al modelo en cuestión.

Es importante destacar que existen algunas reglas adicionales al Diagrama de Forrester que se deben tener en consideración (López y Martínez, 2000).

- Un Canal de Material debe ir (o venir) necesariamente de una variable de Nivel o a una Fuente Externa (nube).
- Los Canales de Información van en el sentido de la variable “causa” a la variable “efecto”. Por tanto, nunca pueden ir de variables endógenas a magnitudes exógenas (variables o parámetros).
- Una Variable de Nivel solo puede ser afectada por una Variable de Flujo. Por lo tanto, sería incorrecto establecer un canal de información que vaya de

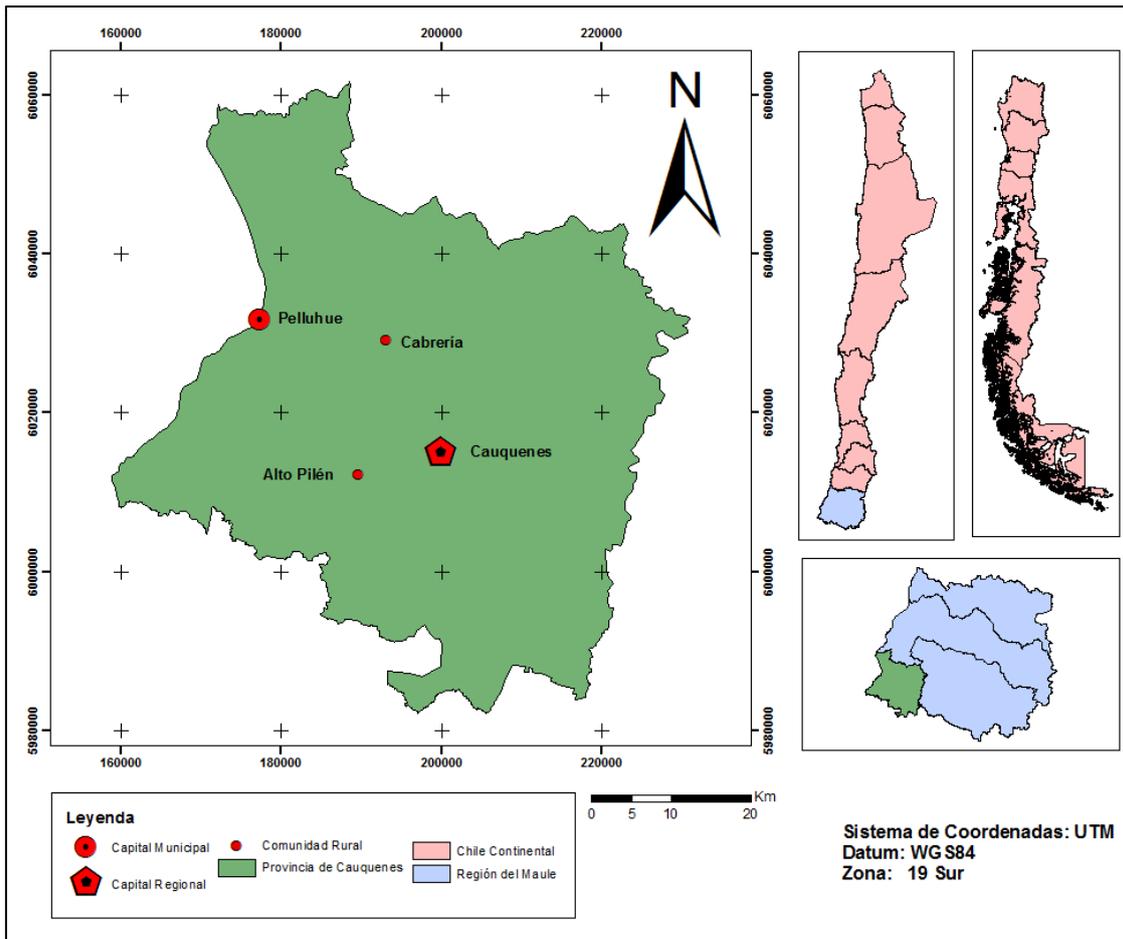
cualquier clase de magnitud (Variable Auxiliar o Flujo) a una Variable de Nivel.

Todos estos elementos se relacionan de una forma visual entre sí con la finalidad de crear una interfaz o red que luego pueda interpretarse en la computadora para ser modelada, cuando se habla de modelación dinámica se asume que el modelo tiene cambios a través del tiempo, por ende, uno de los elementos principales dentro de esos modelos está en función de una unidad de tiempo ( $dt$ ), este “Paso” puede no ser constante, en algunos casos muy particulares el  $dt$  puede variar según una función que si no fuese por el uso de computadoras sería muy difícil determinar su proyección en el tiempo.

### **Proyecto Producción de Biodiesel**

La Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile, durante el periodo de Octubre 2011 y Noviembre 2012 realizó un proyecto llamado “*Centros de producción y acopio de biodiesel y su posterior uso para generación de energía eléctrica en zonas rurales de la comuna de Cauquenes, VII Región*” cuyo fin fue generar energía eléctrica y solucionar, a la vez, los problemas medioambientales provocados por el mal manejo de residuos en la eliminación de aceites usados de la fritura.

El proyecto contemplaba la posibilidad de que habitantes de las localidades rurales de la comuna de Cauquenes pudiesen ser capaces de generar energía a base de motores de combustión interna alimentados principalmente con biodiesel reciclado, de esta forma además de contribuir a una mejor calidad de vida, se genera conciencia respecto al uso de combustibles ambientalmente amigables. Para conseguir esto se consideró el desarrollo de un modelo casero de fabricación de biodiesel y la posterior utilización del mismo en la generación de electricidad en pequeños tendidos eléctricos a partir de grupos electrógenos portátiles en dos localidades que no tenían acceso a electrificación debido a la lejanía de la red principal o por el alto costo de acceso, Las localidades beneficiadas son Cabrería y Pilen Alto, ambas de la Región del Maule (Figura 3).



**Figura 3.** Provincia de Cauquenes, Región del Maule.

En una primera instancia se conversó con las comunidades participantes y beneficiadas para fomentar e incentivar el apoyo del proyecto, de esta forma se logró tener contacto con gran parte de los establecimientos de comida en la localidad de Cauquenes y Pelluhue, logrando así la participación de la mayoría de ellos en la donación del aceite ya utilizado.

El sistema de recolección de aceites usados se realiza una vez por semana donde el principal aporte lo realizan los restaurantes participantes de Pelluhue (Anexo I) debido principalmente al turismo, hecho que cambia radicalmente en la temporada baja donde los participantes disminuyen considerablemente su aporte de aceite. No es menor considerar que hay pequeños locales de comida rápida que solo abren sus puertas en verano para aprovechar la gran cantidad de personas que visitan las playas de Pelluhue.

En la localidad de Cauquenes se encuentra la planta, que soporta una capacidad máxima de 130 L por lote, diseñada y construida como parte del proyecto (Anexo II). Actualmente, se realizan grandes cantidades de metilester con glicerina semanalmente, que luego de ser decantado se obtienen alrededor de 80% de biodiesel utilizable, parte del biodiesel es entregado a las comunidades de forma semanal, quienes lo mezclan con 20% de petróleo. Tanto el aceite como el biodiesel sobrante son almacenados. La mezcla resultante es capaz de abastecer eléctricamente a las localidades rurales

alrededor de tres horas al día. En los meses de verano existe un gran excedente de biodiesel, éste es capaz de abastecer de energía eléctrica a las comunidades en los meses restantes.

Ambas localidades fueron beneficiadas con la entrega de generadores de 5 kW (Anexo III) adaptados para trabajar con biodiesel en grandes porcentajes, ésta adaptación consiste en el cambio de filtro y conductor de combustible, ya que debido al material de estos elementos, podrían desgastarse con la presencia de biodiesel en altas concentraciones.

Para poder distribuir la energía se instaló un tendido eléctrico de 500 m en Cabrería y 1.200 m en Alto Pilen, además de la instalación eléctrica en las casas y luminaria común (Anexo IV).

La cantidad de aceite recolectado no ha generado ningún inconveniente, se ha obtenido gran apoyo de la comunidad para poder desarrollar favorablemente este proyecto, siendo el sector comercial es el que más ha aportado. Algunos locales en el sector costero han llegado a entregar 50 litros semanales de aceite en las temporadas de verano, lo que compensa con creces el déficit en temporada baja donde incluso algunos locatarios dejan de trabajar. El acopio por parte de hogares particulares no ha generado gran impacto en la cantidad de aceite, siendo despreciable en muchos casos.

# MATERIALES Y MÉTODOS

La creación del modelo de simulación dinámica y su posterior evaluación será determinado por un plan convencional determinado por etapas y enfocado para modelos principalmente matemáticos (López y Martínez, 2000). Estas etapas permitirán establecer, mediante un método comprobado, el nivel de detalle máximo que permita obtener los objetivos propuestos.

## **Definir Elementos, Relaciones y Límites del Sistema**

En esta etapa, lo primordial es cuestionarse hasta dónde se requiere analizar para no desarrollar trabajo innecesario o que queden elementos importantes fuera del modelo. Se deben establecer los límites del sistema que permitan esclarecer el nivel de detalle que se requiere para alcanzar los objetivos propuestos.

Una vez determinados los límites, se deben conceptualizar los fundamentos básicos del modelo. Para ello se deben establecer cuáles serán los elementos que tienen alguna incidencia en la elaboración de biodiesel de una planta a pequeña escala, como variables, constantes y procesos que determinan de alguna u otra manera la producción de biodiesel, generación energética, recolección de aceite y consumo eléctrico.

Estos elementos, pertinentes para el modelo, requieren de relaciones entre sí. Cada elemento del modelo influye de alguna forma con algún otro elemento, lo importante en esta etapa es determinar que existe esa relación, independiente de que no se tenga certeza de cuál es la intensidad.

## **Realizar Diagrama Casual**

El diagrama casual corresponde a una de las etapas más influyentes para la creación de cualquier modelo matemático, porque permite formalizar la etapa anterior en un dibujo o esquema de los elementos, sus relaciones y su signo. La determinación del signo se refiere a establecer si la relación entre dos elementos relacionados es positiva o negativa, es decir analizar a medida que aumenta el primero, qué pasa con el segundo.

La construcción del diagrama casual permite “llevar al papel” el modelo hasta entonces abstracto, ayudando de esta forma, a conceptualizar el sistema de biodiesel.

Este diagrama tiene como finalidad adicional la correcta interpretación del modelo por parte del usuario final. Un diagrama casual con gran cantidad de información solo sería comprendido por el autor y no permitiría la replicabilidad del modelo. Por este motivo el diagrama debe ser lo más sencillo posible, por lo que se toman los elementos clave del modelo.

## Definir las Magnitudes de los Elementos

La elaboración de un modelo depende, entre otros aspectos, de determinar el objetivo de cada variable, esto permite establecer cuáles serán los valores que pueden ser incluidos dentro de cada una de ellas. Una de las formas para establecer las magnitudes es construir un código de variables (López y Martínez, 2000), que consiste en realizar una tabla donde cada una de las columnas permita la visualización de cada uno de los elementos del sistema o subsistema.

En el modelo dinámico de la planta de biodiesel a pequeña escala se utilizarán 8 columnas:

### Número

Número correlativo de los elementos del subsistema.

### Subsistema

Nombre del subsistema o subsistemas donde pertenece el elemento.

### Tipo

Especificar la clase de variable que representa en el modelo, esto es, definir si el elemento se trata de una variable de nivel, tasa, variable o constante.

### Nombre

En esta columna se establece el símbolo o nombre que tendrá el elemento dentro del modelo, el cual debe ser acotado, nemotécnico y único debido a las limitantes en el uso de *software* posterior, de esta forma se evita la confusión con otros elementos dentro del modelo.

### Abreviación

Nombre que recibe el elemento dentro del modelo, este nombre debe ser corto y único para cada elemento.

### Descripción

Establece una breve definición de cada elemento que lo vincula con su nombre o símbolo, ésta descripción debe ser precisa y sin ambigüedad.

## **Unidades**

Esta columna es de suma importancia para no caer en incompatibilidades entre dos o más variables, ya que por utilizar dos unidades equivalentes, pero distintas sin su correspondiente transformador, el elemento, y con él todo el modelo, carece de fiabilidad.

## **Observaciones**

En esta última columna se establecen (solo si es necesario) unos comentarios extras que apoyan a la descripción. Esta columna no es fundamental pero se utilizará cuando exista información relevante en caso de reproducir el modelo.

## **Realizar Diagrama de Forrester**

Aunque algunos autores no consideren este paso estrictamente necesario, para el caso del modelo de la planta de biodiesel a pequeña escala es fundamental, ya que por su complejidad es necesario poder visualizar el modelo de una forma general. Por esta misma razón es que el modelo deberá separarse en subsistemas, y de ésta forma se evitará que el diagrama se torne excesivamente confuso como lo puede llegar a ser un modelo de tales características y cantidad de variables. Las líneas de flujo en cada elemento pueden sobreponerse en más de una ocasión, por eso es muy importante establecer un orden y utilizar “*duplicados fantasmas*” los cuales son una o más copias de un mismo elemento con el único fin de mantener un orden, pero en la práctica se comportan como si fuesen uno.

## **Determinar Ecuaciones**

Tanto el diagrama casual como el Diagrama de Forrester, dentro de su gama de información, poseen signos (positivo o negativo) y dirección del flujo de material, lo que determina las relaciones de los elementos del sistema. Éstas relaciones deben ser profundizadas con ecuaciones que se incluyen en algunos elementos del sistema, que hacen participar dinámicamente a los demás elementos.

López y Martínez (2000), determinaron una serie de reglas generales en base a las definiciones y conceptualizaciones establecidas en el Diagrama de Forrester, éstas permiten obtener de una forma ordenada un esquema o esqueleto de lo que serán las ecuaciones a utilizar.

## Ecuaciones de Variables de Nivel

Son ecuaciones definidas, por ende, la fórmula de ellas mantiene un esquema fijo, donde se considera el valor inicial o del tiempo anterior y la variación de entradas y salidas de material (Ecuación 1).

**Ecuación 1.** Ecuación de variable de nivel general.

$$N_{(t)} = N_{(t-dt)} + dt * [FE_{(t)} - FS_{(t)}]$$

Donde:

$N_{(t)}$ : El valor en el instante t.

$N_{(t-dt)}$ : El valor en el intervalo de tiempo anterior.

$dt$ : El intervalo de tiempo elegido.

$FE_{(t)}$ : Flujo de entrada en el instante t.

$FS_{(t)}$ : Flujo de salida en el instante t.

En el caso anterior se extrae de la definición de Variable de Nivel, donde denota el  $dt$  o intervalo de tiempo elegido, no es difícil entonces realizar una ligera adaptación a la ecuación para el caso de estudio donde el intervalo de tiempo se calcula en días, es decir  $dt=1$  (Ecuación 2).

**Ecuación 2.** Ecuación de variable de nivel para intervalos unitarios.

$$N_{(t)} = N_{(t-1)} + [FE_{(t)} - FS_{(t)}]$$

Donde:

$N_{(t)}$ : El valor en el instante t.

$N_{(t-1)}$ : El valor en el instante inmediatamente anterior.

$FE_{(t)}$ : Flujo de entrada en el instante t.

$FS_{(t)}$ : Flujo de salida en el instante t.

Hay que tener en cuenta, además, que para este estudio se asume el instante  $t=0$  como el inicial y no se considera la ecuación, de esta forma se evitan los errores por omisión. Por ejemplo, podemos decir que poseemos, antes de realizar la modelación, 50 L. de biodiesel, con esto es posible abastecer a la comunidad con energía antes de comenzar a producirlo autónomamente, lo que puede demorar unos días, incluso semanas. Para este caso el  $N_{(0)}$  será nuestro inicial que es igual a 50 L. de biodiesel.

## Ecuaciones de Flujos o Tasas

Estas pueden ser definiciones como en el caso anterior donde se pre-establece una ecuación tipo dependiendo del sistema o bien, relaciones de comportamientos.

Las primeras dependen completamente de las variables de nivel que conectan, por ejemplo, si la variable de nivel “Biodiesel” se le conecta un flujo con signo positivo y saliente, este flujo se encargará de extraer todo el biodiesel del reservorio sin considerar otras variables, es decir, a medida que se va generando biodiesel, todo lo producido en el tiempo  $(t-dt)$  se extrae, lo que hace que para la ecuación de la variable de nivel el  $N_{(t-dt)}$  sea cero.

Las ecuaciones de comportamiento dependen de dos o más variables que establecen una relación de causa-efecto, por ejemplo, la “Compra de Petróleo” está determinada por la cantidad de “Metilester” usado, el “Porcentaje de Diesel” a usar en la mezcla y el “Petróleo Disponible”. Todos esos elementos pueden variar según la disponibilidad, producción o incluso por temas legales. Otro ejemplo de ecuaciones de flujo es cuando no es posible determinar con exactitud el valor del flujo y se incluye un rango de error, por ejemplo, determinar flujo de precipitación para el mes de enero conociendo anteriormente datos históricos del lugar y el mes. Esto es posible mediante una función, como por ejemplo la distribución normal que es determinada por la media y la varianza, otro caso es que la función sea determinada por un gráfico que entregue valores dados para distinto valor de tiempo  $(t)$ .

### **Ecuaciones de Variables Auxiliares**

Estas ecuaciones poseen los mismos criterios que las ecuaciones de flujos, ya que pueden ser determinadas de antemano o pueden depender de otros elementos en el sistema o de una función gráfica. Gran parte de las ecuaciones de las Variables Auxiliares son constantes y éstas se determinan a voluntad del usuario dependiendo del lugar de estudio o intereses propios de cada análisis, pero no varían su valor una vez comenzado el modelamiento.

## **Calibrar el Modelo**

El calibrado se enfoca en la fiabilidad de cada una de las ecuaciones antes mencionadas, las que para ser representadas fidedignamente necesitan reflejar de forma correcta, tanto la forma funcional, como el ajuste de los parámetros de la ecuación. El calibrado determina el valor de una constante o si una ecuación es válida o con errores aceptables.

Se realiza una vez que el modelo ya se encuentra estructurado y con todas sus relaciones establecidas. En muchos casos el calibrado debe ser proporcionado por especialistas en cada una de las áreas del modelo para obtener una relación fidedigna. Por lo tanto, no existe una única forma de calibrado, ya que ésta depende principalmente de los métodos utilizados, la disponibilidad de información y de la precisión necesaria de cada ecuación o variable. Existen muchas alternativas para desarrollar el calibrado, una de las cuales es realizar análisis estadísticos que determinen una ecuación, función o relación aproximada y aceptable. Otra alternativa es la denominada “prueba y repite” (López y Martínez, 2000) que se refiere principalmente a realizar series históricas para luego realizar estimaciones en las ecuaciones, donde mayor sea el número de iteraciones más acertado será el calibrado, y por ende, posee la desventaja de que requiere grandes cantidades de información que muchas veces no se encuentran disponibles. Existen

algunos métodos que requieren menor cantidad de información, incluso algunos *Software* entregan herramientas de calibrado que solicitan sólo unos cuantos datos clave, la gran ventaja de estas herramientas es que no se necesitan cientos (o miles) de repeticiones para obtener una aproximación válida, pero se corre el riesgo de una poco fiable calibración si los datos clave no son precisos.

Una forma aceptable es aproximar los valores buscados de los elementos a los valores obtenidos mediante métodos externos hasta que se satisfaga un criterio previamente determinado. Inicialmente este método otorga valores aleatorios a los parámetros, con los que se calcula la variable dependiente, éstos son comparados con los resultados observados y se analiza su diferencia. Este método realiza ensayos iterativamente hasta que el error entre el observado y la variable dependiente de la ecuación cumplan un rango esperado, de esta forma los valores iniciales de la ecuación varían en sentido y cantidad para así establecer la ecuación misma.

Otra forma para aproximar el valor de la ecuación es obtener una serie de valores como respuesta y contrastarlos con los valores esperados según bibliografía, por ejemplo, si asumimos que la mezcla de metilester con glicerina está en una relación 4:1, es posible generar una serie de pruebas para corroborarlo y de esa forma determinar cuánto será el flujo de metilester que se podría utilizar para el biodiesel y cuánto es el flujo de glicerina que habría que extraer.

Contemplando que los procesos dentro del sistema en su mayoría no requieren un calibrado exhaustivo al tratarse de mezclas estándar dadas por bibliografía, sólo se requirió calibrar los elementos de Glicerina y Metilester, ya que la relación resultante, si bien es posible calcularla mediante estequiometría, los distintos factores como evaporación del metanol o una reacción incompleta, pueden traducirse en una diferencia sustancial en las relaciones preestablecidas. Los demás resultados de estos procesos están ligados, en muchos casos, a la totalidad del elemento, es decir, en la gran mayoría de los procesos se utiliza todo el componente o existe una limitante física ya conocida que no permite el ingreso de más material al sistema, por ejemplo en el proceso de mezcla de metilester con petróleo, la relación existente (8:2) está previamente definida y es externa al modelo, y por tanto, no requiere un calibrado porque se sabe con certeza las cantidades exactas a utilizar. Lo mismo ocurre con el uso de biodiesel, ya que éste está definido directamente por el consumo del motor, algo también previamente establecido, siendo acumulados los excedentes.

En el laboratorio de Mecanización Agrícola de la Facultad de Ciencias Agronómicas se realizó un ensayo que pudiese medir dos de los puntos que pudiesen tener un grado de variabilidad dependiendo de la calidad de reacción, estos son tiempo de reacción y porcentaje de glicerina en la mezcla.

La forma usada para determinar si las fracciones de la mezcla oscilan frente a cambios de tiempo, fue la realización de tres repeticiones a diferentes tiempos de reacción (15, 20, 30, 45 y 60 minutos) y analizar si existe una diferencia significativa entre los resultados.

## Evaluación del Modelo: Contrastado

La evaluación del modelo consiste en validar su funcionalidad y comprobar que efectivamente funciona en un rango aproximado. Existen diferentes mecanismos de validación siendo el contrastado uno básico, su validación se refiere a la comparación de las respuestas del modelo con los hechos observados. Para que un modelo sea funcional se requiere que sus resultados se ajusten de alguna forma a los hechos observados, esta forma puede ser establecida mediante una inecuación (Ecuación 3) analítica donde la comparación debe ser menor a un rango de error previamente determinado.

**Ecuación 3:** Validación de valores con un error previamente dado.

$$\left| \frac{y^c - y^o}{y^o} \right| \leq \varepsilon$$

Donde:

$y^o$ : Valor observado.

$y^c$ : Valor calculado en el modelo

$\varepsilon$ : Un error previamente determinado

Si la inecuación se cumple, es posible decir que el modelo es válido con un rango de error de  $\varepsilon$ . Este método debe ser medido en todas las variables que puedan ser una respuesta del modelo y, dependiendo de las circunstancias, la exigencia puede ser menor si la variable en cuestión tiene grandes rangos de error, ya que muchas de las variables medidas en el modelo tienen el factor humano integrado, asumiéndose un supuesto donde los resultados quedan a manos de la responsabilidad y constancia de la persona encargada de dicha tarea.

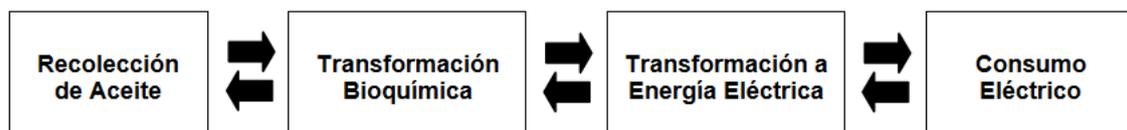
Cualquier proyecto productivo económicamente rentable, debe tener un nivel de confiabilidad que sostenga tanto la producción como el ingreso económico. Bajo estos casos una diferencia de alrededor del 10% en la productividad no debería significar una gran pérdida económica ni mucho menos desestabilizar el proyecto, por el contrario uno que no es capaz de sostenerse con una variabilidad del 10%, no debiese ser económicamente rentable (Santibañez, 2013). Debido a lo anterior y sumando el caso de que se trata de datos principalmente empíricos y fiables, se decidió utilizar un  $\varepsilon = 0,1$ .

# RESULTADOS Y DISCUSIÓN

## Elementos, Relaciones y Límites del Sistema

Dentro de la producción de biodiesel se determinó que la instancia pertinente a analizar dentro del modelo se efectúa desde “Recolección de Aceite” hasta “Consumo Eléctrico”, siendo estos procesos los límites del sistema. Para efectos de este modelo, no tiene incidencia lo que ocurre antes de la recolección del aceite, ya que, al ser reciclado (donación), el proceso comienza sólo con la recolección y no la compra y/o generación de aceite. El proceso final recae después de la “Generación Eléctrica”, una vez que el biodiesel es convertido en electricidad y utilizado por la comunidad. Si bien sería interesante analizar una etapa posterior a este proceso donde se pudiese medir el impacto en la calidad de vida con métodos cuantitativos, este trabajo se limitó solo a la generación eléctrica, debido principalmente a lo difícil y subjetivo que es desarrollar un estudio de esa índole, de todas formas, se asume que existe un aumento en la calidad de vida y desarrollo rural.

Ya conociendo los límites del sistema, los otros procesos importantes para el modelo son los llamados subsistemas del modelo, donde cada proceso determina un nuevo sistema que podría ser completamente independiente, pero que se relacionan de una u otra forma para dar consistencia al sistema general (Figura 4).



Fuente: Modificado de Formulación Proyecto FONDEF D10ER2002.

**Figura 4.** Procesos para la elaboración de una planta de biodiesel a pequeña escala.

### Subsistema Recolección de Aceite

En esta etapa se realiza la recolección del aceite reciclado por, los elementos a analizar son:

- **Aceite:** Determina la cantidad de aceite recolectado y a recolectar. Es un reservorio que se mide en litros donde se acumula todo el aceite antes de ser enviado a su tratamiento químico.
- **Tasa Aceite por Casa:** Cantidad de aceite recolectado semanalmente proveniente de todas casas particulares.
- **Tasa Aceite por Restaurante:** Cantidad de aceite recolectado semanalmente proveniente del comercio en general.

- Casas Participantes: Cantidad de casas suscritas como donantes de aceite.
- Restaurantes Participantes: Cantidad de locales comerciales suscritos como donantes de aceite.
- Aceite por Casa en Temporada Alta: Cantidad de aceite promedio que es entregado por cada casa para el proyecto en temporada alta.
- Aceite por Casa Temporada Baja: Cantidad de aceite promedio que es entregado por cada casa para el proyecto en temporada baja.
- Aceite por Restaurante en Temporada Alta: Cantidad de aceite promedio entregado por cada uno de los locales comerciales partícipes del proyecto en temporada alta
- Aceite por Restaurante Temporada Baja: Cantidad de aceite promedio entregado por cada uno de los locales comerciales partícipes del proyecto en temporada baja.
- Factor de Pérdida de Casas: Porcentaje de aceite no utilizable en el acopio de casas, esto puede ser por su composición, suciedad, derrame o pérdida en general.
- Factor de Pérdida en Restaurantes: Porcentaje de aceite no utilizable en el acopio de locales comerciales.

### **Subsistema Transformación Bioquímica**

Este subsistema se destaca por ser donde se transforma el aceite en biodiesel, incluye a su vez la mezcla con diesel, dimensiones de la planta y compra de materiales químicos. Sus elementos son:

- Tasa Aporte de Aceite: Esta tasa conecta el Subsistema Acopio con el subsistema de Transformación Bioquímica, ya que es la tasa de aceite que se utilizará para la mezcla.
- Mezcla Biodiesel: Cantidad en litros del biodiesel una vez mezclado con petróleo, generado químicamente en el proceso. Es un reservorio.
- Metilester con Glicerina: Reservorio donde se concentra el metilester mezclado con la glicerina, donde posteriormente se separan.
- Petróleo: Reservorio de petróleo donde se almacena para su posterior mezcla con el metilester.
- Metanol: Reservorio donde se acumula el metano comprado y de donde se extrae para su posterior uso en el proceso químico.
- Glicerina: Es un reservorio donde se acumula toda la glicerina resultante del proceso químico de la transesterificación.
- Metilester: Reservorio de Metilester (o comúnmente llamado biodiesel puro), es donde se acumula antes de ser mezclado con el petróleo.
- Aporte de Petróleo: Cantidad en litros de petróleo que será agregado a la mezcla de biodiesel.
- Glicerina Extraída: Cantidad de glicerina en litros que es extraída de la mezcla al día.
- Compra Metanol: Tasa, litros de metanol que se requieren comprar cada día.
- Aporte Metanol: Tasa, cantidad de litros de metanol que se requieren para la mezcla al día.
- Aporte Metilester: Tasa, metilester generado al día.

- Salida Metilester: Tasa, metilester que sale del reservorio para ser usado en el proceso químico.
- Compra Petróleo: Tasa, petróleo comprado al día.
- Costo de Petróleo: Cálculo total de los costos en la compra de petróleo.
- Soda Cáustica : Cantidad de soda cáustica que se requiere para la mezcla.
- Porcentaje Diesel: Porcentaje de cuánto diesel se utilizará en la mezcla.
- Precio del Litro de Petróleo: Precio actual del petróleo por litro.
- Volumen Reactor: Tamaño de la planta en litros.

### **Subsistema Transformación a Energía Eléctrica**

Esta etapa utiliza el biodiesel resultante de la etapa anterior para ser usado en un generador. En este subsistema además se analiza la energía generada y requerida a modo de optimizar los usos de ésta. Sus elementos son:

- Biodiesel Usado: Tasa, que conecta el subsistema anterior con la generación eléctrica, se refiere a los litros de biodiesel usados al día por el generador.
- Horas de uso diario: Cantidad de horas de uso del generador al día.
- Consumo del Generador: Cantidad de litros por hora definidos por el tipo y tamaño del generador.
- Comunidades Participantes: Cantidad de comunidades beneficiadas.
- Energía del Motor: Potencia definida por el tipo y tamaño del generador.
- Indicador de Utilidad: Representa la comparación entre la potencia del motor y la energía necesaria para la comunidad, este valor siempre debe ser positivo.

### **Subsistema Consumo Eléctrico**

Este subsistema analiza el consumo requerido por la comunidad, para esto se desglosó el consumo comunitario y de cada casa en los siguientes elementos:

- Consumo Total: Tasa, se suma el requerimiento eléctrico de la comunidad de todas las casas según el número de horas al día de electricidad.
- Consumo Común: Suma de la energía requerida de todos los elementos eléctricos de uso comunitario.
- Consumo de Casas: Suma de consumo eléctrico de cada elemento de cada casa.
- Número de Casas: Cantidad de casas beneficiadas del proyecto.
- Televisores: Cantidad de televisores por casa.
- Ampolletas: Cantidad de ampolletas de bajo consumo en cada casa.
- Lavadoras: Cantidad de lavadoras en la comunidad.
- Luminaria: Cantidad de ampolletas de uso comunitario.
- Consumo Lavadoras: Consumo eléctrico promedio de cada lavadora.
- Consumo Luminaria: Consumo eléctrico de la luminaria comunitaria.
- Consumo Televisor: Consumo eléctrico promedio de cada televisor.
- Consumo Ampolletas: Consumo eléctrico de cada ampolleta.
- Comunidades Participantes: Cantidad de comunidades beneficiadas.

- Factor de Amplificación: Factor que considera la pérdida de tensión en el tendido eléctrico.

## Diagrama Casual

El diagrama casual se determinó a partir de los grandes subsistemas mencionados con anterioridad (Figura 4), donde diferentes elementos toman protagonismo para definir a grandes rasgos el encaminamiento del modelo. El diagrama casual (Figura 5) contempla elementos fundamentales para comprender de mejor manera el funcionamiento general del modelo, por dicha razón, los elementos como el Aceite, Metilester y Biodiesel Bx (siendo éste último la mezcla de metilester con petróleo) permiten visualizar el comportamiento general del modelo. El siguiente diagrama fue realizado mediante el *Software Vensim*.

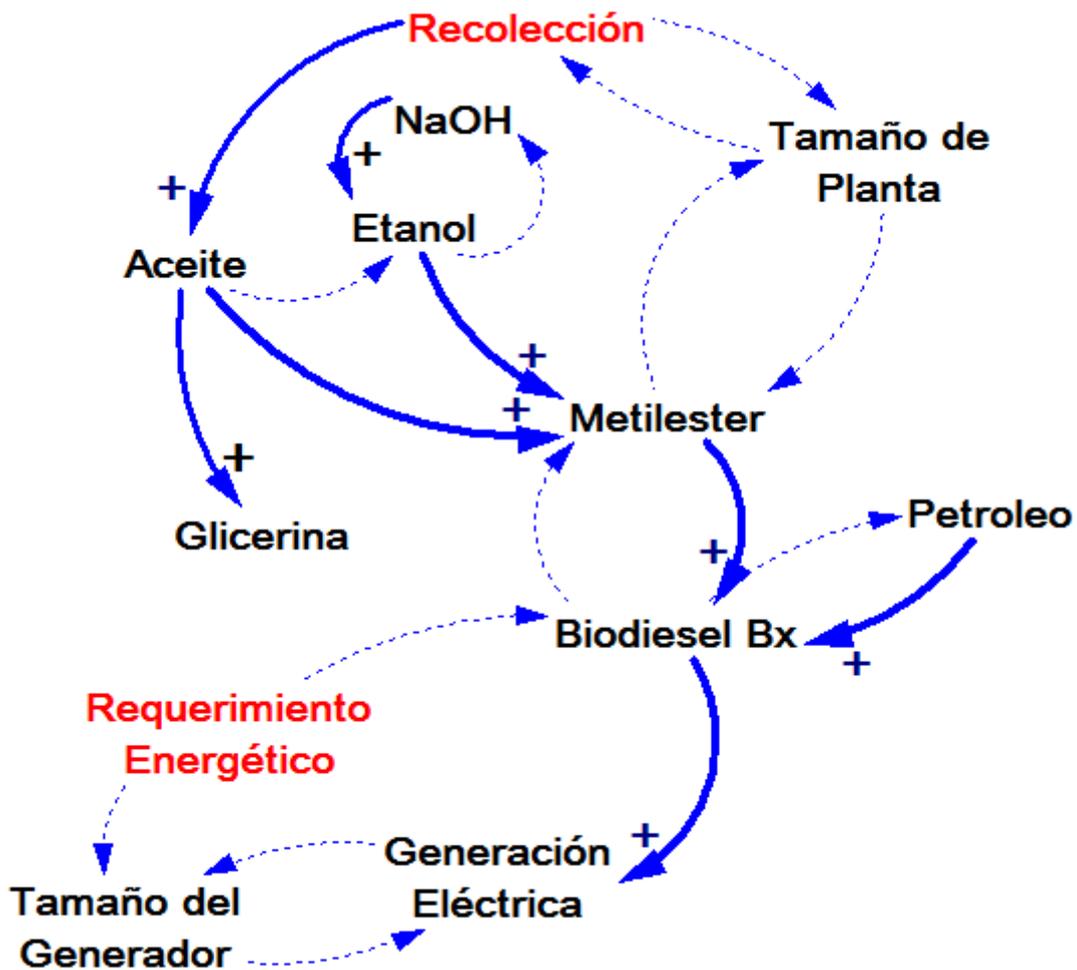


Figura 5. Diagrama casual para planta de biodiesel a pequeña escala.

## Magnitudes de los Elementos

El listado de todos los elementos que componen el diagrama de Forrester se encuentran en el Apéndice I, donde los elementos destacados y mencionados en el Diagrama Casual (Figura 5) conforman los más relevantes reservorios del sistema, y la cantidad de “Aceite”, “Metilester”, “Etanol” y “Biodiesel Bx” denota protagonismo al ser el canal de material principal dentro del modelo. No hay que olvidar que el Metanol es un elemento fundamental para el proceso químico y que su cantidad está directamente ligada a las cantidades de aceite. Otro reservorio que se menciona en el Apéndice I es la Glicerina, la cual no está mencionada en el Diagrama Casual, la razón radica en que la Glicerina es solo un excedente del proceso y la única razón por la cual se decidió medir este elemento y sus cantidades, es por el potencial uso que podrían darle al elemento como materia prima, lo cual no está contemplado en el modelo. Las tasas corresponden a todos los conectores de canales de material, básicamente todos los Reservorios tienen una entrada y/o Salida mediante una tasa, las cuales se detallan en el listado. Las variables además de ser el mecanismo que tiene el usuario de introducir información al modelo, se utilizan en algunos casos como respuesta a las interrogantes propias del modelo, como por ejemplo, la cantidad de energía que se requiere para satisfacer las necesidades entregadas por el mismo usuario.

## Diagrama de Forrester

El Diagrama de Forrester para el modelo se realizó en el *Software Ithink* mostrado en el Apéndice II, para que se logre apreciar de mejor manera por parte del usuario, el modelo general fue dividido en los subsistemas antes mencionados. Cada subsistema es fundamental para la determinación de los objetivos del modelo y por ende debe ser interpretado como un todo.

El subsistema de Acopio (Apéndice III) muestra que a partir de las casas y locales comerciales se acumula el aceite donado por éstos y se retiran una vez a la semana para guardarse en el reservorio “Aceite”. Existen dos elementos que indican pérdida de aceite expresados en porcentajes, estos se refieren al porcentaje promedio de aceite que no logra llegar al siguiente proceso por cualquier causa: composición, derrame, pérdida, etc. La variable “Lunes” mostrada dentro del subsistema es sólo un algoritmo que identifica un día a la semana que es cuando se realiza el acopio y traslado del aceite. Esta variable no está detallada al ser un simple retardador matemático, realizado de ese modo por la diferencia en tiempos que se utiliza en el modelo, ya que el acopio es semanal, pero todo el resto de los procesos ocurren diariamente. En el Apéndice III se muestra como está compuesta esta variable (“Lunes”) a partir de los días correlativos, pero no aporta mayor información a los subsistemas.

El subsistema Transformación Bioquímica (Apéndice IV) muestra el seguimiento del canal de información proveniente del reservorio “Aceite”, donde la tasa de entrada es limitada naturalmente por la capacidad del reactor (volumen). El aceite es mezclado con metanol el cual es comprado y juntos pasan por un proceso químico donde son luego separados en glicerina y metilester (biodiesel). El metilester se mezcla con petróleo en una relación dada por el usuario dando como resultado un “Biodiesel Bx” que se

encuentra listo para ser usado en un motor. En este punto hay que recordar que la legislación sólo permite un máximo de 5% de biodiesel en la mezcla con el petróleo, en casos donde el requerimiento sea mayor, se requiere solicitar un permiso especial en la Superintendencia, previa consulta al Ministerio del Medio Ambiente (Artículo 12° de Decreto Supremo N°11 de 30 de enero de 2008), limitando enormemente los proyectos de esta índole.

Tanto el metanol, soda cáustica y el petróleo son comprados a medida que se requieren, por lo tanto dentro del diagrama de Forrester se incluye esta medición solo como un indicador de valores. Para el caso de la Soda Cáustica, su uso como catalizador hace que su volumen sea despreciable dentro de la transformación química (6,25g por litro), por ende la compra de Soda cáustica se realiza mediante una medición ajena al canal de información principal, donde la Soda cáustica se considera como una variable que nos muestra la cantidad de hidróxido de sodio usado diariamente.

El subsistema de Transformación a Energía Eléctrica (Apéndice V) utiliza como entrada el biodiesel ya mezclado proveniente del subsistema anterior, el cual mediante una tasa que representa el proceso de consumo del generador (Biodiesel Usado o BIOU), se va eliminando la mezcla del modelo. Este proceso está ligado directamente a partir de los detalles técnicos del generador y de los requerimientos eléctricos de la comunidad.

El subsistema de Consumo Eléctrico (Apéndice VI) determina una suma de variables que dan pie al consumo de toda la comunidad, estos se dividen en el consumo proveniente de cada casa (ampolleta y televisor) y el consumo común (lavadora y alumbrado), estos pasan por un factor de amplificación, que es solo el cálculo de la pérdida de tensión natural del cableado. Todo el consumo eléctrico es determinado por el usuario final.

## Determinar Ecuaciones

Una vez realizado el diagrama de Forrester, se complementó agregando en cada elemento la información matemáticamente equivalente. En los casos de las variables de nivel o reservorios se utilizó como método general la mostrada en Ecuación 2.

### Aceite

$$AC_{(t)} = AC_{(t-1)} + [TACC_{(t)} + TACR_{(t)} - TAAC_{(t)}]$$

Donde:

$AC_{(t)}$ : El valor del Aceite en el instante t.

$AC_{(t-1)}$ : El valor del Aceite en el instante inmediatamente anterior.

$TACC_{(t)}$ : Tasa de Aceite Casas en el instante t.

$TACR_{(t)}$ : Tasa de Aceite por Restorán en el instante t.

$TAAC_{(t)}$ : Tasa de Aporte de Aceite en el instante t.

## Metanol

$$MTL_{(t)} := MTL_{(t-1)} + [CMTL_{(t)} - AMTL_{(t)}]$$

Donde:

$MTL_{(t)}$ : El valor del Metanol en el instante t.

$MTL_{(t-1)}$ : El valor del Metanol en el instante anterior.

$CMTL_{(t)}$ : Tasa de Compra de Metanol en el instante t.

$AMTL_{(t)}$ : Tasa de Aporte de Metanol en el instante t.

## Metilester y Glicerina

$$METGLI_{(t)} = METGLI_{(t-1)} + [TAAC_{(t)} + AMTL_{(t)} - AMET_{(t)} - GLIE_{(t)}]$$

Donde:

$METGLI_{(t)}$ : El valor del Metilester con Glicerina en el instante t.

$METGLI_{(t-1)}$ : El valor del Metilester con Glicerina en el instante anterior.

$TAAC_{(t)}$ : Tasa de Aporte de Aceite en el instante t.

$AMTL_{(t)}$ : Tasa de Aporte de Metanol en el instante t.

$AMET_{(t)}$ : Tasa de Aporte de Metilester en el instante t.

$GLIE_{(t)}$ : Tasa de Glicerina Extraída en el instante t.

## Glicerina

$$GLI_{(t)} = GLI_{(t-1)} + [GLIE_{(t)}]$$

Donde:

$GLI_{(t)}$ : El valor de la Glicerina en el instante t.

$GLI_{(t-1)}$ : El valor de la Glicerina en el instante inmediatamente anterior.

$GLIE_{(t)}$ : Tasa de Glicerina Extraída en el instante t.

## Metilester

$$MET_{(t)} = MET_{(t-1)} + [AMET_{(t)} - SMET_{(t)}]$$

Donde:

$MET_{(t)}$ : El valor del Metilester en el instante t.

$MET_{(t-1)}$ : El valor del Metilester en el instante inmediatamente anterior.

$AMET_{(t)}$ : Tasa de Aporte de Metilester en el instante t.

$SMET_{(t)}$ : Tasa de Salida de Metilester en el instante t.

## **Petróleo**

$$PET_{(t)} = PET_{(t-1)} + [CPET_{(t)} - APET_{(t)}]$$

Donde:

$PET_{(t)}$ : El valor del Petróleo en el instante t.

$PET_{(t-1)}$ : El valor del Petróleo en el instante anterior.

$CPET_{(t)}$ : Tasa de Compra de Petróleo en el instante t.

$APET_{(t)}$ : Tasa de Aporte de Petróleo en el instante t.

## **Mezcla Biodiesel**

$$MBIO_{(t)} = MBIO_{(t-1)} + [APET_{(t)} + SMET_{(t)} - BIOU_{(t)}]$$

Donde:

$MBIO_{(t)}$ : El valor de la Mezcla de Biodiesel en el instante t.

$MBIO_{(t-1)}$ : El valor de la Mezcla de Biodiesel en el instante anterior.

$APET_{(t)}$ : Tasa de Aporte de Petróleo en el instante t.

$SMET_{(t)}$ : Tasa de Salida de Metilester en el instante t.

$BIOU_{(t)}$ : Tasa de Biodiesel Usado en el instante t.

En el *Software Stella*, se incluyeron dos algoritmos temporales que incorporan en sus rutinas variables de nivel, las cuales son contadores de semanas y años transcurridos, el primero para determinar los días “Lunes” en donde se realiza la recolección, y el segundo sirve para determinar los períodos de temporada alta.

## **Semanas**

$$Semanas_{(t)} = Semanas_{(t-1)} + [E\_Semanas_{(t)} - S\_Semanas_{(t)}]$$

Donde:

$Semanas_{(t)}$ : El número de semanas transcurridas en el instante t.

$Semanas_{(t-1)}$ : El número de semanas transcurridas en el instante anterior.

$E\_Semanas_{(t)}$ : Calcula las semanas en el instante t.

$S\_Semanas_{(t)}$ : Para equilibrar, quita las “semanas” sobrantes para tiempo t.

## Calibrado

Mediante ensayos realizados por parte del Proyecto FONDEF D10ER2002 (Figura 6), se pudo determinar que la relación Glicerina-Metilester no varía en cuanto a diferentes tiempos de reacción.



**Figura 6.** Ensayos realizados con 15, 20, 30, 45 y 60 minutos de reacción

Los diferentes ensayos se midieron con un matraz (Figura 7) para determinar, mediante el volumen la correcta relación entre las sustancias ya separadas.



**Figura 7.** Medición de proporciones de Glicerina y Metilester.

Los porcentajes de metilester y glicerina obtenidos se mantienen como un valor fijo constante y que corresponden a una correcta relación en el proceso de la traseseterificación con un aproximado de 80% de metilester. Se debe señalar que si el proceso de la reacción no ocurre apropiadamente, los porcentajes de glicerina serán cada vez menores, y aunque el metilester aumente, que a primera vista se podría considerar como favorable, éste tendrá una mala calidad al contener glicerina no separada.

## Evaluación

Los hechos observados en terreno fueron comparados con el modelo utilizando para los mismos parámetros iniciales. Los datos utilizados para el aceite recolectado semanalmente (Cuadro 3) fueron entregados por la Corporación de Desarrollo Productivo Regional del Maule que fue partícipe además del Proyecto FONDEF D10ER2002. Los valores de aceite entregados corresponden a un promedio de bidones de aceite usado entregados por los locales de comida entre los meses de enero y abril del año 2013. Los hogares particulares no participaron de manera significativa en la recolección de aceite, siendo despreciable comparado con las grandes cantidades de aceite entregadas por algunos restaurantes.

**Cuadro 3.** Recolección de aceite entre enero y abril de 2013

Restaurante	Lugar	Aceite Temporada Baja	Aceite Temporada Alta
Rincón Criollo	Cauquenes	7,5 (L/sem)	7,5 (L/sem)
Mampato	Cauquenes	7,5 (L/sem)	7,5 (L/sem)
Iberia	Cauquenes	7,5 (L/sem)	7,5 (L/sem)
Local Frituras 1	Cauquenes	7,5 (L/sem)	7,5 (L/sem)
Local Frituras 2	Cauquenes	7,5 (L/sem)	7,5 (L/sem)
El Quincho	Peyuhue	7,5 (L/sem)	30 (L/sem)
Las Vegas	Peyuhue	5 (L/sem)	30 (L/sem)
Las Brisas	Peyuhue	5 (L/sem)	30 (L/sem)
Balmaceda (Don René)	Peyuhue	5 (L/sem)	10 (L/sem)
La Solución	Peyuhue	5 (L/sem)	30 (L/sem)
Hostería Pacífico	Peyuhue	5 (L/sem)	20 (L/sem)
Carro Churro 1	Peyuhue	0 (L/sem)	50 (L/sem)
Carro Churro 2	Peyuhue	0 (L/sem)	50 (L/sem)

Fuente: Corporación de Desarrollo Productivo Regional del Maule, 2013

Los datos iniciales (Cuadro 4) fueron tomados de las visitas a terreno dadas por el proyecto FONDEF D10ER2002 y de las relaciones utilizadas y entregadas en las transformaciones bioquímicas en el uso del reactor. Estos valores fueron utilizados como variables de entrada dentro del modelo,

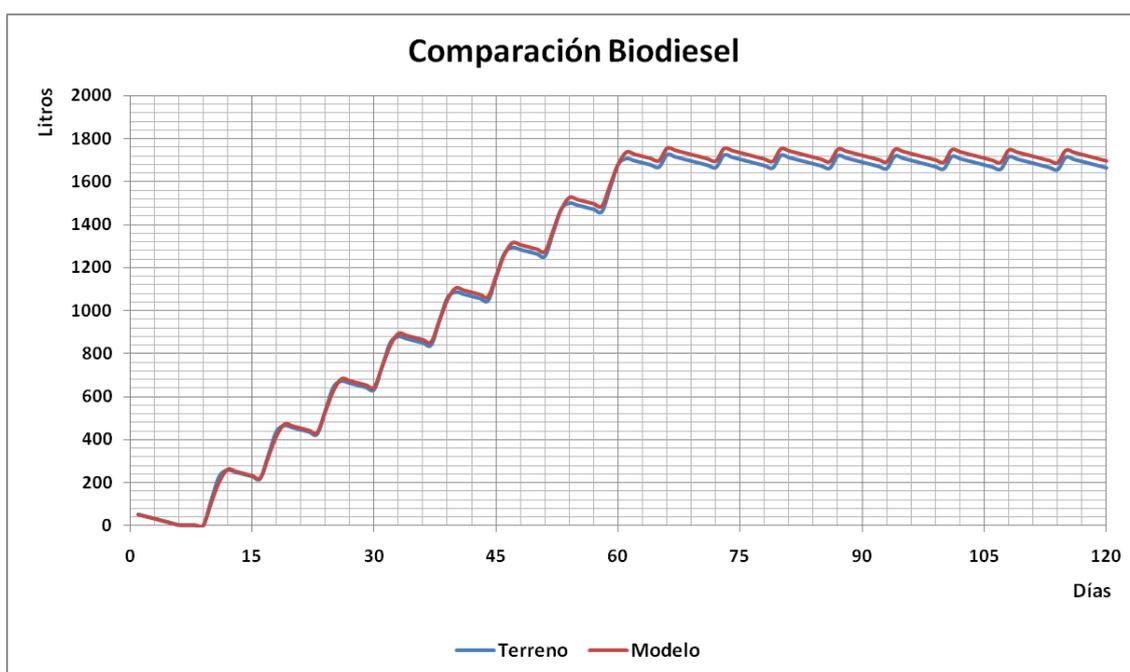
**Cuadro 4.** Información de elementos utilizados en las comunidades beneficiadas.

Elemento	Valor
Potencia Generador	4,5 (kVA)
Consumo Generador	1,23 (L/hr)
Cantidad de Generadores	2
Porcentaje de Petróleo	20 (%)
Comunidades Beneficiadas	2
Número de Casas Beneficiadas por Comunidad	5
Ampolletas por Casa	4
Luminaria común	4
Consumo Ampolletas	0,04 (Watt/h)
Consumo Luminaria	0,1(Watt/h)
Factor de Amplificación	1,2
Horas de uso al Día	3

Fuente: Proyecto FONDEF D10ER2002.

Para la elección del generador se optó por uno que actualmente no se utiliza en su totalidad, esto debido a que parte de los requerimientos contemplados no están siendo utilizados, pero podrían llegar a hacerlos como es el caso de televisores o lavadoras. Actualmente se requiere cerca de 3 kVA por comunidad, pero los generadores poseen potencia para 4,5 kVA, esto es cercano al 15% de energía que se genera y no se utiliza.

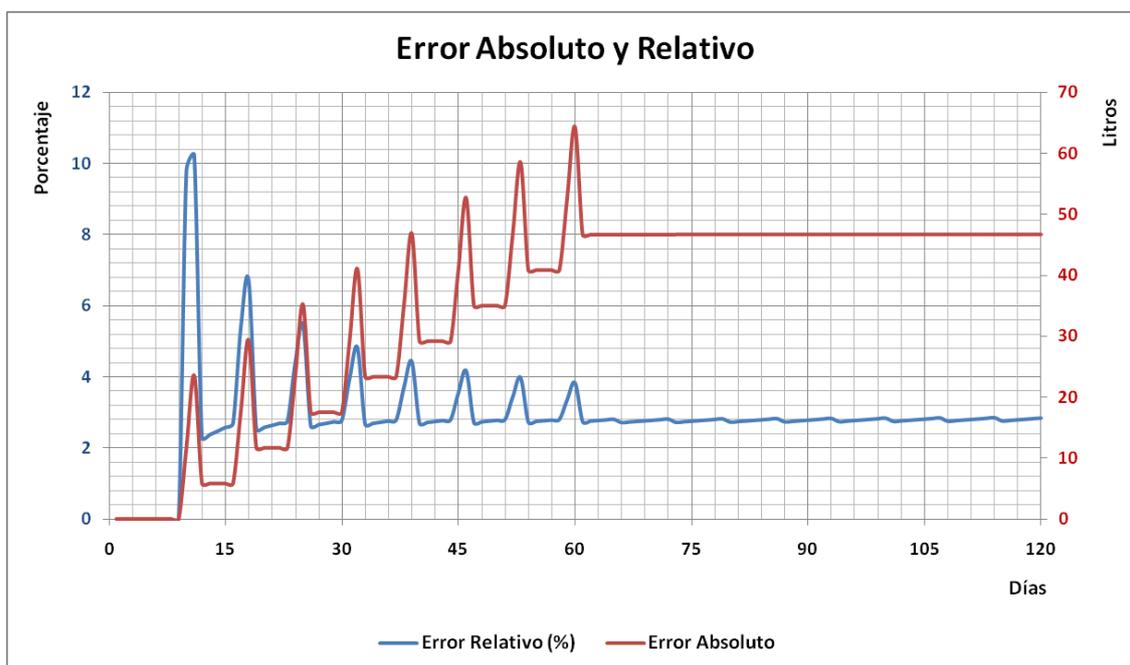
La fiabilidad del modelo se analizó utilizando en el modelo la variable “Biodiesel” (Figura 8), que representa la cantidad de biodiesel almacenado, es decir, todo el biodiesel que fue generado y mezclado con petróleo, pero no fue entregado a las comunidades por lo que fue acumulado para solventar los meses de temporada baja donde el aporte de aceite de las comunidades se reduce considerablemente.



**Figura 8.** Comparación en litros de biodiesel acumulado real y modelado.

Dentro del modelamiento, la curva se ajusta perfectamente a la realidad, esto ocurre en parte por la constancia de los datos entregados (la recolección semanal de aceite no varía significativamente) y por tratarse de datos empíricos que no dependen de un factor azaroso o de percepciones cualitativas. Adecuadamente al entregar el aceite reciclado en bidones, la información fue mucho más precisa al tratarse de valores fijos (5L, 10L, 30L, etc.), lo que ayudó enormemente a la modelación precisa.

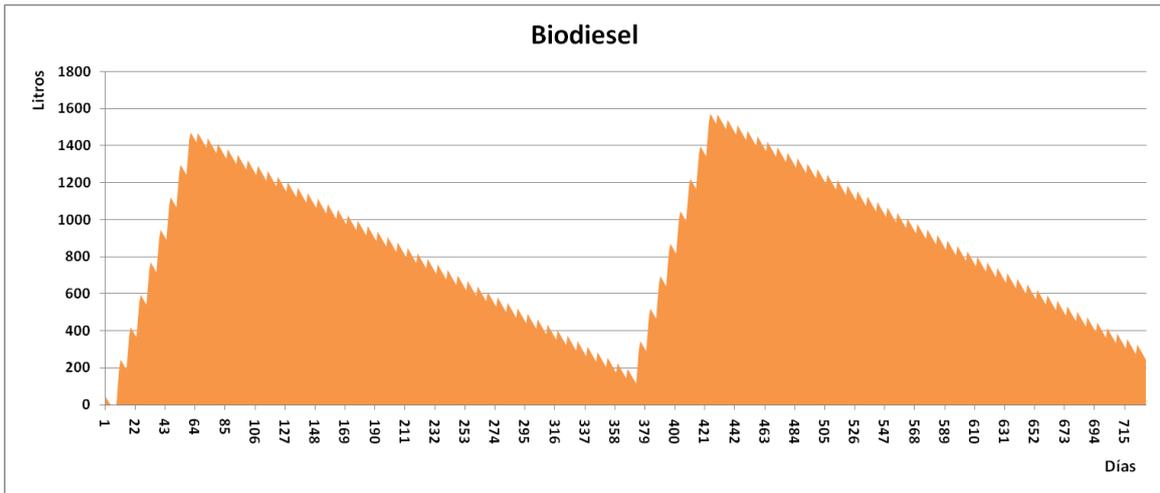
Utilizando la Ecuación 3 se calculó el error absoluto y error relativo porcentual para comparar los datos entregados en terreno con los modelados (Figura 9). El error absoluto, denotado en litros de aceite varía enormemente en los meses de temporada alta (primeros 60 días), para luego estabilizarse cercano a los 35 L, de igual manera el error relativo comienza con grandes variaciones que alcanzan algunas sobre el 10% para finalmente estabilizarse en los meses de temporada baja con valores cercanos al 2%



**Figura 9.** Error Absoluto y Relativo en relación a cantidades de biodiesel.

Para este caso el modelo queda validado para proyecciones al largo plazo (mayor a los 30 días) donde el error ( $\varepsilon = 0,04$ ) se encuentra dentro de lo previamente establecido para estos casos principalmente empíricos ( $\varepsilon = 0,1$ ). En casos de corto plazo, el modelo posee un error cercano al 10% lo cual sigue siendo un error aceptable, aunque el uso principal debiese ser solo el análisis de tendencia a través del tiempo.

Una vez validado el modelo, se decidió utilizarlo para generar proyecciones y analizar, si es posible, aumentar la cantidad de horas para ambas comunidades, para ello se utilizaría el biodiesel almacenado en las temporadas de verano. Se hizo correr el modelo con 5 horas y 30 minutos de energía diaria por dos años (Figura 10), lo que equivale a un consumo de 13,53L de biodiesel al día, valor muy por sobre el biodiesel capaz de generar en los meses de temporada baja, pero altamente viable si se analiza el aceite disponible.



**Figura 10.** Cálculo de excedente de biodiesel para 5,5 horas de energía en dos años

El análisis fue presentado a los representantes de la Municipalidad de Cauquenes, que actualmente administran la recolección y distribución de aceite y biodiesel respectivamente. Ellos corroboraron la validez de los datos entregados para los meses de enero, febrero, marzo y abril y se les indicó la potencialidad de aumentar el número de horas que luego de conversaciones de gestión entre los responsables, tomaron la decisión de aumentar la cantidad de horas en ambas comunidades. Cabe señalar que el biodiesel hasta ese momento estaba siendo guardado como reserva en caso de que existiera un inconveniente y tuviesen que terminar el proyecto de manera abrupta, dejando así un tiempo donde podrían abastecer a las comunidades de manera continua y para buscar una solución a este supuesto problema.

# CONCLUSIÓN

Se logró desarrollar exitosamente un modelo de simulación dinámica para el diseño y evaluación de sistemas eléctricos a pequeña escala a base biodiesel. Esto quedó demostrado al utilizar dicho modelo representando válidamente la realidad con el caso del proyecto efectuado en la Provincia de Cauquenes, donde se pudo modelar la realidad actual del proyecto y se logró además predecir un comportamiento que pudo ser utilizado para la toma de decisiones.

Tanto los elementos como sus funciones, fueron correctamente identificados mediante límites establecidos, los cuales permitieron enfocar los esfuerzos en los elementos relevantes para poder modelar adecuadamente la realidad. El modelo fue generado utilizando para ello el diagrama de Forrester, que permitió la visualización de los elementos y sus relaciones desde una mirada sistémica. El diagrama fue calibrado y validado para dar paso a un modelo de simulación dinámica que es capaz de modelar no sólo la producción de biodiesel sino además permite determinar los correctos parámetros para utilizar de manera óptima los recursos.

El modelo funcionará siempre y cuando se mantenga una constancia en los consumos y en la entrega de aceite. En el caso de estudio la constancia fue fundamental para la correcta relación entre el modelo y la realidad, pero este factor puede llegar a ser algo más variable debido a elementos externos como el cierre de un restaurante o simplemente al factor humano. Es recomendable que al momento de cualquier cambio de magnitud en alguno de los elementos se realice nuevamente el cálculo, es decir “hacer correr el modelo” una vez más, para así evitar que no se tengan datos actualizados para el correcto análisis.

Es muy importante considerar que el factor humano es un elemento parte del modelo. El encargado de recolectar y de hacer la transformación bioquímica podría dejar de hacerlo con la periodicidad regular, lo que se traduciría en un factor de caos y quiebre dentro del modelo. Por dicha razón es muy recomendable tratar de minimizar los agentes externos o cualquier clase de factor aleatorio para una mayor fiabilidad de los datos entregados.

El modelo en su versión en *Excel* es capaz de entregar datos adicionales a los presentados en *Stella*, debido principalmente a que se utilizó como base la programación *Visual Basic* que permite mayor dinamismo. En caso de estudio se presenta que el valor del litro de biodiesel es cercano a los \$220 contemplando costos de metanol, soda cáustica, electricidad (para el uso del reactor) y petróleo (al 20%), asumiendo que el transporte de biodiesel es aportado por la Municipalidad y el aceite es donado por los restaurantes. Además presenta un costo inicial sobre los 4 millones de pesos solamente por compra de materiales, pues el modelo no contempla los gastos de honorarios para la construcción del reactor ni el pago al encargado del mismo.

En el caso estudiado, el comportamiento histórico nos entrega que la localidad beneficiada con el proyecto puede perfectamente abastecerse de materia prima en la temporada de verano, esto es principalmente debido al turismo en el sector costero donde la cantidad de aceite entregado en los meses de enero y febrero es cuatro veces más que la entregada en el resto del año. Este excedente permite satisfacer la temporada

baja incluso si se aumentasen las horas de energía al día en ambas comunidades, pudiendo usar más de 5 horas diarias de energía, siempre y cuando se mantengan los mismos consumos por parte de la comunidad y no existan factores externos que impidan el normal funcionamiento de la planta. El hecho de aumentar las horas no es menor, ya que generar más horas de luz significa un aumento considerable en la calidad de vida de los beneficiados con el proyecto.

Actualmente los beneficiarios no están utilizando todo el potencial eléctrico dado por el generador, incluso la estimación entrega que una gran parte de la energía generada no estaría siendo utilizada (alrededor del 15%), en la realidad esto puede acentuarse ya que como supuesto se estima que durante todo el proceso que el generador está encendido, todos los aparatos eléctricos están funcionando a la vez, además no todas las casas cuentan aún con los utensilios eléctricos supuestos, pero se espera que al corto o mediano plazo los hogares beneficiados cuenten con los aparatos eléctricos propuestos en el modelo.

Mediante el modelo es posible visualizar aproximadamente hasta donde es posible llegar con la generación eléctrica y cuanto sería lo prudente exigir sin caer en un sobreconsumo.

Un punto muy importante fue el traspaso del modelo de *IThink (Stella)* a *Visual Basic* en *Excel*, esta decisión se realizó principalmente para generar mayor compatibilidad en el uso del modelo. Otra de las razones fue la gran cantidad de posibilidades que entrega la programación, a diferencia de *Stella*, pues en *Excel* es posible entregar resultados de texto, resaltar algunos valores y además permite la introducción de datos de manera mucho más amigable. Como se mencionó anteriormente en *Excel* se incluyó una hoja de preguntas con sus respectivas respuestas donde se señalan cuestionamientos básicos para desarrollar un proyecto de similares características. En los algoritmos temporales los métodos para calcular semanas, meses y años fue diferente en ambos programas, principalmente por la forma en que éstos se comportan en las diferentes funciones, los resultados son idénticos, pero los mecanismos fueron en algunos casos completamente diferentes.

El modelo se encuentra validado para la localidad de Cauquenes, pero eso no implica que no sea válido para otra comunidad, el modelo es lo suficientemente flexible como para adaptarse a otra realidad que comparta los objetivos. Aun así es recomendable que el modelo no se utilice con fines exactos debido a que existen variaciones del 10% en algunos casos, debe ser una representación fidedigna del comportamiento de los elementos a través del tiempo, la que permita la informada toma de decisiones para elaborar proyectos similares.

La implementación de esta iniciativa y la posibilidad de replicarlo mediante el uso del modelo elaborado, permite una creciente educación ambiental en las comunidades rurales y su entorno, donde algo que era simplemente un desperdicio pasó a ser la materia prima para la generación energética de sectores rurales. La visión de los residuos como potenciales materias primas es un concepto que permite a las personas tomar conciencia sobre lo importante que es el reciclaje, ya que no sólo disminuyen su cantidad de basura, sino que al hacerlo están aportando considerablemente a las comunidades beneficiadas. El poseer cuatro o cinco horas de luz extra en las localidades permite aumentar enormemente su productividad pudiendo así incluir dentro de su quehacer diario otras actividades que fortalezcan el desarrollo de la comunidad.

# BIBLIOGRAFÍA

ARPEL (Asociación Regional de Empresas del Sector Petróleo, Gas y Biocombustibles en Latinoamérica y el Caribe), Uruguay e IICA (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura), Costa Rica. 2009. Manual de Biocombustibles, IICA, San José, Costa Rica. 230p.

Barriga, E. 2011. Diseño del Módulo de Transesterificación de una Planta Piloto para Producción de Biodiesel a partir de Aceites Usados de Cocina. Tesis Ingeniería Mecánica, Lima, Perú: Facultad de Ciencias e Ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Perú. 100h.

Bridgewater, A. y G. Bridgewater. 2009. Energías Alternativas, Handbook. Paraninfo, Madrid, España. 194p.

Corporación de Desarrollo Productivo Regional del Maule, 2013, may. [Entrevista personal]. Municipalidad de Cauquenes, Chile

Decreto N° 11. Aprueba definiciones y especificaciones de calidad para la producción, importación, transporte, almacenamiento, distribución y comercialización de bioetanol y biodiesel. [En línea]. 30 de enero de 2008. Santiago, Chile: 9 de mayo de 2008. Recuperado en: <<http://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=271031>> Consultado el: 12 de enero de 2013.

Decreto N° 128. Crea comisión asesora interministerial en materia de biocombustibles en Chile. [En línea]. 23 de junio de 2008. Santiago, Chile: 12 de agosto de 2008. Recuperado en: <<http://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=275871>> Consultado el: 12 de enero de 2013.

Decreto N° 174. Prohíbe la mezcla de Kerosene con otros combustibles y establece requisitos al Kerosene para uso doméstico e industrial almacenado, distribuido y comercializado en las regiones Metropolitana, V, VI, VII y VIII. [En línea]. 25 de abril de 2001. Santiago, Chile: 10 de mayo de 2001. Recuperado en: <<http://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=184960>> Consultado el: 12 de enero de 2013.

Dufey, A. 2005. Producción y comercio de biocombustibles y desarrollo sustentable: los grandes temas. International Institute for Environment and Development. Inglaterra. 63p.

ENAP (Empresa Nacional del Petróleo), Chile. 2013. Biocombustibles. [En línea]. Santiago, Chile: ENAP. Recuperado en: <<http://www.enap.cl/proyectos/biocombustibles.php>> Consultado el: 10 de enero del 2013.

Fernández W.; M. Guzman, y R. Torres. 2008, mar. Análisis y Estudio del Desempeño de los Entrelazadores de Bits de Bloque, Dorado y Dorado Relativo en un Canal de la Línea Eléctrica de Baja Tensión. Revista Chilena de Ingeniería 16(3): 333-341.

FONDEF (Fondo de Fomento al Desarrollo Científico y Tecnológico), Chile. 2011. 10 nuevos proyectos de energías renovables no convencionales. [En línea]. Santiago, Chile: CONICYT. Recuperado en: <<http://www.fondef.cl/content/view/804/195/>>. Consultado el: 28 de diciembre de 2012.

Forrester, J. 1961. Industrial Dynamics. M.I.T. Press. Massachusetts, Estados Unidos. 464p.

Homer, I. 2006. Motores y Biocombustible. (cap. 12, pp.149-164) En: Acevedo, E. (ed.). Agroenergía. Un desafío para Chile. Serie Ciencias Agronómicas N°11. Universidad de Chile. Santiago, Chile. 177p.

Huggett, R. 1993. Modelling the human impact on nature: systems analysis of environmental problems. Oxford University Press. Reino Unido. 202p.

IICA (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura), Costa Rica. 2010. Atlas de la agroenergía y los biocombustibles en las Américas: II. Biodiesel. IICA, San José, Costa Rica. 346p.

Jutglar, L. y M. Galán. 2011. Termotecnia. Marcombo. Barcelona, España. 516 p.

Ley N° 18.502. Establece impuestos a combustibles que señala. [En línea]. 1 de abril de 1986. Santiago, Chile: 3 de abril de 1986. Recuperado en: <<http://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=29903>> Consultado el: 12 de enero de 2013.

Ley N° 20.417. Crea el Ministerio, el Servicio de Evaluación Ambiental y la Superintendencia del Medio Ambiente. [En línea]. 12 de enero de 2010. Santiago, Chile: 26 de enero de 2010. Recuperado en: <<http://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=1010459>> Consultado el: 12 de enero de 2013.

López, E. y S. Martínez. 2000. Iniciación a la Simulación Dinámica. Editorial Ariel. Barcelona, España. 213p.

Oyarzún, M. 2006. Efectos del material particulado y del ozono sobre el sistema respiratorio. (cap. 9, pp.299-319) En: Morales, R. (ed.) Contaminación Atmosférica Urbana: Episodios Críticos de Contaminación Ambiental en la Ciudad de Santiago. Editorial Universitaria. Santiago, Chile. 327p.

Rojo, F. y E. Acevedo. 2006. Biodiesel. (cap. 8, pp.83-98) En: Acevedo, E. (ed.). Agroenergía. Un desafío para Chile. Serie Ciencias Agronómicas N°11. Universidad de Chile. Santiago, Chile. 177p.

Romano, S. 2005. Combustibles alternativos. Ediciones Corporativas. Buenos Aires, Argentina. 189p.

Santibañez, M. 2013, abr. Simulación Dinámica. [Entrevista personal]. Departamento de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales Renovables, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile.

SII (Servicio de Impuestos Internos), Chile. 2007. Tratamiento Tributario de los Biocombustibles denominados Biodiesel y Bioetanol. [En línea]. Santiago, Chile: SII.

Recuperado en: <<http://www.sii.cl/documentos/circulares/2007/circu30.htm>>. Consultado el: 12 de diciembre del 2012.

U.S. Department of Energy. 2006 Biodiesel Handling and Use Guidelines. Dinae. Washington, Estados Unidos. 63p.

U.S. Department of Energy. 2012. Fuel Properties Comparison. [En línea]. Washington DC, Estados Unidos: U.S. Department of Energy Recuperado en: <[http://www.afdc.energy.gov/pdfs/afv\\_info.pdf](http://www.afdc.energy.gov/pdfs/afv_info.pdf)> Consultado el: 10 de enero del 2013.

Usó J. y J. Mateu 2004. Teoría del Medio Ambiente: Modelización. Publicaciones de la Universidad de Jaume. Castelló de la Plana, España. 315p.

Velázquez, B. 2006. Aprovechamiento de Los Residuos Forestales Para Uso Energético. Ed. Universidad Politécnica. Valencia, España. 158p.

## ANEXOS Y APÉNDICES

**Anexo I.** Calcomanía entregada a los locales participantes del proyecto.



Fuente: Proyecto FONDEF D10ER2002.

**Anexo II.** Construcción de reactor de biodiesel.



Fuente: Proyecto FONDEF D10ER2002.

**Anexo III.** Motor diesel modificado para altas concentraciones de biodiesel.



Fuente: Proyecto FONDEF D10ER2002.

**Anexo IV.** Luminaria común.



Fuente: Proyecto FONDEF D10ER2002.

**Apéndice I.** Detalle de elementos en modelo de producción de biodiesel.

Número	Subsistema	Tipo	Abreviación	Nombre	Descripción	Unidades	Observaciones
1	Recolección / Transformación Química	Reservorio	AC	Aceite	Determina la cantidad de aceite recolectado y a recolectar. Es un reservorio que se mide en litros donde se acumula todo el aceite antes de ser enviado a un tratamiento químico.	L	Es relevante tanto en el subsistema de Recolección como en el de Transformación Química.
2	Recolección	Tasa	TACC	Tasa Aceite por Casa	Cantidad de aceite recolectado semanalmente proveniente de todas casas particulares.	L/Sem.	-
3	Recolección	Tasa	TACR	Tasa de Aceite por Restaurante	Cantidad de aceite recolectado semanalmente proveniente del comercio en general.	L/Sem.	-
4	Recolección	Variable	CPAR	Casas Participantes	Cantidad de casas suscritas como donantes de aceite.	Un.	-
5	Recolección	Variable	RPAR	Restaurantes Participantes	Cantidad de locales comerciales suscritos como donantes de aceite.	Un.	-
6	Recolección	Variable	ACPCV	Aceite por Casa en Temporada Alta	Cantidad de aceite promedio que es entregado por cada casa para el proyecto en temporada alta.	L	-
7	Recolección	Variable	ACPC	Aceite por Casa Temporada Baja	Cantidad de aceite promedio que es entregado por cada casa para el proyecto en temporada baja.	L	-

Número	Subsistema	Tipo	Abreviación	Nombre	Descripción	Unidades	Observaciones
8	Recolección	Variable	ACPRV	Aceite por Restaurante en Temporada Alta	Cantidad de aceite promedio entregado por cada uno de los locales comerciales partícipes del proyecto en temporada alta.	L	-
9	Recolección	Variable	ACPR	Aceite por Restaurante Temporada Baja	Cantidad de aceite promedio entregado por cada uno de los locales comerciales partícipes del proyecto en temporada baja.	L	-
10	Recolección	Variable	FPACC	Factor de Pérdida de Casas	Porcentaje de aceite no utilizable en el acopio de casas. Esto puede ser por su composición, suciedad, derrame o pérdida en general.	%	-
11	Recolección	Variable	FPACC	Factor de Pérdida en Restaurantes	Porcentaje de aceite no utilizable en el acopio de locales comerciales.	%	-
12	Transformación Química	Tasa	TAAC	Tasa Aporte de Aceite	Esta tasa conecta el subsistema Acopio con el subsistema de Transformación Bioquímica, ya que es la tasa de aceite que se utilizará para la mezcla.	L/día	-
13	Transformación Química	Reservorio	MBIO	Mezcla Biodiesel	Cantidad en litros de biodiesel una vez mezclado con petróleo, generado químicamente en el proceso, es un reservorio.	L	-
14	Transformación Química	Reservorio	METGLI	Metilester con Glicerina	Reservorio donde se concentra el metilester mezclado con la glicerina, donde posteriormente se separan.	L	-

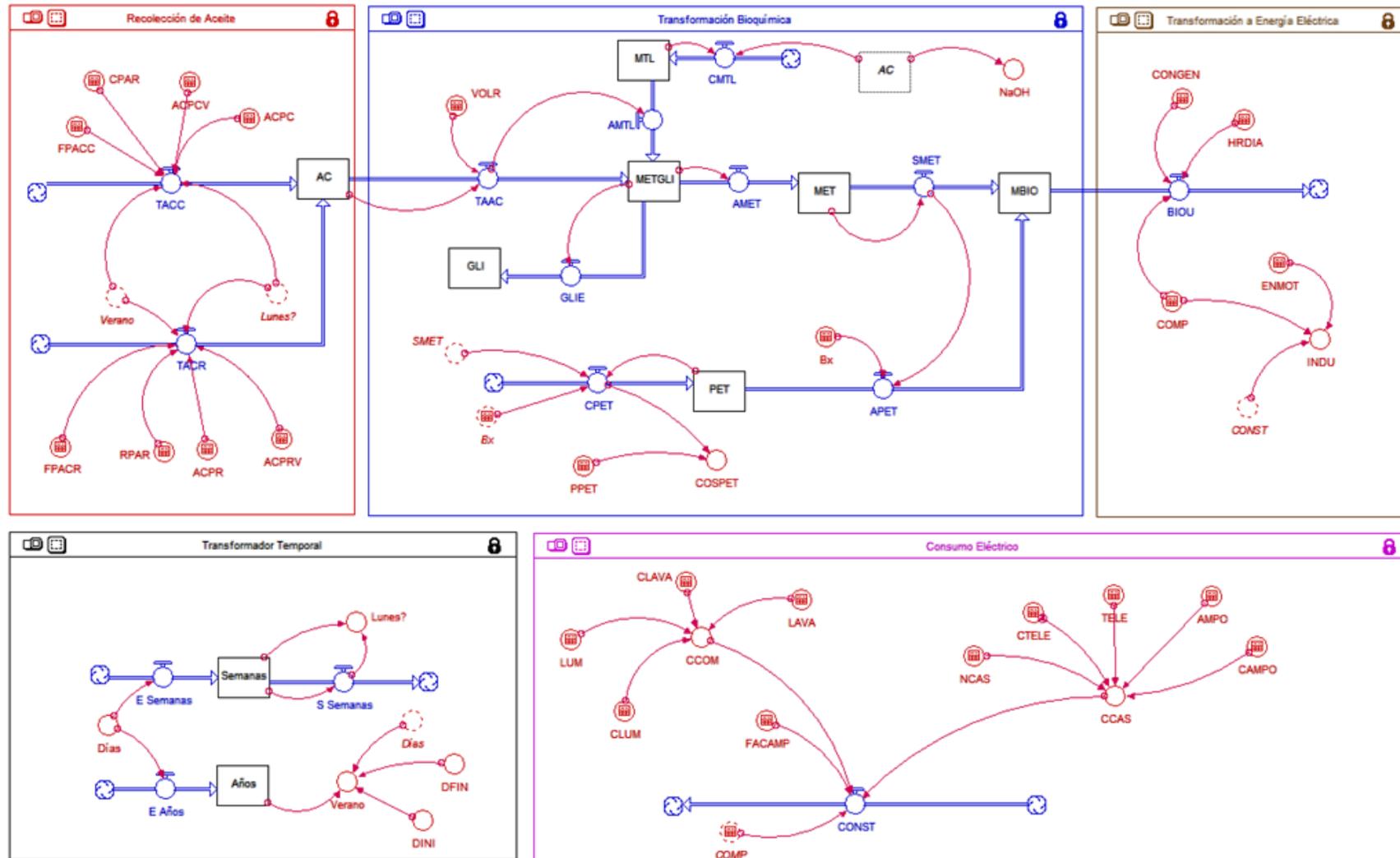
Número	Subsistema	Tipo	Abreviación	Nombre	Descripción	Unidades	Observaciones
15	Transformación Química	Reservorio	PET	Petróleo	Reservorio de petróleo, donde se almacena para su posterior mezcla con el metilester.	L	-
16	Transformación Química	Reservorio	MTL	Metanol	Reservorio donde se acumula el metano comprado y de donde se extrae para su posterior uso en el proceso químico.	L	-
17	Transformación Química	Reservorio	GLI	Glicerina	Es un reservorio donde se acumula toda la glicerina resultante del proceso químico de la transesterificación.	L	-
18	Transformación Química	Reservorio	MET	Metilester	Reservorio de metilester (o comúnmente llamado biodiesel puro), es donde se acumula antes de ser mezclado con petróleo.	L	-
19	Transformación Química	Tasa	APET	Aporte de Petróleo	Cantidad en litros de petróleo que será agregado a la mezcla de biodiesel.	L/día	-
20	Transformación Química	Tasa	GLIE	Glicerina Extraída	Cantidad de glicerina en litros que es extraída de la mezcla al día.	L/día	-
21	Transformación Química	Tasa	CMTL	Compra Metanol	Tasa, litros de metanol que se requieren comprar cada día.	L/día	-
22	Transformación Química	Tasa	AMTL	Aporte Metanol	Tasa, cantidad de litros de metanol que se requieren para la mezcla al día.	L/día	-
23	Transformación Química	Tasa	AMET	Aporte Metilester	Tasa, metilester generado al día.	L/día	-
24	Transformación Química	Tasa	SMET	Salida Metilester	Tasa, metilester que sale del reservorio para ser usado en el proceso químico.	L/día	-
25	Transformación Química	Tasa	CPET	Compra Petróleo	Tasa, petróleo comprado al día.	L/día	-

Número	Subsistema	Tipo	Abreviación	Nombre	Descripción	Unidades	Observaciones
26	Transformación Química	Variable	COSPET	Costo de Petróleo	Cálculo total de los costos en la compra de petróleo.	Pesos Chilenos	-
27	Transformación Química	Variable	NaOH	Soda Cáustica	Cantidad de soda cáustica que se requiere para la mezcla.	g	-
28	Transformación Química	Variable	Bx	Porcentaje Diesel	Porcentaje de cuánto diesel se utilizará en la mezcla.	%	-
29	Transformación Química	Variable	PPET	Precio del Litro de Petróleo	Precio actual del petróleo por litro.	Peso Chileno	-
30	Transformación Química	Variable	VOLR	Volumen Reactor	Tamaño de la planta en litros.	L	-
31	Transformación Química / Transformación Eléctrica	Tasa	BOIU	Biodiesel Usado	Tasa que conecta el subsistema anterior con la generación eléctrica, se refiere a los litros de biodiesel usados al día por el generador.	L/día	-
32	Transformación Eléctrica	Variable	HRDIA	Horas de uso diario	Cantidad de horas de uso del generador al día.	hr	-
33	Transformación Eléctrica	Variable	CONGEN	Consumo del Generador	Cantidad de litros por hora definidos por el tipo y tamaño del generador.	L/hr	No se considera como tasa al ser usado como un valor puntual.
34	Transformación Eléctrica	Variable	ENMOT	Energía del Motor	Potencia definida por el tipo y tamaño del generador.	kVA	-
35	Transformación Eléctrica	Variable	INDU	Indicador de Utilidad	Representa la comparación entre la potencia del motor y la energía necesaria por la comunidad, este valor siempre debe ser positivo.	kVA	Se multiplica por un factor de amplificación para estimar en kVA

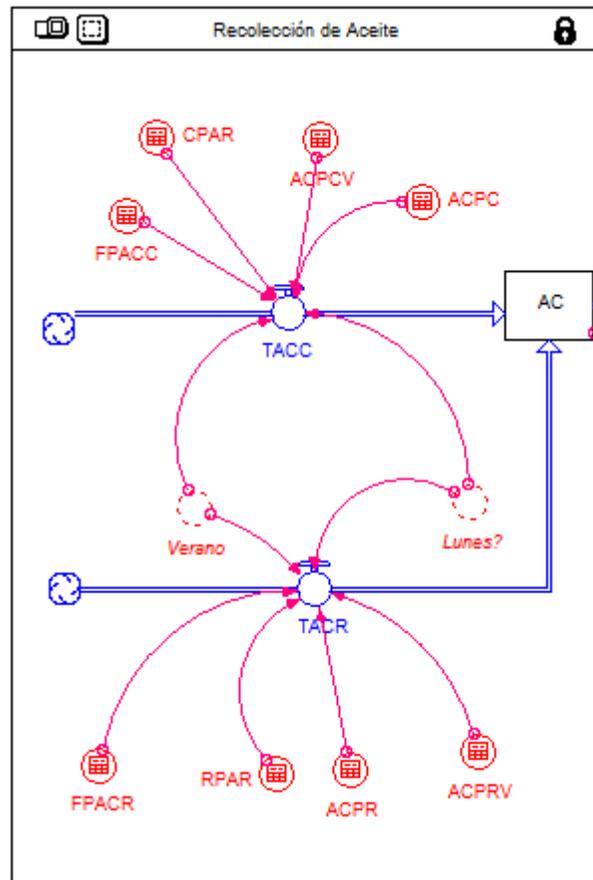
Número	Subsistema	Tipo	Abreviación	Nombre	Descripción	Unidades	Observaciones
36	Consumo Eléctrico	Tasa	CONS	Consumo Total	Tasa donde se suma el requerimiento eléctrico de la comunidad de de todas las casas según el número de horas al día de electricidad.	Watt/h	-
37	Consumo Eléctrico	Variable	CCOM	Consumo Común	Es la suma de la energía requerida de todos los elementos eléctricos de uno comunitario.	Watt/h	-
38	Consumo Eléctrico	Variable	CCAS	Consumo de Casas	Suma de consumo eléctrico de cada elemento de cada casa.	Watt/h	-
39	Consumo Eléctrico	Variable	NCAS	Número de Casas	Cantidad de casas beneficiadas por el proyecto.	Un.	-
40	Consumo Eléctrico	Variable	TELE	Televisores	Cantidad de televisores por casa.	Un.	-
41	Consumo Eléctrico	Variable	AMPO	Ampolletas	Cantidad de ampolletas de bajo consumo por cada casa.	Un.	-
42	Consumo Eléctrico	Variable	LAVA	Lavadoras	Cantidad de lavadoras en la comunidad.	Un.	-
43	Consumo Eléctrico	Variable	LUM	Luminaria	Cantidad de ampolletas de uso comunitario.	Un.	-
44	Consumo Eléctrico	Variable	CLAVA	Consumo Lavadoras	Consumo eléctrico promedio de cada lavadora.	Watt	-
45	Consumo Eléctrico	Variable	CLUM	Consumo Luminaria	Consumo eléctrico de la luminaria comunitaria.	Watt	-
46	Consumo Eléctrico	Variable	CTELE	Consumo Televisor	Consumo eléctrico promedio de cada televisor.	Watt	-

Número	Subsistema	Tipo	Abreviación	Nombre	Descripción	Unidades	Observaciones
47	Consumo Eléctrico	Variable	CAMPO	Consumo Ampolletas	Consumo eléctrico de cada ampolleta.	Watt	-
48	Transformación Eléctrica / Consumo Eléctrico	Variable	COMP	Comunidades Participantes	Cantidad de comunidades beneficiadas.	Un.	-
49	Consumo Eléctrico	Variable	FACAMP	Factor de Amplificación	Factor que considera la pérdida de tensión en el tendido eléctrico.	-	-

**Apéndice II.** Diagrama de Forrester para una planta de biodiesel a pequeña escala.

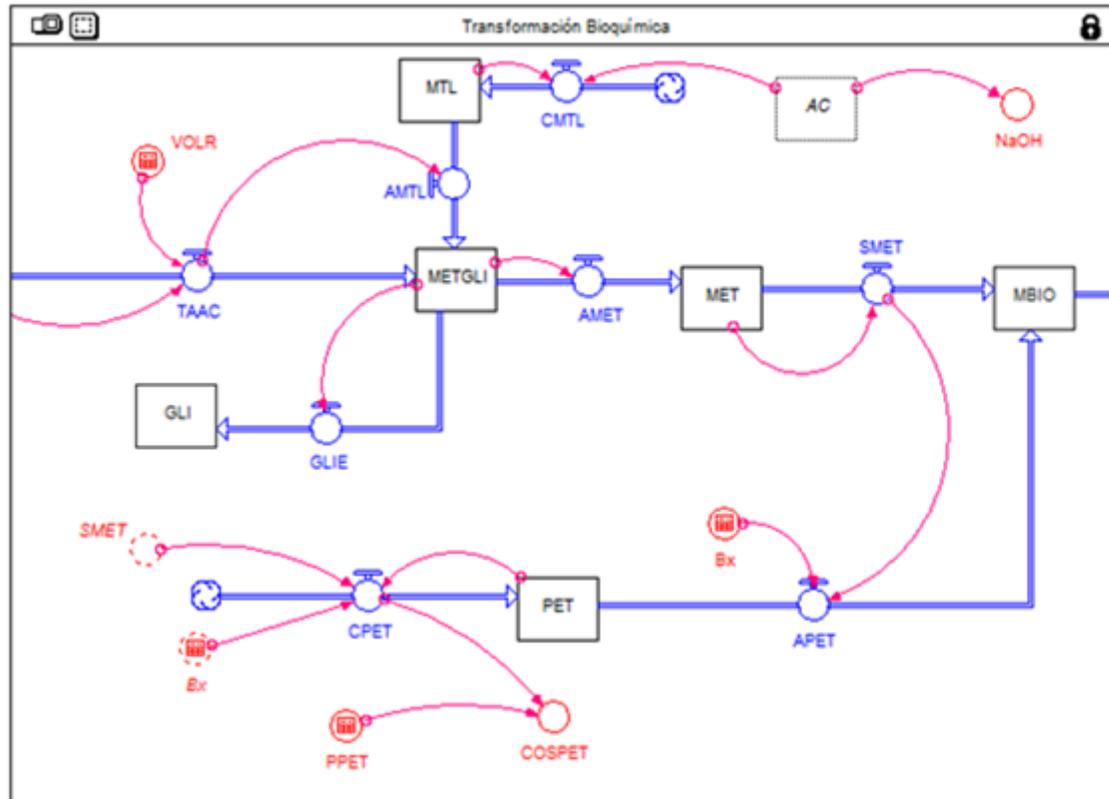


**Apéndice III.** Diagrama de Forrester Subsistema Recolección de Aceite.



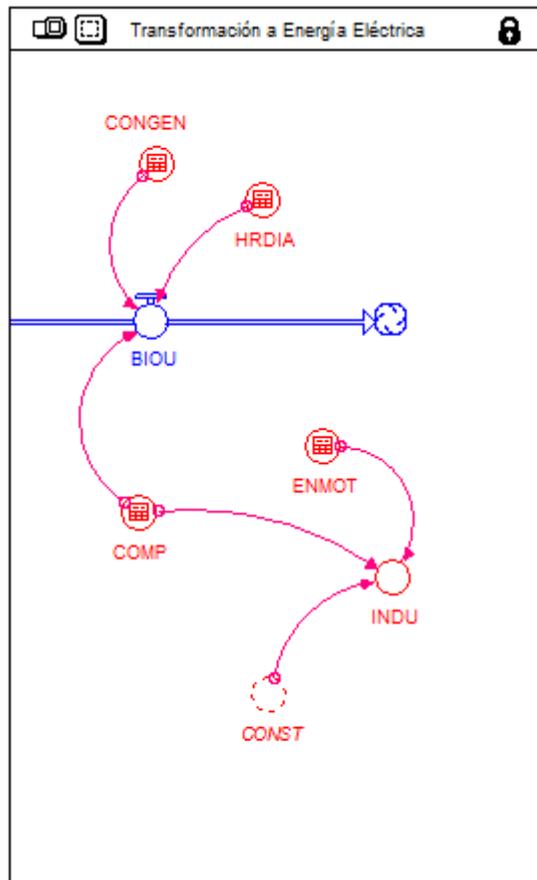
Subsistema Acopio	
AC	Aceite
ACPC	Aceite por Casa Temporada Baja
ACPCV	Aceite por Casa en Temporada Alta
ACPR	Aceite por Restaurantes Temporada Baja
ACPRV	Aceite por Restaurantes en Temporada Alta
CPAR	Casas Participantes
FPACC	Factor de Pérdida de Casas
FPACR	Factor de Pérdida en Restaurantes
RPAR	Restaurantes Participantes
TACC	Tasa Aceite por Casa
TACR	Tasa Aceite por Restaurant

Apéndice IV. Diagrama de Forrester Subsistema Transformación Bioquímica.



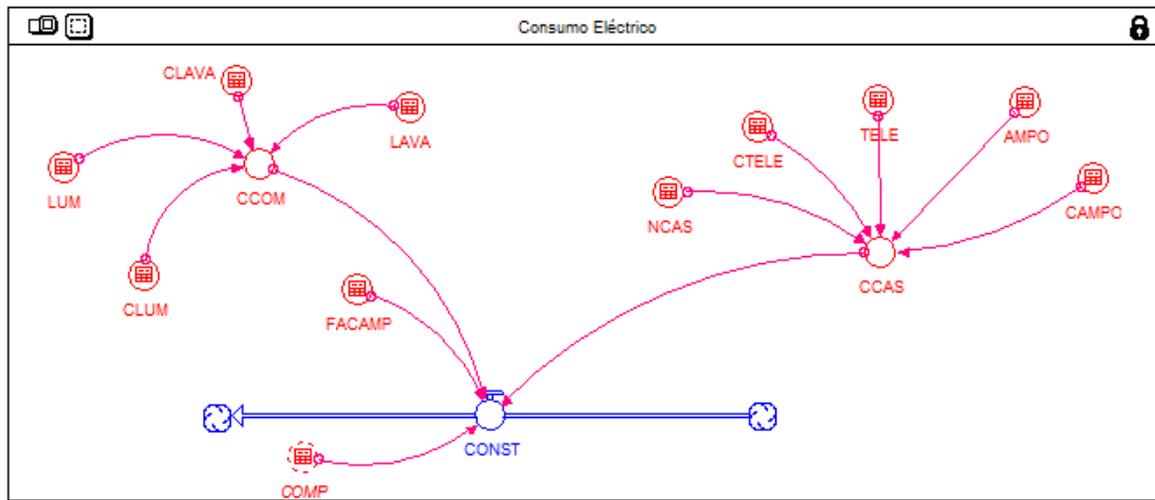
Subsistema Transformación Bioquímica	
AMET	Aporte Metilester
AMTL	Aporte de Metanol
APET	Aporte de Petróleo
Bx	Porcentaje Diesel
CMTL	Compra de Metanol
COSPET	Costo del Petróleo Usado
CPET	Compra de Petróleo
GLI	Glicerina
MBIO	Mezcla Biodiesel
MET	Metilester
METGLI	Mezcla de Metilester con Glicerina
MTL	Metanol
NaOH	Soda Cáustica
PET	Petróleo
PPET	Precio del litro de Petróleo
SMET	Salida Metilester
TAAC	Tasa de Aporte de Aceite
VOLR	Volumen del Reactor

**Apéndice V.** Diagrama de Forrester Subsistema Transformación a Energía Eléctrica.



Subsistema Transformación Energía Eléctrica	
BIOU	Tasa de Biodiesel Usado
COMP	Comunidades Participantes
CONGEN	Consumo del Generador
ENMOT	Energía del Motor
HRDIA	Horas de Uso del Generador al Día
INDU	Indicador de Utilidad

**Apéndice VI.** Diagrama de Forrester Subsistema Consumo Eléctrico.



Subsistema de Consumo Eléctrico	
AMPO	Ampolletas por Casa
CAMPO	Consumo Ampolletas
CCAS	Consumo por Casa
CCOM	Consumo Común
CLAVA	Consumo de Lavadora
CLUM	Consumo de Ampolletas de Luminaria
COMP	Comunidades Participantes
CONS	Consumo Horario de las comunidades
CTELE	Consumo del Televisor
FACAMP	Factor de Amplificación
HRDIA	Horas de uso del Generador
LAVA	Lavadoras por Comunidad
LUM	Ampolletas de uso comunitario
NCAS	Número de Casas
TELE	Televisores por Casa

