

ESTUDIO CON TÉCNICAS MULTICRITERIO DE AYUDA A LA TOMA DE DECISIÓN, APLICADO A LA ENERGÍA EÓLICA

TESIS PRESENTADA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE
INGENIERO INDUSTRIAL

Autor: Ernesto López Verdera

Tutor: M. Sc. Ángel Eugenio Infante Haynes
Lic. Eliseo López Rodríguez

Consultante: Dr. C. Leudis Orlando Vega de la Cruz

HOLGUÍN 2021



PENSAMIENTO

“El hombre no es un sistema mecánico... No hay optimización sino compromiso,
equilibrio y multiplicidad de puntos de vista”

Incógnito



DEDICATORIA

“A mi papá, por resistir con fuerzas los avatares de esta vida, por amarme como lo hace, por estar siempre conmigo, por tantas y tantas batallas libradas por todas esas cosas y más.

A mi mamá que desde donde está me da aliento para seguir, por darme la vida.
A mi niño, por ser el soporte de mi vida y brindarme la posibilidad de aprender a amar, por ser la luz al final que me inspira a seguir aun cuando no parece haber fuerzas, por ti he hecho este esfuerzo”.

El autor



AGRADECIMIENTOS

“Ante todo, a mi familia, porque si no estuvieran conmigo no estaría graduándome hoy.

A Ángel, por aceptar ser mi tutor, por mostrarme el camino, por brindarme su conocimiento infinito, por ser más que mi tutor mi ejemplo a seguir.

A Dios, por darme las fuerzas necesarias y las bendiciones con las que he alcanzado los logros para llegar hasta este momento.

A mis hermanos por estar al tanto de cada paso que he dado en esta carrera.

A la Revolución por todo el esfuerzo y empeño en que cada cubano sea más culto e instruido; sin ella muchos de nosotros no estaríamos aquí.

A todos los que han formado parte de mis sueños, los que han estado mientras los hago realidad, aunque no tengan conciencia de ello (los quiero tanto que ni con mil vidas pudiera demostrarlo)

A mis amigos, los de antes, los de ahora, los que se han preocupado, los que me han brindado su apoyo y los que no también.

A mi grupo, a los que empezamos, a los que se quedaron en el camino, a los que logramos graduados.

A cada uno de los profesores que han dedicado horas a transmitir sus conocimientos para poder llegar hasta aquí, sin ellos este sueño aún estaría en la almohada.

A mí, por encontrar siempre un nuevo impulso en todo lo que me rodea y continuar esforzándome.

A todos, GRACIAS”

El autor



RESUMEN

El presente trabajo se realizó en la Unión Nacional Eléctrica, Sucursal de Holguín, específicamente en el departamento de investigación y generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables de energías (FRE), con el objetivo de realizar un estudio para la evaluación de los proyectos de montajes y construcción de parques eólicos a instalar y generalizar, para seleccionar el mejor proyecto a instalar y generalizar en norte oriental de Cuba, mediante métodos multicriterios, concretamente relacionados con la toma de decisiones pertenecidas con los sistemas que utilizan la energía proporcionada por el viento, digamos eólica. Se aplica un procedimiento con técnicas de multicriterios y sus herramientas asociadas para encontrar la mejor localización de las plantas de generación de energía eléctrica con aerogeneradores, el cual será propuesto a la Unión Nacional Eléctrica, Sucursal de Holguín, como estudio de caso que permita recoger y reconocer criterios de validez. Se muestran los resultados de la aplicación de los mencionados métodos de ayuda a la toma de decisión multicriterio, en el cual se evaluaron los sistemas ya existentes para mediante sus datos tener en cuenta cuáles son más prácticos a utilizar en la zona norte del oriente del país y en qué lugares son más eficientes. Para dar cumplimiento a los objetivos de la presente investigación se elaboró un marco teórico referencial, se caracterizó la zona donde están los parques eólicos en la actualidad y el proceso específico, cuyos datos se muestran en el informe de trabajo.



ABSTRACT

The president's work was carried out in the National Electricity Enterprise, Holguín Branch, specifically in the Department of Research Generation from renewable energies sources (FRE). In order to carry out a study for the evaluation of the projects for the assembly and construction of wind farms to be installed and generalized, to select the best project to install in the northeastern part of Cuba, using multi-criteria methods, particularly related to decision-making for systems that use the energy produced by the wind, or eolic energy. So by applying a multi-criteria procedure technique and the tools associated to it, we were able to find the best location for the electric power generation plants with wind turbines, which will be proposed to the National Electricity Enterprise, Holguín Branch, as a case study that allows collecting and recognizing criteria validity. The results of the application of the aforementioned multi-criteria decision-making aid methods are shown, in which the existing systems were evaluated in order, through their data, to take into accounts which are the most practical to use in the northern part of the eastern part of the country and where they are most efficient. In order to comply with the objectives of this research, a theoretical referential framework was developed; the area where the wind farms are currently located and the specific process were characterized, which data are shown in the report of this work.



ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO-PRÁCTICO REFERENCIAL DE LA INVESTIGACIÓN SOBRE LA TOMA DE DECISIÓN EN LAS FRE	7
1.1 Las fuentes renovables de energía	7
1.2 Toma de decisiones	19
1.3 Métodos de decisiones multicriterio.	24
1.4 Metodologías de toma de decisión.....	35
1.5 Situación actual del uso de las fuentes renovables de energía en el norte oriental de Cuba.....	40
CAPÍTULO 2. CARACTERIZACIÓN DEL CASO DE ESTUDIO Y RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN	44
2.1 Caracterización del caso de estudio a resolver	44
2.2 Aplicación del procedimiento de Infante, Belette.....	46
CONCLUSIONES	67
RECOMENDACIONES	68
BIBLIOGRAFÍA	69
ANEXOS	0



INTRODUCCIÓN

Hoy la generación eléctrica en el mundo y en Cuba presenta serios desafíos a vencer, uno de ellos es la asequibilidad de las tecnologías, debido, en primer lugar, a los altos costos nivelados de la energía, incluyendo los costos de mantenimiento y de adquisición o gastos de inversiones. Otro de los desafíos es la sostenibilidad de estos proyectos, para ello debe garantizar baja emisiones de gas de efecto invernadero, planteándose aquí sustituir las plantas de carbón y petróleo y migrar a tecnologías de baja emisión de carbono acompañada de una alta eficiencia; no menos importante debe ser la flexibilidad en la generación, para poder ser inyectada por las Fuentes Renovables de Energías (FRE). Por último, todo esto debe garantizar la seguridad energética, cumpliendo el principio de ser fiables en el suministro, por lo que, resumiendo, se debe garantizar la asequibilidad, eficiencia, seguridad energética y la sostenibilidad en el tiempo. Será necesario entonces, incrementar la eficiencia en el consumo de todos los clientes que son servidos, mejorar la eficiencia en la generación eléctrica, incrementado la flexibilidad en la generación y no menos importante, introducir las fuentes renovables de energía garantizando no solo su disponibilidad, sino también su fiabilidad.

Según datos de Global Energy Trends, después de la caída del 3,5% en 2020, se espera que el consumo de energía se recupere en 2021 con un crecimiento del 4,1%. Con situaciones de bloqueo, las emisiones de CO₂ disminuyeron un 5,2% en este año, pero las previsiones de 2021 predicen que el nivel de emisión será más bajo que en 2019. La generación alimentada con carbón y generación nuclear disminuyeron en 4,5 y 3,5% respectivamente, lo cual fue compensado con la generación de energías eólicas. Previendo un aumento de la energía geotérmica, o energía del interior de la tierra, igualmente también se espera un incremento para el 2040, aunque su comportamiento haya sido hasta hora de forma lineal, igual pasará con otros recursos renovables, donde también se encuentra las energías marinas. En cuanto a las energías eólicas y solar, su crecimiento es bastante vertiginoso, toda vez porque estas energías, sus costos de adquisición, han bajado considerablemente; entre otras cosas debido a los adelantos científicos técnicos, lo que ha permitido que países en vía de desarrollo puedan acceder a los mercados de

producción de estas tecnologías. El incremento de la energía eólica entre el año 2018 y el 2020 fue de un 5 y 6%; se espera un crecimiento de un 10% para el 2030 y un 13% para el 2040 por lo que es el objeto de esta investigación, (Global Energy Trends 2021).

En Cuba (Global Energy Trends 2021) más del 95% de la generación se realiza con combustibles fósiles, teniendo un papel preponderante el crudo cubano, con el 45%, la generación con motores fueloil el 18%; la generación de fuel térmica y el gas acompañante con una participación del 14%, el diésel en menos proporción con un 3% y por último las FRE, con solamente 4,5% de participación, dentro de las cuales están las solares y fotovoltaica, las hidráulicas, las eólicas y la biomasa. Dada la limitada disponibilidad de recursos fósiles, la falta de aprovechamiento hidroenergéticos y de otras alternativas existentes en Cuba, el país ha trazado la estrategia de migrar a las energías alternativas, limpias y renovables. Al triunfo de la Revolución, la capacidad instalada de generación de electricidad era solo de 397mW y garantizaba el abastecimiento a solo el 56% de la población.

En el marco regulatorio relacionado con las fuentes renovables de energía se encuentra el Decreto Ley 345, de la República de Cuba: “Del desarrollo de las fuentes renovables y usos eficientes de la energía”, cuyo objeto es establecer las regulaciones para el desarrollo de las FER y el uso eficiente de la energía, y llama de forma organizada a hacer la revolución energética de nuestro tiempo, para convertirnos en un país de productores y no de meros consumidores. (Consejo de Estado, publicado en Gaceta Oficial No.95 Ordinaria de 28112019),

En el Lineamiento 204 del VII Congreso del PCC, se plantea la necesidad de acelerar el cumplimiento del programa aprobado hasta el 2030 para el desarrollo de las fuentes renovables y el uso eficiente de la energía. En el Lineamiento 206 plantea concebir las nuevas inversiones, el mantenimiento constructivo y las reparaciones capitales con soluciones para el uso eficiente de la energía, instrumentando adecuadamente los procedimientos de supervisión; por otro lado, el Lineamiento 207 plantea perfeccionar el trabajo de planificación y control del uso de los portadores energéticos e índices de consumo establecidos; los que en este investigación se

tienen en cuenta con el fin de encontrar una nueva forma de hacer de ellos un mejor uso. (Comité Central del PCC 2017)

Por su parte el VIII Congreso de este órgano enunció en el Lineamiento No.146: “Eleva la eficiencia en la generación eléctrica, dedicar la atención y recursos necesarios al mantenimiento de las plantas térmicas en operación y a los emplazamientos de generación distribuida, potenciando el uso de la ciencia y la innovación, la realización de otros trabajos de esta índole”. En el No.149: “Acelerar el cumplimiento del Programa para el Desarrollo de las Fuentes Renovables y Uso Eficiente de la Energía, aprobado hasta el 2030, con prioridad en la energía solar. Concebir en las nuevas inversiones, el mantenimiento constructivo y las reparaciones capitalizables, se potencian y ratifican las políticas del estado en aras de potenciar y perfeccionar el uso de las energías renovables en el país” (Comité Central del PCC 2021)

Sin embargo, los resultados (CUBAHORA 2019) alcanzados no deben entenderse como una meta cerrada, son pequeños pasos en un primer impulso de país para aspirar a aumentar la participación de las FRE en su matriz de generación eléctrica hasta un 24%. Con el trazado de nuevas tareas como la instalación de 700MW en parques fotovoltaicos y 688MW en parques eólicos; para estos últimos es necesario en el norte de oriental de Cuba aumentar el uso de las aéreas que hoy se destinan a estos. El grupo de trabajo que tiene esta última tarea no ha definido la localización de los nuevos parques eólicos lo cual pretenden potenciar con la ayuda de métodos de decisión multiobjetivos teniendo en cuenta los datos de los parques experimentales y así encontrar el lugar óptimo.

En la revisión documental (www.minem.gob.cu) se detecta como **situación problemática** del Sistema Electro Energético Nacional (SEN) UNE, 2020, la alta dependencia de los combustibles fósiles para la generación de electricidad con más del 95% de la energía generada, existe una alta dependencia de los combustibles importados con lo cual se genera una gran parte de la energía del país, el alto costo promedio de la energía servida al cliente debido al incremento del combustible importado; baja eficiencia en la generación con centrales termoeléctricas con un índice de consumo promedio de 275g/kWh debido a efectos del bloqueo económico

que impide, entre otras cosas, la importación de tecnología nueva y los recursos para los mantenimientos de las actuales; las centrales con fuentes derivadas de las energías tradicionales, los hidrocarburos, presentan un alto nivel de contaminación ambiental, tanto por la extracción de estas como por la emisión de gases de efecto invernadero. El proceso de toma de decisiones relacionado con la planificación del uso de las FRE se realiza tradicionalmente sobre la base de motivos puntuales y no sobre la evaluación científica implicando que muchas veces fracasen.

A partir de la situación problémica detectada se evidencia como **problema profesional**: insuficiencias en el proceso de toma de decisiones limitan la ubicación de los proyectos eólicos a generalizar en el territorio oriente norte de Cuba.

Esta investigación tiene por **objeto de estudio** las fuentes renovables de energía.

El **campo de acción** de la investigación son los métodos de ayuda a la toma de decisión con criterios múltiples para la selección de la mejor instalación de los proyectos eólicos en el norte oriental.

Así, la investigación tiene como **objetivo general**: realizar un estudio para la evaluación de los proyectos de montajes y construcción de parques eólicos a instalar y generalizar en el norte oriental, para seleccionar el mejor proyecto a instalar y generalizar en norte oriental de Cuba mediante métodos multicriterios, específicamente relacionadas con la toma de decisiones pertenecidas con los sistemas que utilizan la energía proporcionada por el viento, digamos eólica.

Los **objetivos específicos** son:

1. Elaborar el marco teórico-práctico referencial de la investigación a partir de la consulta de la literatura especializada sobre FRE, el proceso de toma de decisiones, los MCDM, la energía eólica en el oriente norte del país;
2. Seleccionar la metodología un sistema multiobjetivos con sus métodos y herramientas asociadas que nos permita contribuir a una mejora en la toma de decisión sobre proyectos eólicos a instalar y generalizar en el norte oriental de Cuba;
3. Aplicar la metodología en el proceso de toma de decisión de la Unión Nacional Eléctrica Sucursal Holguín, contribuyendo así a disminuir los contratiempos en este ámbito de la inversión.

La investigación plantea como **idea a defender**: el estudio realizado contribuye a mejorar el proceso de la toma de decisión por los directivos de la Unión Nacional Eléctrica en cuanto a los proyectos a instalar y generalizar en el norte oriental de Cuba, a través de métodos de selección con criterios múltiples. Con esto es posible ampliar el diapasón de posibilidades a tener en cuenta a la hora de tomar la decisión correspondiente en materia de construcción y montaje de nuevos parques eólicos.

La investigación identifica como aportes la facilitación, generalización y ubicación de los parques eólicos, estudiándose profundamente la sostenibilidad en sus tres pilares: económico, social y ambiental y criterios del ciclo de vida, vinculándose la sostenibilidad con este último. Los beneficios esperados de la investigación se expresan en la reducción del tiempo, recursos materiales y daños ambientales con una mejor toma de decisión en la instalación y generalización de proyectos eólicos.

En el desarrollo de la investigación se utilizan los métodos teóricos:

- Histórico-lógico: este se aplicó para confeccionar el Capítulo 1 de la investigación permitiendo identificar lo que se ha investigado sobre el tema objeto de estudio, a fin de sustentar el objeto y el campo de la presente investigación;
- Inducción-deducción: se aplicó en la evaluación de las diferentes tendencias que intervienen en el estudio a través de procedimientos multicriterio en la toma de decisión más objetiva para la ubicación de los parques eólicos;
- Análisis y síntesis: se utilizó para identificar los factores principales -y sus características- que influyen en la toma de decisión sobre las localizaciones geográficas de los parques eólicos, así como su interrelación;
- Modelación: se utilizó durante la concepción y desarrollo en el estudio a través de procedimientos multicriterio en la toma de decisión más objetiva para la ubicación de los parques eólicos.

En el desarrollo de la investigación se utilizan los métodos empíricos:

- Observación científica: se utilizó para observar las consecuencias en el estudio a través de procedimientos multicriterio en la toma de decisión más objetiva para la ubicación de los parques eólicos;

- Entrevista: como método para conocer el criterio de los directivos, funcionarios y trabajadores en la Unión Nacional Eléctrica Sucursal Holguín;
- Consulta de documentos: como técnica para la recopilación de la información.

Estructura de la tesis

El contenido de esta tesis se ha organizado en una introducción, dos capítulos, conclusiones generales, recomendaciones, un apartado de referencias bibliográficas y un apartado de anexos. En el Capítulo 1, “Marco Teórico-Práctico Referencial de la Investigación Sobre la Toma de Decisión en las FRE”; en él se expone la revisión bibliográfica realizada, donde se analizan los aspectos esenciales relacionados. Se presenta un análisis de las tendencias actuales en la ubicación de los parques eólicos. En el Capítulo 2, “Caracterización del Caso de Estudio y Resultados de la Investigación”, se desarrolla la metodología para concebir la panorámica multicriterio de ayuda a la toma de decisión, aplicado a la energía eólica. Se realiza el análisis conclusivo de la factibilidad de realizar el estudio a través de procedimientos multicriterio en la toma de decisión más objetiva para la ubicación de los parques eólicos. Las conclusiones y las recomendaciones derivadas de la investigación; hacen referencia a la bibliografía utilizada y en los anexos se muestran datos complementarios esenciales para facilitar la comprensión de la investigación desarrollada.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO-PRÁCTICO REFERENCIAL DE LA INVESTIGACIÓN SOBRE LA TOMA DE DECISIÓN EN LAS FRE

En el presente capítulo se detallan los tipos de fuentes renovables de energía (FRE) que existen, así como, su estado de utilización en el mundo y en Cuba. Sobre la toma de decisión se exponen sus conceptos, elementos importantes de su historia y desarrollo, y la interrelación con las tecnologías de uso de las FRE. Los métodos, y herramientas utilizadas, para facilitar el trabajo del decisor. En el desarrollo del trabajo investigativo se referencia también las metodologías que permitan tener en cuenta la mayor cantidad de variables en lo que en materia de toma de decisiones referidas a la FRE se encontraron. Refiriéndose también a la situación actual de las investigaciones, innovaciones y uso de las FRE en nuestro país, abordando la de nuestra zona geográfica específicamente.

1.1 Las fuentes renovables de energía

Las fuentes de energías renovables son aquellas a las que se puede recurrir de forma permanente porque son inagotables, por ejemplo, el viento, el sol o el agua. Con el triunfo de la Revolución se desarrollaron planes de formación y preparación del personal, encaminadas a desarrollar las fuentes de energías renovables y con ello la industria y tecnología que mueve la moderna sociedad.

1.1.1 Desarrollo de las fuentes renovables de energía en el mundo

La humanidad se enfrenta a grandes retos, uno de estos grandes retos es disponer de una fuente energética, fiable, de fácil acceso, y más que todo sustentable; fiable para ser segura en el tiempo, accesible en dependencia una adecuada política de precio y la sustentabilidad, deberá estar ligada al cumplimiento de los objetivos del desarrollo sostenible, para con la generaciones futuras.

La generación mundial de energía eléctrica, tiene gran importancia para el desarrollo humano, se ha incrementado durante los últimos cincuenta años a un ritmo varias veces superior al del crecimiento de la población. El consumo promedio de electricidad correspondiente a cada habitante del planeta, en todas sus aplicaciones domésticas, industriales y de transporte, ronda hoy los 200kWh mensuales, aunque su distribución es muy desigual (Marrero Figueredo et al, 2007).

Más de 65% de este consumo lo satisfacen plantas termoeléctricas que queman carbón, gas o petróleo. La demanda creciente de estos combustibles no renovables ha desatado un continuo aumento de los precios que afecta a la economía mundial. Además, la combustión de tales combustibles fósiles produce gases, como el dióxido de carbono (CO₂), cuyo efecto invernadero provoca el incremento de la temperatura de la superficie del planeta, lo cual trastorna cada vez más los regímenes de lluvia, acrecienta la ocurrencia de huracanes y provoca el ascenso del nivel de los mares, entre otras consecuencias nefastas a escalas local y global (Marrero Figueredo et al, 2007).

Aunque actualmente el consumo promedio de electricidad de un habitante ronda los 200kWh mensuales (incluidos los gastos de electricidad, tanto industriales y de transporte como domésticos), el mayor consumo por habitante lo registra Islandia, con 2 300kWh mensuales; y los de menor representación son Etiopía y Haití, con 2,5kWh al mes. El latinoamericano medio consume 133kWh al mes. Como país, el mayor consumidor absoluto es Estados Unidos, con 3 803TWh/a, seguido por la República Popular China, con 1 776TWh/a.

Esto evidencia que actualmente la mayor parte de la electricidad generada se obtiene mediante la combustión de combustibles fósiles (carbón, gas y petróleo). Esa ha sido la realidad durante muchos años, pero dos serios problemas se oponen a la continuación indefinida de tal estado de cosas:

- El rápido incremento que están sufriendo los precios de los combustibles fósiles, provocado sobre todo por el creciente desequilibrio entre la oferta y la demanda
- El calentamiento global debido al aumento de la concentración de los gases de efecto invernadero en la atmósfera, en primer lugar el dióxido de carbono (CO₂), que amenaza con un desastre climático de imprevisibles consecuencias.

El primer problema ya está desestabilizando las economías de varios países que importan combustibles fósiles. El segundo problema no es menos serio, pues se pronostica un incremento, en número e intensidad, de desastres naturales (tormentas, huracanes, inundaciones, sequías), así como la subida del nivel de los mares, entre otros efectos funestos, debido al incremento de la temperatura de la superficie de la Tierra y su atmósfera.

Se hace muy necesario la utilización de las denominadas Fuentes Renovables de Energía (FRE) para esto un importante grupo ha estado y está trabajando en el desarrollo de estas tecnologías entre las cuales se destaca las que se describen a continuación:

1.1.2 Tipos de energías renovables

La **energía fotovoltaica** es el proceso de convertir directamente en electricidad la energía proveniente del Sol. La celda fotovoltaica o celda solar es el elemento encargado de transformar la energía radiante solar en eléctrica y su funcionamiento se basa en el fenómeno físico denominado efecto fotovoltaico. Fue descubierto en 1839 por el físico francés Edmund Becquerel, quien obtuvo una tensión eléctrica al iluminar un contacto de platino revestido con plata que estaba inmerso en una solución electrolítica. En 1873 Willoughby Smith observó que el selenio era sensible a la luz. Cuatro años más tarde William Adams y Richard Day observaron el efecto fotovoltaico en el selenio y en 1894 Charles Fritz desarrolló la primera celda solar de selenio. En 1905 Albert Einstein publicó su trabajo con la explicación del efecto fotovoltaico, por el que recibió el Premio Nobel en 1921. Como fruto de las investigaciones y la aparición de los materiales semiconductores se crearon celdas solares a partir de estos materiales. Hoy la mayor parte de la producción de celdas solares es a partir del silicio. (Saunders Vázquez 2019)

El mercado de la energía solar fotovoltaica tuvo un año récord adicionando más de 39GW en el año 2013, para un acumulado global superior a 139GW. China mostró un crecimiento espectacular contando con cerca de un tercio de la capacidad global acumulada, seguido por Japón y EE UU. La energía fotovoltaica comienza a jugar un rol sustancial en la generación de electricidad en algunos países, particularmente en Europa, a la vez que se han reducido los precios de dicha tecnología. El interés se incrementa tanto desde el punto de vista corporativo como a nivel comunitario, y el tamaño de los sistemas a gran escala continuó creciendo. Muchos fabricantes continúan preparándose y se mantienen a la expectativa del crecimiento de la demanda de las tecnologías fotovoltaicas. Los datos preliminares del mercado muestran un mercado creciente en 2019 por primera vez en dos años. Por lo menos se han instalado y conectado a la red sistemas fotovoltaicos en el mundo con una

potencia de la sostenibilidad que se centra en la habilidad del proyecto de mantener su operación, servicios y beneficios durante toda la vida del proyecto, se debe considerar al macroeconomía, micro, social y político en que se desarrolla el proyecto. Con el fin de identificar las debilidades que muestra el sistema y fortalecer sus puntos débiles para asegurar su permanencia una vez que se haya tomado una alternativa como solución. (Saunders Vázquez 2019)

La energía hidroeléctrica constituye la fuente más flexible de generación de energía disponible y es capaz de responder a las fluctuaciones de la demanda en cuestión de minutos, la entrega de energía de carga base y sirve para el almacenamiento de energía cuando existen embalses asociados. Una ventaja clave de esta fuente es su inigualable capacidad para satisfacer las fluctuaciones de carga minuto a minuto, aun cuando las centrales térmicas también tienen esa capacidad, pero sus tiempos de respuesta no son ni tan rápidos ni tan flexibles. Como resultado de esta flexibilidad, la energía hidroeléctrica es un complemento ideal para las FRE variables, y puede satisfacer la demanda de energía cuando existen disminuciones o aumentos en la generación de energía solar o eólica. (Saunders Vázquez 2019)

Aproximadamente 70% de la superficie terrestre está cubierta por agua, por lo que este recurso ha sido explotado por cientos de años y se ha caracterizado por un constante desarrollo tecnológico pasando desde la rueda de madera, que convertía un bajo porcentaje de energía hidráulica en energía mecánica útil, a los modernos turbogeneradores que giran a 1500 revoluciones por minuto y producen energía eléctrica con muy altos rendimientos, lo que hace que actualmente la energía hidráulica se destine fundamentalmente a la generación de electricidad. (Saunders Vázquez 2019)

La energía solar térmica funciona con un colector solar de placa. Consiste en una plancha de color negro, provista de conducciones por las que circula el fluido que se calentará. Entre los colectores de placa cabe mencionar los no acristalados, que permiten obtener calor a temperaturas en varios grados superiores a la temperatura ambiente; los acristalados, que están cubiertos de una lámina de vidrio u otro material transparente paralelo a la placa y separado de ella unos centímetros; permiten generar calor a temperaturas de entre 30°C y 60°C; y de vacío, similares a

los acristalados, con la diferencia de que se ha vaciado el aire contenido entre la placa y la cubierta de vidrio, y que permiten obtener calor a temperaturas entre 50°C y 120°C, aproximadamente. (Saunders Vázquez 2019)

Para resistir la presión del vacío las placas de este tipo de colectores suelen estar situadas en el interior de tubos de vidrio, que hacen al mismo tiempo las veces de cubierta y de recipiente. Las placas de vacío llevan un recubrimiento negro especial denominado superficie selectiva que ayuda a evitar la reemisión del calor absorbido; ese mismo recubrimiento se utiliza también en las placas acristaladas que no son de vacío. La eficiencia típica de los colectores solares utilizados en el intervalo de temperaturas idóneo se extiende entre 40% y 70% a pleno sol. (Saunders Vázquez 2019)

El biogás es un gas combustible que se genera en medios naturales o en dispositivos específicos, por las reacciones de biodegradación de la materia orgánica, mediante la acción de microorganismos y otros factores, en ausencia de oxígeno. Se podrá utilizar todo tipo de materias orgánicas o biológicas para la generación de biogás, siempre y cuando estas puedan ser reducidas por microorganismos. La producción de biogás por descomposición anaeróbica es un modo considerado útil para tratar residuos biodegradables, ya que produce un combustible de valor además de generar un efluente que puede aplicarse como acondicionador de suelo o abono genérico. La digestión anaerobia puede aplicarse a excedentes de cosechas, cultivos energéticos, residuos agrícolas, residuos ganaderos, lodos procedentes de depuradoras de aguas residuales o efluentes industriales. Estos residuos se pueden tratar de forma independiente o conjunta (codigestión). (Saunders Vázquez 2019)

El biogás resultante de aguas residuales urbanas y efluentes industriales generalmente es producido en las mismas plantas depuradoras. Los residuos agrícolas y ganaderos pueden ser tratados en pequeñas plantas de biogás a nivel de granja o grupo de granjas. Es una fuente de energía con amplias potencialidades de uso. En el caso de Cuba, en la política de implementación de las FRE, el uso del biogás se contempla dentro del programa de ahorro de energía y no para la generación de electricidad. A pesar de la experiencia negativa con la instalación de la

tecnología necesaria para el aprovechamiento del gas generado en el vertedero de la calle 100, resultaría importante valorar las posibilidades de implementar el aprovechamiento de los residuos sólidos urbanos, por sus connotaciones para el medioambiente. De igual manera, el Ministerio de la Agricultura (MINAGRI) debe implementar un programa integral de fomento de las plantas de biogás, junto con la industria nacional, que debe articularse para producir y comercializar las tecnologías de aprovechamiento directo del biogás generado. (Saunders Vázquez 2019)

La biomasa se define como la materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado utilizable como fuente de energía, 1 indicándose también que la biomasa es toda sustancia orgánica renovable de origen tanto animal como vegetal. Existen diferentes tipos de biomasa, las cuales pueden ser utilizadas como recurso energético, además de distintos métodos que la transforman en energía aprovechable. La biomasa es una materia prima que puede utilizarse directamente en la fabricación de combustibles y la producción de energía térmica y/o eléctrica. Se considera oportuno señalar que los biocombustibles no son solamente líquidos, como el bioetanol o el biodiesel, que constituyen los más connotados, sino que también existen los biocombustibles sólidos y gaseosos. La biomasa sólida puede sustituir directamente a los combustibles fósiles, como es el caso de los residuos agrícolas e industriales, los cuales se emplean como fuente de energía térmica; como principal biocombustible gaseoso se encuentra el biogás, que puede obtenerse a partir de la fermentación anaeróbica de residuales de producciones agrícolas e industriales. (Saunders Vázquez 2019)

Gasificación de la biomasa: Es la obtención de un gas combustible a partir del suministro de una cantidad tal de oxígeno que no se produzca la combustión de la biomasa; este gas se denomina gas pobre. Su valor calórico es de 1500-1800kcal/kg. El gas natural tiene un valor calórico de 6000kcal/kg. A presión atmosférica el gas pobre tiene diversos usos. (Saunders Vázquez 2019)

La energía marina: esta consiste en aprovechar las potencialidades de los mares y océanos. Las tecnologías pueden ser clasificadas, en función del recurso marino que aprovechen, en:

- La oscilación creada por las olas, conocida también como energía undimotriz, considerada como muy irregular, ha implicado la construcción de múltiples tipos de máquinas para hacer posible su aprovechamiento
- Utilizando el movimiento natural de ascensos (pleamar) o descensos (baja mar) de las mareas o energía mareomotriz
- Aprovechando el movimiento de las corrientes marinas y los flujos de los estuarios.
- Utilizando las diferencias de temperaturas entre la superficie y las profundidades del mar, conocida como energía maremotérmica u OTEC
- Aprovechando las variaciones de salinidad
- Se considera además como energía del mar, la producida por los vientos marinos (eólica offshore) y la producida por el aprovechamiento de la biomasa marina, principalmente las algas, estas también se analizan o analizan en un contexto no marino como la eólica y biomasa (Saunders Vázquez 2019).

Comparada con otras energías se considera que las principales ventajas de esta energía son: alta disponibilidad; predecible y la predicción meteorológica es suficiente para evitar grandes tempestades; concentrada; no contamina. Se usan los conocimientos los efectos de las tempestades sobre las plataformas petrolíferas para evitar daños a estos mecanismos. Llevar a tierra la electricidad es más simple que llevar gas o petróleo y podría utilizarse el hidrógeno como vector producido mediante electrólisis; las inversiones en instalaciones fijas son mucho menores que las necesarias en energía eólica, térmica, fotovoltaica o biomasa. No es una tecnología dominante porque existen distintos modelos de aprovechamiento energético, y por lo tanto diferentes dispositivos. (Saunders Vázquez 2019).

El hidrogeno como fuente de energía es el elemento químico representado por el símbolo H y al que se le asigna el número atómico 1; en condiciones normales de presión y temperatura es un gas biatómico (H₂), incoloro, inodoro, insípido, no metálico y altamente inflamable. Con una masa atómica de 1,00794u, el hidrógeno (H₂) es el elemento químico más ligero y es también el elemento más abundante; se encuentra presente aproximadamente en 75% de los elementos que nos rodean. Por su alto valor energético y por su capacidad para almacenarse es potencialmente

viable para la producción de electricidad y como combustible para el transporte, lo que influirá en la reducción a escala mundial de las emisiones de CO₂ a la atmósfera, lo cual conlleva a que las investigaciones estén centradas en la creación, ampliación e integración de una infraestructura para la utilización a gran escala. (Saunders Vázquez 2019).

La necesidad de reducir las emisiones de CO₂ para evitar el efecto invernadero que provoca y las consecuencias previsibles del calentamiento de la Tierra y del posible cambio climático, hace que actualmente se estudie con profundidad la obtención de hidrógeno, a partir del agua, por métodos térmicos. Conseguir que el hidrógeno sea una alternativa energética y llegue a utilizarse en múltiples sectores económicos requiere producirlo en las cantidades necesarias de manera eficiente, segura y medioambientalmente aceptable, y a precios competitivos con otras opciones. Es necesario desarrollar tecnologías para su uso final en distintas aplicaciones y diseñar infraestructuras seguras y eficientes que les faciliten a los usuarios su utilización. Se requiere realizar un importante esfuerzo de I+D, incluyendo desarrollos en ciencia básica, para poder impulsar tecnologías emergentes, basadas en el conocimiento científico disponible, capaces de reducir los costos actuales de las tecnologías de producción y almacenamiento. (Saunders Vázquez 2019)

La energía geotérmica es la que se obtiene mediante el aprovechamiento del calor del interior de la Tierra. El término geotérmico viene del griego *geo* (Tierra), y *thermos* (calor); literalmente “calor de la Tierra”. El interior de la Tierra está caliente y la temperatura aumenta con la profundidad. Las capas profundas, pues, están a temperaturas elevadas y a menudo a esa profundidad hay capas freáticas en las que se calienta el agua: al ascender, el agua caliente o el vapor produce manifestaciones en la superficie, como los géiseres o las fuentes termales, utilizadas para baños desde la época de los romanos. Actualmente, el progreso en los métodos de perforación y bombeo permiten explotar la energía geotérmica en numerosos lugares del mundo. (Saunders Vázquez 2019)

Se produjo por primera vez energía eléctrica a partir de la geotérmica en Larderello, Italia, en 1904. Desde ese momento, el uso de la energía geotérmica para electricidad ha crecido mundialmente. Los usos medicinales y turísticos son los más

antiguos y tradicionales de aprovechamiento de esta energía. Además, tiene aplicaciones en calefacción de viviendas, agricultura, piscicultura e industria en general. Uno de los principales puntos calientes del planeta está ubicado en la cuenca del Pacífico, en la zona denominada Anillo de Fuego, por su gran cantidad de volcanes. También en Alaska, California, Oregón, Nevada e Islandia. Sin embargo, la energía geotérmica abarca toda la superficie terrestre, donde existen zonas de más calor y zonas de menos calor, por lo que para suministrarle energía a una casa, por ejemplo, no es necesario estar sobre un punto caliente, sino simplemente excavar a la profundidad necesaria. (Saunders Vázquez 2019)

Si se explota correctamente, la energía geotérmica podría verdaderamente adjudicarse de un rol importante en el balance de energía de algunos países. En ciertas circunstancias, incluso, recursos geotérmicos de pequeña escala, resulta apta para solucionar numerosos problemas locales y mejorar la calidad de vida de pequeñas comunidades aisladas. El valor actual de 12,8GW instalado en todo el mundo es un resultado importante, lo que confirma la tendencia iniciada en 2010 de un crecimiento, principalmente de los proyectos de desarrollo de temperatura media-baja a través de las plantas binarias, y un importante esfuerzo por la realización de todos los proyectos económicamente viables en el mundo. (Saunders Vázquez 2019)

Según las previsiones de varios expertos, si se alcanza la instalación de 140MW de capacidad hasta 2050, sería posible producir a partir de energía geotérmica, hasta 8,3% de la producción total de electricidad en el mundo. Por otra parte, 4 países pueden cubrir 100% de su demanda total con energía geotérmica. El ahorro por generar electricidad a partir de la energía geotérmica en todo el mundo puede ser de 1000 millones de toneladas de petróleo anuales. En Cuba, en años recientes, se realizó un estudio para valorar la posibilidad del uso de esta fuente de energía. Los resultados constataron que el país no posee potencial ni posibilidades para el uso de las tecnologías de generación de electricidad con energía geotérmica. No obstante, debe valorarse la aplicación de tecnologías de aprovechamiento de energía geotérmica a bajas temperaturas, por su potencial contribución a la eficiencia energética, el ahorro en la industria y en el sector público. (Saunders Vázquez 2019)

La energía bioeléctrica (Rubio González 2015) En los últimos tiempos se ha comenzado a escuchar en el argot del sector azucarero cubano, en la prensa e incluso, en reuniones de alto nivel, el término bioeléctrica y muchos se preguntan ¿qué es una bioeléctrica?” Ante todo, tengamos presente que el término bioeléctrica es una reducción del vocablo central bioeléctrica, que se refiere a una central eléctrica que genera electricidad a partir de la biomasa y que es un término netamente cubano. Actualmente una decena de naciones son paradigmas en el uso de las bioeléctricas: Isla Reunión, India, Isla Mauricio, Australia, Isla Guadalupe, Belice, Guatemala, Estados Unidos, Costa Rica, China y particularmente Brasil, que posee 160 de 188 existentes en el orbe. Globalmente estas unidades tienen un potencia instalada de más 2800 megavatios, y de esa cifra al menos dos mil corresponden a Brasil, secundado en cuanto a cantidad de bioeléctricas por India (14), Isla Mauricio (tres), Isla Reunión (dos), mientras que los restantes países mencionados poseen una individualmente.

Para Cuba (Rubio González 2015) la biomasa constituye una de las principales fuentes renovables de energía y la aplicación de las bioeléctricas como solución tecnológica para su uso en la generación de electricidad es un paso de avance en cuanto a eficiencia y rentabilidad. Se demuestra que hay una significativa madurez tecnológica en las tecnologías asociadas a esta solución, pero también la existencia de significativas barreras a nivel nacional e internacional. La contribución al medioambiente y al desarrollo de las localidades es un aspecto que distingue estas aplicaciones de las fuentes renovables de energía.

La energía eólica cuyo término viene del latín *Aeolicus*, perteneciente o relativo a Eolo, dios de los vientos en la mitología griega. La energía eólica ha sido aprovechada desde la antigüedad para mover los barcos impulsados por velas o hacer funcionar la maquinaria de molinos al mover sus aspas. En el ya lejano 1888 Charles F. Brush marcó un hito histórico al diseñar y construir la primera turbina eólica de funcionamiento continuo para generar electricidad, cuyo rotor tenía un diámetro de 17m y 144 palas fabricadas con madera de cedro y una potencia de 12Kw y servía para cargar baterías en el sótano de su casa. (ECURED)

En el desarrollo y uso de estas FER han jugado un importante papel la nanotecnología como ciencia interdisciplinaria que entronca con la química, la física, la ciencia de materiales, la biología, la biofísica, las ciencias atmosféricas y la medicina, por solo mencionar algunas. Tiene implicaciones por lo tanto en diferentes campos del conocimiento y de la investigación, como nuevas terapias, los procesos que ocurren en la atmósfera o las fuentes renovables de energía, pasando por su aplicación en la obtención de nuevos materiales capaces de tener mayor resistencia al desgaste, que no se mojen, más dúctiles, ligeros y resistentes. Por ello se continúa investigando para obtener materiales que puedan aplicarse en las tecnologías de aprovechamiento de las fuentes renovables de energía. Se espera que en corto plazo ya se obtengan productos comercializables y con menores costos que se apliquen en el almacenamiento de energía (como las baterías), en los paneles fotovoltaicos o en las celdas de combustible. Consideramos que este tema requiere un seguimiento, sobre todo de las principales investigaciones y proyectos que se desarrollan a nivel internacional y nacional. (Saunders Vázquez 2019)

1.1.3 Desarrollo del uso de la energía eólica

Desde el decenio de 1980, (Saunders Vázquez 2019) cuando comenzó el desarrollo de los primeros aerogeneradores comerciales, su capacidad instalada, la eficiencia y diseño visual han evolucionado considerablemente. Aunque se han explorado varias y diversas ideas en el diseño de la turbina ideal, se ha consolidado un diseño en particular: el aerogenerador de eje horizontal de tres palas o aspas. Hoy los estos son más altos y grandes. En este período, los diámetros del rotor han aumentado hasta diez veces. El tamaño promedio de los aerogeneradores en 2017 fue de 1,9MW, siendo de 2,7MW en Alemania; 1,8MW en EE. UU.; 1,7MW en China y 1,3MW en la India. El aerogenerador más grande comercialmente disponible es la turbina de ENERCON E-126, con 7,6MW.

El principal impulsor para el desarrollo tecnológico en la energía eólica ha sido el mercado offshore con varios inconvenientes pues colocar las turbinas en el fondo del mar exige cimentaciones más óptimas, aun cuando esas cimentaciones, la producción de electricidad y su transmisión a tierra aumentan los costos. En el caso de los aerogeneradores que se utilizan en tierra, la capacidad de diseño se ha

estabilizado con un promedio de 1,9MW. Esto ha posibilitado la producción en serie de miles de turbinas, así como el aumento de fiabilidad y la eliminación de diversos problemas en la producción. También se trabaja en el mejoramiento de los sistemas de control para asegurar una mejor compatibilidad con la red eléctrica. (Saunders Vázquez 2019)

La potencia eólica en todo el mundo llegó a 336 327MW a finales de junio de 2018, de los cuales 17 613MW se añadieron en los primeros seis meses de 2018. Este aumento es sustancialmente mayor que en el primer semestre de 2017 y 2016, cuando se añadieron 13,9GW y 16,4GW eólicos. De los 336GW instalados en todo el mundo, 37% de esa capacidad corresponde a los países que forman parte del bloque de la Unión Europea (28 en la actualidad) y 36% a los países que forman el BRICS (Brasil, Rusia, India, China Sudáfrica). A China le corresponde 29% de la capacidad mundial instalada y 19% a los Estados Unidos, los cuales no han aumentado mucho en la actualidad por la situación que atraviesa el mundo en el enfrentamiento a la pandemia. (Saunders Vázquez 2019)

A pesar de su poco crecimiento, Dinamarca sigue siendo un digno ejemplo del interés de incrementar el uso de la energía eólica, pues 33,2% de la producción de electricidad del país es cubierta por la generación eólica. En Australia y Oceanía los acontecimientos positivos ocurridos en Australia, cuya energía eólica aumentó 699MW, equivalente a un crecimiento de 23% en comparación con finales de 2017, similar a 2015 y 2016, se han visto interrumpidos por el nuevo gobierno. No hay nuevos parques eólicos en Nueva Zelanda. (Saunders Vázquez 2019)

En varios países la energía eólica comienza a suponer una importante contribución al suministro eléctrico. Setenta y un países tienen más de 10MW instalados y en 24 de ellos la capacidad es de 1GW. El crecimiento del mercado de la energía eólica es debido a diferentes factores, como son: es una fuente de energía propia y abundante que está permanentemente disponible y sin costos de combustible; la importante baja que ha experimentado en sus costos, la gran capacidad que tiene su industria para generar empleo (en 2013 contaba con 834 millones de trabajadores), etc. Es una tecnología que ha llegado a ser un importante negocio. Para satisfacer la

demanda, los principales fabricantes de aerogeneradores están habilitando fábricas de millones de dólares alrededor del mundo. (Saunders Vázquez 2019)

Cuba, en los últimos años, se ha unido a los países que aprovechan esta energía con cuatro parques eólicos, que suman 11,7MW, representan solo el 0,1% de la matriz energética. En la política para el desarrollo prospectivo de las fuentes renovables y el uso eficiente de la energía, aprobada en 2014, se prevé la instalación, hasta 2030, de 633MW para aprovechar la energía del viento. Cuba se ha insertado en el concierto mundial que utiliza esta fuente renovable y debe incrementar en los próximos años su capacidad instalada y la participación de esta fuente en la matriz de generación. (Saunders Vázquez 2019)

1.2 Toma de decisiones

Se puede afirmar que un individuo o colectivo tienen un problema de decisión al plantear un conjunto bien definido de alternativas o cursos de acción posibles y un conflicto tal que es necesario elegir una de las alternativas o bien establecer en ese conjunto las preferencias. Una buena decisión es cuyas consecuencias han resultado favorables. En la mayoría de las veces no se pueden comparar estas entre una alternativa las otras, por ese motivo también el proceso mediante el cual se adoptó la elección final para poder concluir o no que es la mejor posible se debe tener en cuenta la mayor información posible en el momento de tomar dicha decisión.

Se entiende por una buena decisión (León 2001) cuando tiene las características siguientes:

- Es una decisión en la que se ha trazado el objetivo que se quiere conseguir
- Se ha reunido toda la información relevante
- Se han tenido en cuenta las preferencias del decisor.

Otros autores plantean que la toma de decisiones es aparentemente sencilla, es algo cotidiano y natural que se hace diariamente de forma casi inconsciente. Por lo que se puede hablar del hombre como un “homo decisonal”, ya que la misma toma aproximadamente entre seis mil y ocho mil decisiones diarias. En la toma de decisiones están implícitas las distintas alternativas o acciones que pueden ser tomadas por el DM y que constituyen las variables controladas en el proceso. El problema del DM es evaluar las distintas alternativas y seleccionar la mejor de

acuerdo al objetivo trazado. Cuando se adopta una decisión esta se basa en datos (información) sobre los resultados obtenidos en el pasado y establece una línea de acción en el presente (decisión) que dará lugar a un resultado en el futuro. Fallos que alteran el valor, la calidad y la credibilidad de la decisión. Utilización de una información errónea, desactualizada, o irrelevante. Utilización de una muestra mal seleccionada para desarrollar el proceso de análisis. Dejarse influir por prejuicios o sentimientos afectivos. Absolutizar la importancia de los promedios, ignorando el valor de los valores extremos. Interpretación y/o conclusiones equívocas. Análisis efectuado bajo un único prisma en relación con la posición social, económica o administrativa. Absolutizar la certeza cuando se está en presencia de incertidumbre. Keeny definía, en 1982, la toma de decisiones como “una formalización del sentido común para aquellos problemas demasiado complejos en que este no puede ser utilizado de modo informal”. Es decir, podemos definir decisión como la elección entre varias alternativas posibles, teniendo en cuenta la limitación de recursos y las necesidades del agente que nos plantea el problema.

1.2.1 Los métodos para la toma de decisión multicriterio clásicos (MCDM).

Los métodos utilizados forman parte de la metodología de toma de decisión multicriterio y otras metodologías pues fácil acceso desde cualquier ámbito y lugar que encuentre el decisor. Puesto que se debe tomar una decisión seleccionado la alternativa que mejor cumpla con los requisitos evaluados, necesitaremos información sobre cada una de las alternativas y sus consecuencias en el problema. Analizamos los resultados obtenidos con la opción elegida y los integramos con la información ya evaluada, tendremos la base de una nueva decisión a implementar, pudiendo establecer así un proceso continuo de mejora o retroalimentación (White, 1990).

Los métodos de ayuda a la toma de decisión no buscan la solución óptima de un problema, pues en la realidad es común que no exista una alternativa ideal. Por ello trataremos de buscar, según los grupos de metodologías, la solución que mejor respuesta proporcione al problema planteado:

1. Toma de decisión multiatributo (MADM): Enfocada a problemas en los cuales el número de alternativas se encuentra fijado, con lo cual el decisor únicamente debe

- seleccionar, clasificar u ordenar las diferentes alternativas. En esta categoría se puede encontrar los métodos con solución a priori y los métodos interactivos
2. Toma de decisión multiobjetivo (MODM): En esta variante de los procesos de toma de decisión las alternativas no están definidas al inicio del proceso, con lo que el decisor busca obtener o diseñar la “mejor” alternativa dentro de las limitaciones con los recursos disponibles
 3. Toma de decisión multicriterio (MCDM): En las palabras (Moreno Jiménez 1996) es el conjunto de aproximaciones, métodos, modelos, técnicas y herramientas dirigidas a mejorar la calidad integral de los procesos de decisión seguidos por los individuos y sistemas, esto es mejorar la efectividad, eficacia y eficiencia de los mismos y a incrementar el conocimiento sobre estos. Es el más completo de todos, pues combina a los anteriores, de los cuales se nutre bajo la forma estructural $MCDM = MADM + MODM$, lo cual implica es más completo y por ende cumple más fácil con las expectativas del decisor.

Estaremos ante un problema multiobjetivo en el caso de que se presenten tantas soluciones que se consideran infinitas estas alternativas; es decir tendremos un problema continuo, de naturaleza infinita, que será resuelto por medio de métodos de optimización para encontrar un conjunto de soluciones eficientes o factibles, no dominadas u óptimas, estas son aplicadas en condiciones de incertidumbre y trata de determinar entre las soluciones los resultados esperados. Este tipo de soluciones encuentra la alternativa óptima para un determinado problema bajo condiciones de incertidumbre. Su uso es limitado ya que para problemas en muchos sectores será muy difícil establecer si un resultado es más o menos deseable que otro debido a la cantidad de opciones bajo un mismo escenario.

Según Marrero Delgado (2001), la evolución histórica del paradigma decisional multicriterio existen varias etapas que a continuación relacionamos:

1. Finales del siglo XVIII, donde se presentaron trabajos de algunos teóricos franceses acerca de la elección social y el problema del voto
2. Finales del siglo XIX, se introduce los trabajos de Pareto, Óptimo de Pareto
3. Década de los 40, algunos teóricos hacen alusión al problema multicriterio hacen alusión al problema multicriterio, pero sin profundizar en el mismo

4. Década de los 50, aparecen los primeros trabajos sobre el análisis multicriterio fundamentalmente relacionados con la elección social, la teoría de las preferencias y la teoría sobre el vector eficiente
5. Década de los 60, individualización de la decisión multicriterio con su propia terminología y problemática aplicada de seleccionar una alternativa en presencia de múltiples criterios, surgimiento de los métodos clásicos
6. Década de los 70, aparición de gran cantidad de artículos científicos sobre el tema multicriterio, surge la Escuela francesa y norteamericana
7. Década de los 80, introducción de la informática a la toma de decisión multicriterio, se fortalece la escuela europea y norteamericana, surge la escuela del pacífico
8. Década de los 90, consideración del paradigma monocriterio, como un caso particular del multicriterio, desarrollo acelerado de este último
9. Siglo XXI, amplia divulgación y aplicación del paradigma multicriterio, en los países en vía de desarrollo, utilizándose en diversas áreas de las ciencias y campos de aplicación.

1.2.2 Qué se entiende por decisión. Definición.

En la actualidad existen multitud de métodos desarrollados entorno a la toma de decisión multiatributo, por ello resulta necesario realizar una clasificación de los mismos, según la ordenación desarrollada por Chen y Hwang en 1992, en ella se puede distinguir entre información ordinal, cardinal o estandarizada, según se muestra a continuación, figura del anexo 1 Modelo de métodos multiatributos, adaptado de Chen y Hwang, 1992

La evaluación y aprobación de proyectos entorno a la utilización de las FRE ha tenido su propia evolución histórica, pasando desde el enfoque privado hasta el social-ambiental lo cual ha sido impulsado fundamentalmente por la incorporación del desarrollo sostenible. Existen variadas metodologías las cuales no son homogéneas, teniendo en cuenta que el análisis tradicional tiene una proyección muy limitada para el presente momento histórico, jugando un papel muy importante entonces las metodologías de análisis multicriterio, dada la flexibilidad de estas y la conjugación de elementos cuantitativos y cualitativos determinando una evaluación mas integral. Las inversiones en este sector atendiendo a características propias fundamentalmente

abogando por el análisis sostenible, aparecen aquí un importante número de metodologías encaminadas a mejorar este proceso (Martín Barroso y Leyva Ferreioll 2017).

1.2.3 Agentes en el proceso de decisión

Según (Roy, 1985) Establecemos los tres agentes principales, en un problema de toma de decisión, de la siguiente forma:

Decisor, individuo o grupo de individuos que como indica su nombre, tiene como función tomar la decisión, es decir, a la vista de las observaciones recibidas deberá seleccionar la alternativa final que será implementada para la resolución del problema.

Analista, cuando existe, realiza la función de apoyo al decisor aconsejándole por medio del estudio pormenorizado de la formulación y el problema plantado.

Público o stakeholders, grupo social que sin participar activamente en el proceso de toma de decisión recibirá los impactos, ya sean positivos, negativos o neutros de la alternativa elegida como solución al problema plantado.

1.2.4 La toma de decisión en las fuentes renovables de energías

Señala Tekiner, Coit Felder 2010, que poder determinar o establecer un sistema con FRE o convencionales resulta una decisión compleja. El problema de planificar el aumento de la producción de energía eléctrica consiste en seleccionar tecnologías de última generación que se añaden a sistemas existentes. Definido por Meza, J. L C Yildirim Masud 2007 y 2009 como Power Generation Expansion Planning (PGEP) consiste en la apreciación de diferentes alternativas de proyectos para seleccionar la mejor, significa poder lograr determinar dónde, cuándo y qué tipo de tecnología utilizar. Con estas se debe satisfacer la demanda prevista determinando la capacidad de generación que se debe instalar y lo más importante la cantidad de energía a generar en periodos de tiempo oportunos con la intención de lograr una planeación a largo plazo.

La explotación de las FRE es una política que está causando interés debido al aumento de una conciencia ambiental y al incremento de los efectos negativos en la naturaleza del consumo de combustibles fósiles. El cambio de estas fuentes hacia otras más sostenibles requiere de expansión de las FRE y de otorgarle un uso más

apropiado (Yang Y. Ren J. Solgaard H. S. Xu D. & Nguyen T. T. 2018). En 2016 Michailos, Parker & Webb plantearon que la formulación de políticas para la sustitución de matrices energéticas tradicionales por la que utilizan las FRE deben realizarse sobre la base de la decisión multicriterio. Esta es una planeación muy compleja y sus proyectos hacen que este tipo de análisis se convierta en una herramienta indispensable en el proceso de toma de decisiones.

La toma de decisiones esté considerando entre otros aspectos complejos social, económico, tecnológico, factores ambientales como novedad en este proceso. Las técnicas para la toma de decisiones multicriterios han ganado popularidad y uso en el desarrollo y gestión de la energía sostenibles pues permiten solucionar problemas y establecer prioridades y sus combinaciones para la planificación más eficiente de las FRE. Estos métodos tratan el problema en presencia de múltiples objetivos requiriendo de un decisor para elegir entre criterios cuantificables o no y objetivos que pueden estar en conflicto teniendo en cuenta que la solución depende en gran medida de las preferencias de quien toma las decisiones (Álvarez González, Jiménez Borges, López Batista, Monteagudo Yanes 2021)

Con la búsqueda de un modelo que permita encontrar una escogencia de la mejor alternativa que permita la expansión al mínimo costo y con muchos más objetivos o criterios que dependen en gran medida de las condiciones de quien dirige la inversión. Esto puede lograrse con la optimización considerándolo más complejo y difícil de resolver en consecuencia con el escenario que puede involucrar múltiples objetivos o criterios (Moreno Rocha 2021).

1.3 Métodos de decisiones multicriterio.

El problema de toma de decisión multicriterio es la basada en el empleo de programación lineal. Está fue desarrollada por Harold William Kuhn y Albert William Tucker (1925), mediante el concepto de vector máximo, que permitió a la optimización multiatributo convertirse en una disciplina propia (Barba-Romero y Pomerol 1997). La primera reunión científica dedicada explícitamente a la metodología multiatributo, tuvo lugar durante la celebración del VIII Congreso de Programación Matemática, en el La Haya en 1970. En esta convención resultaron como triunfadoras las propuestas llevadas a cabo por (Roy, 1990) así como los

métodos multicriterio interactivos desarrollados por Benayoun, Tergny y Geoffrion (Barba-Romero & Pomerol, 1997). En 1972 en la Universidad de Columbia, (Hannan, 1981) organizaron la “First International Conference on Multiple Criteria Decision Making”, una nueva convención sobre las metodologías de Toma de Decisión Multiatributo donde se presentó la investigación sobre (Multicriterio, De, & Kuhniana, 2006); hasta consagrados científicos como (Multicriterio Et Al., 2006). Gracias a este congreso, los estudios sobre la problemática de métodos multiatributo se constituyeron como ciencia expresamente, hecho que queda expuesto mediante la publicación de las actas del congreso en 1973, por (Zeleny, 1973a, 1973b). Es durante esta serie de conferencias cuando se acuerda la formación del “Special Interest Group on Multiple Criteria Decision Making”. (Barba-Romero Casillas & Pomerol, 1997) (Barba-Romero & Pomerol, 1997). (Llewellyn, Boon, & Lewthwaite, 2018), afirman que los métodos de ayuda a la toma de decisión no buscan la solución óptima de un problema, pues en la realidad es común que no exista una alternativa ideal. Por ello trataremos de buscar, según los dos grandes grupos de metodologías, la solución que mejor respuesta proporcione al problema planteado. Según (Velázquez, Claudio, & Ravindran, 2010), para poder aplicar metodologías multiatributo debemos contar con un problema formado por al menos dos criterios de decisión o atributos, pudiendo estos estar enfrentados, y al menos dos alternativas que puedan ser valoradas por los atributos impuestos.

Alternativas: posibles soluciones al problema de decisión, entre las cuales el decisor puede elegir.

Atributos o Criterios: características, rasgos, cualidades, o parámetros que describen cada una de las alternativas. El número de atributos que describe las alternativas será elegido por el decisor o grupo de decisión. Estos pueden ser valorados de dos formas: cuantitativamente, si tenemos evaluaciones numéricas y cualitativamente, sino existe unidad de medida, siendo la medida subjetiva.

Pesos: parámetros que permiten reflejar las preferencias del decisor entre atributos.

Objetivo o Meta: delimita el deseo que se quiere satisfacer, indicando las dirección es de mejora según las preferencias del conjunto decisor. La alternativa resultante del proceso cumplirá los atributos establecidos.

En este momento se van a exponer la utilización de diversos métodos de decisión multicriterio como técnicas de aplicación a la valoración, lo cual se hará en su faceta original de metodología de toma de decisiones, para posteriormente desarrollar para dar cumplimiento a los objetivos de la presente investigación.

Método Máx.-Min. o pesimista En 1950, Wald sugiere que el decisor debe elegir aquella alternativa que le proporcione el mayor nivel de seguridad posible. El método Max-Min es conocido por ser el método empleado por los “pesimistas”, puesto que se basa en llegar a una solución para el problema planteado por medio de, en primer lugar, la elección del criterio peor valorado para cada una de las alternativas, quedándonos posteriormente con el valor más alto de los seleccionados, siendo su correspondiente alternativa la elegida. En este caso será necesario contar con información del entorno, es decir, la solución depende de los valores de todos los atributos para las distintas alternativas, expresado en términos matemáticos, la mejor alternativa será aquella que cumpla $A_{\text{óptima}} = (A_i / \max_i * \min_j x_{ij})$ por lo que en ocasiones, este criterio puede conducir a decisiones poco adecuadas.

Método Máx.-Máx. u optimista La metodología Max-Max es semejante a la explicada en el punto anterior, consiste en la elección de la mejor alternativa posible. Este criterio corresponde a un optimista pues el decisor supone que la naturaleza siempre estará de su lado, por lo que siempre presentara el estado más favorable en contraposición al método Max-Min. Una vez hayamos identificado estos datos, la mejor alternativa será aquella que mayor valor proporcione en su mejor valoración, es decir, aquella que tenga el número más alto. Si expresamos este método de forma matemática la mejor opción es $A_{\text{óptima}} = (A_i / \max_i * \max_j x_{ij})$. Al utilizar este método las pérdidas pueden ser elevadas si no se presenta el estado de la naturaleza adecuado, en ocasiones puede conducir a decisiones poco convenientes.

Método conjuntivo Ahora el decisor debe especificar un nivel mínimo aceptable para cada criterio, este valor servirá para eliminar todas aquellas alternativas que no alcancen dicho valor mínimo en alguno de sus atributos, de este modo el resultado de la matriz nos proporcionará todas las alternativas en las cuales cada uno de sus valores es apto para el decisor. En él se produce gran pérdida de información, puesto que no se analizan en ningún momento los criterios que, no superan el valor mínimo,

se trata de un método no compensatorio, puesto que la elección se realiza en base a el umbral establecido para cada criterio, por lo que las valoraciones para los criterios son independientes entre sí. En este caso no es necesario normalizar, pero debemos prestar atención en cuanto a la valoración del criterio, si este es creciente o decreciente, en el caso de ser creciente, los valores que superen el valor mínimo establecido para dicho criterio serán aceptables, lo contrario ocurrirá si el criterio es decreciente. Cuanto mayor sea el criterio peor será su valoración, de esta forma en un criterio decreciente aceptaremos aquellas alternativas en las cuales el valor numérico sea más bajo para el establecido para ese criterio.

Matemáticamente tenemos: $x_{ij} \geq x_j^0$ donde $j = 1; \dots; n$

Siendo x_j^0 el valor mínimo aceptable para el atributo j .

Método disyuntivo Para la aplicación de este método debemos establecer un valor mínimo para cada criterio, como en el punto anterior. La principal diferencia radica en la forma de establecer las alternativas válidas, en este caso, una alternativa resulta aceptable si en alguno de sus criterios supera el umbral establecido, sin necesidad de verificar los demás, de forma que con que al menos uno de los criterios resulte aceptable, la alternativa será elegida. Este puede ser desarrollado sin normalizar los datos que aporta el usuario, y también debemos prestar atención a si los criterios son crecientes o decrecientes, del mismo modo se trata de un método no compensatorio, un criterio no cambia su situación en función de los demás.

De forma matemática: $x_{ij} \geq x_j^0$ donde $j=1$, o $j=2$, o...o $j=n$

Siendo x_j^0 el valor mínimo aceptable para el atributo j .

Método asignación lineal Entre 1976 y 1978 Blin desarrolla el método de Asignación Lineal, este se corresponde con un compensatorio que requiere únicamente un preorden, por cada atributo. Siendo este proporcionado por el decisor al completar la matriz de datos principal, de esta forma conoceremos tanto la evaluación de las alternativas como pesos cardinales asignados. Como es enunciado nos encontramos ante un método semicualitativo, pues no es necesario conocer una asignación numérica de los atributos. La selección de alternativas en presencia de múltiples criterios, constituye uno de los problemas más importantes y frecuentes en el campo de la toma de decisiones (López, 1998).

Método Lexicográfico Si el decisor considera que los métodos ponderados enmascaran (este es una desventaja), los mejores atributos de una alternativa al tomar un promedio ponderado de los mismos serán interesante sobre el problema. A la hora de hablar de este método, debemos resaltar como característica principal del mismo, la importancia de los atributos individuales, puesto que se ejecuta mediante la eliminación secuencial por orden de importancia de los criterios para el decisor. La forma de encontrar la mejor solución para el problema se realiza por reducción de alternativas según el valor de sus criterios conforme a la ordenación de los mismos asignados. Si en un determinado paso hemos alcanzado la situación en la cual dos o más alternativas tengan el mismo valor para el atributo mejor puntuado en este momento, debemos mirar el siguiente atributo más valorado por el analista. La alternativa, de las empatadas en el mejor atributo, que contenga el valor más alto en el siguiente atributo será la alternativa elegida, en el caso de que el empate persista, repetiremos el proceso hasta encontrar un criterio en el cual las alternativas tengan diferentes valores. Con este método se puede elegir en primer lugar las alternativas que mejor valoración tengan para dichos atributos sin ser necesario normalizar, puesto que solo se comparan los valores dentro de un mismo atributo, el método lexicográfico se trata de un método no compensatorio, pues un atributo con buena valoración no hace que los demás también mejoren en su valoración. Según Marrero Delgado (2012), este es un método no compensatorio, para resolver problemas en que se conocen las preferencias ordinales de atributos dados. Se recomienda siempre que se tenga información referente a la importancia de cada uno de los atributos, no siendo necesario que se exprese a través de un peso o ponderación, sino ser capaz de realizar un ordenamiento de los atributos de acuerdo a la importancia.

Método de la dominancia Es perteneciente al conjunto de los métodos no compensatorios, los cuales en su sin fin de atributos no tienen en cuenta todos los criterios de decisión a la hora de seleccionar la mejor alternativa o a la hora de reducirlas. Se basa en la intensidad de dominancia entre pares de alternativas, debido a la preferencia, elección de una alternativa frente a otra u otras con las que es comparada, ante un problema concreto en el que el usuario otorga diferentes

valores a cada una de las opciones a elegir, se podrá obtener la preferencia entre alternativas, cuyo resultado será la matriz de dominancia total. Con el objetivo de reducir el conjunto de alternativas a valorar para hacer el procedimiento propuesto más rápido y eficiente es necesario eliminar aquellas alternativas que por sus características no formarán parte del conjunto solución debido al mal comportamiento de los indicadores obtenidos siendo estas las alternativas que reciben el nombre de alternativas dominadas. Se dice que una alternativa domina a la otra si en al menos uno de los criterios es mejor que la otra y en los demás es al menos igual, lo que equivale a decir que la mejor alternativa es no dominada concepto que coincide con la solución eficiente o solución Pareto optimal. El algoritmo matemático en cuestión es, si A_i domina a A_j entonces: $x_{ik} \geq x_{jk}$ $k = 1; \dots; n$. Mediante la matriz de dominancia total se calcula para cada alternativa si esta representa una dominancia total o no frente a las demás alternativas. En la matriz final se encontrará varias soluciones válidas, por lo que serán aceptables todas aquellas alternativas que no resulten dominadas en el proceso de elección. Dentro de las principales ventajas de este método podemos destacar su sencillez, este método será de gran utilidad en aquellas situaciones en las cuales la normalización sea compleja, puesto que no es necesario realizarla.

Método suma ponderada Calcula la ponderación de las alternativas como resultado del sumatorio del producto del peso de cada variable (calculado por Diakoulaki, Entropía o por ordenación simple, etc) por el valor que toma para esa alternativa la variable correspondiente. En el momento cual el analista nos proporciona más información acerca de los criterios del sistema, pasamos a hablar de métodos para la ayuda de toma de decisión cardinales. Cuando trabajamos con métodos cardinales entra en juego un nuevo término, la ponderación de atributos. Entendemos como ponderar la realización de un simple análisis estadístico, mediante el empleo de coeficientes de ponderación o pesos. Una vez que ha sido otorgado un peso para cada criterio, pasamos a calcular para cada alternativa la suma ponderada de sus atributos, obteniendo un valor para cada alternativa por medio del cual se ordenarán las diferentes soluciones. Se trata de un método compensatorio, pues los criterios en

los cuales una alternativa alcanza buena valoración servirán para contrarrestar aquellos en los que la alternativa estudiada obtenga puntuaciones menores.

Método producto ponderado Es muy parecido al de la suma ponderada, consiste básicamente en multiplicar los valores de cada alternativa. Se trata de un procedimiento para la toma de decisión que también está definido dentro de los métodos cardinales, puesto que el decisor debe proporcionarnos información sobre los criterios en base a sus preferencias, sin embargo, en este caso si será necesaria la normalización de los pesos a la hora de realizar la ponderación, del mismo modo debemos normalizar los valores de las alternativas en los criterios de estudio. La forma de implementar el método es similar al método anterior, sin embargo, en este caso estamos ante un método compensatorio no lineal, pues ahora las alternativas cuyos atributos adquieran valoraciones bajas resultan penalizadas frente a las alternativas que presentan mayor estabilidad, conseguirán mejor posicionamiento en la ordenación final aquellas alternativas que contengan valores más estables en sus atributos. Esto lo conseguimos mediante la multiplicación iterativa de los valores establecidos en los atributos para cada alternativa elevados al valor de cada criterio ponderado.

Programación por compromiso La idea básica consiste en utilizar el punto ideal como punto de referencia para el centro decisor, con este cada función objetivo alcanza su valor óptimo por lo que aceptar un comportamiento racional por parte del centro decisor consistirá en elegir aquel punto eficiente o zona del conjunto eficiente que se encuentre más próxima al punto ideal. Para poder medir la mayor o menor proximidad de un punto eficiente con respecto al punto ideal se introducirá en el análisis una función de distancia. Con estos sencillos ingredientes, Yu (1973) y Zeleny (1973; 1974) han desarrollado uno de los enfoques multicriterio de mayor potencia operativa y con un campo de aplicación más extenso. Por medio de este enfoque consideremos ir reduciendo el tamaño del conjunto eficiente, determinando aquellos subconjuntos del mismo que se encuentran más próximo al punto ideal y más atractivos para el centro decisor. Los subconjuntos encontrados, los llamados conjuntos compromisos representan políticas equilibradas entre objetivos en conflicto, pero sin subordinar un objetivo a otro. El concepto fundamental en un

contexto compromiso es el de distancia. Debe de quedar claro desde un principio que dentro de este enfoque, el concepto de distancia no se utiliza solo en un sentido geométrico sino más bien como una inclinación de las preferencias humanas.

Ventajas exige pocos parámetros, es de fácil entendimiento para el decisor. Para problemas lineales, con una variación paramétrica adecuada, puede obtenerse todo el conjunto de soluciones no dominadas. Los resultados con métricas grandes son muy equilibrados respecto a los objetivos.

Desventajas los resultados con métricas pequeñas son muy desequilibradas respecto a los objetivos, aunque los pesos sean iguales.

Programación metas o Goals Programming Inicialmente introducida por Charnes y Cooper en los años 50. Desarrollada en los años 70 por Ljiri, Lee, Ignizio y Romero, es actualmente uno de los enfoques multicriterio que más se utilizan. En principio fue dirigida a resolver problemas industriales, sin embargo, posteriormente se ha extendido a muchos otros campos como la economía, agricultura, recursos ambientales, recursos pesqueros, etc. Resulta de gran interés, sobre todo, en problemas complejos de gran tamaño.

Conceptos y definiciones que un modelo tiene que tener partiendo de que puede ser de varias metas:

Atributo: una característica del proceso que se está modelando.

Objetivo: maximizar o minimizar un atributo.

Meta: establecer un nivel de aspiración para determinado atributo.

Criterio: atributos + objetivos + metas. (Luís García Márquez.)

Una ventaja importante es su flexibilidad en el sentido de que permite al tomador de decisiones, experimentar con una multitud de variaciones de las restricciones y de prioridades de las metas cuando se involucra con un problema de decisión de objetivos múltiples.

Esta está destinada a:

1. Buscar participación en el mercado, minimizar los costos y maximizar el margen de ganancias
2. Control de inventario, para minimizar los faltantes y minimizar el costo de almacenajes

3. En la producción para minimizar los costos de fabricación, maximizando el control de la calidad.

Ventajas y desventajas de las distintas técnicas de programación multicriterio.

Uno de los mayores problemas que presenta es la gran cantidad de información que necesita para su aplicación. Por el hecho de trabajar con metas, necesita una definición clara de los niveles de aspiración para cada uno de los objetivos en cuestión. Por otra parte, es preciso asignarle pesos específicos a cada una de las metas o, en su defecto, proceder a una ordenación excluyente de las mismas.

La programación multiobjetivo, por el contrario, al trabajar con objetivos no requiere información sobre niveles de aspiración y la articulación de las preferencias sólo se necesita una vez obtenido el conjunto eficiente. En relación con la información ofrecida, la programación por metas da los valores en el campo de los objetivos correspondientes a una única solución. En contraposición, la información aportada por la programación multiobjetivo es amplia, ya que responde a todas las soluciones eficientes. Debido a esta amplitud de información, justamente, se produce la principal debilidad de este método ya que se sobrecarga el centro decisor con información, dificultando así la toma de una decisión. Por su parte, la eficiencia operativa de la programación por metas es mejor y, en consecuencia, el costo computacional también ofrece una buena alternativa a este problema.

Otro aspecto a considerar es la posibilidad de obtener soluciones óptimas inferiores. Agregan que es posible solucionar este problema a través de dos enfoques: el primero consiste en realizar un análisis paramétrico de los niveles de aspiración, viendo con ello si es posible incrementar la satisfacción de algunas metas sin reducir el logro de otras, y el segundo en utilizar un test de no dominancia.

Método Simplex Básicamente este enfoque consiste en generar el conjunto de soluciones eficientes, desplazándose de un punto extremo factible a un punto extremo eficiente, y luego de éste a los puntos extremos eficientes que le sean adyacentes. Es una herramienta eficiente basada en un algoritmo que no tiene en cuenta el número de ecuaciones ni de variables. El método Simplex multiobjetivo representa, sin duda, el mejor método por cuanto entrega una exacta representación

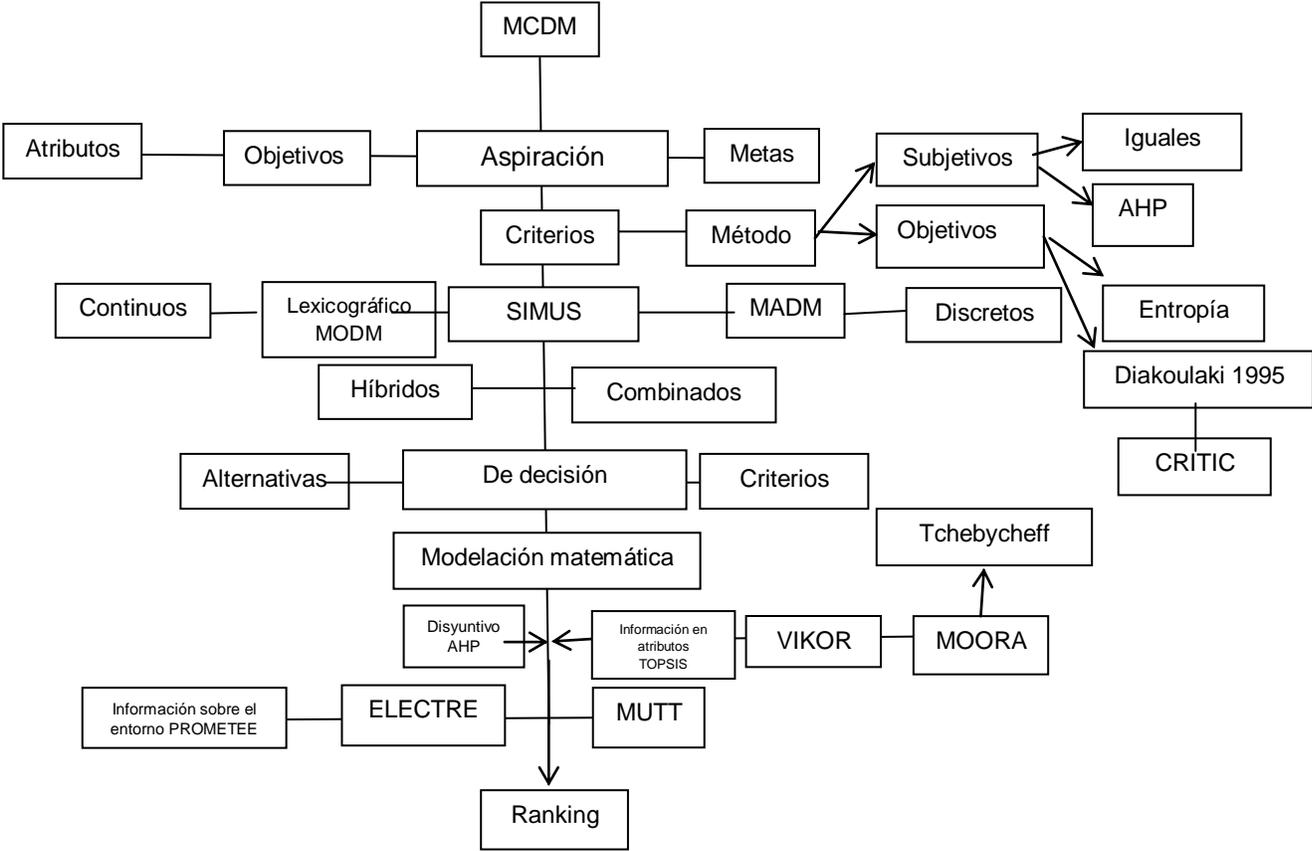
del conjunto eficiente. Sin embargo, tiene el inconveniente de la disponibilidad del software correspondiente.

Programación multiobjetivos Llamada optimización, constituye un enfoque multicriterio de gran potencialidad cuando el concepto decisional está definido por una serie de objetivos a optimizar que deben satisfacer un determinado conjunto de restricciones. Como la optimización simultánea de todos los objetivos es usualmente imposible, pues en la vida real entre los objetivos que pretende optimizar un centro decisor suele existir un cierto grado de conflicto, el enfoque multiobjetivo en vez de intentar determinar la existencia de un no óptimo pretende establecer, el conjunto de soluciones eficientes o Pareto óptimos. Debe indicarse que la búsqueda de soluciones eficiente puede establecerse en un sentido maximizador cuando más del atributo mejor o en un sentido minimizador, cuando menor del atributo mejor. El propósito del enfoque multiobjetivo consiste en segregar del conjunto de soluciones posibles un subconjunto propio del mismo cuyos elementos gocen de la optimalidad paretiana. Planteado el problema en estos términos la operatividad de la programación multiobjetivo consistirá en desarrollar una serie de técnicas que permitan a partir de la estructura generar el conjunto de soluciones eficientes o Pareto óptimas.

Un problema operativo que subyace a los métodos multiobjetivo, consiste en el elevadísimo número de puntos extremos eficientes que se generan incluso en problemas multiobjetivo de tamaño mediano. Así, con una matriz de tamaño moderado (por ejemplo, 40x40) y tres o cuatro objetivos, puede generar fácilmente un número de puntos extremos eficientes, superior a 500 soluciones, implica inundar al centro decisor con información, imposibilitando que pueda aprovecharla eficazmente. El problema de la excesiva información generada por los enfoques objetivos puede paliarse de dos maneras distintas. Uno de los enfoques sugeridos consiste en trabajar con intervalos de pesos en vez de con pesos fijos. Dos, solo se genera aquella parte del conjunto eficiente, representada por los correspondientes puntos extremos, que tienen un mayor interés para el centro decisor. Con este sistema de intervalos de peso se consigue reducir considerablemente tanto la carga computacional como el número de puntos extremos eficientes obtenidos.

Métodos continuos Se caracterizan por que el decisor considera un número infinito de alternativas. Se podría decir que la mayoría de modelos de este tipo se han desarrollado para apoyar la toma de decisiones en ambientes de certeza, es decir en situaciones donde el decisor posee información completa de cerca de los estados de la naturaleza que se van a presentar en momentos posteriores. Según (Meza 2007), en este ambiente, el problema de decisión queda reducido a un problema de optimización matemática. Además, (Romana 2016) explica que en muchas ocasiones es imposible optimizar simultáneamente todos los objetivos al mismo tiempo ya que suelen existir conflictos entre los mismos o se carece de recursos necesarios para su consecución. Para comprender cómo se utilizan y relacionan estos métodos se muestra en el anexo 2: Diagrama de los modelos más usados y la vinculación entre ellos.

Dentro de los principales métodos más difundidos en la literatura se encuentran figura 1 (Fuente Infante, Belette, 2021).



Listado de las principales herramientas informáticas para resolver los MCDM que se pudieran usar en la aplicación de estos métodos para la solución y la toma de la mejor decisión, de las cuales algunas se usan en esta investigación teniendo en cuenta sus características: SOLVER, WINQ QSB, EXPERT CHOICE, EXCEL, VISUAL BASIC, LINDO, PROMETHEE, HOMER, TORAY muchos más, todas las de que correspondan con herramientas de cálculo o de programación, aunque estas son las más usadas y por ende las que hoy se tienen al alcance.

1.4 Metodologías de toma de decisión

Teniendo en cuenta la importancia de la energía eléctrica para la sociedad es necesario a la hora de planificar la generación de la misma, tener en cuenta la capacidad tanto de los sistemas convencionales, basados en combustibles fósiles, como la de las FRE dependiendo de las políticas ambientales del país. En este sentido, es necesario tener una metodología para la correcta selección de la mejor tecnología para la producción de la energía, considerando entre estas las técnicas de decisión multicriterio.

Existen en este ámbito autores como García B.L, 2004; Benítez-Leyva, 2007; Parodi, 2013; Morales, 2015; Muhongo, Arzola, 2019; que han tratado el tema y propuesto metodologías con el afán de contribuir al desarrollo sostenible, entre ellos Parodi, 2013 que propuso evaluar la mejor tecnología con técnicas de decisión llamado el Proceso Analítico Jerárquico. Por su parte Yajure, 2015, propuso una metodología integrada multicriterio para la jerarquización de tecnologías de energías renovables para la producción de energía eléctrica conocida como PROMETHEE, en combinación con AHP en su versión difusa. Por otra parte, un importante grupo de autores desarrollan métodos de decisión multicriterio para el uso de sistemas de energías renovables en islas. (Yajure Ramírez y Arlenis Guzmán 2017).

1.4.1 Proceso Analítico de Jerarquización (AHP)

Es una técnica de soporte basada en la jerarquización, comparación pareada y en los pesos de importancia, de los criterios considerados. Propuesto por Thomas Saaty en 1980, consistente en convertir evaluaciones subjetivas de importancia relativa, que servirán posteriormente para hacer la selección de la mejor alternativa. Este

plantea que para tomar una decisión de forma organizada de debe descomponer en los 4 pasos siguientes:

1. Definir el problema y determinar el tipo de conocimiento que genera
2. Estructurar la jerarquía de decisión desde la parte superior con la meta que se busca alcanzar, luego los objetivos desde una perspectiva amplia, para seguir con los niveles intermedios, hasta los más bajos, los cuales usualmente son el conjunto de alternativas
3. Construir un conjunto de matrices de comparaciones pareadas. Cada elemento en un nivel superior se usa para comparar los elementos en el nivel intermedio inferior con respecto a él
4. Utilizar las prioridades obtenidas de las comparaciones para pesar las prioridades en el nivel inmediatamente inferior. Continua este proceso de pesa y suma hasta que se obtengan las prioridades finales de las alternativas en el nivel bajo de la jerarquización.

Para realizar las comparaciones de pares mencionada en el paso 3 se necesita una escala numérica que indique cuántas veces es más importante un elemento sobre otro, con respecto al criterio o propiedad con el cual están siendo comportados. Una vez obtenida la matriz de comparaciones pareada se procede a obedecer el peso de importancia relativa de cada uno de los criterios utilizando la técnica de los autos vectores. Estos resultados se someten al procedimiento para determinar su consistencia. Se multiplica cada peso de cada alternativa con cada criterio correspondiente obteniendo la puntuación que permite proceder a la toma de decisión (Saaty T. L. 2008).

1.4.2 Método de organización y jerarquización por preferencias

Este es también conocido por PROMETHEE, perteneciente a la escuela americana, fue propuesto por J. Brans y PH. Vincke en 1985, plantea que para aplicar el mismo en cualquiera de dos variantes primero debes determinar el desempeño de las alternativas para cada uno de los criterios considerados. Se utilizan funciones de preferencia generalizadas para comprar las alternativas en pares, para cada uno de los criterios y calcular los flujos de sobre clasificación, positivos y negativos, para ser utilizados como medidas de dominancia de las alternativas. Basándose en esos

flujos se obtiene un pre ordenamiento parcial de las alternativas, definiendo cuáles alternativas son incomparables entre sí, hasta aquí es lo que se conoce como PROMETHEE 1. Al aplicar PROMETHEE 2, se cambian los flujos sobre clasificación positivos negativos de cada una de las alternativas se obtiene lo que llamaron flujo de sobre clasificación neto, el cual se utiliza para obtener un pre ordenamiento total de las alternativas, que es el producto que se obtiene al aplicar el método.

Entre PROMETHEE 1 y PROMETHEE 2 se obtienen pro ordenamiento parcial de las alternativas y una jerarquización completa de las mismas pero no se observa información con respecto a las posibles incomparabilidades. Por esta razón, el autor recomienda aplicar ambas versiones a los problemas. Es necesario determinar los pesos de cada uno de los criterios considerados para reflejar la importancia relativa de dichos criterios. Para determinar estos pesos se recomiendan utilizar la técnica de las comparaciones pareadas propuesta por Saaty en el AHP (J. Brans y PH. Vincke 1985).

1.4.3 Método TOPSIS

Método creado por Hwang y Yoon en 1981 y presentado por Chen y Hwang en este año presentando como regla de decisión la alternativa que tenga más corta la distancia hasta la solución ideal y más grande hasta la negativa-ideal, en sentido geométrico. El método supone que cada atributo tiene la tendencia de incrementar o no de manera monótona una función de valor o utilidad. Para evaluar esta distancia se utiliza el enfoque que considera la distancia euclidiana como indicador para lo cual indican los pasos siguientes:

- Calcular la matriz de decisión normalizada
- Calcular la matriz de decisión normalizada ponderada
- Calcular las soluciones ideales positivas y negativas
- Calcular las medidas de separación
- Calcular la cercanía relativa a la solución ideal
- Jerarquizar por orden de preferencia. (Opricovic S. y Tzeng 2004)

En esta área geográfica, estas son las principales metodologías que en materia de toma de decisión multicriterio se han aplicado y diseñado con el afán de utilizar de

forma óptima las FRE, vale destacar que existen muchas más aplicadas en el mundo las cuales se desecharon en esta investigación.

El grupo de trabajo al evaluar tuvo en cuenta que la tendencia actual a la automatización y mecanización de los procesos ha ido en aumento sobre todo proporcionado por la aparición y desarrollo de la informática y las bases de datos. Con estas nuevas técnicas se incrementan las posibilidades de los análisis por los expertos así como la calidad de sus determinaciones, teniendo en cuenta sus límites y peligros los cuales se aplican de forma muy exagerada en muchos casos, situación muy fácil de evitar con la metodología o modelo Infante Haynes, aplicado en la presente investigación.

1.4.4 Procedimiento multicriterio extendido Infante y Belette

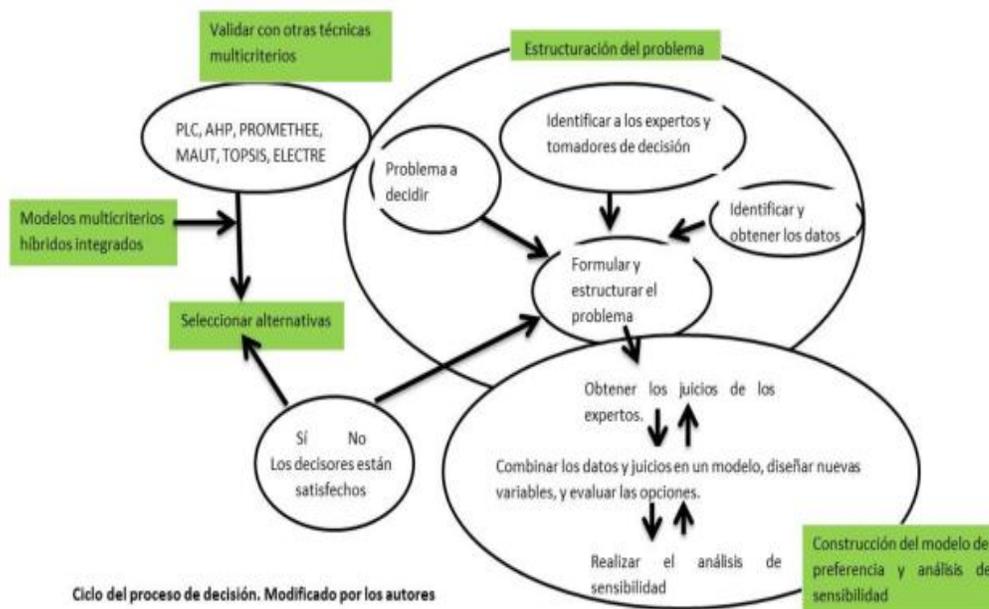


Figura 2 Procedimiento de toma de decisión modelo Infante, Belette

Este procedimiento, figura 2, modelo Infante Haynes donde lo primero es estructurar el problema que es el paso número uno, en este paso se seleccionan los expertos y tomadores de decisión, previamente se tiene la modelación del problema, se identifican las alternativas y los criterios para que de esta forma quede estructurado el problema, como segundo paso, luego de encuestar a los expertos, y obtener sus juicios, se evalúa la consistencia de los juicios, de no cumplir con el requisito, se

realiza una nueva evaluación, luego de esto se realizan los estudios de sensibilidad, donde se demuestra la robustez de la alternativa seleccionada, y como puede ser modificada por los criterios, este resultado se le muestra a los decisores, si no están de acuerdo, se vuelve a evaluar a los expertos, finalmente se validan con otros métodos multicriterio híbridos para garantizar el resultado final. (Infante, Belette 2020)

1.4.5 ¿Por qué y se utiliza el procedimiento multicriterio y cual se aplicará en el caso que ocupa la presente investigación?

Tomar decisiones es asumir responsabilidades, lo que implica cierto grado de riesgo cuando la incertidumbre entra en juego. Desde que comenzó el desarrollo de la humanidad se comienza a tomar decisiones, lo cual en un principio era muy sencillo y en la misma medida que se ha ido desarrollando y adquiriendo conocimiento esta se fue complicando. Entre los autores que se refieren a la toma de decisión en cualquiera de sus formas (García B.L, 2004; Benítez-Leyva, 2007; Parodi, 2013; Morales, 2015; Muhongo, Arzola, 2019; Infante-Belette, 2020 entre otros) las cuales se modifican desde el mismo conocimiento es sí, bajo estas condiciones a medida que los cálculos se han hecho más comunes la mayoría de ellos coincide en que la modelación matemática de la misma, es un muy buena forma de ordenar las alternativas para lograr la mejor decisión.

Estos métodos han logrado desarrollarse teniendo cada vez más una mayor cantidad de alternativas y variables, entran a jugar un primordial papel los métodos multicriterios. Ellos son los que abarcan todas las variables hasta ahora encontradas, se ha demostrado que son capaces de asimilar infinitas opciones, son aplicables entonces a todos los ámbitos de la ciencia, economía y vida en general. Como resultado dan un orden muy completo de las opciones por el decisor, siempre tiene la posibilidad de validar la información o recomenzar en caso de ser necesario.

Un procedimiento cubano, diseñado, elaborado y publicado para mejorar el proceso de toma de decisiones en aras de implementar las FRE se pone en práctica en la Unión Nacional Eléctrica, Sucursal Holguín. Por la necesidad de aumentar el uso de estas, debido a que son conocidas muchas variables, no se tuvieron en cuenta para instalar las que a modo experimental existen hoy, se tomaran de muestra, con el

interés de mejorar el nivel de vida en el país sin que esto implique causar daños al medio ambiente o que su efecto sea el mínimo posible. Este procedimiento es el propuesto por Infante, Belette publicado, en septiembre del 2021 ya que este incluye aun validación del problema integrando varios métodos, lo cual generaliza y facilita la disminución de errores.

1.5 Situación actual del uso de las fuentes renovables de energía en el norte oriental de Cuba

Debido a la necesidad de conocer cómo influye en el desarrollo social y económico de la población, la ejecución del cambio de la matriz energética, es muy necesario conocer los beneficios que otorga a la población y al medio ambiente el uso de energías renovables.

Teniendo en cuenta que estos no se alcanzan en un principio sino a medida que se efectúen las inversiones que a largo plazo se logrará cumplir con los objetivos planteados en Objetivos de Desarrollo Sostenible para toda la población. Cuba no se queda detrás de los esfuerzos por alcanzar estos y en materia de energía la literatura consultada muestra en nuestro país la situación que a continuación se muestra:

1.5.1 Algunas referencias del desarrollo del uso de las energías renovables en Cuba.

Antes del triunfo de la Revolución, el esquema energético nacional era típico de un país capitalista subdesarrollado, esta llegaba apenas al 56% de la población. La gran mayoría de los campos de Cuba desconocían lo que era la electricidad. Después de 1959, con el planteamiento de un aumento del desarrollo científico tecnológico del país y los cambios en los planes de estudio en las universidades se empiezan a formar profesionales capaces de llevar adelante el desarrollo que requiere la sociedad.

Durante los años 1960 al 1979 la principal característica en cuanto al tema es la formación de especialistas energéticos en las universidades de La Habana, Oriente y Las Villas. En esa época comenzaron los experimentos con superficies de absorción y captadores solares, se introducen los temas medioambientales y de diseño bioclimático para el uso pasivo de la energía solar, se desarrollan trabajos

encaminados al mejoramiento de la eficiencia en los hornos calderas de los centrales azucareros, así como el quemado del bagazo.

En 1975 es creado por la Academia de Ciencias (AC) el grupo de Energía Solar, siendo este, pionero en las investigaciones del país dedicadas exclusivamente al desarrollo de las fuentes renovables. Años después se crea un grupo de trabajo para el Ahorro de Energía, el cual se integró con el ya existente y se convirtió en un grupo Asesor de Energía que tenía entre sus tareas el desarrollo del uso de las energías renovables.

En 1981, se abre el Programa de Energía Solar del Consejo de Ayuda Mutua Económica (CAME) y Cuba es representada por la AC, un año más tarde se realizó por el CAME la primera instalación fotovoltaica de 1Kw con celdas de silicio monocristalino que con fines prácticos abastecía toda la casa. Es merecido mencionar en estos años la instalación fotovoltaica basada en celdas de arseniuro de galio desarrollada por la Facultad de Física de la Universidad de La Habana.

Con la creación en 1983 de la Comisión Nacional de Energía, cuyas tareas principales fueron el uso racional de la energía y el desarrollo de las fuentes naturales, el uso de las fuentes renovables de energía pasó a ocupar un papel preponderante. Este organismo encausó un conjunto de acciones demostrando las posibilidades de desarrollar las energías renovables y destaca en la creación de Mini, Macro y pequeñas hidroeléctricas integrando para esto las instituciones y organismos que fueron necesarios.

Un acontecimiento importante en el desarrollo de las fuentes de renovables de energías fue la creación, en Santiago de Cuba, del Centro de Investigaciones de Energía Solar; concibiendo el ciclo completo de investigación producción con el objetivo de desarrollar la actividad del aprovechamiento de las fuentes renovable de energía en especial la solar térmica y la fotovoltaica como vías de ahorro de energías del país. A propuesta de la Universidad de La Habana, específicamente el frente de electrónica, se crea el Instituto de Materiales que tuvo, desde su creación, la responsabilidad del desarrollo de dispositivos optoelectrónicos de alta tecnología, de estos las celdas solares de silicio, este grupo abarca también otras temáticas dentro de las energías renovables e incluía el hidrógeno.

En 1992, por recomendaciones de VI Fórum de Piezas de Repuestos y Tecnologías Avanzadas, se crea el Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables (CETER), con carácter docente investigativo y cede en el Instituto Superior Politécnico José Antonio Echavarría (ISPJAE); este contribuye al desarrollo sostenible de la sociedad cubana a través de su encargo social relacionado con las energías renovables, la eficiencia energética y la interrelación con el medio ambiente. Con la creación del Centro de Estudios de Termo Energética Azucarera, en la Universidad Central de las Villas, y del Grupo de Biogás de Villa Clara, en 1992 y 1993, respectivamente, se han desarrollado varios trabajos relacionados con los centrales azucareros de todo el país y se ha creado una cultura a todos los niveles sobre el uso y beneficio de estas tecnologías, logrando, entre otros méritos, tener un alcance nacional. También en Villa Clara, se creó en 1994, el Área de Investigación y Desarrollo de Hidroenergía, la cual tiene como objetivo asesorar a los órganos de gobierno en la temática de la hidroenergía, dar respuestas a las necesidades de diseños, construcción y montaje de este tipo de instalaciones así como, contribuir a la formación de especialistas y técnicos en la materia, e investigar nuevos modelos y familias de turbinas, con vistas a lograr su introducción en la práctica mediante la generalización del resultado.

1.5.2 Sobre la energía eólica, inicios en Cuba, así como su actualidad en nuestro país.

En Cuba no es hasta que en la isla de Turiguanó, cuando corría el 1999, y con aerogeneradores de 225Kw cada uno, se fundó el primer parque eólico; en el cual se desarrolló un centro de estudios de energías eólicas. Este grupo logró, con la aplicación de los resultados obtenidos en sus investigaciones, que al finalizar el 2007 Cuba ocupaba el lugar 61 en potencia eólica instalada. Con la llegada de la revolución energética, se despegó el empleo del viento para producir electricidad. En diez años se podrían llegar a tener instalados, según los cálculos más conservadores, 2 000MW aunque para llegar a esa meta se requiere de transformaciones globales que garanticen el acceso libre a este tipo de tecnologías. Estimar el recurso eólico de un sitio o región determinada con fines de generación eléctrica, resulta esencial para el posterior emplazamiento de aerogeneradores o

parque eólico. Para ello se emplean diversas técnicas entre ellas las físico matemáticas que permiten obtener una representación del potencial eólico con elevada confiabilidad.

En la gráfica de la figura 3 se muestra como se ha comportado en la última década el desarrollo de las fuentes renovables de energías:

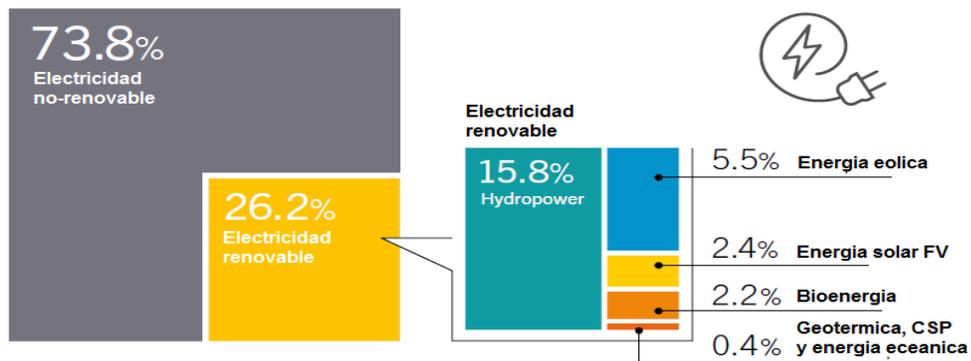


Figura3 Marrero Figueredo, C 2017 Conferencia magistral sobre energía eólica

CAPÍTULO 2. CARACTERIZACIÓN DEL CASO DE ESTUDIO Y RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

En este capítulo se aplica el procedimiento de Infante, Belette con el objetivo de contribuir a la mejora en el proceso de toma de decisiones relacionado con la localización, montaje, construcción y puesta en marcha de nuevos parques eólicos en la zona norte del oriente de Cuba, basando el estudio a partir de los ya existentes de forma experimental.

Como resultado de la aplicación del estudio se demostró que las zonas tienen similar eficiencia para aprovechar las condiciones existentes en el ámbito social, medioambiental y de sostenibilidad, para continuar incrementando en ellas el uso de la energía eólica, para generar electricidad que en mucho depende de la densidad de población que existe y en estas zonas los vientos son muy similares entre sí, por lo que es una variable con igual valor para todas las alternativas.

2.1 Caracterización del caso de estudio a resolver

Se tuvieron en cuenta todos los datos del problema que se aborda, en ella aparecen señalados para cada alternativa, los diferentes criterios o atributos y sus indicadores cuantitativos, para los parques Gibara 1, Gibara 2, Herradura y Río Seco, tales como factor capacidad, clase de resistencia IEC 61400, diámetro del rotor, potencia nominal unitaria, cantidad de generadores, potencia total, suministrador, altura del buje, costo de inversión, costo de operación, mantenimiento anual, costo nivelado energía, costo nivelado SEN, extensión en km²/Kw, generación neta, horas equivalentes, combustible sustituido, ahorro, ingresos anuales, ingresos+ ahorro, no emisión CO₂, velocidad media viento, empleos generados, vivienda promedio electrificadas y personas beneficiadas núcleos.

Los parques Gibara 1 y Gibara 2, se encuentran situados a 40km de la ciudad de Holguín. Fueron construidos, en el año 2008, Gibara 1 y diciembre del 2010, Gibara 2, respectivamente, como estaciones experimentales; asumiendo el 30% de la energía que consume el municipio de su ubicación. Están soportados en torres de 50-55m respectivamente, comenzando a generar a velocidades de 4m/s y deteniéndose cuando el viento llega a 25m/s, contando ambos parques con 11

trabajadores, entre operadores y técnico de mantenimiento; Gibara 1 de 5,1MW, con tecnología española Gamesa y Gibara 2, de 4,5MW, con tecnología China Goldwind. El parque Herradura 1, se encuentra en fase de inversión, por lo que se cuenta con los estudios de pre factibilidad, como supuesto para la evaluación multicriterio de estas tecnologías. Se localiza en una zona comprendida entre esta localidad y Punta del Lirio, ubicada en la región de Chaparra, municipio Jesús Menéndez, a poco más de 20km del municipio de Gibara, provincia Holguín, con una capacidad de producción de energía de 51MW, conformado por 34 generadores de 1,5MW, tecnología Goldwind.

De los dos últimos, se tomaron como supuesto, los estudios de pre factibilidad elaborados por la Empresa de Ingeniería y Proyectos para la Electricidad de Holguín (INEL Hlg) y aprobados por la Unión Nacional Eléctrica y el Ministerio de Industria.

Los criterios seleccionados y ponderados por los expertos, según encuestas, fueron corroborados utilizando métodos estadísticos, creándose tres grupos: académicos, personal de la industria y estudiantes del último año de la carrera de Ingeniería mecánica. A partir de la matriz de decisión, tabla 1, donde se encuentran reflejados las dimensiones, criterios y valores cuantitativos de cada indicador, así como los pesos que fueron obtenidos por la aplicación del método AHP para el análisis, se procede a la aplicación del método:

Dimensiones	Indicadores	Pesos de los Criterios	Alternativas a evaluar				
			Gibara 1	Gibara 2	Herradura 1	Rio Seco 1	
Técnicas	Factor Capacidad %	0,123	28,5	25,8	30	30	Max
	Generación neta MWh/años	0,131	8994,2	7907,2	134500	135095	Max
Económicas	Costo inversión MMT	0,023	9500,5	11762	222397	122835,6	Min
	Costo de operación y mantenimiento (\$)	0,039	2978,8	1630,6	3387,8	2978,85	Min
	Costo nivelado energía cup kW	0,034	0,269	0,344	0,11	0,1	Min
	Periodo Rep. Inv, años CUP	0,03	8	10	19	17	Min
Ambiental	No emisión CO ₂ Ton/años/MW	0,097	69791	49051	114200	116000	Max
	Uso de la tierra	0,153	0,637	0,562	6,375	12,06	Min

	(Extensión en km ² /kW)							
Sociales	Calidad de vida	Creación empleo (u)	0,121	6	19	19	19	Max
		Salarios (\$)	0,012	5000	4500	5000	5000	Max
	Viviendas promedios electrificadas(u)		0,048	1499	1176	79778	79778	Max
	Personas beneficiadas núcleos (3)/MW		0,093	4499	3529	44676	44676	Max
Estratégico Organizativo	Combustible Sustituido ton/años		0,197	22302	20438	33500	37730	Max

Tabla 1 Indicadores seleccionados con sus diferentes pesos. Fuente infante, Belette 2020.

2.2 Aplicación del procedimiento de Infante, Belette

2.2.1 Primer paso del procedimiento de Infante-Belette

Primero es estructurar el problema. En este paso, se seleccionan los expertos y tomadores de decisión, previamente se tiene la modelación del problema, se identifican las alternativas y los criterios para que de esta forma quede estructurado el problema, lo cual quedó definido en el epígrafe anterior.

2.2.2 Segundo paso del procedimiento de Infante-Belette

Durante la encuesta aplicada a los expertos, para obtener su juicio, y con la evaluación de la consistencia de los mismos, se verifican las mismas con la utilización de los métodos previstos por estos con anterioridad arrojando los resultados siguientes:

Aplicación del método Max-Min

Tabla 2 Aplicación del método Max-Min.

Normalización del vector unitario

	Factor Capacidad	Generación Bruta.	Monto Inventario	Costo O&M	Costo kW	T.R. Inv	CO ₂ N.E
P. Gibara 1	0.500	0.047	0.776	0.404	0.260	0.700	0.380
P. Gibara 2	0.444	0.041	0.627	0.739	0.203	0.560	0.267
Herradura 1	0.526	0.704	0.033	0.356	0.635	0.295	0.621
Rio Seco 1	0.526	0.707	0.060	0.404	0.699	0.330	0.631

Tabla 2 Continuación Aplicación del método Max-Min

	Uso Tierra	Empleo	Salario	Viviendas electrificadas.	Personas beneficiadas.	Combustible. sustituido
P. Gibara 1	0.660	0.214	0.512	0.013	0.071	0.044
P. Gibara 2	0.748	0.179	0.461	0.010	0.056	0.040
Herradura 1	0.066	0.679	0.512	0.707	0.704	0.663
Rio Seco 1	0.035	0.679	0.512	0.707	0.704	0.746

Tabla 2a Conclusiones del método Max-Min

Valor MAX-MIN	MAX-MIN
Rio Seco 1	0.348

Como resultado de aplicar este método, se encontró que la alternativa Rio Seco 1, fue valorada como máxima entre las mínimas, por tanto, es la mejor alternativa.

Aplicación del método Max-Max

Tabla 3. Resultados de la aplicación del método Max-Max.

Normalización del vector unitario y % del total

	Factor Capacidad	Generación Bruta.	Monto Inventario	Costo O&M	Costo kW	T.R. Inv	CO ₂ N.E
P. Gibara 1	0.250	0.031	0.519	0.212	0.145	0.372	0.200
P. Gibara 2	0.222	0.028	0.419	0.388	0.113	0.297	0.141
Herradura 1	0.264	0.469	0.022	0.187	0.354	0.156	0.327
Rio Seco 1	0.264	0.472	0.040	0.212	0.389	0.175	0.332

Tabla 3.Continuación Resultados de la aplicación del método Max-Max.

	Uso Tierra	Empleo	Salario	Viviendas electrificadas.	Personas beneficiadas.	Combustible . sustituido
P. Gibara 1	0.437	0.122	0.256	0.009	0.046	0.030
P. Gibara 2	0.496	0.102	0.231	0.007	0.036	0.027
Herradura 1	0.044	0.388	0.256	0.492	0.459	0.444
Rio Seco 1	0.023	0.388	0.256	0.492	0.459	0.500

Tabla 3a Conclusiones del método Max-Max

Valor MAX-MAX	MAX-MAX
0.5187	P. Gibara 1

Sin embargo, opuestamente al resultado anterior, Gibara 1, fue valorada como la máxima entre las máximas, por lo que en este caso es la mejor alternativa

Aplicación del Método Conjuntivo

Tabla 4. Resultados de la aplicación del método conjuntivo.

	Factor Capacidad	Generación Bruta.	Monto Inventario	Costo O&M	Costo kW
PESOS	0.123	0.131	0.023	0.039	0.034
Parques	Factor Capacidad	Generación Bruta.	Monto Inventario	Costo O&M	Costo kW
P. Gibara 1	Si	Si			
P. Gibara 2	Si	Si			
Herradura 1	Si	Si			
Rio Seco 1	Si	Si			

Tabla 4 Continuación Resultados de la aplicación del método conjuntivo.

	CO ₂ N.E	Uso Tierra	Empleo	Salario	Viviendas electrificadas.	Personas beneficiadas.
PESOS	0.097	0.153	0.121	0.012	0.048	0.093
Parques	CO ₂ N.E	Uso Tierra	Empleo	Salario	Viviendas electrificadas.	Personas beneficiadas.
P. Gibara 1	Si		Si	Si	Si	Si
P. Gibara 2	Si		Si	Si	Si	Si
Herradura 1	Si		Si	Si	Si	Si
Rio Seco 1	Si		Si	Si	Si	Si

Tabla 4 Continuación Resultados de la aplicación del método conjuntivo.

	Combustible. sustituido	T.R. Inv
PESOS	0.0197	0.03
Parques	Combustible. sustituido	T.R. Inv
P. Gibara 1	Si	
P. Gibara 2	Si	
Herradura 1	Si	
Rio Seco 1	Si	

Tabla 4a Conclusiones de la aplicación del método conjuntivo.

Aceptables	No aceptables
	Si
	Si
	Si
	Si

Cuando aplicamos este método, se obtiene una lista donde se muestra aquellas alternativas que superan un umbral mínimo, el cual es seleccionado en dependencia de cada atributo, por lo que en este caso ninguna alternativa superó este umbral, por lo que no son aceptables.

Aplicación del Método Disyuntivo

Tabla 5 Resultados de la aplicación del método disyuntivo.

	Factor Capacidad	Generación Bruta.	Monto Inventario	Costo O&M	Costo kW
PESOS	0.123	0.131	0.023	0.039	0.034
Parques	Factor Capacidad	Generación Bruta.	Monto Inventario	Costo O&M	Costo kW
P. Gibara 1	Si	Si			
P. Gibara 2	Si	Si			
Herradura 1	Si	Si			
Rio Seco 1	Si	Si			

Tabla 5 Continuación Resultados de la aplicación del método disyuntivo.

	CO ₂ N.E	Uso Tierra	Empleo	Salario	Viviendas electrificadas.	Personas beneficiadas.
PESOS	0.097	0.153	0.121	0.012	0.048	0.093
Parques	CO ₂ N.E	Uso Tierra	Empleo	Salario	Viviendas electrificadas.	Personas beneficiadas.
P. Gibara 1	Si		Si	Si	Si	Si
P. Gibara 2	Si		Si	Si	Si	Si
Herradura 1	Si		Si	Si	Si	Si
Rio Seco 1	Si		Si	Si	Si	Si

Tabla 5 Continuación Resultados de la aplicación del método disyuntivo.

	Combustible. sustituido	T.R. Inv
PESOS	0.0197	0.03
Parques	Combustible. sustituido	T.R. Inv
P. Gibara 1	Si	
P. Gibara 2	Si	
Herradura 1	Si	
Rio Seco 1	Si	

Tabla 5a Conclusiones de la aplicación del método conjuntivo.

Aceptables	No aceptables
Si	
Si	
Si	
Si	

En este caso, se obtiene una lista donde se muestran aquellas alternativas que superan un umbral mínimo, que solo se establecerá en algunos de los atributos, por lo que en este caso las alternativas superan este umbral, por lo que son aceptables.

Aplicación del método Asignación Lineal

Tabla 6. Resultados de la aplicación del método asignación lineal.

Elegir tipo de jerarquía equivalente

	Factor Capacidad	Generación Bruta.	Monto Inventario	Costo O&M	Costo kW	T.R. Inv	CO ₂ N.E
P. Gibara 1	3	3	1	2	3	1	3
P. Gibara 2	3	3	1	1	3	1	3
Herradura 1	1	2	2	2	2	2	2
Rio Seco 1	1	1	1	1	1	1	1

Tabla 6.Continuación Resultados de la aplicación del método asignación lineal

	Uso Tierra	Empleo	Salario	Viviendas electrificadas.	Personas beneficiadas.	Combustible sustituido
P. Gibara 1	2	3	1	3	3	3
P. Gibara 2	1	3	3	3	3	3
Herradura 1	1	1	1	1	1	2
Rio Seco 1	1	1	1	1	1	1

Tabla 6a Valoración y elección resultado de la aplicación del método

Valoración	Elección	Valoración
31.0	Rio Seco 1	13.0
31.0	Herradura 1	20.0
20.0	P. Gibara 1	31.0
13.0	P. Gibara 2	31.0

Con este método se calculó primeramente el índice de la suma de jerarquización que se obtuvo en cada alternativa, teniendo en cuenta cada atributo, por lo que la elección será quien posea menor valoración, igualmente se seleccionó la alternativa

Rio Seco 1. Se pudo demostrar la pertinencia de estos métodos aplicados para la selección de alternativas, incluso cuando sea un tamaño considerable de las mismas.

2.2.3 Tercer paso del procedimiento de Infante-Belette

Al no tener elementos para demostrar cuál es la mejor alternativa se procede a evaluar nuevamente estas alternativas con otros métodos, arrojando los resultados que a continuación se presentan:

Resultados del Método Lexicográfico

Tabla 7 Cálculo obtenido con la aplicación del Método Lexicográfico.

	Factor Capacidad	Generación Bruta.	Monto Inventario	Costo O&M	Costo kW	T.R. Inv
PESOS	0.123	0.131	0.023	0.039	0.034	0.03
	Factor Capacidad	Generación Bruta.	Monto Inventario	Costo O&M	Costo kW	T.R. Inv
P. Gibara 1	28.5	8994.0	0,00	0,00	3.7	0,1
P. Gibara 2	25.3	7907.0	0,00	0,00	2.9	0,1
Herradura 1	30.0	134500.0	0,00	0,00	9.1	0,1
Rio Seco 1	30.0	135095.0	0,00	0,00	10.0	0,1

Tabla 7 Continuación Cálculo obtenido con la aplicación del Método Lexicográfico.

	CO ₂ N.E	Uso Tierra	Empleo	Salario	Viviendas electrificadas.
PESOS	0.097	0.153	0.121	0.012	0.048
	CO ₂ N.E	Uso Tierra	Empleo	Salario	Viviendas electrificadas.
P. Gibara 1	697912.0	1.6	6.0	5000.0	1499.0
P. Gibara 2	49051.1	1.8	5.0	4500.0	1176.0
Herradura 1	114200.0	0.2	19.0	5000.0	79778.0
Rio Seco 1	116000.0	0.1	19.0	5000.0	79778.0

Tabla 7 Continuación Cálculo obtenido con la aplicación del Método Lexicográfico

	Personas beneficiadas.	Combustible sustituido
PESOS	0.093	0.0197
	Personas beneficiadas.	Combustible sustituido
P. Gibara 1	4499.0	2230.0
P. Gibara 2	3529.0	2043.0
Herradura 1	44676.0	33500.0
Rio Seco 1	44676.0	37730.0

Tabla 7a Orden de la decisión asumiendo su valoración.

Orden de decisión	Valoración
P. Gibara 2	4111111413
P. Gibara 1	3222222324
Herradura 1	2333333131
Rio Seco 1	1433433242

En este método se selecciona la mejor alternativa según las preferencias establecidas por cada atributo, quiere este decir que el peso de cada atributo es algo que influye y de suma importancia a tener en cuenta, para el caso Gibara 2, será la mejor alternativa.

Resultados del Método de Dominancia

Tabla 8 Cálculo obtenido con la aplicación del método dominancia.

	P. Gibara 1	P. Gibara 2	Herradura 1	Rio Seco 1
P. Gibara 1		No	No	No
P. Gibara 2	No		No	No
Herradura 1	No	No		No
Rio Seco 1	No	No	No	

Por lo que se aprecia en la tabla 8a, todas las alternativas son dominantes, gracias al valor de cada atributo.

Tabla 8a Cálculo obtenido con la aplicación del método dominantes.

Dominantes
P. Gibara 1
P. Gibara 2
Herradura 1
Rio Seco 1

La alternativa dominante, en este caso a elegir, es Parque Eólico Gibara 1.

Resultados del Método Suma Ponderada

Tabla 9 Cálculo obtenido con la aplicación del método suma ponderada.

Método de normalización	VECTOR UNITARIO
-------------------------	-----------------

	Factor Capacidad	Generación Bruta.	Monto Inventario	Costo O&M	Costo kW	T.R. Inv	CO ₂ N.E
Pesos	0.123	0.131	0.023	0.039	0.034	0.03	0.09

Tabla 9 Continuación Cálculo obtenido con la aplicación del método suma ponderada

	Uso Tierra	Empleo	Salario	Viviendas electrificadas.
Pesos	0.153	0.12	0.012	0.048

Tabla 9 Continuación Cálculo obtenido con la aplicación del método suma ponderada

	Personas beneficiadas.	Combustible sustituido
Pesos	0.09	0.019

Tabla 9a Valoración de los parques analizados.

	Valoración
P. Gibara 1	0.309
P. Gibara 2	0.300
Herradura 1	0.473
Rio Seco 1	0.477

Tabla 9b Orden de decisión de los parques eólicos

Orden de Decisión	Valoración
Rio Seco 1	0.477
Herradura 1	0.473
P. Gibara 1	0.309
P. Gibara 2	0.300

En este caso todo depende del valor obtenido por la función suma ponderada y se puede apreciar que la alternativa Rio Seco 1, es la mejor alternativa a proponer a los tomadores de decisión.

Resultados del Método Producto Ponderado

Tabla 10 Cálculo de los productos ponderados.

Método de normalización	Vector unitario
-------------------------	-----------------

	Factor Capacidad	Generación Bruta.	Monto Inventario	Costo O&M	Costo kW	T.R. Inv	CO ₂ N.E
Pesos	0.123	0.131	0.023	0.039	0.034	0.03	0.097
Pesos Ponderados	0.133	0.142	0.025	0.042	0.037	0.032	0.105

Tabla 10 Continuación Cálculo de los productos ponderados

	Uso Tierra	Empleo	Salario	Viviendas electrificadas.
Pesos	0.153	0.121	0.012	0.048
Pesos Ponderados	0.166	0.131	0.013	0.052

Tabla 10 Continuación Cálculo de los productos ponderados

	Personas beneficiadas.	Combustible sustituido
Pesos	0.093	0.0197
Pesos Ponderados	0.101	0.021

Tabla 10a Valoración de los parques analizados

	Valoración
P. Gibara 1	11.602
P. Gibara 2	11.516
Herradura 1	12.159
Rio Seco 1	12.126

Tabla 10b Orden de decisión de los parques analizados

Orden de decisión	Valoración
Herradura 1	12.159
Rio Seco 1	12.126
P. Gibara 1	11.602
P. Gibara 2	11.516

Como resultado de la aplicación del método puede decirse que el mismo permitió una jerarquización tras realizar la valoración de cada alternativa en dependencia de la función de producto ponderado, pero acá se penalizan las alternativas con puntuación bajas en sus atributos, sin embargo la mejor alternativa seleccionada pasó a ser Herradura 1 con mayor puntuación.

2.2.4 Cuarto paso de Infante-Belette

Realiza los estudios de sensibilidad, donde se demuestra la robustez de la alternativa seleccionada, y cómo puede ser modificada por los criterios, este resultado se le muestra a los decisores, si no están de acuerdo, se vuelve a evaluar a los expertos,

se aplica para este paso la programación por compromiso arrojando los resultados siguientes:

Tabla 11 Resultado de la aplicación del método programación por compromisos

	Factor Capacidad	Generación Bruta.	CO ₂ N.E	Empleo	Salario
Valoración	Max	Max	Max	Max	Max
Pesos	0.123	0.131	0.097	0.121	0.012
P. Gibara 1	28.5	8994	69791.3	6	5000
P. Gibara 2	25.3	7907	49051.1	5	4500
Herradura 1	30	134500	114200	19	5000
Rio Seco 1	30	135095	116000	19	5000
Ideal	30	135095	116000	19	5000
Normalizar					
P. Gibara 1	0.050	0.933	0.398	0.684	0.000
P. Gibara 2	0.157	0.941	0.577	0.737	0.100
Herradura 1	0.000	0.004	0.016	0.000	0.000
Rio Seco 1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ponderar					
P. Gibara 1	0.006	0.122	0.039	0.083	0.000
P. Gibara 2	0.019	0.123	0.056	0.089	0.001
Herradura 1	0.000	0.001	0.002	0.000	0.000
Rio Seco 1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Tabla 11 Continuación Resultado de la aplicación del método programación por compromisos

	Viviendas electrificadas	Personas beneficiadas.	Combustible sustituido
Valoración	Max	Max	Max
Pesos	0.048	0.093	0.0197
P. Gibara 1	1499	4499	2230
P. Gibara 2	1176	3529	2043
Herradura 1	79778	44676	33500
Rio Seco 1	79778	44676	37730
Ideal	79778	44676	37730
Normalizar			
P. Gibara 1	0.981	0.899	0.941
P. Gibara 2	0.985	0.921	0.946
Herradura 1	0.000	0.000	0.112
Rio Seco 1	0.000	0.000	0.000

Tabla 11 Continuación Resultado de la aplicación del método programación por compromisos

	Viviendas electrificadas	Personas beneficiadas.	Combustible sustituido
Valoración	Max	Max	Max
Pesos	0.048	0.093	0.0197
Ponderar			
P. Gibara 1	0.047	0.084	0.019
P. Gibara 2	0.047	0.086	0.019
Herradura 1	0.000	0.000	0.002
Rio Seco 1	0.000	0.000	0.000

Tabla 11 Continuación Resultado de la aplicación del método programación por compromisos

	Monto Inventario	Costo O&M	Costo kW	T.R. Inv	Uso Tierra
Valoración	Min	Min	Min	Min	Min
Pesos	0.023	0.039	0.034	0.03	0.135
P. Gibara 1	0.023	-2978.8	-0.269	-8	-0.637
P. Gibara 2	-9500	-1630	-0.344	-10	-0.562
Herradura 1	-11762	-3387	-0.11	-19	-6
Rio Seco 1	-122835	-2978.9	-0.1	-17	-12.06
Ideal	-222397	-3387	-0.344	-19	-12.06
Normalizar					
P. Gibara 1	0.957	0.121	0.218	0.579	0.947
P. Gibara 2	0.947	0.519	0.000	0.474	0.953
Herradura 1	0.000	0.000	0.680	0.000	0.471
Rio Seco 1	0.448	0.120	0.709	0.105	0.000
Ponderar					
P. Gibara 1	0.022	0.005	0.007	0.017	0.145
P. Gibara 2	0.022	0.020	0.000	0.014	0.146
Herradura 1	0.000	0.000	0.023	0.000	0.072
Rio Seco 1	0.010	0.005	0.024	0.003	0.000

Normalizar por:

$$\frac{Z_i^{\text{máx}} - Z_{ij}}{Z_i^{\text{máx}} - Z_i^{\text{mín}}}$$

Calcular la distancia por

$$P = 1 \quad D_1 = a + b$$

$$P = 2D_2 = \sqrt{a^2 + b^2}$$

$$P^\infty = D^\infty = \text{máx. (a, b)}$$

Tabla 11a Cálculo de las distancias.

Distancia Manhattan		Distancia Euclidiana		Distancia Tchebycheff		Alternativas
D1	Ranking	D2	Ranking	D $^\infty$	Ranking	
0,596	2	0,234	3	0,145	3	Rio Seco 1
0,643	3	0,243	4	0,146	4	Herradura 1
1,00	4	0,076	2	0,072	2	P. Gibara 1
0,042	1	0,027	1	0,024	1	P. Gibara 2

Con la aplicación de este método se define como la alternativa a referenciar el parque eólico Gibara 2 por tener en las tres distancias la más corta relativa a P^∞ . Al presentar esta solución al grupo decisor, demostrándole al mismo que en cada uno los parques experimentales son factibles por lo que en ellos es viable la inversión con fines de incrementar el uso de este recurso.

2.2.5 Quinto paso la validación del resultado

Luego de esto finalmente se validan con otros métodos multicriterio híbridos para garantizar el resultado final, para lo cual se aplica la programación en metas teniendo en cuenta que la entidad pretende generalizar uno de los cuatro parques eólicos, para ello necesita conocer cual presenta las mejores bondades conocidas de las condiciones del entorno (tabla 12)

Tabla 12 Bondades conocidas de las condiciones del entorno

	P. Gibara 1	P. Gibara 2	Herradura 1	Rio Seco	Disponibilidad
Factor de capacidad	28	28	30	30	≥ 25
Generación bruta	8994,2	7907,2	134500	135095	≥ 7907
Costo de la inversión	9500,5	11762,3	222397	122835,6	$\leq 9500,5$
Costos O&M	2978,8	1630,55	3387,8	2978,85	≤ 1630
Costos de niveles de energía	0,269	0,344	0,11	0,10	$\leq 0,10$
No emisión de CO ₂	69791,3	49051,1	114200	116000	≥ 49051
Combustibles sustituidos	22302	20438	33500	37730	≥ 23500

El grupo de decisores plantea que una zona es óptima cuando la generación es la mayor posible, se emiten la menos cantidad de CO₂, cuando los costos nivelados de energía son los mínimos posibles. Este grupo asume que no se puede incrementar el costos O&M por encima de 1360, la sustitución de combustible tiene que ser mayor

que 23500, así mismo se plantea que los costos de niveles de energía tienen que ser menores que 0,10. Con esa información y acompañada de la tabla 12 se modela el problema de multiobjetivos.

Definición de variables

X_1 P. Gibara 1

X_2 P. Gibara 2

X_3 Herradura 1

X_4 Rio Seco

Declaración de los objetivos.

Max $f_1(x) = 8994,2X_1+7907,2X_2+134500X_3+135095X_4$ (Maximizar la generación bruta)

Max $f_2(x) = 69791,3X_1+49051,1X_2+114200X_3+116000X_4$ (Maximizar la no emisión de CO_2)

Min $f_3(x) = 0,269X_1+0,344X_2+0,11X_3+0,1X_4$ (Minimizar los costos nivelados de energía)

Restricciones rígidas iniciales

1^{ra} $2978,8X_1+1630,55X_2+3387,8X_3+2978,85X_4 \leq 1630$ (Costo de O\$M)

2^{da} $22302X_1+20438X_2+33500X_3+37730X_4 \geq 23500$ (Combustible Sustituido)

3^{ra} $0,269X_1+0,344X_2+0,11X_3+0,1X_4 \leq 0,10$ (Minimizar los costos nivelados de energía)

$X_1; X_2; X_3; X_4 > 0$

Con los objetivos y las restricciones se construyen las metas y se pondera el modelo para lo cual se usará la herramienta informática en nuestro caso WindQsb foto 1; inicio del software, foto 2 problema específico GP-IGP; donde se introducen el número el título del problema, número de metas, variables y restricciones, que son introducida en el software.

Definiendo las restricciones tipos metas

1^{ra} $0,269X_1+0,344X_2+0,11X_3+0,1X_4+N_1-P_1 = 0,10$ (Costo nivelados de energía \leq)

2^{da} $2978,8X_1+1630,55X_2+3387,8X_3+2978,85X_4+N_2-P_2 = 1630$ (Costo de O\$M exacto =)

$$3^{\text{ra}} \quad 69791,3X_1+49051,1X_2+114200X_3+116000X_4+N_3-P_3 = 49051 \text{ (Emisión de CO}_2 \geq)$$

$$4^{\text{ta}} \quad 22302X_1+20438X_2+33500X_3+37730X_4+N_4-P_4 = 23500 \text{ (Combustible Sustituido } \geq)$$

$$5^{\text{ta}} \quad 28X_1+25X_2+30X_3+30X_4+N_5-P_5 = 25 \text{ (Factor de Capacidad } \geq)$$

$$X_1; X_2; X_3; X_4; N_1; N_2; N_3; N_4; N_5; P_1; P_2; P_3; P_4; P_5 > 0$$

Como se presenta el caso, serían cinco metas, cinco restricciones rígidas iniciares y finalmente 14 variables al tener en cuenta las variables no deseadas negativas y positivas las que tenemos que incluirán la solución del problema.



Foto 1 Inicio del software



Foto 2 Problema específico GP-IGP

Luego se introduce la modelación matemática al software, teniendo en cuenta que primero se introducen los valores numéricos de las variables no deseadas negativas y positiva, siempre teniendo en cuenta su signo, de las restricciones tipos metas, luego de esto se introducen las restricciones agregando también en ellas, el valor de las variables no deseadas, aquí se debe destacar que son todas las que se incluyen en el problema.

Variable ->	X1	X2	X3	X4	n1	p1	n2	p2	n3	p3	n4	p4	n5	p5	Direction	R. H. S.
Max:G1						1										
Max:G2							1	1								
Max:G3									1							
Max:G4											1					
Max:G5													1			
C1	0,269	0,34	0,11	0,1		1									=	0,10
C2	2978	1630	3387	2978			1	1							=	1630
C3	69791	49051	114200	116000					1						=	49051
C4	22300	20438	33500	37730							1				=	23500
C5	28	25	30	30										1	=	25
LowerBound	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
UpperBound	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M		
VariableType	Continuous															

Foto 3 Modelación matemática al software.

Los resultados que entrega el software se muestran a continuación:

09-11-2012 00:53:00	Decision Variable	Solution Value	Basis Status	Reduced Cost Goal 1	Reduced Cost Goal 2	Reduced Cost Goal 3	Reduced Cost Goal 4	Reduced Cost Goal 5
1	X1	0	at bound	-269.00	-2,978.00	-69,791.00	-22,300.00	-28.00
2	X2	0	at bound	-34.00	-1,630.00	-49,051.00	-20,438.00	-25.00
3	X3	0	at bound	-11.00	-3,387.00	-114,200.00	-33,500.00	-30.00
4	X4	0	at bound	-1.00	-2,978.00	-116,000.00	-37,730.00	-30.00
5	n1	0	at bound	0	0	0	0	0
6	p1	10.00	basic	0	0	0	0	0
7	n2	1,630.00	basic	0	0	0	0	0
8	p2	0	at bound	0	0	0	0	0
9	n3	49,051.00	basic	0	0	0	0	0
10	p3	0	at bound	0	0	0	0	0
11	n4	23,500.00	basic	0	0	0	0	0
12	p4	0	at bound	0	0	0	0	0
13	n5	25.00	basic	0	0	0	0	0
14	p5	0	at bound	0	0	0	0	0
	Goal 1:	Maximize	G1 =	10.00				
	Goal 2:	Maximize	G2 =	1,630.00				
	Goal 3:	Maximize	G3 =	49,051.00				
	Goal 4:	Maximize	G4 =	23,500.00				
	Goal 5:	Maximize	G5 =	25.00				

Foto 4 La solución de las variables, luego de ocho interacciones se llega a la solución óptima

Los resultados que entregan el software y el resumen combinado de la aplicación del método se muestran en la foto 5:

09-11-2012 00:58:14	Constraint	Left Hand Side	Direction	Right Hand Side	Slack or Surplus	Shadow Price Goal 1	Shadow Price Goal 2	Shadow Price Goal 3	Shadow Price Goal 4	Shadow Price Goal 5
1	C1	10.00	=	10.00	0	1.00	0	0	0	0
2	C2	1,630.00	=	1,630.00	0	0	1.00	0	0	0
3	C3	49,051.00	=	49,051.00	0	0	0	1.00	0	0
4	C4	23,500.00	=	23,500.00	0	0	0	0	1.00	0
5	C5	25.00	=	25.00	0	0	0	0	0	1.00

Foto 5 Resultado del resumen combinado de la aplicación del método

Con los resultados combinados se procede a analizar la sostenibilidad de las metas.

09-09-2012 21:40:31	Decision Variable	Goal Level	Reduced Cost	Unit Cost or Profit c(j)	Allowable Min. c(j)	Allowable Max. c(j)
1	X1	G1	-17.67	28.00	-M	45.67
2	X2	G1	0	25.00	15.33	M
3	X3	G1	-489.60	30.00	-M	519.60
4	X4	G1	-426.87	30.00	-M	456.87
5	X1	G2	-119,891.50	95,005.00	-M	M
6	X2	G2	0	117,623.00	-M	M
7	X3	G2	-2,222,285.25	222,397.00	-M	M
8	X4	G2	-2,026,707.25	122,835.00	-M	M
9	X1	G3	-19,824.88	69,791.00	-M	M
10	X2	G3	0	49,051.00	-M	M
11	X3	G3	-905,278.38	114,200.00	-M	M
12	X4	G3	-780,399.50	116,000.00	-M	M

Foto 6 Análisis de sensibilidad para las metas

09-09-2012 21:48:14	Constraint	Direction	Right Hand Side	Allowable Min. RHS	Allowable Max. RHS	Shadow Price Goal 1	Shadow Price Goal 2	Shadow Price Goal 3
1	C1	>=	7,907.00	-M	7,907.00	0	0	0
2	C2	<=	95,000,528.00	117,624.00	M	0	0	0
3	C3	<=	1,630.00	1,630.00	1,316,523.88	0.02	72.16	30.09
4	C4	>=	2,300.00	-M	20,438.00	0	0	0

Foto 7 Análisis de sensibilidad para el lado derecho de las restricciones

21:49:45		Sunday	September	09	2012					
Goal Level	Decision Variable	Solution Value	Unit Cost or Profit c(j)	Total Contribution	Reduced Cost	Allowable Min. c(j)	Allowable Max. c(j)			
1	G1	X1	0	28.00	0	-17.67	-M	45.67		
2	G1	X2	1.00	25.00	25.00	0	15.33	M		
3	G1	X3	0	30.00	0	-489.60	-M	519.60		
4	G1	X4	0	30.00	0	-426.87	-M	456.87		
5	G2	X1	0	95,005.00	0	-119,891.50	-M	M		
6	G2	X2	1.00	117,623.00	117,623.00	0	-M	M		
7	G2	X3	0	222,397.00	0	-2,222,285.25	-M	M		
8	G2	X4	0	122,835.00	0	-2,026,707.25	-M	M		
9	G3	X1	0	69,791.00	0	-19,824.88	-M	M		
10	G3	X2	1.00	49,051.00	49,051.00	0	-M	M		
11	G3	X3	0	114,200.00	0	-905,278.38	-M	M		
12	G3	X4	0	116,000.00	0	-780,399.50	-M	M		
	G1	Goal	Value	(Max.) =	25.00					
	G2	Goal	Value	(Max.) =	117,623.00					
	G3	Goal	Value	(Max.) =	49,051.00					
Constraint	Left Hand Side	Direction	Right Hand Side	Slack or Surplus	Allowable Min. RHS	Allowable Max. RHS	ShadowPrice Goal 1	ShadowPrice Goal 2	ShadowPrice Goal 3	
1	C1	7,907.00	>=	7,907.00	0	-M	7,907.00	0	0	0
2	C2	117,621.00	<=	95,000,528.00	94,882,904.00	117,624.00	M	0	0	0
3	C3	1,630.00	<=	1,630.00	0	1,630.00	1,316,523.88	0.02	72.16	30.09
4	C4	20,438.00	>=	2,300.00	18,138.00	-M	20,438.00	0	0	0

Foto 8 Resultados combinados de las metas y las restricciones

Esta herramienta da la opción de realizar un análisis paramétrico, introduciendo alguna perturbación en algunas de las variables

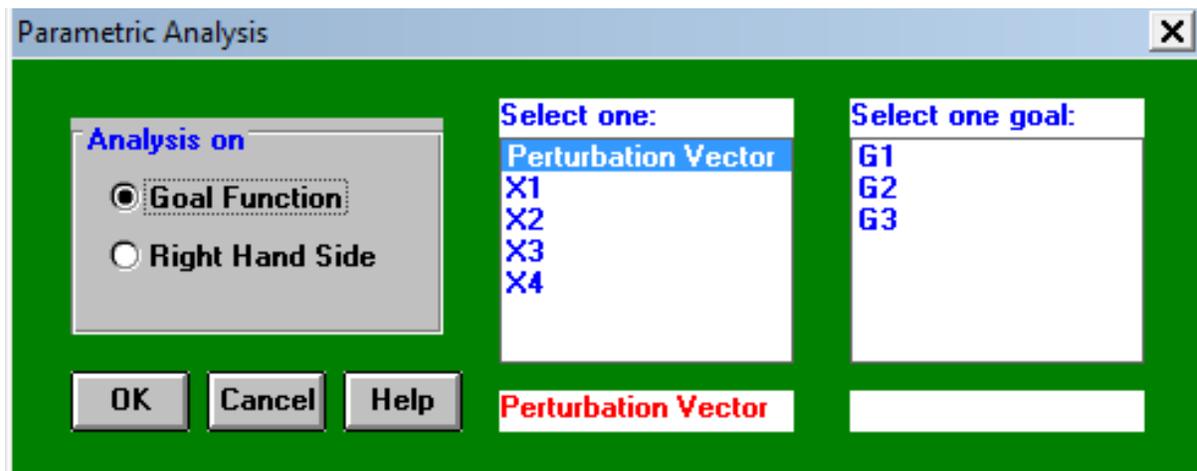


Foto 9 Análisis paramétrico

Finalmente llegamos al resultado final

		X1	X2	X3	X4	n1	p1	n2	p2	n3	p3	n4	p4	n5	p5		
Goal 1	C(j)	0	0	0	0	0	1.00	0	0	0	0	0	0	0	0		
Goal 2	C(j)	0	0	0	0	0	0	1.00	1.00	0	0	0	0	0	0		
Goal 3	C(j)	0	0	0	0	0	0	0	0	1.00	0	0	0	0	0		
Goal 4	C(j)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.00	0	0	0			
Basis	Goal 5	C(j)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.00	0	0		R. H. S.	Ratio
p1	C1	269.00	34.00	11.00	1.00	0	1.00	0	0	0	0	0	0	0	0	10.00	M
n2	C2	2,978.00	1,630.00	3,387.00	2,978.00	0	0	1.00	1.00	0	0	0	0	0	0	1,630.00	M
n3	C3	69,791.00	49,051.00	114,200.00	116,000.00	0	0	0	0	1.00	0	0	0	0	0	49,051.00	M
n4	C4	22,300.00	20,438.00	33,500.00	37,730.00	0	0	0	0	0	1.00	0	0	0	0	23,500.00	M
n5	C5	28.00	25.00	30.00	30.00	0	0	0	0	0	0	0	1.00	0	0	25.00	M
Max. Goal 1	Cj-Zj	-269.00	-34.00	-11.00	-1.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10.00	
Max. Goal 2	Cj-Zj	-2,978.00	-1,630.00	-3,387.00	-2,978.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,630.00	
Max. Goal 3	Cj-Zj	-69,791.00	-49,051.00	-114,200.00	-116,000.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	49,051.00	
Max. Goal 4	Cj-Zj	-22,300.00	-20,438.00	-33,500.00	-37,730.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	23,500.00	
Max. Goal 5	Cj-Zj	-28.00	-25.00	-30.00	-30.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25.00	

Foto 10 Cálculo del resultado final

El análisis gráfico también es una opción de la herramienta que nos permite visualizar la solución de una forma más práctica.

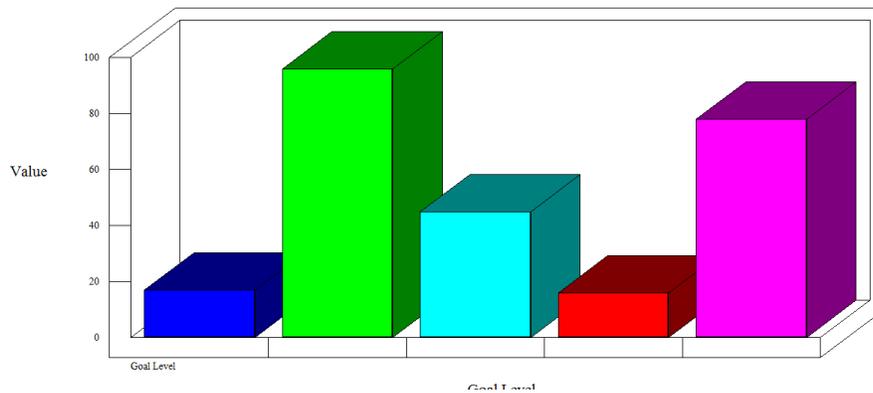


Foto 11 Grafico uno

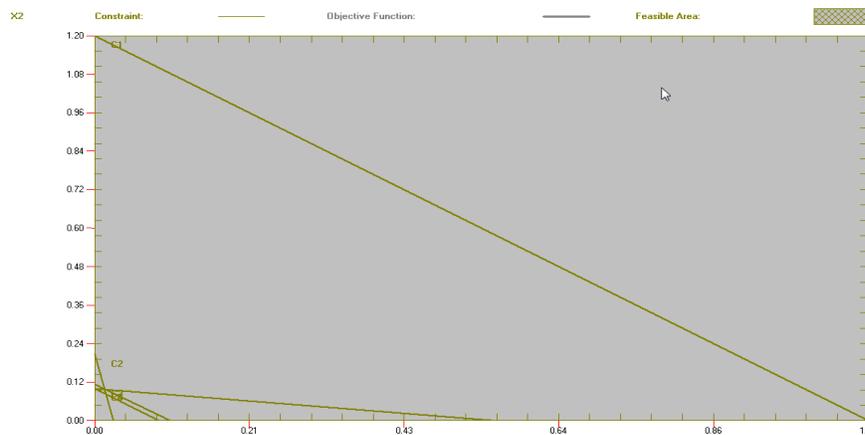


Foto 12 Función Objetivo uno

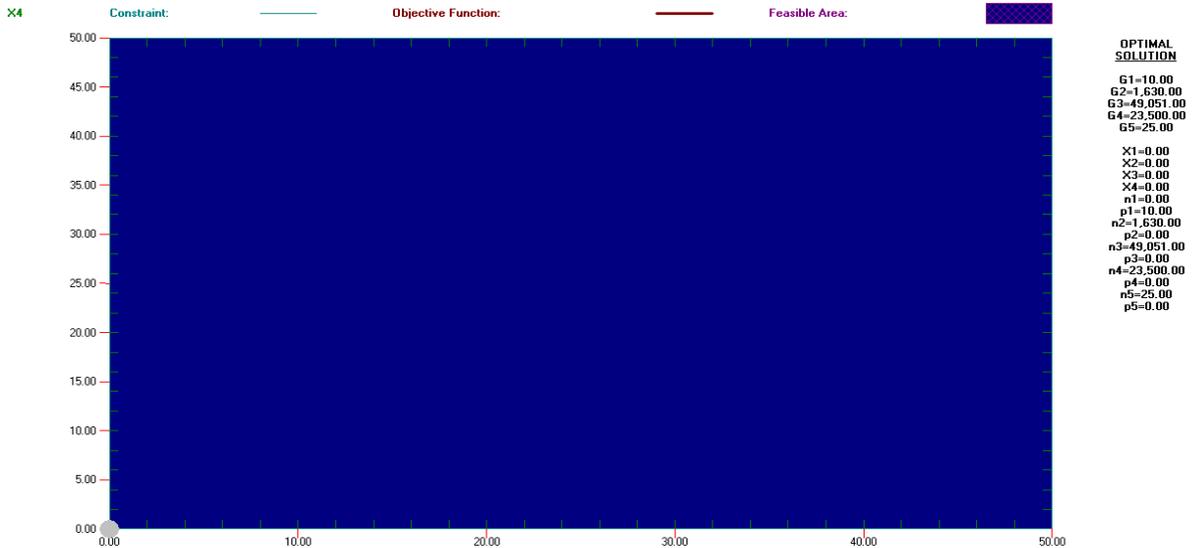


Foto 13 Función Objetivo dos solución óptima

La solución óptima se alcanzó en ocho interacciones y en breve tiempo, lo cual es muy importante, se muestra en la foto 14

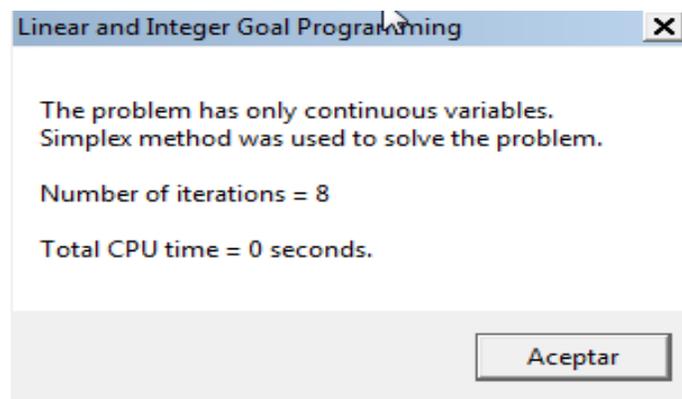


Foto 14 Cantidad de interacciones y medición del tiempo.

En la foto 15 que se muestra el software se informa que el problema ha sido resuelto y que la solución óptima es que las alternativas tienen las mismas opciones de ser escogidas; los costos nivelados de energía se mantienen por iguales a lo planificado, el costo O&M es exacto lo concebido, la emisión de CO₂ se mantiene por debajo 49051, el combustible sustituido se comporta como lo pensado y el factor capacidad tampoco se deteriora. Para hacer un análisis detallado e interpretación del modelo se vuelve a la ventana donde se resume toda la información (foto 16), pudiéndose apreciar una amplia correspondencia entre el resultado óptimo entre las metas y los niveles de aspiración.

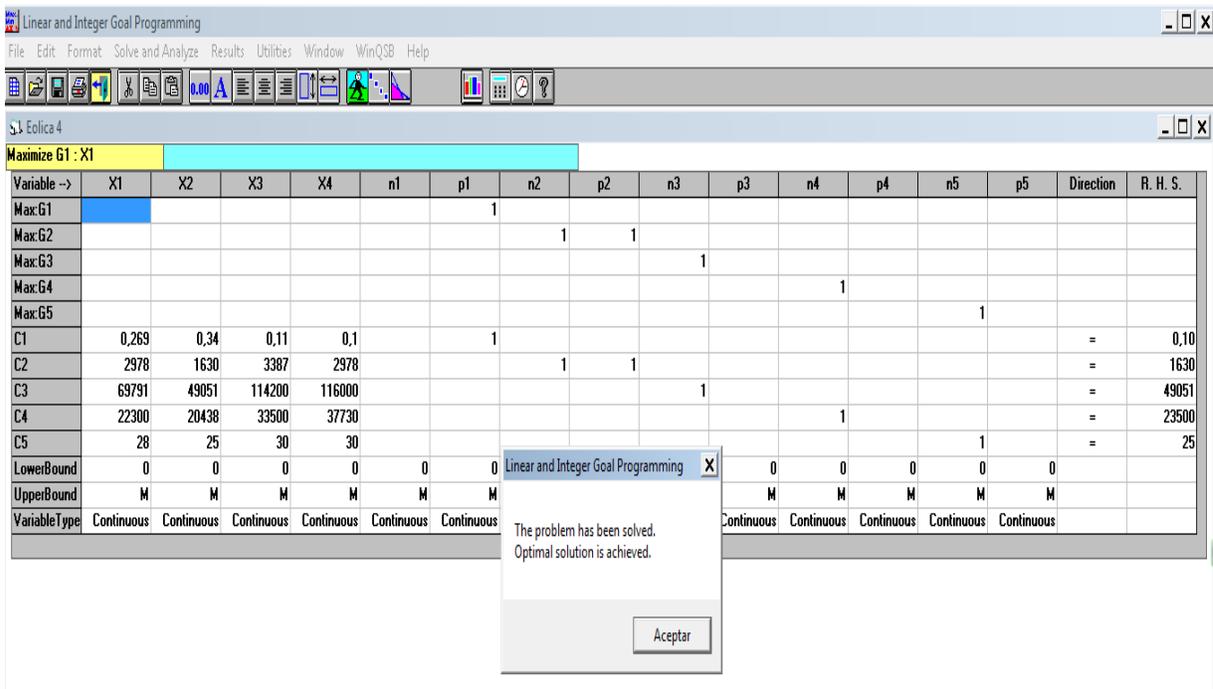


Foto 15 Programación lineal y información de las conclusiones proporcionadas por el software.

09-11-2012 00:53:00	Decision Variable	Solution Value	Basis Status	Reduced Cost Goal 1	Reduced Cost Goal 2	Reduced Cost Goal 3	Reduced Cost Goal 4	Reduced Cost Goal 5
1	X1	0	at bound	-269.00	-2,978.00	-69,791.00	-22,300.00	-28.00
2	X2	0	at bound	-34.00	-1,630.00	-49,051.00	-20,438.00	-25.00
3	X3	0	at bound	-11.00	-3,387.00	-114,200.00	-33,500.00	-30.00
4	X4	0	at bound	-1.00	-2,978.00	-116,000.00	-37,730.00	-30.00
5	n1	0	at bound	0	0	0	0	0
6	p1	10.00	basic	0	0	0	0	0
7	n2	1,630.00	basic	0	0	0	0	0
8	p2	0	at bound	0	0	0	0	0
9	n3	49,051.00	basic	0	0	0	0	0
10	p3	0	at bound	0	0	0	0	0
11	n4	23,500.00	basic	0	0	0	0	0
12	p4	0	at bound	0	0	0	0	0
13	n5	25.00	basic	0	0	0	0	0
14	p5	0	at bound	0	0	0	0	0
	Goal 1:	Maximize	G1 =	10.00				
	Goal 2:	Maximize	G2 =	1,630.00				
	Goal 3:	Maximize	G3 =	49,051.00				
	Goal 4:	Maximize	G4 =	23,500.00				
	Goal 5:	Maximize	G5 =	25.00				

Foto 16 Información resumida de la interpretación del modelo.

Con la solución del problema mediante la programación por metas en el WindQsb se validó la solución antes dada con respecto a la paridad que presentan los parques estudiados, lo cual presupone que es factible continuar en esas zonas la inversión para aumentar el uso de este tipo de tecnologías. Con esto se da solución al problema de los decisores y una vía para futuras inversiones.

En el anexo 3 tablas de la modelación de la programación por metas debido que las fotos no están con la mejor nitidez y para ayudar a la comprensión del método.

CONCLUSIONES

Al concluir la investigación y el presente informe se puede concluir lo siguiente:

1. Se estudió mediante un sistema multiobjetivos usando sus métodos y herramientas asociadas para la localización de las plantas de generación de energía eléctrica con fuentes renovables
2. Se elaboró el marco teórico-referencial que sustenta la investigación a partir del análisis de las tendencias actuales sobre los métodos multiobjetivos y su aplicación en las organizaciones
3. Se expuso el procedimiento propuesto para encontrar la mejor solución al problema equivalente integrando diferentes herramientas de acuerdo a los casos que se pueden presentar
4. Se aplicó el procedimiento en una organización del territorio tomada como caso de estudio. Para el desarrollo de la investigación se utilizaron métodos de análisis y síntesis, método general de solución de problemas, la metodología de métodos multiobjetivos, herramientas matemáticas específicas y trabajo con expertos entre otros
5. Con la aplicación del procedimiento se demostró que siempre se pueden tomar mejores decisiones en cualquiera de los ámbitos económicos y sociales del país.
6. Semejoro el proceso de toma de decisión mediante la aplicación de métodos multiobjetivos.

RECOMENDACIONES

Teniendo en cuenta las conclusiones del presente trabajo se proponen las recomendaciones que a continuación se exponen:

1. Continuar con la aplicación de los métodos de toma de decisiones multicriterios, pues al tener en cuenta una mayor cantidad de variables se evita cometer errores que trasladen más problemas que el que inicialmente se trata de resolver.
2. Incorporar los conocimientos adquiridos durante la realización del trabajo en nuestra vida laboral, personal y al desarrollo de la empresa cubana.
3. Continuar trabajando en el montaje de sistemas de generación de energía eléctrica a partir de energías renovables por el beneficio que traen estos sistemas a la economía del país y al cuidado del medio ambiente.
4. Continuar socializando los resultados de la investigación a través de publicaciones y presentaciones en eventos, así como en la tareas realizadas en las instituciones a las que les pueda traer beneficios tanto económicos como de satisfacción personal y laboral.
5. Utilizar el informe técnico de la investigación como material de consulta para futuros trabajos con sumilleros enfoques.

BIBLIOGRAFÍA

- 1) Álvarez González Andrés Lorenzo, Jiménez Borges Reinier, López Batista Eduardo, Monteagudo Yanes José Pedro (2021) “Métodos de decisión multicriterios en la planificación energética renovable” Universidad de Cienfuegos
- 2) Arzola- Ruiz J, Muhongo V, and Lorca-Toranzo G. “Rural Territories Partition and Optimal Systems Development for it Energy Assurance”; En: World Wind Energy Conference. La Habana, Cuba, 10, 2013. ISBN: 978-3-940683-07-6. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/>
- 3) Barba Romero y Pomerol (1997) “La programación por metas o Loal Programing 1961” Universidad de Alcalá
- 4) Barba Romero y Pomerol (1997) “Sepecial Interest Groupon Multiple Criteria Decision Making”. Universidad de Alcalá
- 5) Belton Valerie y Stewart Theodor (2002) “Análisis de decisión con enfoque criterios múltiples: un enfoque integrado”:
 - A) Técnicas multicriterios clásicas para problemas complejos en los Sistema de Ingeniería I;
 - B) Técnicas multicriterios clásicas para problemas complejos en el Sistema de Ingeniería II;
 - C) Técnicas multicriterios clásicas para problemas complejos en el Sistema de Ingeniería III;
 - D) Continuos: Max-Min, Max-Max, Conjuntivos, Disyuntivos, Asignación lineal;
 - E) Discreto: Lexicográfico, Dominancia, Suma ponderada, Producto ponderado.
- 6) Benayoum Tergny y Geoffrion “La ayuda a la Decisión multicriterio: orígenes, evolución y situación actual” Universidad de San Pablo “Madrid”
- 7) Benítez-Leyva L.V. (2015) “Procedimiento multicriterio-multiobjetivo de planificación energética para comunidades rurales aisladas”. Tutor: Marcos Martín, F. Tesis Doctorado. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos, Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, [Consultado el: 10-10-2021] Disponible en: <http://oa.upm.es/38624/>

- 8) Bernard Roy (1968) "Calssement et choix en presence de point de veu multiples, El méthode ELECTRE" disponible en http://www.numadan.org/item?id=Ro_1968_2_1_57_0
- 9) Brans J- P. PH. Vincke (1985) "A Preference Ranking Organization Method (The PROMETHEE Method for Multiple Criteria Decision-Making)". Management Science
- 10) Bohorquez, L. E. (2016). Complejidad e Ingenier´ia de Sistemas Complejos. En: Ingenier´ia, Vol. 21, No. 3, pp. 360-362. En l´inea DOI:
- 11) Brauers WK. y Zavadskas EK. (2006)" The Moore method and its application to privatization in a transition economy. Control and Cybernetics", 35 (2): 445-469.
- 12) Brauers WK. Zavadskas EK. Peldschus F. y Turskis Z. (2008)"Multi-Objetive decision-making forro ad design. Transport" 23 (3): 183-193.
- 13) Brauers WK. Zavadskas EK. Turskis Z. y Vilutiené T. (2008)"Multi-Objective contractor's ranking by applying the moora method. Journalof Business Economics and Management" 9 (4): 245- 255.
- 14) Candia-Vejar A, González-Araya M: "Sistemas de ingeniería: problemas, modelos y algoritmos de solución para la ayuda en la toma de decisiones"
- 15) Cochrane y Teleny (1972) "First international conference on multiplecriteria decisión making" Universidad de Colombia.
- 16) Consejo de Estado (2019)"Gaceta Oficial de la República de Cuba No.95 Ordinaria De 28112019"
- 17) Comité Central del PCC (2017) "Documentos del 7mo. Congreso del Partido aprobados por el III Pleno del Comité Central del PCC el 18 de mayo de 2017" junio de 2017
- 18) Comité Central del PCC (2021) "Lineamientos de la política económica y social del partido y la revolución para el período 2021-2026"junio / 2021
- 19) CUBAHORA 2019 Primera Revista Digital de Cuba
- 20) Ding C. & Hershberger S. (2002) "Assessing content validity and content equivalence using structural equation modeling". Structural Equation Modeling: A Multidisciplinary Journal

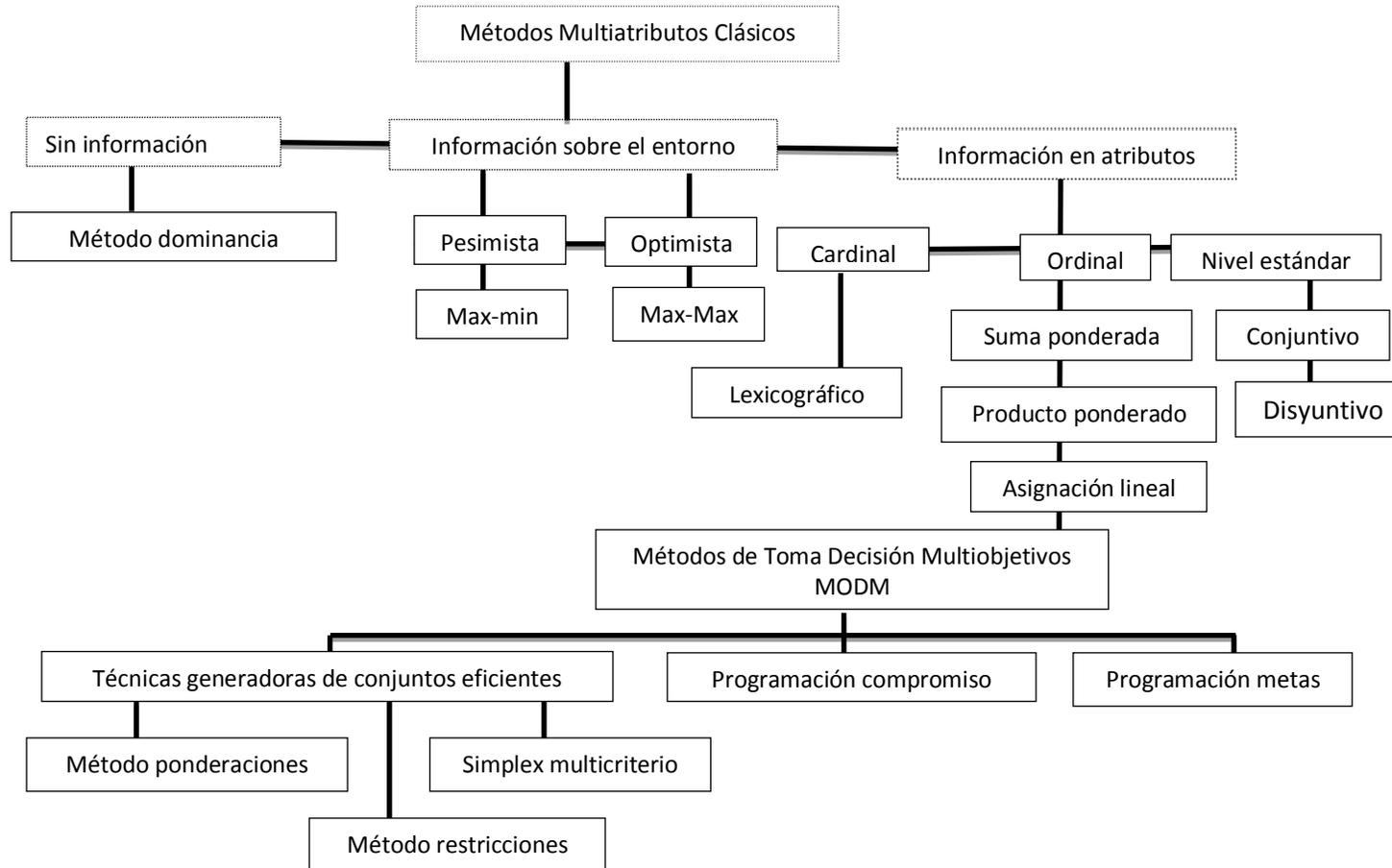
- 21) Escobar Pérez Jazmine & Cuervo Martínez Ángela (2008) "Validez de contenido y juicio de expertos: una aproximación a su utilización". Universidad Nacional de Colombia
- 22) García Bellino R, González Surch J. y Jornet Meliá J. M. (2021) "SPSS: Transformar variables" convención de innovación Universidad de Valencia
- 23) García B.L. (2004) "Desarrollo de un modelo multicriterio-multiobjetivo de oferta de energías renovables: Aplicación a la comunidad de Madrid". Tutor: Marcos Martín, F. Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Universidad Politécnica de Madrid; Madrid. [Consultado el: 5-11-2016] Disponible en: <http://oa.upm.es/259/>
- 24) Global Energy (2021) Trends "Edition Enerdata" Disponible en www.enerdata.net/publications/reports-presentations/world-energy-trends.html consultado 20/11/2021
- 25) Infante Hayne Angel Eugenio, Belete Fuentes Orlando (2020) "Técnicas Mulicriterio para problemas complejos en los sistemas de ingeniería". www.amazon.com
- 26) J. Morales, C. Moreno, J. Pfann. 9 (2015) "Modelo para diseñar y simular sistemas renovables de energía para calentar agua a dos niveles de temperatura". Ingeniería Mecánica. Mayo-Agosto, vol.8, nº. 2, p. 129 -138.ISSN1815-5944
- 27) Lucca M. Carlos (2009) "El proceso de estructuración de problemas como insumo. En la formulación de políticas urbanas de vivienda y hábitat" ww.aacademica.org/000-062/528
- 28) Marie Antonie Nicolas de Caritat (1785) "Essai sur l' application de l'analyse a la probabilité des décisions rendaes a la pluralité des voix"
- 29) Marrero, Díaz et (2012) "Manual de métodos multicriterio para la toma de decisiones"
- 30) Martin Barroso Ariel Manuel, Leyva Ferreiroll I Grisel (2017) "Análisis crítico de la inversión en energías renovables. Enfoque socioeconómico". Confín Habana versión On-line Vol. 11 No. 2 La habana Julio-Diciembre
- 31) Martínez Arjona Nuria (2016) "Metodología Multiobjetivo aplicada a análisis de datos" Universidad Complutense de Madrid, Tesis doctoral

- 32) Mesa J. L. C. Yildirim M. B y Masud A. S. M. OP. Cit (2007) "A model for the multiperiod multiobjective power generation expansion problem" IEEE Transactions on Power Systems
- 33) Michailos S. Parker D. & Webb C. (2016) " A multicriterio comparison of utilizing sugar cane bagasse for methanol to gasoline and butanol production" Biomass and Bioenergy: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe> consulted 25/11/2021
- 34) Moreno Rocha Christian Manuel (2021) "Proceso de jerarquía analítica difusa para la toma de decisiones de suministro eléctrico en aéreas rurales no interconectadas en la región Caribe colombiana" Universidad de la Costa Barranquilla, Colombia
- 35) Montesino Ronquillo Yaima (2012) "Manual de métodos multicriterio para la toma de decisiones" Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas Santa Clara
- 36) Opricovic S. y Tzeng G (2004) "Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS". European Journal of Operational Research
- 37) Rodríguez Cotilla Zoe. "Teoría de la decisión multicriterio: un enfoque para la toma de decisiones"
- 38) Saaty T L (2008) "Decision making with the analytic hierarchy process" Int. J. Services Sciences
- 39) Saunders Vázquez Anaely (2019) "Vigilancia Energética, Las Fuentes Renovables de Energía Volumen 1 y 2" CUBAENERGÍA, CUBASOLAR
- 40) Sergio Barba – Romero (1987) "Panorama actual de la decisión multicriterio discreta"
- 41) Skjong R & Wentworth B. (2000) "Expert judgment and risk perception". Recuperado el 15/01/2006 research.dnv.com/skj/Papers/SkiWen.pdf consultado 21/11/2021
- 42) Tjalling Koopmans (1910 – 1985) "Analysis of production as an efficient combination of activities"
- 43) Tekiner H. Coit D. W. Felder F (2010) "Multi period multi-objective electricity generation expansion planning problem with Monte-Carlo simulation" Electric Power Systems Research

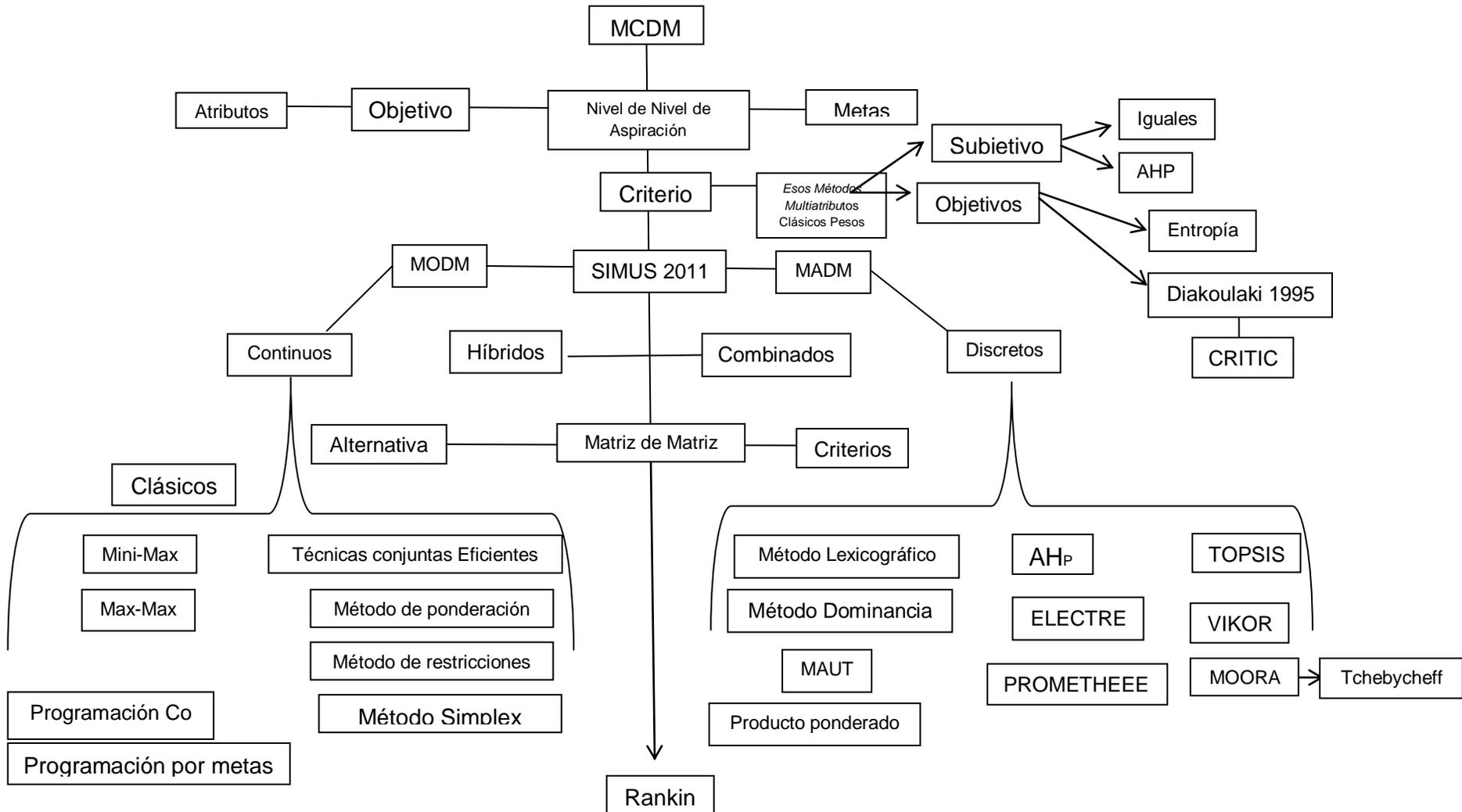
- 44) Yajure C. (2015) “Metodología integrada multicriterio para la jerarquía de tecnologías de energía renovable a utilizar para la producción de energía eléctrica”
Revista Tecnológica ESPOL
- 45) Yajure Ramírez Cesar Aristóteles y Arlenis Guzmán Yaismir (2017) “Estudio comparativo de técnicas de toma de decisiones multicriterio para la jerarquización de tecnologías de energías renovables a utilizar en la producción de electricidad”
Universidad Tecnológica de Pereira
- 46) Yang Y. Ren J. Solgaard H. S. Xu D. & Nguyen T. T. (2018) “Using multi-criteria analysis to prioritize renewable energy home heating technologies” Sustainable Energy Technologies and Assessments: <https://doi.org/10.1016/j.seta> consulted 25112021

ANEXOS

Anexo 1 Modelo de métodos multiatributos, adaptado de Chen y Hwang, 1992



Anexo 2 Diagrama de los modelos más usados y la vinculación entre ellos.



Anexo 3 Tablas de la modelación de la programación por metas

Tabla 13 Modelación matemática al software.

C5: R. H. S. X V 25

Variable	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	N ₁	P ₁	N ₂	P ₂	N ₃	P ₃	N ₄	P ₄	N ₅	P ₅	Dirección	R. H. S.
Max: G ₁						1										
Max: G ₂							1	1								
Max: G ₃									1							
Max: G ₄											1					
Max: G ₅													1			
C ₁	0,269	0,344	0,11	0,1		1									=	0,10
C ₂	2978,8	1630,55	3387,8	2978,85			1	1							=	1630
C ₃	69791,3	49051,1	114200	116000					1						=	49051
C ₄	22302,3	20438	33500	37730							1				=	23500
C ₅	28	25	30	30									1		=	25
Lower Bound	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Upper Bound	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M		
Variable Type	Continuous															



Tabla 13 Resultado que entrega el software

Decisión Variable	Solución Value	Basis Status	Reduced Cost Goal1	Reduced Cost Goal 2	Reduced Cost Goal 3	Reduced Cost Goal 4	Reduced Cost Goal 5
X ₁	0	At bound	-269,00	-2 978,00	-69 791,00	-22 300,00	-28,00
X ₂	0	At bound	-34,00	-1 630,00	-49 051,00	-20 438,00	-25,00
X ₃	0	At bound	-11,00	-3 387,00	-114 200,00	-33 500,00	-30,00
X ₄	0	At bound	-1,00	-2 978,00	-116 000,00	-37 730,00	-30,00
N ₁	0	At bound	0	0	0	0	0
P ₁	10,00	Basic	0	0	0	0	0
N ₂	1 630,00	Basic	0	0	0	0	0
P ₂	0	At bound	0	0	0	0	0
N ₃	49 051,00	Basic	0	0	0	0	0
P ₃	0	At bound	0	0	0	0	0
N ₄	23 500,00	Basic	0	0	0	0	0
P ₄	0	At bound	0	0	0	0	0
N ₅	25	Basic	0	0	0	0	0
P ₅	0	At bound	0	0	0	0	0
Goal 1	Maximize	G ₁ =	10,00				
Goal 2	Maximize	G ₂ =	1 630,00				
Goal 3	Maximize	G ₃ =	49 051,00				
Goal 4	Maximize	G ₄ =	23 500,00				
Goal 5	Maximize	G ₅ =	25,00				

Tabla 14 Resultado del resumen combinado de la aplicación del método

Constraint	Left Hand Side	Dirección	Right Hand Side	Stackor Surplus	Shadow Price Goal 1	Shadow Price Goal 2	Shadow Price Goal 3	Shadow Price Goal 4	Shadow Price Goal 5
C ₁	10,00	=	10,00	0	1,00	0	0	0	0
C ₂	1 630,00	=	1 630,00	0	0	1,00	0	0	0
C ₃	49 051,00	=	49 051,00	0	0	0	1,00	0	0
C ₄	23 500,00	=	23 500,00	0	0	0	0	1,00	0
C ₅	25,00	=	25,00	0	0	0	0	0	1,00

Tabla 15 Análisis de sensibilidad para las metas

Decision Variable	Goal Level	Reduced Cost	Unit Cost or Profit c(i)	Allowable Min. c(i)	Allowable Max c(i)
X ₁	G ₁	-17,67	28,00	-M	45,67
X ₂	G ₁	0	25,00	15,33	M
X ₃	G ₁	-489,60	30,00	-M	519,60
X ₄	G ₁	-426,87	30,00	-M	456,87
X ₁	G ₂	-119 891,50	95 005,00	-M	M
X ₂	G ₂	0	117 623,00	-M	M
X ₃	G ₂	2 222 285,25	222 397,00	-M	M
X ₄	G ₂	2 026 707,25	122 835,00	-M	M
X ₁	G ₃	19 824,88	69 791,00	-M	M
X ₂	G ₃	0	49 051,00	-M	M
X ₃	G ₃	905 278,38	114 200,00	-M	M
X ₄	G ₃	-708 399,50	116 000,00	-M	M

Tabla 16 Análisis de sensibilidad para el lado derecho de las restricciones.

Constraint	Direction	Right Hand Side	Allowable Min. RHS	Allowable Max. RHS	Shadow Price Goal 1	Shadow Price Goal 2	Shadow Price Goal 3
C ₁	>=	7 907,00	-M	7 907,00	0	0	0
C ₂	<=	95 000 528,00	117 624,00	M	0	0	0
C ₃	<=	1 630,00	1 630,00	1 316 523,00	0,02	72,16	30,09
C ₄	>=	2 300,00	-M	20 438,00	0	0	0

Tabla 17 Resultados combinados de las metas y las restricciones

Goal Level	Decision Variable	Solución Value	Unit Cost or Profit c(i)	Total Contribution	Reduced Cost	Allowable Min. c(i)	Allowable Max c(i)
G ₁	X ₁	0	28,00	0	-17,67	-M	45,67
G ₁	X ₂	1,00	25,00	25,00	0	15,33	M
G ₁	X ₃	0	30,00	0	-489,60	-M	519,60
G ₁	X ₄	0	30,00	0	-426,87	-M	456,87
G ₂	X ₁	0	95 005,00	0	-119 891,50	-M	M
G ₂	X ₂	1,00	117 623,00	117 623,00	0	-M	M
G ₂	X ₃	0	222 397,00	0	2 222 285,25	-M	M
G ₂	X ₄	0	122 835,00	0	2 026 707,25	-M	M
G ₃	X ₁	0	69 791,00	0	19 824,88	-M	M
G ₃	X ₂	1,00	49 051,00	49 051,00	0	-M	M
G ₃	X ₃	0	114 200,00	0	905 278,38	-M	M
G ₃	X ₄	0	116 000,00	0	-708 399,50	-M	M

Tabla 17 Continuación Resultados combinados de las metas y las restricciones

Goal Level	Decision Variable	Solución Value	Unit Cost or Profit c(i)	Total Contribution	Reduced Cost	Allowable Min. c(i)	Allowable Max c(i)			
G ₁	Goal	Value	(Máx) =	25,00						
G ₂	Goal	Value	(Máx) =	117 623,00						
G ₃	Goal	Value	(Máx) =	49 051,00						
Constraint	Left Hand Side	Direction	Right Hand Side	Slack or Surplus	Allowable Min. RHS	Allowable Max. RHS	Shadow Price Goal 1	Shadow Price Goal 2	Shadow Price Goal 3	
C ₁	7 907,00	>=	7 907,00	0	-M	7 907,00	0	0	0	
C ₂	117 621,00	<=	95 000 528,00	94 882 904,00	117 624,00	M	0	0	0	
C ₃	1 630,00	<=	1 630,00	0	1 630,00	1 316 523,00	0,02	72,16	30,09	
C ₄	20 438,00	>=	2 300,00	18 138,00	-M	20 438,00	0	0	0	

Tabla 18 Cálculo del resultado final

	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	N ₁	P ₁	N ₂	P ₂	N ₃	P ₃	N ₄	P ₄	N ₅	P ₅
Goal 1 C(i)	0	0	0	0	0	1,00	0	0	0	0	0	0	0	0
Goal 2 C(i)	0	0	0	0	0	0	1,00	1,00	0	0	0	0	0	0
Goal 3 C(i)	0	0	0	0	0	0	0	0	1,00	0	0	0	0	0
Goal 4 C(i)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,00	0	0	0
Goal 5 C(i)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,00	0

Tabla 18 Continuación Cálculo del resultado final

Basis		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	N ₁	P ₁	N ₂	P ₂	N ₃	P ₃	N ₄	P ₄	N ₅	P ₅	R: H: S.	Ratio
P ₁	C1	269,00	34,00	11,00	1,00	0	1,00	0	0	0	0	0	0	0	0	10,00	M
N ₂	C2	2 78,00	1 630,00	3387,00	2 978,00	0	0	1,00	1,00	0	0	0	0	0	0	1630,00	M
N ₃	C3	69791,00	49051,00	114200,00	116000,00	0	0	0	0	1,00	0	0	0	0	0	49051,00	M
N ₄	C4	22300,00	20438,00	33 500,00	37 730,00	0	0	0	0	0	0	1,00	0	0	0	23500,00	M
N ₅	C5	28,00	25,00	30,00	30,00	0	0	0	0	0	0	0	0	1,00	0	25,00	M

Tabla 18 Continuación Cálculo del resultado final

		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	N ₁	P ₁	N ₂	P ₂	N ₃	P ₃	N ₄	P ₄	N ₅	P ₅	
Max Goal 1	C _j -Z _j	-269,00	-34,00	-11,00	-1,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10,00
Max Goal 2	C _j -Z _j	-2 78,00	-1630,00	-3 387,00	-2 978,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1 630,00
Max Goal 3	C _j -Z _j	-69791,00	-49051,00	-114200,00	-116000,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	49051,00
Max Goal 4	C _j -Z _j	-22300,00	-20438,00	-33500,00	-37730,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	23500,00
Max Goal 5	C _j -Z _j	-28,00	-25,00	-30,00	-30,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25,00

Tabla 19 Programación lineal

Variable	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	N ₁	P ₁	N ₂	P ₂	N ₃	P ₃	N ₄	P ₄	N ₅	P ₅	Dirección	R. H. S.
Max: G ₁						1										
Max: G ₂							1	1								
Max: G ₃									1							
Max: G ₄											1					
Max: G ₅													1			
C ₁	0,269	0,344	0,11	0,1		1									=	0,10
C ₂	2978,8	1630,55	3387,8	2978,85			1	1							=	1630
C ₃	69791,3	49051,1	114200	116000					1						=	49051
C ₄	22302,3	20438	33500	37730							1				=	23500
C ₅	28	25	30	30									1		=	25
Lower Bound	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Upper Bound	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M		
Variable Type	Continuous															

Tabla 20 Información resumida de la interpretación del modelo

Decisión Variable	Solución Value	Basis Status	Reduced Cost Goal1	Reduced Cost Goal 2	Reduced Cost Goal 3	Reduced Cost Goal 4	Reduced Cost Goal 5
X ₁	0	At bound	-269,00	-2 978,00	-69 791,00	-22 300,00	-28,00
X ₂	0	At bound	-34,00	-1 630,00	-49 051,00	-20 438,00	-25,00
X ₃	0	At bound	-11,00	-3 387,00	-114 200,00	-33 500,00	-30,00
X ₄	0	At bound	-1,00	-2 978,00	-116 000,00	-37 730,00	-30,00
N ₁	0	At bound	0	0	0	0	0
P ₁	10,00	Basic	0	0	0	0	0
N ₂	1 630,00	Basic	0	0	0	0	0
P ₂	0	At bound	0	0	0	0	0
N ₃	49 051,00	Basic	0	0	0	0	0
P ₃	0	At bound	0	0	0	0	0
N ₄	23 500,00	Basic	0	0	0	0	0
P ₄	0	At bound	0	0	0	0	0
N ₅	25	Basic	0	0	0	0	0
P ₅	0	At bound	0	0	0	0	0
Goal 1	Maximize	G ₁ =	10,00				
Goal 2	Maximize	G ₂ =	1 630,00				
Goal 3	Maximize	G ₃ =	49 051,00				
Goal 4	Maximize	G ₄ =	23 500,00				
Goal 5	Maximize	G ₅ =	25,00				