

Universidad Técnica de Cotopaxi

**Unidad Académica de Ciencias de la Ingeniería y
Aplicadas**



INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

TEMA:

**METODOLOGÍA PARA LA PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA
A COMUNIDADES RURALES AISLADAS DE LA PROVINCIA
DE GRANMA – CUBA. ESTUDIO DE CASO EN LA
COMUNIDAD LAS PELADAS**

Tesis previa a la obtención del Título de Ingeniero Electromecánico

AUTORES:

Guillermo Ignacio Chalacan Navas

José Arturo Masapanta Dias

DIRECTOR:

M SC. Victor Hugo Armas

Latacunga - Ecuador

Mayo - 2011

Pensamiento

“Educar no es dar carrera para vivir, sino temprar el alma para las dificultades de la vida”.

Pitágoras

Dedicatorias

A Dios todo poderoso, fuente de inspiración en mis momentos de angustias, esmero, dedicación, aciertos y reveses, alegrías y tristezas que caracterizaron el transitar por este camino que hoy veo realizado, sin cuyo empuje no hubiese sido posible.

A mis Padres, especialmente a mi madre que ha sido, es y será la mejor del mundo.

A mi hermano y a mis hermanas, que de una u otra forma me supieron ayudar para que este objetivo se vea desarrollado.

A mi novia, que ha formado parte muy importante en mi vida.

A mis profesores y a la vez amigos, que contribuyeron con lo poco o mucho de sus conocimientos.

José Masapanta Dias.

Dedico este proyecto de tesis a Dios y a mis padres. A Dios porque ha estado conmigo en cada paso que doy, guiando y dándome fortaleza para continuar.

A mis padres, quienes a lo largo de mi vida han velado por el bienestar y formación, mía y de mis hermanos, siendo ellos mi apoyo y ejemplo en todo momento. Depositando su entera confianza en cada reto que se me presentaba sin dudar ni un solo momento en mi inteligencia y capacidad. Es por ellos que soy lo que soy ahora. Los amo con mi vida.

Guillermo Chalacán Navas

Agradecimientos

Son numerosas las personas a las que debo agradecer por ayudarme en el logro de mi carrera, es demasiado poco, el decir gracias, pero en el fondo de mi ser eternamente les estaré agradecido y siempre presto a tenderles una mano cuando así lo requieran. Sin embargo, resaltaré solo algunas de estas personas sin las cuales no hubiese hecho realidad este sueño tan anhelado como es la culminación de mi carrera universitaria.

Ante todo, a Dios todopoderoso por darme la vida para lograr esta meta tan aspirada, después de tantos esfuerzos, caídas entre otras cosas, que he tenido durante mi formación profesional, solo tú sabes el sacrificio que he pasado y en mis días y noches de soledad me guiaste con luz divina por el camino correcto para no desmayar. Por eso mil gracias Dios.

A mis Padres Arturo Masapanta y especialmente a mi madrecita Lucinda Dias, por el constante amor inexplicable para mi superación personal, siempre me inculcaste buenos valores y gracias a ti soy lo que soy.

A mi amor Ruth Cajas, por brindarme su inmenso amor, conocimiento y sobre todo por tenerme mucha comprensión y paciencia durante estos dos años y medio. Gracias por existir en mi vida, es para ti este triunfo. Te amo.

Definitivamente, a la Universidad de Cotopaxi, por ser mi casa máxima de estudio y a la Universidad de Granma, por darme la oportunidad de culminar profesionalmente mi carrera y ser apto para enfrentar la vida de una manera moralmente digna.

José Masapanta Dias

Agradecimientos

En primer lugar a Dios por haberme guiado por el camino de la felicidad y el bien, en segundo lugar a mi familia pilares fundamentales en mi vida, a mi PADRE Guillermo Chalacán Guzmán, mi MADRE Rosa Navas Zúñiga, por siempre haberme dado su fuerza y apoyo incondicional que me han ayudado y llevado hasta donde estoy ahora.

También dedico este proyecto a mi novia, mi compañera inseparable de cada jornada. Ella representó gran esfuerzo y tesón en momentos de decline y cansancio. A ellos este proyecto, que sin ellos, no hubiese podido ser.

A mis profesores a quienes les debo gran parte de mis conocimientos, gracias a su enseñanza y finalmente un eterno agradecimiento a la prestigiosa Universidad Técnica de Cotopaxi la cual abrió y abre sus puertas a jóvenes como nosotros, preparándonos para un futuro competitivo y formándonos como personas de bien.

Guillermo Chalacán Navas

RESUMEN:

El presente trabajo se desarrolló en una comunidad rural no electrificada del municipio de Bartolomé Masó llamada “Las peladas”. Con este estudio se recabó datos sobre las necesidades energéticas más urgentes de dicha comunidad y la disponibilidad de estos recursos a través de métodos como la encuesta, la observación, las mediciones de campo así como datos oficiales de organismos no gubernamentales de la región. Se estimó la disponibilidad de las fuentes de energías renovables más abundantes, las cuales fueron: la biomasa (21,6 tep/año); la energía eólica proveniente de aerogeneradores (0,020 tep/año); energía solar proveniente de Paneles Fotovoltaicos (1,3 tep/año). Así mismo se estimó la posible demanda de ellas de los distintos sectores consumidores: biomasa (20,96 tep/año); energía eólica (0,014 tep/año); energía de PFV (0,73 tep/año). Finalmente, dada a la poca disponibilidad de estos recursos energéticos, se desarrolló una metodología de Investigación de Operaciones (Programación Lineal) de optimización vía a establecer una planificación adecuada de la cantidad ofertada de cada tipo de energía renovable a los diferentes sectores consumidores.

ABSTRACT:

The present work was developed in a rural community not electrified of the municipality of Bartolomé Masó called “Las Peladas”. With this study one successfully obtained data on the needs more urgent energetics of this community and the availability of these resources through methods like the survey, the observation, the measurements of field as well as official data of nongovernmental organisms of the region. The availability of the more abundant renewable energy sources was considered, which were: the biomass (21.6 tep/year); the originating Aeolian energy of aerogenerators (0.020 tep/year); originating solar energy of Photovoltaic Panels (1.3 tep/year). Also the possible demand of them of the different consuming sectors was considered: biomass (20.96 tep/year); Aeolian energy (0.014 tep/year); PFV energy (0.73 tep/year). Finally, given the little availability of these power resources, design a methodology of Investigation of Operations (Linear programming) of optimization via a to establish a planning adapted of the supplied amount of each type of renewable energy to the different consuming sectors.

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| CAPÍTULO 1 | 5 |
| ESTADO ACTUAL DEL TEMA..... | 5 |
| 1.1. Escenario energético. | 5 |
| 1.1.1. Escenario energético mundial. | 6 |
| 1.1.2. Escenario energético en Latinoamérica..... | 8 |
| 1.1.3. Contexto energético cubano. | 11 |
| 1.2. Situación mundial de las energías renovables. | 12 |
| 1.2.1. Energía Solar. | 12 |
| 1.2.2. Energía Eólica. | 14 |
| 1.2.3. Energía Biomásica. | 18 |
| 1.3. Situación Energética en comunidades rurales no electrificadas. | 19 |
| 1.3.1. Desarrollo energético en algunas regiones rurales latinoamericanas. ... | 20 |
| 1.3.2. Desarrollo energético en regiones rurales cubanas. | 22 |
| 1.4. Los modelos matemáticos. | 23 |
| 1.4.1. Modelos de planificación energética. | 24 |
| 1.4.1.1. Modelo de Optimización Clásica. | 24 |
| 1.4.1.2. Programación Lineal. | 27 |
| 1.4.1.3. Método Simplex. | 29 |
| 1.4.1.4. Programación lineal entera. | 30 |
| CAPÍTULO 2 | 32 |
| MATERIALES Y MÉTODOS | 32 |
| 2.1. El problema de la toma de decisiones. | 32 |
| 2.2. Descripción de la comunidad estudiada. | 33 |
| 2.3. Determinación de las variables de decisión. | 33 |
| 2.3.2. Disponibilidad de recursos naturales de la zona. | 35 |
| 2.3.3. Estudio de la demanda y consumo de energía en Zonas No Interconectadas (por sectores de consumo)..... | 35 |
| 2.4. Formulación del modelo de programación lineal | 37 |
| 2.7. Otros métodos utilizados. | 40 |
| CAPÍTULO 3 | 41 |
| ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS. | 41 |
| 3.1. La construcción de un modelo de planificación energética. | 41 |
| 3.1.1. Estudio de la función objetivo..... | 41 |
| 3.1.2. Estudio de las restricciones. | 43 |
| 3.1.2.1. Restricciones de disponibilidad..... | 43 |
| 3.1.2.1. Restricciones de demanda. | 47 |
| 3.1.3. La solución óptima del modelo (resultados). | 49 |
| CONCLUSIONES | 51 |
| REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA | 53 |
| ANEXOS..... | 58 |

INTRODUCCIÓN

La energía posibilita y facilita toda actividad humana. Las diferentes fuentes, sistemas de producción y uso de la energía utilizada por el hombre han marcado las grandes etapas en el desarrollo de la sociedad, dependiendo el curso de éste, de las elecciones energéticas realizadas en cada momento. Con el paso del tiempo el hombre pasó del empleo de su fuerza muscular al uso de diversas fuentes para satisfacer sus necesidades, el empleo del fuego, la utilización de la tracción animal, y finalmente en rápida sucesión, el dominio de las tecnologías del carbón, petróleo, gas natural, la producción y uso del vapor y la electricidad (Blanco,2009).

Suele reconocerse que la electricidad es un importante elemento del desarrollo socioeconómico rural, no como fin en sí misma sino a través de la demanda de los servicios que permite ofrecer, como el bombeo de agua potable, la prolongación del día gracias a la iluminación, y la preparación de alimentos. En general, el aumento de la demanda de energía, tanto en cantidad como en calidad, está directamente relacionado con el desarrollo socioeconómico. Con todo, las poblaciones rurales de muchos países en desarrollo han quedado excluidas de la mayor parte de los beneficios del desarrollo económico y de la transición hacia servicios de energía eléctrica de mejor calidad. (Campen, *et al.*, 2000).

En la mayor parte de los países en vías de desarrollo los problemas de energía que se están tratando es la alta dependencia de las fuentes tradicionales de energía que suministran más del 90% del total de energía usada, causando una rápida deforestación, la pérdida de fertilidad de suelo, etc. Así una gran cantidad de la información que se requiere para describir sus relaciones, y varias herramientas son necesarias al analizar diversas investigaciones y alcanzar una variedad de resultados que sean necesarios para el proceso de planeación. Aparte del gran crecimiento en la población, las maravillas de la tecnología moderna han realizado las aspiraciones de la gente para el aumento calidad de vida.

Poco parece haber cambiado desde que se plantearon por primera vez las cuestiones y los problemas de la energía rural a fines del decenio de 1960; las fuentes tradicionales de energía (leña, residuos de biomasa, tracción humana y animal) siguen siendo los principales y con frecuencia los únicos recursos energéticos disponibles para millones de familias rurales, con limitaciones y efectos bien documentados en el bienestar rural en ámbitos como la salud, la seguridad alimentaria y la producción agrícola. (Campen, *et al.*, 2000).

La energía es una necesidad vital para el desarrollo social y económico de cualquier nación. Con el aumento de las actividades agrícolas e industriales en un país, la demanda de energía es también creciente. La formulación de modelos de energía ayudará en la asignación apropiada de fuentes de energías renovables ampliamente disponibles como la solar, el viento, bioenergía y de la hidroenergía será la demanda de energía futura en muchos países.

Durante la última década varios conceptos nuevos de planificación energética y dirección han surgidos; como la planificación descentralizada, conservación de energía a través de las tecnologías mejoradas, reciclado de desperdicios, la planificación energética integral, la introducción de fuentes de energía renovables y previsión energética. (Jebaraj e Iniyar, 2006).

Uno de los índices en la elevación de la calidad de vida es el consumo per cápita de energía, que se ha estado elevando constantemente desde las últimas décadas. El beneficio neto de esto ha sido que la demanda de energía se ha multiplicado y puede no ser satisfecha por las tecnologías tradicionales e ineficientes de energía usando algunos recursos locales solamente. Antes de la caída del combustible en los años 70, los planificadores y políticos de los países del tercer mundo tenían previsto el energizar zonas rurales en líneas similares a los países desarrollados. Esperaban que los modelos de energía pudieran ser desarrollados para la planificación de la eficiencia, pronosticando y optimizando las fuentes de energía. (Jebaraj e Iniyar, 2006).

Los modelos matemáticos tienen muchas ventajas sobre la descripción verbal del problema. Una ventaja obvia es que el modelo matemático describe un problema

de forma mucho más breve. Esto tiende a hacer que toda la estructura del problema sea mucho más comprensible y ayude a revelar las relaciones importantes entre causa y efecto. De esta manera indica con claridad que datos adicionales son importantes para el análisis. También facilita el manejo del problema en su totalidad y el estudio de todas sus interrelaciones. (Introducción a...2007).

Dada la complejidad de los problemas de energización rural, que no se ha solucionado aún, y para realizar la toma de decisiones en cuanto a la oferta de energía mediante fuentes renovables a una comunidad, se necesitan herramientas que ayuden a tomar decisiones de manera más sencilla.

En la realidad no se han desarrollado de forma eficiente los modelos matemáticos para facilitar la comprensión de los problemas de oferta de energía y la ulterior toma de decisiones. Es por estas razones que tenemos como **problema científico**: en comunidades rurales aisladas no se desarrollan metodologías que faciliten la toma de decisiones para la planificación energética a través de alternativas renovables.

Para dar respuesta al problema científico se plantea la siguiente **hipótesis** del trabajo: si se construye una metodología utilizando la programación lineal, como una herramienta para la planificación energética a una comunidad rural aislada, facilitaría la toma de decisiones.

El **Objetivo General** es:

Construir un modelo matemático de programación lineal como una metodología de planificación energética a una comunidad rural aislada a través de algunas alternativas renovables.

Los **Objetivos Específicos** se plantean de la siguiente manera:

- Determinar las variables de decisión para un problema de energización con fuentes renovables a comunidades rurales aisladas.

- Definir la cantidad de energía óptima que suplan la demanda de la comunidad y maximice la cantidad de energía disponible.

CAPÍTULO 1

ESTADO ACTUAL DEL TEMA

1.1. Escenario energético.

El hombre aprendió a utilizar las fuentes de energía para obtener determinados servicios energéticos que les permite realizar con mayor facilidad o menor esfuerzo tareas engorrosas, peligrosas, repetitivas, que consumen mucho tiempo o esfuerzo físico y que están asociados con el aumento del bienestar o el nivel de vida de los seres humanos.

Aunque existen registros históricos sobre el empleo del carbón mineral en China durante los siglos XI y XII con fines siderúrgicos, hasta fines del siglo XIII los portadores energéticos utilizados mayoritariamente por la humanidad eran fuentes renovables sobre todo la leña, el carbón vegetal, el viento y la energía hidráulica, derivadas todos del flujo solar en mayor o menor medida.

A partir de la primera revolución industrial, proceso generalmente enmarcado de manera convencional entre 1760 y 1830, la tecnología se desarrollo con ritmos inéditos al aparecer invenciones como la máquina de vapor, los telares, el ferrocarril y navíos propulsados a vapor.

Como uno de las vías para impulsar ese proceso, se comenzó a emplear la hulla o carbón mineral, se sustituyo en buena medida a las fuentes renovables y caracterizó la primera transición energética, iniciándose desde ese momento el consumo de la dotación finita del planeta en materia de recursos energéticos (Torres, 2008).

En investigaciones recientes se ha descubierto que los procesos que generan afectaciones en el cambio climático mundial (en la década de los 80 se vislumbraba como algo posible y lejano a causa de la contaminación ambiental), fundamentalmente por la quema de combustibles fósiles, hoy se distinguen mas cercanos y con procesos de aceleración mucho más inquietantes que los previstos en su inicio.

Se ha unido ambas preocupaciones (el incierto futuro energético y el cambio climático), porque las dos tienen un punto común y este proviene del derroche desmedido de los recursos existentes, de la falta de voluntad política para enfrentar los problemas que crean, la carencia de concepción más amplia y abarcadora del fenómeno y su integralidad, dentro de la sinergia de los procesos que se generan y afectan al planeta en su totalidad. (Ayes, 2008).

1.1.1. Escenario energético mundial.

A partir del siglo XX, los combustibles fósiles han sido la base del avance de las sociedades industrializadas. Sin embargo, el petróleo tiene sus días contados al tratarse de un recurso no renovable, por lo que la utilización de nuevas fuentes de energía, múltiples y renovables, será uno de los principales retos del siglo XXI.

En este sentido hay que señalar que, el precio del petróleo ha aumentado más del doble desde finales de los 80 hasta el 2005, y seguirán incrementándose a medida que se vayan agotando los yacimientos y haya que recurrir a otros en peores condiciones de explotación. De seguir esta tendencia, algunos analistas calculan que, hasta el 2010, los países del Golfo Árabe-Pérsico controlan el 95% de la capacidad de exportación a nivel mundial, puesto que los demás países con reservas disponibles tendrán que absorberlas para consumo doméstico.

Una de las características del sistema energético contemporáneo son los continuos vaivenes de los precios, tanto de los combustibles como de la demanda de energía, a causas de guerras y crisis económicas. La crisis energética de 1973 provocó una estabilización e incluso, una ligera disminución de las demandas ante los constantes aumentos del precio del crudo. El encarecimiento de la

producción de energía obligó a un replanteamiento de los distintos países sobre la estrategia económica global, basado en el fomento del ahorro energético y de actividades con menor dependencia de los combustibles fósiles. Según datos compilados por el Worldwatch Institute, 1980, ocurrió un pico en la demanda mundial de energía, la cual disminuyó y se estabilizó en los primeros años de esa década. Con posterioridad, el consumo de energía ha estado aumentando, a pesar de los altos y oscilantes precios del petróleo en el mercado mundial (Flavin, 1994).

Una parte de la energía primaria que hoy se consume se emplea en el llamado “sistema eléctrico” (generación de energía eléctrica) y la otra va para el “sistema de combustibles” (para uso no eléctricos, como transporte, calefacción, etcétera). La fracción de energía primaria destinada a la generación de electricidad, correspondía a escala global a un 36 %, aunque en Japón y en otros países económicamente desarrollados esta cifra es superior al 40 %. Según los pronósticos de algunos expertos, para la década del 2010 al 2020, la proporción de la energía primaria usada para generar electricidad crecerá hasta alrededor de 44 % como promedio a escala mundial y ya a mediados del siglo 21 la cifra llegará a un 50 % (Romero, 2010).

En los países industrializados, cada habitante consume como promedio 10 veces más energía que uno que vive en llamado tercer mundo. En el caso de los países como Canadá y los EUA el consumo llega a alcanzar cifras tales, que puede ser 30 y hasta 40 veces mayor que en algunos países de África subsahariana y de Asia, e incluso hasta 2 veces mayor que los países europeos (Borroto et al. 2002).

Esta situación ha venido cambiando rápidamente en los últimos años. El incremento de la demanda, el aumento de los precios de la energía, las restricciones financieras para ampliar la oferta energética, la necesidad de lograr mayor competitividad internacional, así como la imperiosa necesidad de protección del medio ambiente, son factores que impulsan actualmente el aumento de la eficiencia energética en el mundo, existiendo un gran potencial para ello (Borroto, 2002).

Consumo anual de energía en el mundo.

Se llegó a un consumo de energía a escala mundial que superó ligeramente los 10 TW/año en 1980. Como refiere el *Annual Energy Review 1997*, de la Comisión Europea, entre 1980 y 1990 hubo un aumento del 20 %. Entre 1990 y 1995 el aumento fue solamente de 4,5 % (incremento medio anual de 0,9 %). Esta reducción se debió al cambio de estructuras económicas en los países que componían la antigua Unión Soviética. Sin embargo, a partir de 1995 la tendencia es a continuar en aumento. En 1996 creció 3 % aproximadamente.

El consumo de energía a escala mundial en el 2005 llegó alrededor de 14 TW/año. Con respecto a la población como se puede ver en la figura 1.1, ocurre la situación inversa: el Sur del mundo posee una población tres veces mayor que el norte (en 1988 la diferencia era aún mayor; de cinco millones de habitantes en la tierra, cuatro mil millones son del Sur), de modo que la diferencia de consumo per cápita entre el norte y el Sur es muy elevada (figura 1.2). (Turrini, 2006).

1.1.2. Escenario energético en Latinoamérica.

En América latina y el Caribe, salvo algunas excepciones no se han observados mejoras en este campo, donde el crecimiento del PIB ha ido en paralelo con el consumo de energía incluso manifestándose determinada tendencia a la elevación de este indicador en algunos sectores (SEPAL, 2004).

La baja eficiencia energética en la región obedece a un conjunto de factores, dentro de los que se encuentran:

- ✓ La etapa en que se encuentra en el proceso de industrialización.
- ✓ La política aplicada por los gobiernos.
- ✓ El déficit de los mercados energéticos.
- ✓ Los bajos precios de la energía que han prevalecido.

- ✓ La falta de financiamiento para los proyectos de eficiencia energética.
- ✓ La insuficiente capacidad técnica de la ingeniería local en este campo.
- ✓ El bajo nivel de la gestión energética empresarial.
- ✓ La insuficiente información y motivación social para el ahorro de energía.

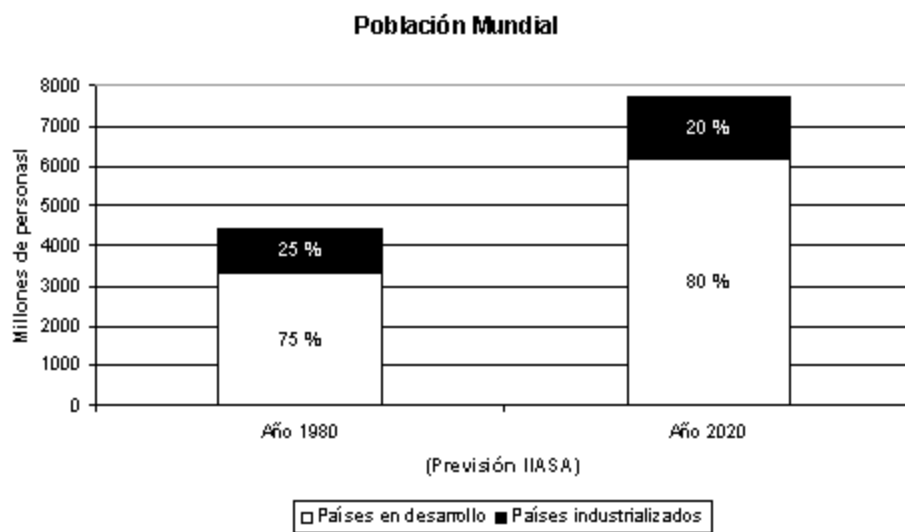


Figura 1.1. Aumento estimado de la población de 1980 a 2020.

Fuente: Annual Review of Energy, vol. 10.USA, 1985

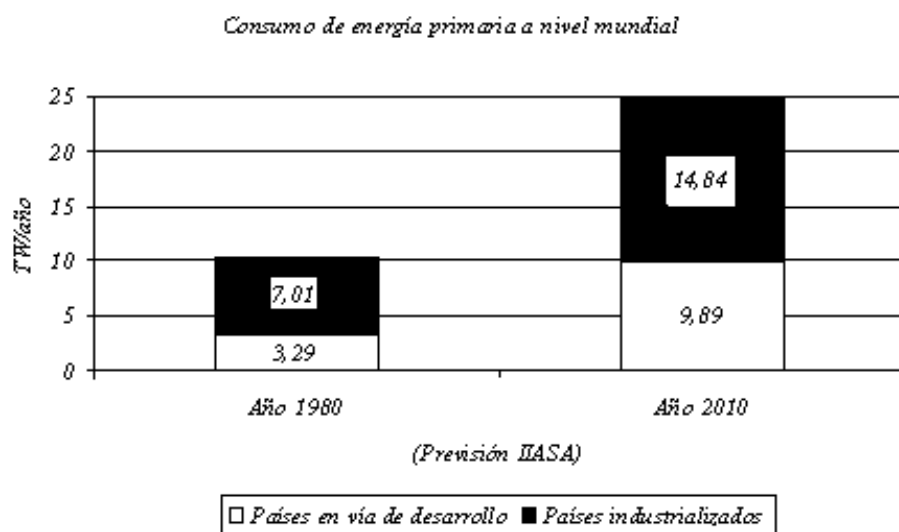


Figura 1.2. Aumento estimado del consumo de energía de 1980 a 2020.
Fuente: Annual Review of Energy, vol. 10.USA, 1985.

El predominio de una política económica de carácter desarrollista impulsó al sector energético tareas muy difíciles de resolver, entre ellas de extender la oferta y cobertura energética y aceptar un deterioro de sus precios como parte de las políticas sociales y antiinflacionario, sin recibir los fondos necesarios para cubrir sus costos de operación (Romero, 2010).

En 1994 las reservas de petróleo en América Latina representan el 14% de las reservas mundiales y sólo eran superadas por las existentes en Medio oriente (64,5% del total mundial). La relación reservas-producción (indicador de la capacidad de oferta de petróleo) es de 50 años, ubicándose en una posición intermedia respecto al mundo (Stolovich et al., 1997).

El potencial de ahorro de energía en los países subdesarrollados es actualmente mucho mayor que en los desarrollados por varias razones, dentro de las cuales se pueden señalar:

- Las actividades energo-intensivas están creciendo a mayor ritmo en los países en desarrollo, de modo que existen mayores oportunidades de lograr ahorros de energía en nuevas instalaciones, que es donde el potencial de ahorro es mayor.
- Los precios de la energía han sido tradicionalmente más bajos, subsidiados, por lo que el mercado no ha estimulado el ahorro de energía.
- Ha faltado el acceso a tecnologías comerciales para el incremento de la eficiencia de energética.
- Han sido muy limitadas las fuentes de financiamiento para proyectos de eficiencia energética.

1.1.3. Contexto energético cubano.

En el período 80-89 en Cuba existía un adecuado balance oferta-demanda de portadores energéticos, creciendo el consumo de energía debido al desarrollo del país a una tasa promedio anual del 4 %. En el período 90-93, con el derrumbe del campo socialista, el incremento del bloqueo y la crisis económica que comenzó a sufrir el país, la disponibilidad de generación eléctrica decreció desde el 78 % hasta el 53 % y la de combustibles, en prácticamente 2 años, se redujo a menos del 50 %. El consumo promedio de energía eléctrica en este período en el país decreció en más de un 6 % anual. (Colectivo de autores, 2002).

El 4 de diciembre de 1984, en la clausura del Primer Forum Nacional de Energía, el máximo líder de la Revolución cubana, Fidel Castro, insistió en la necesidad de de una cultura energética popular: “Todo nuestro pueblo, todos los trabajadores, todos nuestros jóvenes, nuestros estudiantes. Incluso, nuestros pioneros tienen que tomar conciencia de la energía, de sus perspectivas futuras, y preguntarse como vamos a producir electricidad, vapor y transportaciones en el futuro. Esa pregunta tiene que hacérselas hasta los niños, en nuestro país más que en cualquier otro país”. (Blanco, 2009).

El Programa Docente Educativo de Ahorro de Energía del Ministerio de Educación (PAEME) tiene alcance nacional y se inició en 1997. Surgió como componente del Programa de Ahorro de Electricidad en Cuba (PAEC), y ha llevado la cultura energética a todas las escuelas del país. Coordinado por el Ministerio de Educación y la dirección de Uso Racional de la energía de la Unión Eléctrica, el PAEME ha sido un programa exitoso que ha contribuido a formar una cultura energética en los niños, adolescentes y jóvenes de todo el país.

La revolución energética ha contribuido a socializar los temas energéticos en el país, lo que constituye un aporte importante a la educación de todo el pueblo en temas de energía. La estrategia de comunicación de la revolución energética está orientada a fomentar y desarrollar una cultura energética sostenible.

La educación energética y la educación ambiental son componentes inseparables de la educación para un desarrollo sostenible. La educación energética es un proceso que supone interiorizar conceptos y procedimientos, valores y actitudes. Se requiere una disposición favorable de la persona y la comprensión de su necesidad, pues es imposible imponerlas mediante directivas. Es un proceso continuo, y en constante transformación de acciones dirigidas al desarrollo del conocimiento, procedimientos, habilidades, comportamiento, actitudes y valores en relación con el uso sostenible de la energía. (Blanco, 2009).

1.2. Situación mundial de las energías renovables.

1.2.1. Energía Solar.

La energía solar directa y la indirecta presentan las características de tener una distribución amplia, de modo que resulta particularmente óptima para satisfacer las necesidades energéticas de la humanidad.

La energía que el sol irradia anualmente hacia la tierra corresponde a $1,5 \cdot 10^9$ TWh= $1,7 \cdot 10^5$ TW/año. De ella, un 33 % se refleja desde la atmósfera hacia el espacio, 44 % es mayormente energía térmica, que es reflejada por la tierra bajo la forma de rayos infrarrojos; 21 % se usa en la vaporización de agua (formación de nubes), 2 % se transforma en energía almacenada en el viento (eólica), y en las olas en las mareas, solo el 1 % se almacena químicamente (fósiles) y biológicamente (biomasa).

Al considerar la energía solar técnicamente utilizable y teniendo en cuenta las pérdidas en su transformación, se podrían obtener, cada año, los siguientes índices disponible de consumidor en TW/año: 19 de la solar directa, 1 de viento, 2 de biomasa, 1,5 de agua, 1,5 de geotérmica, mareas, olas, etc. Con un total de 25. Este valor es tres veces superior al consumo mundial por año de energía al nivel de consumidor (aproximadamente 7,5 TW/año, siendo 11 TW/año el consumo anual de las fuentes primarias). (Turrini, 2006).

Recogiendo de forma adecuada la radiación solar, esta puede transformarse en otras formas de energía como energía térmica o energía eléctrica utilizando paneles solares. Mediante colectores solares, la energía solar puede transformarse en energía térmica, y utilizando paneles fotovoltaicos la energía luminosa puede transformarse en energía eléctrica. Los paneles fotovoltaicos convierten directamente la energía luminosa en energía eléctrica (Figura 1.2).

Los rayos de luz solar nos transmiten una pequeñísima parte de la energía que continuamente se está produciendo en el Sol, por las reacciones nucleares que tienen lugar en su interior. La energía solar se convierte en electricidad en los paneles o placas solares, que están formados por finas láminas de materiales especiales.



Figura 1.3. Paneles solares fotovoltaicos.

Las diferentes tecnologías fotovoltaicas se adaptan para sacar el máximo rendimiento posible de la energía que recibimos del sol. De esta forma por ejemplo los sistemas de concentración solar fotovoltaica (CPV por sus siglas en inglés) utiliza la radiación directa con receptores activos para maximizar la producción de energía y conseguir así un coste menor por kWh producido. Esta tecnología resulta muy eficiente para lugares de alta radiación solar, pero actualmente no puede competir en precio en localizaciones de baja radiación solar como Centro Europa, donde tecnologías como la Capa Fina están consiguiendo

reducir también el precio de la tecnología fotovoltaica tradicional. (Enciclopedia Encarta, 2010).

La energía solar también se utiliza en los hornos solares, que tienen unos espejos llamados helióstatos, que se pueden orientar de forma que dirigen la luz del Sol que reflejan hacia una torre central en la que está el sistema de calentamiento. Como el número de espejos es muy grande, se alcanzan temperaturas muy altas, que resultan muy útiles, por ejemplo, en investigación.

Las placas solares, también llamadas colectores (figura 1.4.), utilizan la energía del Sol para calentar agua, que servirá para la calefacción y el suministro de agua caliente de la casa.

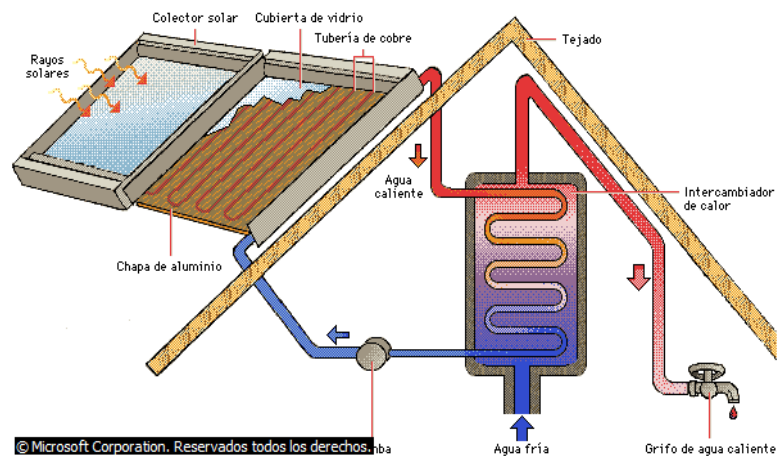


Figura 1.4. Diagrama de un calentador solar de agua.

1.2.2. Energía Eólica.

La energía del viento está relacionada con el movimiento de las masas de aire que desplazan de áreas de alta presión atmosférica hacia áreas adyacentes de baja presión, con velocidades proporcionales (gradiente de presión). Por lo que puede decirse que la energía eólica es una forma no-directa de energía solar, las diferentes temperaturas y presiones en la atmósfera, provocadas por la absorción de la radiación solar, son las que ponen al viento en movimiento

Un parque eólico es la instalación integrada de un conjunto de aerogeneradores interconectados eléctricamente (figura 1.5.). Los aerogeneradores son los elementos claves de la instalación de los parques eólicos que, básicamente, son la evolución de los tradicionales molinos de viento. Como tales son máquinas rotativas que están formadas por tres aspas, de unos 20-25 metros, unidas a un eje común. El elemento de captación o rotor que está unido a este eje, capta la energía del viento. Mediante el movimiento de las aspas o paletas, accionadas por el viento, activa un generador eléctrico que convierte la energía mecánica de la rotación en energía eléctrica. Mediante el movimiento de las aspas o paletas, accionadas por el viento, activa un generador eléctrico que convierte la energía mecánica de la rotación en energía eléctrica.

Los aerogeneradores dañan menos el medio ambiente que otras fuentes, aunque requieren una velocidad media del viento de al menos 21 km/h.

Un desarrollo importante de la energía eléctrica de origen eólico puede ser, por tanto, una de las medidas más eficaces para evitar el efecto invernadero ya que, a nivel mundial, se considera que el sector eléctrico es responsable del 29% de las emisiones de CO₂ del planeta. Como energía renovable que es, contribuye a minimizar el calentamiento global. Si nos centramos en las ventajas sociales y económicas que nos incumben de una manera mucho más directa son mayores que los beneficios que nos aportan las energías convencionales.



Figura 1.5. Parque Eólico.

Los aerogeneradores son fundamentalmente de eje horizontal orientable y alcanzan una potencia de hasta 3-4 MW en tierra firme y 5 MW en aplicaciones *offshore* (en el mar). Dos de este último tipo, con rotor de 120 m de diámetro, están funcionando en Alemania. Están divididos en generadores de velocidad variable y constante. Existen también generadores con regulación de potencia llamada *pitch regulation*, obtenida mediante la rotación de las palas alrededor de su eje radial, de modo que cambie el ángulo de arranque con regulación de potencia (*stall regulation*).

Existen también, como menciona Turrini (2006), que existen otras aplicaciones para la baja potencia donde la energía del viento se convierte en mecánica para el bombeo de agua y el riego. Asimismo existen generadores aún más pequeños de solo 10 kW.

La energía eólica está desarrollándose mucho. A finales de 1993 la potencia eléctrica instalada en los generadores europeos había superado los 1 100 MW, similar a la potencia de una megacentral térmica o nuclear. A finales de 1997 la potencia instalada resultó ser superior a 4 400 MW. Según Turín (2006) citando a la revista *Renewable Energy World* (julio-agosto, 2004), a finales de 2003 Alemania llegó a una potencia eólica instalada de 14 612 MW; España de 6 420 MW, y Dinamarca de 3 076. Al final de 2004 la subida de potencia eólica fue particularmente grande: en el mundo se llegó a 47 000 MW; a nivel europeo, a más de 34 000 MW, y en Alemania, a 16 630 MW.

Mapa eólico de Cuba.

En Cuba para impulsar el uso de la energía eólica, resulta prioritaria la evaluación del recurso eólico en el país, con la finalidad de conocer el potencial en este recurso, así como los posibles sitios en los cuales es factible el emplazamiento de parques eólicos a mediana y gran escala que puedan contribuir al Sistema Electroenergético Nacional (SEN).

Un grupo interdisciplinario de especialistas de varias entidades cubanas trabaja desde el 2005 para disponer de un mapa con las principales zonas donde se

localiza el recurso eólico y obtener una evaluación preliminar del potencial eolo-energético en Cuba. En esta ocasión las principales entidades que participaron en la confección del mapa eólico fueron el Instituto de Meteorología (INSMET), el Centro de Gerencia de Programas y Proyectos Priorizados (GEPROP), el Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables (CETER, ISPJAE), el Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SNAP), los Joven Club de Computación y el Centro de Investigaciones de Energía Solar (CIES).

El Mapa del Potencial Eólico de Cuba permite identificar 26 zonas geográficas que revelan potenciales eólicos acordes con las clases 4 (Moderado), 5 (Bueno), 6 (Excelente) y 7 (Excepcional), con potencias que van desde 500 y 600 W/m², con velocidades entre 6,2 y 6,8 m/s, y más de 1 000 W/m² (>8,2 m/s) (Excep.).

A partir de la determinación de la extensión en kilómetros cuadrados de las áreas consideradas entre moderadas y excelentes, se determinó el potencial eólico de Cuba, que fluctúa entre 5 000 y 14 000 MW (Tabla 2). (Cubasolar, 2010).

Tabla 1.2. Potencial eólico instalable en Cuba.

| Provincias | Área ₁ , km ² | Área ₂ , km ² | Potencial eólico, MW | Potencial equivalente con FC = 25%, MW |
|---------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|----------------------|--|
| Pinar del Río | 34 | 7 | 35-98 | 8-24 |
| La Habana | 65 | 13 | 65-182 | 16-45 |
| Ciudad de La Habana | 13 | 3 | 15-42 | 3-9 |
| Matanzas | 21 | 4,2 | 3-8 | 5-15 |
| Villa Clara | 0,1 | 0,02 | 0,1-0,28 | 0,02-0,07 |
| Cienfuegos | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Sancti Spíritus | 0,2 | 0,04 | 0,2-0,6 | 0,05-0,14 |
| Ciego de Ávila | 110 | 22 | 110-308 | 27-77 |
| Camagüey | 313 | 63 | 315-882 | 78-219 |
| Las Tunas | 25 | 5 | 25-70 | 6-17 |
| Holguín | 766 | 153 | 176-2 142 | 191-536 |
| Granma | 1 184 | 237 | 1 185-3 318 | 296-828 |
| Santiago de Cuba | 734 | 147 | 735-2 058 | 183-514 |
| Guantánamo | 1 555 | 311 | 1 555-4 354 | 389-1 089 |
| Isla de la Juventud | 210 | 42 | 210-588 | 52-147 |
| Total nacional | 5 030 | 1 006 | 5 030-14 084 | 1 257-3 521 |

Fuente: Cubasolar.

1.2.3. Energía Biomásica.

La formación de biomasa a partir de la energía solar se lleva a cabo por el proceso denominado fotosíntesis vegetal que a su vez es desencadenante de la cadena biológica. Mediante la fotosíntesis las plantas que contienen clorofila, transforman el dióxido de carbono y el agua de productos minerales sin valor energético, en materiales orgánicos con alto contenido energético ya su vez sirven de alimento a otros seres vivos.

La biomasa mediante estos procesos almacena a corto plazo la energía solar en forma de carbono. La energía almacenada en el proceso fotosintético puede ser posteriormente transformada en energía térmica, eléctrica o carburantes de origen vegetal, liberando de nuevo el dióxido de carbono almacenado. (Enciclopedia Encarta, 2009).

Usos de la leña y el carbón vegetal.

Unos de los recursos biomásicos más utilizados para la producción de energía son la leña y el carbón vegetal. Por lo que ambos tienen un peso significativo en los países en vías de desarrollo.

Un presupuesto energético típico, en un país en vía de desarrollo, depende mucho de la leña y del carbón vegetal, para la cocina y la calefacción doméstica. Los tres principales aspectos a tomarse en cuenta, cuando se formula una política energética para la leña son:

- Las dimensiones actuales y características del recurso maderero y de su futuro desarrollo.
- El esquema actual del consumo de leña y de carbón vegetal, y su posible desarrollo futuro.
- Cómo se produce y distribuye la oferta actual, y qué posibilidades hay de racionalización y mejora.

El consumo per cápita mundial de leña, incluyendo el carbón vegetal, fue estimado en 1978 en 0,37 m³. Sin embargo, el empleo per cápita en el mundo desarrollado era de sólo 0,13 m³, comparado con los 0,46 m³ del mundo en desarrollo. Los países desarrollados tienen un alto consumo global de energía por persona, en el cual la madera es una componente menor; los países en desarrollo tienen un bajo insumo de energía per cápita, representado principalmente por la leña y el carbón vegetal. (La Biomasa, 2007).

Consumo mundial de leña y carbón vegetal.

El consumo básico per cápita puede estimarse en 1.200 kg anuales de leña con 30% de contenido de humedad. Este valor se aplica a los hornos y fogones de cocina, tradicionalmente de baja eficiencia. Las cocinas económicas muy eficientes pueden bajar este valor a 450 kg. El consumo de carbón vegetal varía aproximadamente entre 60 y 120 kg per cápita por año, y a los fines de una planificación preliminar, puede usarse el valor de 100 kg, convertible desde alrededor de 700 kg de madera seca, necesarios para producirla, teniendo en cuenta las pérdidas de transporte. El contenido calórico de 100 kg de carbón vegetal, desmenuzado, equivale aproximadamente a alrededor de 300 kg de madera seca al aire (FAO, 2007).

1.3. Situación Energética en comunidades rurales no electrificadas.

Existen hoy en día todavía amplios sectores de la población rural que no disponen de electricidad. Esta exclusión, por cierto no solamente limitada a la energía, lleva a severas inestabilidades y conflictos sociales, porque la energía es un elemento clave en el bienestar de toda persona. Por lo tanto, la energización y electrificación de regiones rurales debe ser hoy un eje central de cualquier política democrática que busca efectivamente promover igualdad de oportunidades para todos.

1.3.1. Desarrollo energético en algunas regiones rurales latinoamericanas.

En los países andinos, especialmente en Bolivia y Perú, hay millones de personas que todavía no disponen de electricidad en su casa. No hay datos confiables sobre la electrificación de estos países, pero contrastando diversas informaciones se puede estimar que todavía 35% de Bolivianos, 25% de Peruanos, 10 % de Ecuatorianos y 5 % de Colombianos, que viven mayormente en regiones rurales apartadas de las redes eléctricas, no disponen de electricidad (ver tabla 1.1.).

En todos estos países hay programas de electrificación rural, básicamente vía extensión de redes eléctricas existentes. Sin embargo ello tiene severas limitaciones económicas. La conexión de un nuevo usuario a la red eléctrica es cada vez más costosa en la medida que se busca electrificar regiones más apartadas. Costos típicos son hoy en día US\$ 1000 – 1500 para conectar un nuevo usuario rural a la red eléctrica. Por otro lado, estos usuarios rurales tienen luego un consumo muy reducido de electricidad.

Tabla 1.1. Estimación de la población sin electricidad de red y con sistemas fotovoltaicos en algunos países latinoamericanos.

| | Población (10 ⁶) | Consumo eléctrico kWh/hab año | Población con electricidad (%) | Población sin electricidad (10 ⁶) | SFV # (*) | SFV MW _p (*) |
|----------|---------------------------------|--|---|--|------------------|-------------------------------|
| Bolivia | 9 | 412 | 65 | 3,2 | 17 000 | 1 |
| Colombia | 42 | 819 | 95 | 2,3 | 78 000 | 6 |
| Ecuador | 13 | 627 | 90 | 1,3 | No disponible | No disponibl e |
| Perú | 28 | 744 | 75 | 7,0 | 10 000 | 1,5 |

Fuente: OLADE.

SFV: Sistemas Fotovoltaicos; estimación del número de sistemas (#) y de la potencia total (MW) instalados.

Ilustrativo es en este contexto un estudio realizado recientemente por ELFEC, la empresa eléctrica de Cochabamba, Bolivia: esta empresa electrificó vía extensión de su red eléctrica entre 1997 y 2002 unas 10 000 viviendas rurales en comunidades cerca de su red existente, a un costo de US\$ 1000 – 1200 por usuario. El consumo de electricidad de estas familias campesinas fue, en promedio, inicialmente alrededor de 20 kWh/mes y actualmente es, después de varios años, alrededor de 30 kWh/mes. El estudio concluye que “este consumo no cubre los costos de suministro de electricidad, aún considerando el total de la inversión hundida”.

Energía solar para el desarrollo de regiones rurales.

Frente a esta situación se presenta como una alternativa la generación local de energía, en particular de electricidad. La respuesta tradicional fueron grupos electrógenos. Al margen de los altos costos de la electricidad así generada (con los costos actuales del petróleo: 0.50 – 2.00 US\$/kWh), la realidad ha demostrado que esto no es sostenible, debido a la dificultad de poder dar mantenimiento a los equipos. Como alternativa, quedan entonces las energías renovables.

Si existen condiciones locales favorables, lo más económico es una pequeña central hidroeléctrica o, eventualmente, un generador eólico o un generador que use biomasa como fuente energética. Sin embargo, en la mayoría de los lugares no se dan estas condiciones, quedando solamente la energía solar que siempre es disponible. La energía solar es el recurso energético con mayor disponibilidad en casi toda la región andina, variando relativamente poco de un lugar a otro, con una intensidad de 4–6 kWh/m² día (promedios mensuales) y bastante uniforme durante todo el año. Esta energía puede ser convertida muy fácilmente, con tecnología local, inclusive artesanal, en calor útil para invernaderos, secado de productos agrícolas u otros usos, pero requiere equipos de alta tecnología para ser transformada en electricidad. (Soluciones solares, 2008).

Desde hace 20 años se comenzó en la región andina, como en otras partes del mundo, a usar paneles fotovoltaicos en forma creciente para producir electricidad en lugares alejados de la red eléctrica. Mayormente se han instalado en casas pequeños Sistemas Fotovoltaicos (SFV), llamados “Sistemas Fotovoltaicos Domiciliarios” (SFD), con una potencia típica de 50 Wp, lo que permite producir electricidad de unos 5–7 kWh/mes.

Los SFD tienen hoy un costo de US\$ 500 – 1000 (incluyendo instalación, batería, impuestos, etc.) No existen datos confiables sobre la cantidad de SFV instalados y operativos en los países andinos, pero contrastando diferentes fuentes de información se puede estimarla, llegando a situaciones muy diferentes en cada país (ver Tabla 1.1)(Soluciones solares, 2008).

1.3.2. Desarrollo energético en regiones rurales cubanas.

Naturalmente, un país con las limitaciones que tiene Cuba en cuanto a combustibles fósiles, ha de considerar seriamente la explotación de las fuentes de energía renovables de que dispone. En primer lugar, el bagazo de la caña, que se utiliza como combustible para generar el vapor requerido por la industria azucarera, en parte para la producción de energía eléctrica, la cual podría incrementarse considerablemente si se contase con los recursos necesarios para optimizar la producción y el uso del vapor en los centrales.

Existe, por supuesto, la posibilidad de aprovechar al máximo las corrientes fluviales, generalmente bastante pobres, con que cuenta el país. Al efecto, se han venido instalando, especialmente en las áreas rurales y montañosas en donde carecen de electrificación, plantas micro y minihidroeléctricas, cuyo número llegó a 205 en 1992, con una potencia total instalada de 8,6 MW. Estas plantas han sido utilizadas fundamentalmente en la electrificación rural, allí donde resulta demasiado costoso llevar las líneas del Sistema Electroenergético Nacional. Por otra parte, se han dado los primeros pasos con vistas al posible empleo de la energía eólica para el mismo fin. (Unión Eléctrica, 1992, p. 33).

Se han venido dando pasos para resolver la situación de la población rural no electrificada, mediante la instalación de plantas microhidroeléctricas y paneles fotovoltaicos solares (a menudo aportados a título de contribución solidaria, por personas y organizaciones no gubernamentales alemanas, italianas, españolas, noruegas, etc.). En los últimos dos o tres años, se electrificaron totalmente mediante el uso de celdas solares, tres comunidades de montaña de alrededor de 100 viviendas cada una en la zona oriental de la Isla.

Como quiera que una buena parte de la población rural residía en casas dispersas, las cuales no era practicable electrificar (unas 110 000), desde la década de los ochenta se ha seguido la política de llevar la electricidad únicamente a los asentamientos poblacionales, no sólo por razones estrictamente económicas, sino con el fin de promover, incluso en las zonas más alejadas, una vida en comunidad que facilite el acceso de todos a los beneficios sociales de que disfruta el resto de la población, particularmente la educación y el servicio médico gratuitos.

Para unas 140 pequeñas comunidades, situadas en lugares particularmente difíciles, la solución fue la instalación, en los últimos años, de paneles de fotoceldas solares con capacidad suficiente no sólo para iluminar eléctricamente el consultorio y la residencia del facultativo, sino para conectar un refrigerador donde conservar los medicamentos, un negatoscopio, un aparato de radiocomunicación y dos televisores de uso social. La utilización de fuentes de energía renovables y no convencionales ha permitido electrificar total o parcialmente no pocos asentamientos poblacionales en áreas rurales y montañosas muy apartadas, lo que les ha facilitado el acceso efectivo a los principales beneficios sociales de que disfruta el resto del país (Madruga, 1997).

1.4. Los modelos matemáticos.

En los últimos años, en virtud de la necesidad de la optimización de los pocos recursos energéticos de naturaleza fósil de los que el mundo dispone, y por otro lado los recursos renovables que pueden ser también deficitarios para la

producción de energía si no se consumen con mesura; así mismo por lo caro que resulta aún la producción de energía con estas tecnologías, se crean herramientas que ayuden a tomar decisiones de cuanto y que tipo de recursos energéticos necesitan los pueblos. Una de estas herramientas son los modelos matemáticos como metodologías de planificación energética que ayudan a la toma de decisiones.

Un modelo matemático se define como una descripción desde el punto de vista de las matemáticas de un hecho o fenómeno del mundo real, desde el tamaño de la población, hasta fenómenos físicos como la velocidad, aceleración o densidad.

El objetivo del modelo matemático es entender ampliamente el fenómeno y tal vez predecir su comportamiento en el futuro.

El proceso para elaborar un modelo matemático es el siguiente:

1. Encontrar un problema del mundo real.
2. Formular un modelo matemático acerca del problema, identificando variables (dependientes e independientes) y estableciendo hipótesis lo suficientemente simples para tratarse de manera matemática.
3. Aplicar los conocimientos matemáticos que se posee para llegar a conclusiones matemáticas.
4. Comparar los datos obtenidos como predicciones con datos reales. Si los datos son diferentes, se reinicia el proceso.

Es importante mencionar que un modelo matemático no es completamente exacto con problemas de la vida real, de hecho, se trata de una idealización. (Stewart, 2002).

1.4.1. Modelos de planificación energética.

1.4.1.1. Modelo de Optimización Clásica.

La teoría de optimización clásica utiliza el cálculo diferencial en la determinación de los puntos de máximos y mínimos (extremos), para funciones con y sin

restricciones (Taha, 1998). La teoría que lo fundamenta proporciona las bases para diseñar la mayor parte de los algoritmos de programación lineal.

Optimización libre.

Es la primera aproximación en la optimización de funciones. Se dice que una función f posee un óptimo (en este caso máximo) para el punto $P(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$ si se verifica que:

$$f(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) \geq f(x_1, x_2, \dots, x_n) \tag{1}$$

Se demuestra que es condición necesaria para que se verifique (1), que:

$$\frac{\partial f}{\partial x_i} = 0, \quad i=1,2,\dots, n. \tag{2}$$

En general, esta condición puede enunciarse como $\nabla f(x^0) = \mathbf{\Phi}$, donde $\nabla f(x^0)$ es el gradiente de $f(x^0)$ y $\mathbf{\Phi}$ el correspondiente vector nulo. Esto es lo mismo que afirmar que el valor de X_i en el óptimo ha de ser tal, que si llamamos "función objetivo" a $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, una variación marginal de dicho valor tiene un efecto nulo sobre la función objetivo.

Optimización restringida.

Como indica (López, 1983), en los problemas de decisión las variables que definen la función objetivo suelen estar sometidas a vínculos o restricciones. Si se quiere obtener como resultado el óptimo de la función, debe recurrirse a la técnica de los máximos (en su caso, mínimos) condicionados. El procedimiento general en este supuesto es el desarrollado por Jacobi pero, frecuentemente, puede emplearse el método de los llamados "multiplicadores de Lagrange". En resumen, si las variables X_1, X_2, \dots, X_n se encuentran ligadas por vínculos:

$$\left. \begin{aligned} g_1(X_1, X_2, \dots, X_n) &= b_1 \\ g_2(X_1, X_2, \dots, X_n) &= b_2 \end{aligned} \right\} \quad (m \leq n-1) \tag{4}$$

$$g_m(X_1, X_2, \dots, X_n) = b_m$$

supuesto el carácter constante de los b_j ($j = 1, 2, \dots, m$), la determinación del óptimo para $f(X_1, X_2, \dots, X_n)$ se lleva a cabo construyendo la llamada "función de Lagrange" o "Lagrangiana":

$$L = f(x_1, x_2, \dots, x_n) + \sum \mu_k [b_k - g_k(x_1, x_2, \dots, x_n)]$$

o, denominando x al vector de variables independientes,

$$L = f(x) + \sum \mu_k [b_k - g_k(x)]$$

La condición de óptimo (máximo o mínimo) requiere la anulación del gradiente de la lagrangiana,

$$\nabla L(x) = \Phi$$

lo que es lo mismo,

$$\frac{\partial L}{\partial x_i} = \frac{\partial f}{\partial x_i} - \sum_{k=1}^n \mu_k \frac{\partial g_k}{\partial x_i} = 0 \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

Así tenemos, n ecuaciones de la forma (5) que, unidas a las m ecuaciones comprendidas en (4), permiten determinar los valores de los m parámetros (multiplicadores de Lagrange) μ_k y los de las n variables x_i .

Si denominamos V^* al valor de la función objetivo en el óptimo, obtenemos el siguiente resultado:

$$\frac{\partial V^*}{\partial X_k} = \mu_k^*$$

La interpretación de esta expresión implica que el valor de cada multiplicador en el óptimo es igual a la tasa marginal de cambio del valor óptimo de la función

objetivo, respecto a una modificación de carácter infinitesimal en la restricción a que dicho multiplicador se halla asociado.

1.4.1.2. Programación Lineal.

Definición del problema.

Un caso particular dentro de la programación matemática es el que corresponde a la llamada "programación lineal". Esta técnica está diseñada para optimizar el empleo de recursos limitados. La característica fundamental que define este caso es la linealidad de sus expresiones. Tanto la función objetivo a optimizar como el conjunto de restricciones asociadas al problema son lineales.

Estas restricciones, según (López de la Manzanara, 1983) suelen clasificarse en dos grupos, según afecten a relaciones entre las variables independientes (llamadas "instrumentos") de la función objetivo (restricciones "circunstanciales") o al signo de dichas variables (restricciones "laterales"). En algunos casos una restricción, implícita y esencial, para desarrollar el algoritmo de solución del modelo es la "restricción de no negatividad" ($X_j > 0$) para las variables de la función objetivo.

Según lo que se acaba de establecer:

$$X_0 = C_1 X_1 + C_2 X_2 + \dots + C_n X_n$$

Por ser lineales las funciones que definen las ecuaciones y/o inecuaciones asociadas a las restricciones del problema:

$$a_{i1}X_1 + a_{i2}X_2 + \dots + a_{in}X_n (\geq, \acute{o}, =, \acute{o}, \leq) b_i, \quad \text{siendo } i = 1, 2, \dots, n$$

En la formulación usual el problema se establece de la siguiente forma:

$$\text{máx o mín: } X_0 = C_1 X_1 + C_2 X_2 + \dots + C_n X_n,$$

$$\text{sujeto a, } a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + \dots + a_{1n}X_n (\leq, \acute{o}, =, \acute{o}, \geq) b_1$$

$$a_{21}X_1 + a_{22}X_2 + \dots + a_{2n}X_n (\leq, \acute{o}, =, \acute{o}, \geq) b_2$$

$$a_{m1}X_1 + a_{m2}X_2 + \dots + a_{mn}X_n (\leq, \acute{o}, =, \acute{o}, \geq) b_m$$

$$X_1, X_2, \dots, X_n (>0, \acute{o} \text{ no})$$

donde C_j , a_{ij} , b_i , ($i = 1, 2, \dots, n$), García (2004) citando a López de la Manzanara (1983) que supone constantes determinadas por la "tecnología" del problema a la que sirve el modelo, y son llamados "parámetros" del problema.

Así mismo, este autor establece que "en tanto que el modelo de programación lineal sirva a problemas de asignación de recursos a un determinado número de actividades x_i , y dichos recursos sean limitados, los parámetros que figuran en tal modelo se interpretan como sigue":

- b_i : cantidad disponible del recurso "i",
- a_{ij} : cantidad del recurso "i" que se asigna a la actividad "j",
- C_j : valor por unidad de la actividad "j".

Dadas las características expuestas, un problema de programación lineal puede establecerse como se describe a continuación:

Sean:

$$C = (C_1, C_2, \dots, C_n) \quad X = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{pmatrix} \quad A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \dots \\ b_m \end{pmatrix}$$

Y siendo "0" el vector columna nulo de "n" filas, el problema consiste en hallar

$$\text{máx } CX,$$

con:

$$A \cdot X \geq b$$

$$X \geq 0$$

Obviamente, el problema puede plantearse en forma de máximo; de hecho, si $Z = CX$, es claro que, siendo $Z = -Z$, entonces, $\text{mín } Z = \text{máx } Z$

1.4.1.3. Método Simplex.

Es un método de resolución de la forma estándar de programación lineal. Esta forma estándar tiene las siguientes propiedades:

1. Todas las restricciones son ecuaciones con un lado derecho no negativo.

Para ello se convierten las desigualdades en ecuaciones aumentando su lado izquierdo con una variable "de holgura" (ó superávit).

1. Todas las variables son no negativas. Para la conversión de una "variable no restringida" (puede ser negativa) en una "variable no negativa" se utiliza el siguiente sistema: Sea x_j una "variable no restringida", entonces se descompone en dos variables no negativas, x_j^+ y x_j^- cumpliéndose que, $x_j = x_j^+ - x_j^-$.

2. La determinación de las soluciones básicas de la forma estándar incluye "m" ecuaciones lineales simultáneas en "n" incógnitas o variables ($m < n$). Las variables "n" pueden dividirse en dos series:

- (1) "n - m" variables a las cuales les asignamos valores cero.
- (2) Las restantes "m" variables, cuyos valores se determinan resolviendo las "m" ecuaciones restantes.

Si las "m" ecuaciones producen una solución única, entonces las "m" variables asociadas se llaman 'Variables básicas', y las "n-m" restantes son denominadas, "variables no básicas". A la solución se la denomina "solución básica". Si todas las variables toman valores no negativos, entonces la solución básica es "factible". De lo contrario es no factible.

Con el fin de describir el algoritmo simplex Taha (1998) afirma que podemos determinar la programación lineal óptima enumerando, de forma exhaustiva, todas las soluciones básicas (factibles) de la forma estándar. Pero, continúa esta autor, "este procedimiento es ineficiente desde el punto de vista de cálculo". Por ello el algoritmo simplex está diseñado para localizar la óptima, concentrándose en un número seleccionado de las soluciones básicas.

El método Simplex empieza en una solución básica factible. Partiendo de esta solución, trata de encontrar otra solución básica factible que mejore el valor objetivo del problema. Para ello, convierte una variable no básica (que por tanto toma el valor cero en el problema) en una variable positiva. A su vez elimina una de las variables básicas actuales (para mantener el número de variables en relación con las ecuaciones del problema) convirtiéndola en una "variable no básica". La variable no básica seleccionada se denomina, "variable de entrada", y la variable básica eliminada, "variable de salida". Repitiendo este proceso a lo largo de los límites del conjunto convexo se obtiene la deseada solución factible óptima.

1.4.1.4. Programación lineal entera.

En esta programación, algunas o todas las variables están restringidas a valores enteros (o discretos). Taha (1998) llama "problema entero puro", a aquel, en el cuál, todas las variables deben ser valores enteros. En contraposición, llama "problema entero mixto", a aquel, en el cuál, sólo algunas variables son deben tomar valores enteros.

Con el fin de resolver este tipo de problemas existen varios algoritmos cuyo planteamiento supone tres puntos:

- Disminuir el espacio de la solución del problema. Para ello se sustituye cada variable binaria por una gama continua, entre 0 y 1. A su vez se quitan las restricciones enteras en todas las variables enteras. Esta disminución da lugar a una programación lineal regular.
- Resolver el nuevo problema planteando, encontrando su solución óptima. Esta solución será continua.

- Desde el punto óptimo se van añadiendo restricciones especiales, de forma iterativa, que modifican el espacio de solución. Estas nuevas restricciones darán lugar al punto extremo óptimo que cumpla los requerimientos enteros.

Las restricciones especiales pueden construirse mediante tres métodos: El método de ramificación y acotamiento (R y A), el método de enumeración implícita cero-uno y el método de plano cortante.

Puede encontrarse una información detallada de esta programación y de los métodos de construcción de restricción en varios autores como Nemhauser y Wolsey (1988), Parker y Rardin (1988), etc.

CAPÍTULO 2

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. El problema de la toma de decisiones.

Este trabajo parte de la necesidad de brindar, en los proyectos de energización con fuentes renovables a comunidades rurales, una información exacta de cuanta energía se debe poner a disposición (oferta) a una comunidad rural aislada, teniendo en cuenta la disponibilidad de los recursos energéticos y la demanda de dichos recursos. De manera que se utilice de forma óptima en la futura producción de energía. Lo que se busca es diversificar la producción de energía con fuentes renovables de manera que se utilicen todos los recursos disponibles de las zonas rurales de forma óptima y no depender solo de uno o dos recursos.

Así mismo, este trabajo consiste en la aplicación de una metodología para la planificación energética a una comunidad rural aislada sin conexión a ninguna red de abastecimiento eléctrico (Zona No Interconectadas) con un pobre o ningún uso de los recursos renovables disponibles y que decidieran, por parte de los gobiernos, suministrar energía a través de fuentes renovables.

Para ello se tuvo en cuenta un método matemático de Investigación de Operaciones: Programación Lineal. Esta es una técnica de optimización de recursos para efectuar el trabajo de toma de decisiones con exactitud.

Se lleva a cabo el modelo de manera que se puedan determinar las variables de decisión, la función objetivo a optimizar y las restricciones de recursos a la que está sujeta dicha función.

Para formalizar el modelo se necesitan los datos de entrada, llamada variables de de decisión. En este estudio se necesitó observar los recursos energéticos de la comunidad; para ello mayormente nos basamos en parámetros tabulados y presentados por las instituciones medioambientales de la zona, otros por las observaciones y la opinión de los habitantes de la zona (encuestas, anexo 4). Así mismo el comportamiento de los sectores de consumo del recurso que se trate, por otros proyectos de energización ya implementados.

2.2. Descripción de la comunidad estudiada.

Este trabajo se desarrolló en la comunidad rural “Las peladas”, Zona No Interconectada al sistema eléctrico nacional (ZNI). Ella pertenece al municipio Bartolomé Masó, de la provincia Granma. Ubicada a 15 km de la cabecera municipal.

El pueblo urbano más cercano es “Bueycito” a 12 km de distancia de la comunidad objeto de estudio. También pertenece al Parque Nacional “Sierra Maestra” el cual está declarado, por la institución de Flora y Fauna de la provincia, zona protegida. Tiene 14 viviendas con 56 habitantes. Posee 3 km² de territorio limítrofe, está a 4 km de la red de transporte más importante y sin acceso a servicio telefónico.

En esta comunidad forma parte de las prioridades del gobierno de la región para la energización a través de fuentes renovables.

2.3. Determinación de las variables de decisión.

Las variables analizadas para la entrada al modelo fueron las más importantes en cuanto a la disponibilidad y demanda de energía en la zona. Para lo cual se basa en varias fuentes de datos conforme a lo que se ha explicado, entre ellas el método de observación, la entrevista (en el marco del proyecto RESURL III) (Ver anexo 4) y datos oficiales publicados por las instituciones medioambientales de la provincia y el país. Así mismo parámetros utilizados en otros proyectos de energización. Las variables se presentan a continuación.

2.3.1. Demanda de Energía en Zonas No Interconectadas.

Lo primero que se evalúa es la demanda energética particular de la comunidad, para poder determinar la capacidad para instalar las tecnologías de producción de energía a implementar. La demanda de energía depende de factores como: el tipo de energético a usar, el sector consumidor, el clima de la región, las costumbres de la población (aspectos culturales) y el nivel socioeconómico.

Se tomó un diseño propuesto por UPME (2000) para la proyección de la demanda de energía eléctrica (mínimos cuadrados ordinarios) en Colombia con base en la información de una encuesta realizada a 100 localidades de los centros poblados de las ZNI en 22 departamentos del país. Según estudios realizados por UPME (2000) se realizaron encuestas (1890 en total) a usuarios de tipo residencial y comercial, y a empresas prestadoras del servicio a través de sistemas de generación de energía. Con base en esta información se estimaron tres escenarios de demanda en los cuales las variables más significativas resultaron ser: tasas de crecimiento de población, tarifas e ingresos. Los resultados de la demanda se presentan a continuación por región y por el tamaño de la población:

Tabla 2.1. Aplicable fuera de Colombia: Demanda de electricidad en ZNI por usuario/año.

| CENTRO POBLADO | DEMANDA (kWh/año) |
|-----------------------|--------------------------|
| X > 500 hab. | 1232 |
| 200 hab < X < 500 hab | 389 |
| X < 200 hab | 363 |

Fuente: Proyecto RERURL III.

Por lo que en esta investigación se tomaron la demanda de energía eléctrica cuando la comunidad es menor a 200 habitantes. Aquí se tuvo en cuenta la previsión del crecimiento en el consumo.

2.3.2. Disponibilidad de recursos naturales de la zona.

Son los recursos más abundantes en la zona para la producción de energía que se tiene en cuenta en el modelo, forman parte de las restricciones.

Estos parámetros de disponibilidad fueron medidos y muchos determinados por tablas del comportamiento del recurso por estudios anteriores y organismos (CITMA). Estas variables fueron las siguientes:

- ✓ Vientos (velocidad en m/s).
- ✓ Sol (radiación).
- ✓ Biomasa (cantidad en kg).
 - Desechos agrícolas (cantidad por casa).
 - Desechos de animales (cantidad por casa).
 - Leña disponible.
- ✓ Caídas de agua (velocidad en m/s).

2.3.3. Estudio de la demanda y consumo de energía en Zonas No Interconectadas (por sectores de consumo).

La demanda de energías en zonas aisladas y sin conexión eléctrica es variada. Primero hay que definir los sectores consumidores a los que se la ofertará energía con un tipo de fuente apropiada para él.

Biomasa.

Por ejemplo, para la cocción de alimentos con cocinas eficientes y fogones tradicionales se le ofertará biomasa. Se hace esto por la diversidad de estas dos tecnologías en la zona. En este sector de consumo, las zonas tienen una demanda que es la cantidad de biomasa necesaria para efectuar la labor de cocción de alimentos los 365 días del año para las personas de la comunidad.

Por otro lado se necesita conocer que los recursos biomásicos de la zona puedan suplir (ofertar) esta necesidad sin afectar el ciclo evolutivo de la biomasa para una producción continua de energía con este recurso. De lo que se trata es de ofertar este recurso de una manera óptima y que el consumidor la demande, respetando todo lo antes dicho. Por lo tanto en este rubro, se subdivide como sigue:

- Demanda de biomasa con cocinas eficientes para la cocción de alimentos (en tep).
- Demanda de biomasa con fogones tradicionales para la cocción de alimentos (en tep).
- Disponibilidad (oferta) de biomasa (leña) de la zona (en tep).

Energía Solar.

En este rubro, la producción de energía, por su estabilidad de producción en esta comunidad, se utiliza en los sectores de consumo más necesarios y más sensibles de la comunidad:

- Demanda de electricidad en el sector residencial (en tep).
- Demanda de electricidad en el sector público, iluminación pública (tep).
- Disponibilidad de la energía solar fotovoltaica.

Energía eólica.

En este sentido, la energía eólica es un recurso limitado de la zona aunque aún así explotable en algunos sectores de consumo (todo en tep). Se subdividen como sigue:

- Demanda de energía para el bombeo de agua.
- Disponibilidad de energía eólica para el bombeo de agua.

2.4. Formulación del modelo de programación lineal.

El modelo matemático de un problema de energización es el sistema de ecuaciones y expresiones matemáticas relacionadas que describen la esencia del problema.

Así se pueden tomar n decisiones cuantificables relacionadas unas con otras, se representan como *variables de decisión* (digamos x_1, x_2, \dots, x_n) para lo que se deben determinar los valores respectivos. La medida de desempeño adecuada (por ejemplo oferta de energía) entonces se expresa como una función matemática de estas variables de decisión (por ejemplo $Z = 3x_1 + 2x_2 + \dots + 5x_n$). Esta función se llama *función objetivo*. También se expresan matemáticamente todas las limitaciones que se pueden imponer sobre los valores de las variables de decisión, casi siempre en forma de inecuaciones o desigualdades (como $x_1 + 3x_1x_2 + 2x_2 \leq 10$). (Introducción a...2007).

Tales expresiones matemáticas de las limitaciones, con frecuencia reciben el nombre de restricciones. Las constantes (los coeficientes al lado derecho de las ecuaciones) en las restricciones y en la función objetivo se llaman *parámetros* del modelo. El problema puede expresarse entonces como el problema de elegir variables de decisión de manera que se optimice (maximizar o minimizar) la función objetivo, sujeta a las restricciones dadas.

El problema matemático consiste en ofertar la mayor cantidad de energías provenientes de fuentes renovables, a máxima capacidad de planta. Por tanto las expresiones del modelo de programación lineal son las siguientes:

La función objetivo:

$$\text{Maximizar } Z = C_1x_1 + C_2x_2 + \dots + C_nx_n$$

Donde:

Z es la media global de efectividad, la máxima cantidad de energía total óptima para la comunidad.

x_1, x_2, \dots, x_n es la cantidad de energía de la fuente j a poner a disposición, para $j=1,2,\dots,n$

Dicha función ha de ser maximizada para cada año a estudiar y para cada escenario centro de ese año.

Los valores de C_1, C_2, \dots, C_n es el incremento de Z que resulta de aumentar una unidad la cantidad energía a suministrar j , se obtiene a través de:

- La cantidad de energía (en tep o kW) a ofertar por cada planta o tecnología.

Las restricciones:

$$A \cdot x \leq b_i$$

$$\begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots \\ a_{l1} & \dots & a_{ln} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{pmatrix} \leq \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \dots \\ b_n \end{pmatrix}$$

que puede hallarse quedando:

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \leq b_1$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \leq b_2$$

$$\begin{matrix} - & - & - & - \\ - & - & - & - \end{matrix}$$

$$a_{l1}x_1 + a_{l2}x_2 + \dots + a_{ln}x_n \leq b_l$$

Donde:

Los coeficientes a_{ij} cantidad de energía i consumido por el sector de consumo j (representan la cantidad de energía renovable j , que dedican al sector de consumo

i). Por tanto distribuyen la cantidad total de cada tipo de energía renovable en los distintos sectores de demanda. De esta forma la suma de todos los coeficientes de la energía renovable j , en los distintos sectores i , debe ser igual a la cantidad máxima de energía disponible. (Introducción a...2007)

Por tanto:

b_l es la cantidad máxima del recurso energético disponible j destinado a la producción de energía.

Para establecer estos coeficientes se estudia el nivel de producción (potencia) de energía renovable de las tecnologías energéticas de cada sector.

- De manera que las restricciones debidas a la disponibilidad de recursos energético de la zona (biomasa, eólica y solar fotovoltaica respectivamente) quedarían:

$$x_{11}+x_{12} \leq b_1$$

$$x_{21}+x_{22} \leq b_2$$

$$x_{31}+x_{34} \leq b_3$$

- Restricciones debidas a la energía demandada por el sector j de consumo (consumo de biomasa para la cocción de alimentos, consumo eléctrico en el sector residencial, en la iluminación pública, consumo de energía eólica para el bombeo de agua). Estas limitaciones supone que existe una cantidad máxima de energía a consumir debido a la cantidad de habitantes y sus necesidades energéticas. Por tanto, la contribución de cada tipo de energía renovable puede ser igual o superior a la previsión de consumo de dicho recurso pero nunca superior a la disponibilidad total de este.

$$x_{11}+x_{12} \geq b_1$$

$$x_{21}+x_{22} \geq b_2$$

$$x_{31} + x_{32} \geq b_3$$

2.7. Otros métodos utilizados.

Para la resolución del problema de programación lineal se utilizó el programa computacional WinQSB. En dicho programa se resuelven el sistema de ecuaciones utilizando el método Simplex descrito en el apartado 1.4.1.3.

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.

3.1. La construcción de un modelo de planificación energética.

3.1.1. Estudio de la función objetivo.

En este caso se utiliza la programación lineal donde la función objetivo es la función de optimización como ya se ha explicado en apartados anteriores. En el caso de la energización rural, se pretende ofertar a la comunidad la máxima cantidad de energía, tendiendo como limitaciones las restricciones del recurso energético de la zona y la demanda de estos. Así mismo esa ofertar maximizarla, hasta los distintos sectores de consumo o usuarios finales.

De lo que se trata es que cada recurso salga de un origen n hasta un destino j , y este proceso hacerlo de la forma más óptima, como se representa en la figura 2.1 de lo explicado.

Orígenes
(Producción de energía)

Destinos
(Demanda de energía)

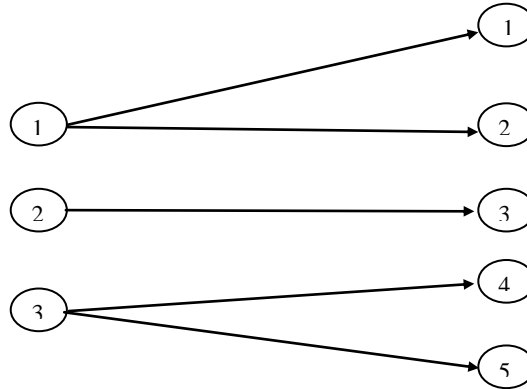


Figura 2.1. Esquema general de la energización.

Donde los Orígenes 1, 2 y 3 son los recursos capaces de la producción de energía (figura 2.1.). En el caso que nos ocupa son, 1: Cantidad de de energía (en tep) de dos hectáreas de marabú, 2: Cantidad de energía (en tep) que puede producir un generador eólico a 5 m/s de velocidad del viento, 3: Cantidad de tep que puede producir un m² de área disponible con energía solar fotovoltaica.

En el caso de los Destinos (sectores de consumo), son los demandan la cantidad de energía que producen los Orígenes y estos deben de cubrir sus necesidades energéticas mínimas de forma óptima de manera que:

Destino 1: Es la demanda (en tep/año) de energía biomásica para la cocción de alimentos con cocinas eficientes y en el modelo se define como x_{11} .

Destino 2: Es la demanda de energía biomásica (en tep/año) para la cocción de alimentos con cocinas no eficientes, x_{12} .

Destino 3: Es la demanda de energía (en tep/año) para el bombeo de agua con generación eólica, x_{23}

Destino 4: Es la demanda de energía eléctrica (en tep/año) residencial con Paneles Fotovoltaicos, x_{34}

Destino 5: Es la demanda de energía eléctrica (en tep/año) en la iluminación

pública de Paneles Fotovoltaicos, x_{35}

Para maximizar estas variables la función objetivo quedaría:

$$\text{Maximizar } Z = C_{11}x_{11} + C_{12}x_{12} + C_{23}x_{23} + C_{34}x_{34} + C_{35}x_{35}$$

Donde, según García (2004) C_1, C_2, \dots, C_n son coeficientes que dan un orden de importancia a las alternativas energéticas y son asignados por el decisor para dar el grado de incremento de se desee. En este caso se les da a todos el mismo valor en virtud de la necesidad y que todos puedan contribuir de igual forma.

Maximizar la función objetivo significa que todas las variables tomarán el mejor valor óptimo teniendo en cuenta las limitaciones (restricciones) a la que está sometida.

3.1.2. Estudio de las restricciones.

Las restricciones son todas aquellas que limitan a la función objetivo a volverse máxima. Esto siempre viene caracterizado por la disponibilidad de los recursos, las limitaciones de estos.

En nuestro caso las restricciones son de dos tipos: las relativas a la demanda y las de disponibilidad del recurso. Para poder hacer un estudio de las restricciones se debió realizar observaciones y mediciones a la comunidad estudiada.

3.1.2.1. Restricciones de disponibilidad.

Para la Biomasa.

Para encontrar los parámetros de esta restricción se realizaron varios cálculos. Lo primero es determinar la disponibilidad de la biomasa, porque no se puede consumir más energía proveniente de la biomasa de la que se dispone, porque en caso contrario crearía una crisis en ese sector que trataría de equilibrarla con otro recurso energético.

La comunidad estudiada posee 4 hectárea de Marabú en los alrededores. Fáciles de coleccionar ya que no implica transporte automotor ni gastos adicionales que no

sean físicos humanos y animal.

Para respetar el ciclo de vida de esta biomasa y mantener los suministros en el tiempo para no generar crisis de abastecimiento, se toman solo dos hectáreas como recurso disponible para un año. Al año siguiente se tomarías las otras dos.

Cada hectárea de bosques cortos de sabanas posee de 20 a 45 m³ (FAO, 2007). El marabú, por tener una alta densidad poblacional se encuentra en la comunidad un total de 90 m³ disponible para la cocción de alimentos.

Por otro lado, cada metro cúbico de marabú puede tener 750 kg de madera verde por m³ y a su vez 535 kg de leña seca por m³ (FAO, 2007). Teniendo en cuenta que un kg de marabú posee 4 654 kcal, se traduce a que la comunidad posea una disponibilidad de 21,6 tep (ver factores de conversión, anexo 1), respetando el ciclo de vida de este tipo de biomasa y para mantener el suministro energético de biomasa para la cocción de alimentos estable en el tiempo.

Esta restricción también posee unos coeficientes delante de cada variable que muestran el gasto de cada sector de consumo o actividad. En este caso es uno porque en las restricciones de demanda se le impone estos coeficientes.

En este caso la biomasa solo se utilizará en dos sectores que tienen una demanda anual estimada per cápita. Teniendo como base este antecedente, se planifica que el consumo no debe exceder esta cifra ya que generaría problemas de tipo ambiental y económico. Esto se representa a través de la siguiente restricción.

$$x_{11} + x_{12} \leq 21,6$$

donde,

x_{11} : es la cantidad de energía anual en el sector “cocción de alimentos con fogones tradicionales”.

x_{12} : es la cantidad de energía anual en el sector “cocción de alimentos con cocinas eficientes”.

Para la Energía Eólica.

La disponibilidad del recurso eólico depende de muchos factores. El primer factor es la velocidad del viento de la zona. El segundo factor es la frecuencia de esta velocidad (que sea sostenida). El tercer factor es la disponibilidad de área o características geográficas de la región para la instalación de equipos y si en la comunidad están de acuerdo a sacrificar sus terrenos y modificar el entorno. El cuarto factor es los costos de las instalaciones (aquí no se tuvo en cuenta), etc. Es uno de los tres recursos aquí analizados menos disponible.

Es por todo esto que se impone una restricción de disponibilidad de recurso estricta. Es decir, que cualquier actividad que se quiera realizar con la energía proveniente del viento, debe de ser menor la demanda.

Para encontrar el parámetro de la comunidad en cuanto a la disponibilidad de viento se tuvo en cuenta lo siguiente:

Se observó la velocidad de los vientos de la zona que fue de 5 m/s con una frecuencia de calma de 3 veces por semana (180 días de vientos a 5 m/s). Para esta velocidad del viento solo se puede instalar generadores para el bombeo de agua de una potencia mínima de 200 W.

Como la disponibilidad del terreno es reducida a causa de los cultivos y la biomasa así mismo los costes, se asumió que solo se pueden instalar 7 generadores que deben funcionar todo el año. Estos generadores deben producir electricidad solo para el bombeo de agua.

De este modo se multiplica la cantidad de energía (en tep) capaz de producir un aerogenerador en un año, que funcione con 5 m/s, por siete de estos. Esto resulta ser solo 0,020 tep disponible en un año, este es el parámetro en el lado derecho del signo. El bombeo de agua se tiene que limitar a esta disponibilidad del recurso.

El coeficiente delante de la variable es 1 ya que en las restricciones de demanda, en el siguiente apartado, se la impone por el consumo de esta actividad. Por tanto

la restricción de disponibilidad se plantea como:

$$X_{23} \leq 0,020$$

donde,

X_{23} : es la cantidad de energía necesaria (en tep/año) para el bombeo de agua.

Para la Energía Solar Fotovoltaica.

Para la determinación de los parámetros y los coeficientes se hizo lo siguiente:

La disponibilidad de sol y del área para la instalación de paneles fotovoltaicos. Según Cubasolar (2009) en esta comunidad posee una intensidad solar de 5 kWh/m²·día. Teniendo en cuenta que la disponibilidad de área para la instalación de paneles fotovoltaicos es reducida a causas de las áreas para la biomasa, los cultivos, el pastoreo y el cuidado del entorno paisajístico en sentido general; solo se instalarán los paneles encima de los techos de las viviendas y ellas solo poseen 1 m² disponible para ello.

Esto significa que se cuenta con solo 14 metros cuadrados para el aprovechamiento de este tipo de recurso. También teniendo en cuenta que existen aproximadamente 200 días soleados, la comunidad cuenta con 1,3 tep de este recurso. Los coeficientes delante de la variable es la necesidad del recurso en la actividad.

Y la inecuación se expresa de la siguiente manera:

$$x_{34} + x_{35} \leq 1,3$$

donde,

x_{34} : cantidad de energía necesaria (en tep) para el sector residencial.

x_{35} : cantidad de energía necesaria (en tep) para el alumbrado público.

3.1.2.1. Restricciones de demanda.

En estas restricciones se determinó las necesidades energéticas de los distintos sectores consumidores de cada recurso para poder suplir sus necesidades mínimas. Es decir, que la demanda es un aspecto fundamental en el modelo. Suplir menos energía que la mínima indispensable generaría crisis en el sector de consumo. Es por esta razón que las restricciones de demanda se imponen con el propósito de obligar al modelo a dar una solución óptima sin descuidar la necesidad de la comunidad.

Para la biomasa.

En este caso se tuvo en cuenta que en la zona existen 14 casas, 7 de las cuales habitan 31 personas en total y usan cocinas de biomasa no eficientes (fogón tradicional). Según la FAO las cocinas no eficientes hacen que se consuma 1200 kg de leña anuales por personas; por lo que con fogones de este tipo se demandan de 16,55 tep/año.

En cuanto a las cocinas eficientes, el consumo per cápita es de 450 kg anuales por lo que equivale a una demanda de 4,41 tep. El lado derecho del signo es la suma de las dos demandas de biomasa:

$$16,55 x_{11} + 4,41 x_{12} \geq 20,96$$

donde,

x_{11} : es la demanda de energía biomásica en el sector “cocción de alimentos con fogones tradicionales”.

x_{12} : es la demanda de energía biomásica en el sector “cocción de alimentos con cocinas eficientes”.

Para la energía eólica.

Para la demanda de energía eólica se tuvo en cuenta la necesidad de agua de la comunidad y así mismo la demanda de electricidad para el bombeo agua a las 14

casas. De este modo para producir un m³/día se necesita un kWh/día (Wikipedia, 2010), lo que equivale a 5 aerogeneradores o bombas eólicas para producir 7 m³/día (7 kWh/día) para satisfacer la demanda de las 14 casas suponiendo que cada vivienda consuma como promedio 0,5 m³.

Por la velocidad de los vientos de dicha comunidad (5 m/s), se utilizan solo generadores de capacidad 200 W, trabajando 180 días al año por los períodos de calma de este recurso. Entonces existe en el sector una demanda de este recurso de 0,0209 tep/año. El coeficiente delante de la variable es la contribución de cada aerogenerador. Se necesita que el sistema sea capaz de ofertar una cantidad de energía mayor o igual a la demanda. Por lo que quedaría de la siguiente forma:

$$0,149 X_{23} \geq 0.209$$

Para la Energía Solar Fotovoltaica.

Se determinó la demanda eléctrica de las 14 casas los 365 día del año (ver anexo 2) que equivale a 0,192 tep. Igualmente para la demanda eléctrica de la iluminación pública estimada que se necesitan para iluminar la comunidad 10 bombillas de 150 W de potencia (Unión Eléctrica, 2010), encendidas 12 horas diarias por los 365 días, se estimó que esto equivalía a 0,54 tep anuales. Se necesitan que el sistema sea capaz de ofertar una cantidad de energía igual o mayor de lo que es capaz de demandar el sector, nunca menor. De esta forma quedaría la inequación como sigue:

$$0,192 x_{34} + 0,54 x_{35} \geq 0,73 \text{ tep}$$

donde,

x₃₄: es el consumo de electricidad en el sector “residencial” con paneles fotovoltaicos.

X₃₅: es el consumo de electricidad en el sector “iluminación pública” con paneles fotovoltaicos.

El modelo completo.

$$\text{Maximizar } Z = C_{11}x_{11} + C_{12}x_{12} + C_{23}x_{23} + C_{34}x_{34} + C_{35}x_{35}$$

$$x_{11} + x_{12} \leq 21,6$$

$$x_{23} \leq 0,020$$

$$x_{34} + x_{35} \leq 1,3$$

$$16,55 x_{11} + 4,41 x_{12} \geq 20,96$$

$$0,149 x_{23} \geq 0,209$$

$$0,192 x_{34} + 0,54 x_{35} \geq 0,73 \text{ tep}$$

3.1.3. La solución óptima del modelo (resultados).

Para maximizar la cantidad de energía disponible por la comunidad se utilizó el programa computacional WinQSB (Linear Programming) con el método Simplex.

Al maximizar la función objetivo, es decir, llevar la máxima cantidad de energía de manera óptima a la comunidad objeto de estudio resultó que es de 23 tep. Es decir que el rendimiento neto para dicha función debe ser este valor para que se cumplan todas las restricciones. Estos resultados depende mucho de las restricciones impuestas a la función objetivo. Por tanto:

La cantidad de energía anual necesaria producida por la biomasa debe ser:

- Cocción de alimentos con Cocinas eficientes debe ser de: 4,5 tep
- Cocción de alimentos con Cocinas no eficientes debe ser de: 16,8 tep

La cantidad de energía anual necesaria producida por el sol para la satisfacción de las necesidades debe ser:

- Para el consumo residencial debe ser de: 0,40 tep
- Para el consumo de alumbrado público: 0,78 tep

Aquí el modelo demuestra que se necesitan más disponibilidad de energía para satisfacer ambas demandas ya que la disponibilidad solo es de 1,3 tep. Esto equivale a instalar más paneles fotovoltaicos lo que encarecería el proyecto o aportar de lo que sobra de la energía eólica.

- La cantidad de energía que necesaria para el bombeo de agua para abastecer la comunidad en el período de un año es de: 0,015 tep

CONCLUSIONES

1. La velocidad de los vientos 180 días del año, es un promedio de 5 m/s.
2. Los generadores eólicos que trabajan a estas velocidades de vientos son de 200 W.
3. Se necesitan 5 aerogeneradores de esta potencia para suplir de agua a toda la comunidad. (7 kWh/día= 0,0284 tep)
4. La disponibilidad de sol captada con Paneles Fotovoltaicos que se pueden instalar es 5 kWh/m²día por 14 viviendas (1,3 tep/año).
5. La disponibilidad de biomasa de las 2 hectáreas de biomasa (marabú) equivalen a 21,3 tep.

Los resultados de la optimización de los recursos utilizando la metodología para establecer la cantidad de energía necesaria por año fueron los siguientes:

6. Consumo energético de las cocinas eficientes: 4.5 tep/año
7. Consumo energético de las Cocinas no eficientes: 16,8 tep/año
8. Consumo eléctrico en el sector residencial debe ser de: 0,30 tep/año
9. Consumo eléctrico del alumbrado público: 0,78 tep/año
10. Consumo eléctrico necesario para el bombeo es de: 0, 015 tep/año

RECOMENDACIONES

1. Utilizar el modelo como una metodología para optimizar los recursos energéticos de la comunidad.
2. Realizar un análisis postóptimo para determinar si los parámetros sensibles pueden ser cambiados y dar una solución más óptima.
3. Repensar el modelo para aportar energía de diferentes fuentes para diferentes sectores.
4. Realizar un análisis ambiental y económico de la aplicación del modelo a las comunidades rurales.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

"Gráfico de Calentamiento Solar," en *Encarta*, Microsoft Corporation, Ed., 2009.

"Introducción a la investigación de operaciones." vol. 1 Ciudad de la Habana: Editorial "Félix Varela", 2007.

Blanco Yandi. Gestión Energética en la Empresa Cultivos Varios Bayamo de la provincia de Granma. Tomado de: trabajo de diploma Universidad de Granma, 2009.

Borroto et al. 2002. Colectivo de autores. Gestión Energética Empresarial. Centros de estudio de energía y medio ambiente. Universidad de Cienfuegos, Cuba. Bajo la redacción de Aníbal E Borroto Nordelo. Editorial Universidad de Cienfuegos, 2002.

Borroto Nordelo, Aníbal, López Batista, Eduardo. Maestría en eficiencia energética. Universidad de Cienfuegos, 2002.

Centro de recursos ambientales purriketal (dima.bizkaia) accesible." La *Energía*. www.unescoeh.org/ext/manual/html/energia.html.23.4.07.

Cherni J. A., "Seminario: Energización de zonas aisladas en latinoamérica," Universidad Nacional de Colombia, Medellín 2002.

Consortio OPET Comunidad Andina, "Sondeo preliminar del mercado de las tecnologías energéticas limpias en Bolivia, Colombia, Ecuador y Perú," Comisión Europea 1999.

Consumer es eroski. Hacia una crisis energética. Tomado de: www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/energia_y_ciencia/2005/05/16/142009.php. 11 de Octubre de 2006.

FLAVIN C, LENSSEN N. Nuevas orientaciones de la industria eléctrica. Informe de World Wacth Institute. Cáp. 4. 1994.

MADRUGA, E. Una experiencia cubana: la electrificación solar a las casas consultorios del médico de la familia en zonas montañosas y rurales remotas. *Energía y Tú*, 1997, nº 0, p. 25. Tomado de: <http://www.ub.es/geocrit/sn-18.htm>, Noviembre 2010.

Mapa eólico de Cuba. Tomado de: <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia37/HTML/articulo03.htm>. 20 de Octubre de 2010.

Ministerio de Minas y Energía Unidad de Planeamiento Minero Energético UPME, " Línea base geo-referenciada para la formulación del plan de suministro de energía para las zonas no interconectadas de Colombia. Metodología," Colombia, 1999.

Modelos de programación entera. Tomado de: <http://www.slideshare.net/krizx/modelos-de-programacion-entera>. Octubre 2010.

Moreno Figueredo, Conrado. La gestión energética y la competitividad empresarial. Tomado de la revista científica-popular trimestral de CUBA SOLAR *Energía y Tu*. Ed. Cuba Solar, 2005.

R. Smith, O. Mesa, I. Dyrner, P. Jaramillo, G. Poveda, y D. Valencia, "Decisiones con múltiples objetivos e incertidumbre," 2da ed, Universidad Nacional de Colombia y Facultad de Minas, Eds. Medellín, 2000.

Romero Lenin. Gestión energética en la pasteurizadora el "Alba". Tomado en: trabajo de diploma. Universidad de Granma 2010.

S. Jebaraj y S. Iniyar "A review of energy models," *Renewable y sustainable energy reviews*, vol. 10, pp. 281-311, 2006.

Seminario o taller "Centro América – Energía y medio ambiente" (Tegucigalpa, Honduras, mayo, 2001).

SEPAL. Estudio económico de América Latina y el Caribe. Petróleo y gas en América Latina un análisis de relaciones internacionales a partir de la política

Venezolana (DT). Htm, 2004.

Situación de las energías renovables en el mundo. Tomado de:
<http://www.energiasrenovables.ciemat.es/especiales/energia/index.htm#6>.

Octubre, 2010.

STEWART, James. "Cálculo, Trascendentes Tempranas". 4 ed. Tr. de Andrés Sestier. México, Ed. Thomson, 2002. p. 1151.

Stolovich, Luis et al. 1997. El sector energía en América Latina. "El sector energía En América Latina. Análisis descriptivo". Montevideo. Instituto del Tercer Mundo.

Torres, Nelliud. El uso de portales corporativos en la gestión del conocimiento para la empresa. Universidad de Turabo, Turabo, Puerto Rico, 2010.

UNIÓN ELÉCTRICA. *Cuba en la XIV Conferencia Latinoamericana de Electrificación Rural: Avances de la electrificación rural en el país y programas perspectivas*. La Habana: Taller Gráfico de la Unión Eléctrica, 1993. 26 p. Tomado de: <http://www.ub.es/geocrit/sn-18.htm>

UNIÓN ELÉCTRICA. *Datos de interés de la actividad eléctrica*. La Habana: Unión Eléctrica, Diciembre de 1992. 108 p. Tomado de: <http://www.ub.es/geocrit/sn-18.htm>.

UPME - Ministerio de Minas y Energía. Unidad de Planeamiento Minero Energético. (2000). "Establecimiento de un plan estructural, institucional y financiero, que permita el abastecimiento energético de las zonas no interconectadas, con la participación de las comunidades y el sector privado". Ministerio de Hacienda, DNP, UPME, CREG, PNUD.

G. N. Ayes, Revolución energética, un desafío para el desarrollo, Científico-Técnica ed., 2008.

H. A. Taha, 1998. "Investigación de operaciones. Una introducción". PRENTICE HALL, 6' edición. México.

M. López Cachero. I Curso de Planificación Energética. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid.1983.

Desarrollo de regiones rurales, energía y democracia. Tomado de: <http://solucionessolares.blogspot.com/2008/05/desarrollo-rural-en-comunidad-andina.html>. 9 de Noviembre de 2010.

B. van Campen, D. Guidi, y G. Best, "Energía solar fotovoltaica para la agricultura y desarrollo rural sostenibles," en *Documento de Trabajo sobre Medio Ambiente y Recursos Naturales* Roma: FAO, 2000.

E. Turrini, *El camino del sol, un desafío para la humanidad del tercer milenio, una esperanza para los países de sur.*: Cubasolar, 2006.

Annual Energy Review. Bruselas: Comunidad Económica Europea, sep., 1997.

Renewable Energy World. Jul.-Ago., 2004; y nov.-dic., 2004

López de la Manzanara, J. 1983. I Curso de Planificación Energética. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid.

Nemhauser, G. y Wolsey, L. 1988. "Integer and Combinatorial Optimization". Willey. New York.

Parker, G. y Rardin, R. 1988. "Discrete Optimization". Academic Press. Orlando. Florida.

L. García, "Desarrollo de un modelo multicriterio-multiobjetivo de oferta de energías renovables: aplicación a la comunidad de madrid.,"Departamento de Ingeniería Forestal, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid 2004.

F. Marcos, "Estudio de la aplicación de un modelo de planificación energética a la región Castellano-Leonesa,"Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid 1984.

Proyecto: "Energías renovables en función de desarrollo sostenible en comunidades rurales" RESURL III, 2009.

D.I. Rodríguez, R. Cordon, y V.I Melián, "Un programa computacional para resolver problemas de Programación Lineal y Lineal Entera," 2.0 ed: Grupo de Algebra Computacional, Facultad de Matemática y Computación, Universidad de Oriente, 2005.

EcoSol Solar, "Hoja de calculo fuentes renovables de energía," 1.1 ed Ciudad de la Habana, 2004.

ANEXOS

ANEXO 1. TABLA 1: FACTORES DE CONVERSIÓN DE LAS UNIDADES DE ENERGÍA.

| Unidad | 1 kj | 1 kcal | 1 kWh | 1 tec | 1 tep | 1 TWaño |
|---------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|
| 1 kj | 1 | 0.24 | $2,78 \cdot 10^{-4}$ | $3,4 \cdot 10^{-8}$ | $2,3 \cdot 10^{-8}$ | $0,317 \cdot 10^{-16}$ |
| 1 kcal | 4,18 | 1 | $1,16 \cdot 10^{-3}$ | $1,4 \cdot 10^{-7}$ | $9,7 \cdot 10^{-8}$ | $0,128 \cdot 10^{-15}$ |
| 1 kWh | 3 600 | 860 | 1 | $0,123 \cdot 10^{-3}$ | $0,083 \cdot 10^{-3}$ | $0,11 \cdot 10^{-12}$ |
| 1 tec | $2,93 \cdot 10^7$ | $7 \cdot 10^6$ | $8,14 \cdot 10^3$ | 1 | 0,67 | $0,93 \cdot 10^{-9}$ |
| 1 tep | $4,3 \cdot 10^7$ | $10,4 \cdot 10^6$ | $12,1 \cdot 10^3$ | 1,5 | 1 | $1,38 \cdot 10^{-9}$ |
| 1 TWaño | $3,15 \cdot 10^{16}$ | $0,75 \cdot 10^{16}$ | $8760 \cdot 10^9$ | $1082 \cdot 10^6$ | $725 \cdot 10^6$ | 1 |

Fuente: El camino del Sol. Turrini, 2006.

ANEXO 2. TABLA 2: ESTIMADO DE DEMANDA DE ELECTRICIDAD CON PFV EN UNA VIVIENDA NO ELECTRIFICADA.

| <i>Equipos</i> | <i>Cant.</i> | <i>Potencia(W)</i> | <i>Fact.Pot.</i> | <i>t_{uso}·D</i> | <i>t_c</i> | <i>P(VA)</i> | <i>E(Wh/día)</i> | <i>t_{uso}·R</i> |
|------------------------|--------------|--------------------|------------------|--------------------------|----------------------|--------------|------------------|--------------------------|
| Lampara PL 20 W | | | 0,70 | | 16,0 | 0,0 | 0,0 | |
| Lampara PL 15 W | 5 | 5,0 | 1,00 | 5,0 | 16,0 | 5,0 | 125,0 | 13,5 |
| PC | 0 | | 0,72 | 0,0 | 16,0 | 0,0 | 0,0 | |
| Licuadaora | 1 | 340,0 | 0,80 | 0,2 | | 425,0 | 68,0 | 0,5 |
| Radio Grabadora | 1 | 10,0 | 1,00 | 2,0 | | 10,0 | 20,0 | 5,4 |
| Ventiladores | | 45,0 | 0,90 | 10,0 | | 50,0 | 0,0 | 27,0 |
| Frezeer | | 75,0 | 0,90 | 0,0 | | 83,3 | 0,0 | |
| TV | 1 | 45,0 | 0,80 | 5,0 | | 56,3 | 225,0 | 13,5 |
| VHS | 1 | 15,0 | 0,80 | 1,0 | | 18,8 | 15,0 | 2,7 |
| BOMBA DE AGUA | | | 0,80 | 3,0 | | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Totales | | 435,0 | 0,82 | 30,00 | | 528,0 | 453,0 | |

Fuente: EcoSol Solar, 2004. Copextel.

**ANEXO 3. CUADRO 1: FACTORES DE CONVERSIÓN PARA EL USO
DEL RECURSO LEÑA EN COMUNIDADES RURALES.**

| | |
|---|---|
| Variación típica del consumo de leña per capita para usos domésticos en países en desarrollo. (Las cifras reales dependen del clima, oferta, tradiciones, etc.) | 0,5 m ³ a 2,0 m ³ |
| Cantidad de leña usada para producir 1 ton (1.000 kg) de carbón vegetal. | 7 a 11 m ³ (sólidos) |
| Producción probable de leña por cortas en: | |
| (a) Bosque tropical alto | 80 - 100 m ³ /ha |
| (b) Monte de sabana | 20 - 45 m ³ /ha |
| (c) Plantaciones de eucalipto de buena calidad, de 12-15 años. (El rendimiento de las plantaciones depende totalmente del ritmo de crecimiento alcanzado. Un inventario real será necesario para con firmar pronósticos de producción). | 80-200 m ³ /ha |
| Producción anual de plantaciones de eucalipto bien ordenadas, sobre buenos sitios; rotación 12-20 años. Incremento medio anual (IMA) | 14-20 m ³ /ha |
| Una ton (1.000 kg) de carbón vegetal, al quemar, genera energía equivalente a: | |
| (a) Fuel Oil. | 0,55 ton |
| (b) Electricidad, si usada para producir calor. | 7,260 kWh |
| (e) Carbón bituminoso (duro). | 0,83 ton |
| (d) Madera seca (15% contenido de humedad). | 1,65 ton |
| (e) Madera verde (ej. 60% contenido de humedad). | 2,50 ton |

Fuente: La Biomasa, FAO