Proceso multi-criterio para la toma de decisiones en la selección de componentes para la estación de medición basado en el Proceso Jerárquico Analítico (AHP)

David Javier Muñoz Aldana

*Docente Investigador, Facultad de Ingenierías,
Programa de Tecnología en Control de Procesos
Electrónicos e Ingeniería Electrónica, Grupo de
Investigación en Automatización y Electrónica (GIAEL),
Fundación Universitaria Tecnológico Comfenalco
Cartagena, BRR España Cr. 44 D 30 A 91,
Cartagena, Colombia.
dmunoz@tecnologicocomfenalco.edu.co*

Recibido: 15 Febrero 2015 – Revisado: 30 Abril 2015

Aceptado: 30 Mayo 2015 – Publicado: 30 Julio 2015

Resumen: La técnica del Analytical Hierarchy Process (AHP), creado por Tomas Saaty, ha sido aplicada para la selección de los elementos de la estación meteorológica. Se consideraron criterios de características como precio, temperatura, características físicas, rendimiento y alimentación energética para cada uno de los elementos involucrados dentro de la estación meteorológica, algoritmo propuesto por Saaty. Por otra parte, con base en los resultados presentados por los diferentes ponentes en el Primer Encuentro de Fuentes No Convencionales de Energía (FNCE) y estudios recientes realizados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (Ideam), se determinó que el potencial eólico y solar no se limita solo a la zona de La Guajira, como así lo señalaba el estudio del 2005 realizado también por el Ideam, sino que se extiende a toda la Región Caribe; esto sugiere un mayor muestreo de variables en toda esta región con el fin de determinar la potencialidad de estos recursos energéticos en esta zona. De este modo, el Ideam identificó un nuevo punto de medición ubicado en Bolívar con el cual se podrían mejorar las mediciones en este departamento.

Palabras clave: multi-criterio; recurso eólico; recurso solar; proceso analítico jerárquico; estación meteorológica.

Abstract: The technique ANALYTICAL HIERARCHY PROCESS (AHP), created by Thomas Saaty, it has been applied for the selection of the elements of the weather station. Criteria are considered characteristics such as price, pressure, temperature, physical characteristics, performance and power supply to each of the elements involved in the weather station, proposed by Saaty algorithm. Moreover, based on the results presented by different speakers at the First Meeting of FNCE and recent studies by the IDEAM, it was determined that wind and solar potential is not limited to the region of La Guajira, as they marked the 2005 study also conducted by the IDEAM, but extends to the entire Caribbean region, suggesting a higher sampling variables whole region in order to determine the potential of these energy resources in this area. Thus, the IDEAM identified a new measurement point located in Bolivar which measurements could be improved in this department.

Key words: multi-criteria; wind resource; solar resource; analytical hierarchy process, weather station.

1. INTRODUCCIÓN

En el año 1987, Tomas Saaty creó una técnica para generar modelos de tomas de decisiones en problemas decisionales no estructurados. El sistema consiste en cuatro niveles de integración siguiendo el enfoque TOP-DOWN (Saaty, 2008). El propósito es desarrollar un estudio de toma de decisión multicriterio en la selección de componentes para la estación de medición meteorológica basado en el Proceso Jerárquico Analítico (AHP), que atienda a un requerimiento del proyecto de investigación con base en energías eólica y solar en el caribe colombiano (Pasqualino, 2015).

Se realizó el estudio abordando solo tres niveles comparativos basados en las características y sus

alternativas. Al final del proceso algorítmico, se espera seleccionar aquellos componentes de la estación meteorológica sugeridos para ser comprados dentro del marco del proyecto de investigación y al mismo tiempo, ofrecer un registro a las futuras selecciones de estaciones meteorológicas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La técnica AHP posee una variedad de softwares de apoyo para sus aplicaciones. Actualmente existen los paquetes informáticos dedicados a la decisión multicriterio como el HIPRE3+ INPRE, AIM, PROMCALC, CRITERIUM, MCView, ELECTRE, EXPERT CHOICE, entre otros. En esta investigación se ha trabajado con el software EXPERT CHOICE.

Figura 1. Modelo AHP para la estación meteorológica.

Debido a que se desea efectuar una comparativa entre cada una de las características de los instrumentos de medición, es necesario en este apartado realizar la identificación clara y precisa para no caer en ambigüedad y mostrar resultados notorios para cada variable perceptible dada a los instrumentos asociados, tal como los anemómetros, sensor de dirección de viento, higrómetro, barómetro y pyranómetro. Por tanto, dentro una misma variable, puede ser adquirida por varios instrumentos de medición; se consideran características únicas de cada fabricante y se reconsidera muy útil establecer la comparativa acorde por cada modelo de fabricante (Da Hora y Costa, 2009).

El presente estudio se desarrolló teniendo en cuenta los niveles de integración y siguiendo el enfoque TOP-DOWN (MacLellan, 2007). El foco ubicado en el nivel cero es la estación meteorológica; en el nivel 1 se encuentran los criterios denominados como características eléctricas, rendimiento, física, temperatura y precio donde cada criterio posee alternativas que son los requerimientos para cada elemento tecnológico, tal como se observa en el nivel 3 o nivel base de la Figura 1.

Consecuentemente, para la selección adecuada, se plantea el poder realizar el criterio de selección conforme a cada elemento tecnológico de nivel 3, tras comparar las características correspondientes y sus alternativas particulares; es decir, se pretende realizar comparaciones de a pares entre dichos elementos (criterios-subcriterios y alternativas) y se atribuyen valores numéricos de criterio para realizar juicios parciales que facilitan una síntesis de la misma.

Consecuentemente, para la selección adecuada, se plantea el poder realizar el criterio de selección conforme a cada elemento tecnológico de nivel 3, tras comparar las características correspondientes y sus alternativas particulares; es decir, se pretende realizar comparaciones de a pares entre dichos elementos (criterios-subcriterios y alternativas) y se atribuyen

valores numéricos de criterio para realizar juicios parciales que facilitan una síntesis de la misma.

Los valores numéricos que entrega la persona experta facilita la comprensión de cada elemento de la jerarquía al nivel inmediatamente superior en el cual se encuentra relacionado.

Para realizar las comparaciones, es factible usar escalas de razón de términos de preferencia, importancia o probabilidad, sobre la base de una escala numérica propuesta por Tomas Saaty; lo que da lugar a la escala abordada de la Fig. 2.

Figura 2. Escala AHP

Dicha escala es puesta por el experto dentro de la matriz de comparación por pares o también conocida como matriz calificación-criterios (Gómez, 2008) (ver la Tabla 1).

Tabla 1. Matriz de comparación por pares.

Selección de elementos tecnológicos para la estación meteorológicas	Características Eléctrica/ Electrónica	Características Físicas	Precio
Características Eléctrica/ Electrónica	1		
Característica Física		1	
Precio			1

Para llenar esta matriz, primero hay que entender el significado de cada valor de la escala y para los valores recíprocos de la escala, su interpretación es análoga concibiéndose tal como se observa en la Tabla 3.

Los valores pares como el 2, 4, 6 y 8 se utilizan cuando se comparan dos (2) elementos entre sí. El primero está en un grado de importancia/preferencia

intermedio entre dos (2) valores adyacentes de la escala.

Los valores $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{6}$, y $\frac{1}{8}$ se usan de la misma forma que los valores pares 2, 4, 6 y 8.

Tabla 2. Escala recíproca, interpretación análoga.

IMPORTANCIA/ PREFERENCIA	INTENSIDAD	SIGNIFICADO
1/3	Ligeramente menos importante o preferido que...	Al comparar un elemento con el otro, primero se considera ligeramente menos importante o preferido que el segundo
1/5	Menos importante o preferido que...	Al comparar un elemento con el otro, el primero se considera menos importante o preferido que el segundo
1/7	Mucho menos importante o preferido que...	Al comparar un elemento con el otro, el primero se considera mucho menos importante o preferido que el segundo
1/9	Absolutamente o muchísimo menos importante o preferido que...	Al comparar un elemento con el otro, el primero se considera absolutamente o muchísimo menos importante o preferido que el segundo

Tabla 3. Interpretación de algunos valores de la escala.

IMPORTANCIA/ PREFERENCIA	INTENSIDAD	SIGNIFICADO
1	Igual o diferente a...	Al comparar un elemento con otro, hay indiferencia entre ellos
3	Ligeramente más importante o preferido que...	Al comparar un elemento con el otro, el primero es ligeramente más importante o preferido que el segundo
5	Más importante que...	Al comparar un elemento con el otro, el primero se considera más importante o preferido que el segundo
7	Mucho más importante o preferido que...	Al comparar un elemento con el otro, el primero se considera mucho más importante o preferido que el segundo
9	Absolutamente o muchísimo más importante o preferido que...	Al comparar un elemento con el otro, el primero se considera absolutamente o muchísimo más importante que el segundo

3. RESULTADOS

3.1 Instrumentos de medición

3.1.1 Anemómetro

De acuerdo a la Fig. 3 es prioritario el precio (74,2%) conforme a las decisiones tomadas. De segundo lugar estarían las características eléctricas (21,1%), por último, las características físicas (4,7%).

Figura 5. Comparaciones de los sensores de velocidad del viento.

De la Figura 5 se puede recopilar que el sensor de Campbell Scientific A100R tiene las mejores características físicas; Met One Modelo 034B, las mejores características eléctricas y Ngr CLASS 1, el mejor precio ofertado. Sin embargo, si el precio fuese influyente en el momento de la adquisición, mejor sería adquirir Ngr Class1.

Figura 6. Gráficas de sensibilidad para los sensores de anemómetro.

Si fuese en que no se tuviera el precio como un factor de prioridad, sino que la decisión que se quiera tomar se diera por las características físicas y eléctricas, el sensor de Met One Modelo 034B tendría el mayor porcentaje de favorabilidad y de segundo lugar estaría el Campbell Scientific A100R, el cual serían los dos altamente recomendados.

A pesar de la postura dada en la Figura 3 y Figura 4, comparándose con la Fig. 6, la recomendación sería que en el proyecto se adquiriera el sensor Met One Modelo 034B, dado a su costo y mejores prestaciones eléctricas y físicas.

Figura 7. Cambios de prioridad con respecto al precio para las gráficas de sensibilidad [Anemómetro].

3.1.2 Sensor dirección de viento

De acuerdo a la Fig. 6, es prioritario el precio (63,6%) conforme a las decisiones tomadas; de segundo lugar estarían las características eléctricas (29,5%) y, por último, las características físicas (6,9%).

Figura 8. Comparaciones de los sensores de dirección de viento.

En la Fig. 7, se observa que Met One 034B ofrece el mejor precio; Campbell Scientific W200P tiene las mejores características físicas y Lambrecht Ref. 14522 posee las mejores características eléctricas, pero muy sesgado con Met One Modelo 034B.

Figura 9. Gráficas de sensibilidad para los sensores de dirección de viento.

Para el caso en que casi no se tuviera en cuenta el precio como un factor de prioridad y se tuviera mayor incidencia en las características eléctricas, el sensor de Lambrecht Ref. 14522 tendría en mayor porcentaje de favorabilidad y de segundo lugar estaría el Met One Modelo 034B. Los dos serían altamente recomendados.

A pesar de la postura dada en la Fig. 6 y Fig. 7, comparándose con la Fig. 8, la recomendación sería que en el proyecto se adquiriera el sensor Met One Modelo 034B para la dirección de viento, dado a su costo y mejores prestaciones eléctricas y físicas.

Figura 10. Cambios de prioridad con respecto al precio para las gráficas de sensibilidad [dirección de viento].

3.1.3 Sensor de humedad relativa

Acorde a la Fig. 9, es prioritario el precio (73%) respecto a las decisiones tomadas; de segundo lugar estarían las características eléctricas (21,3%) y, por último, las características físicas (5,3%).

Goal: SENSOR DE HUMEDAD RELATIVA	
<ul style="list-style-type: none"> Características Eléctricas (L: .213) <ul style="list-style-type: none"> Rango (L: .018) Tiempo de respuesta (L: .033) Presición (L: .052) Señal de salida (L: .105) Entrada de Potencia (L: .519) Temperatura de Operación (L: .272) Características Físicas (L: .053) <ul style="list-style-type: none"> Dimensión (L: .143) Peso (L: .857) Precio (L: .734) Preferencia (L: 1.000) 	
MET ONE MODELO 083E	168
Siap+Micros Ref. T003-TRH-V	111
Campbell Scientific CS215	721

Figura 11. Comparaciones de los sensores de humedad relativa

De acuerdo a la Fig. 10, se puede extraer información sobre qué sensor tiene las mejores características físicas, eléctricas y ofrece el mejor precio. Este es el sensor de Campbell Scientific Cs215.

Figura 12. Gráficas de sensibilidad para los sensores humedad relativa.

Cuando se desea conocer el criterio para cuando no se tiene incidencia en el precio, se sigue destacando el sensor de Campbell Scientific CS215, tal como se observa en la Figura 11.

Figura 13. Cambios de prioridad con respecto al precio para las gráficas de sensibilidad [Higrómetro].

Por tanto, el sensor de humedad relativa recomendado es Campbell Scientific CS215 por sus altos índices de preferencias.

3.1.4 Sensor de presión barométrica

En la Fig. 12, es prioritario el precio (70,8%) respecto a las decisiones tomadas, de segundo lugar estarían las características eléctricas (23%) y, por último, las características físicas (11,1%).

Figura 14. Comparaciones de los sensores de presión barométrica

De acuerdo a la Fig. 13, se puede simplificar la información sobre qué sensor tienen las mejores características físicas, eléctricas y ofrece el mejor precio. Para las características físicas y eléctricas, las posee el sensor de Campbell Scientific CS106. Aunque quien ofrece mejor precio es Met One Modelo 092E.

Figura 15. Gráficas de sensibilidad para los sensores de presión barométrica

Para conocer el criterio para cuando no se tiene incidencia en el precio, se sigue destacando el sensor de Campbell Scientific CS106, tal como se observa en la Figura 14.

Por tanto, el sensor de presión barométrica recomendado es Campbell Scientific CS106, por sus altos índices de preferencias tanto económica como técnica.

Figura 16. Cambios de prioridad con respecto al precio para las gráficas de sensibilidad [Barómetro].

3.1.5 Sensor de radiación solar

En la Fig. 15, es prioritario el precio (71,8%) respecto a las decisiones tomadas, de segundo lugar se ubicarían las características eléctricas (22,7%) y, por último, las características físicas (5,4%).

Figura 17. Comparaciones de los sensores de radiación solar.

De acuerdo a la figura 16, se puede simplificar la información sobre qué sensor tienen las mejores características físicas, eléctricas y cuál ofrece el mejor precio. Con respecto a las características eléctricas, las mejores las tienen los sensores de Met One Modelo 095 y el Kipp&Zonen Re CMP 3. Por otro lado, las características físicas que mejor ofrece es Campbell Scientific Lp02.

Figura 18. Gráficas de sensibilidad para los sensores de radiación solar.

Para cuando no se tiene incidencia en el precio, se sigue destacando el sensor de Met One Modelo 095, tal como se observa en la figura 17.

Por ende, el sensor de radiación solar recomendado Met One Modelo 095, debido a sus altos índices de preferencias.

Figura 19. Cambios de prioridad con respecto al precio para las gráficas de sensibilidad [Pyranómetro].

4. DISCUSIÓN

Los métodos de toma de decisión multi-criterio son eficientes para resolver problemas de tomas de decisiones complejos (Tejero Aranda, 2015), como es el caso del proceso de selección de los elementos de la estación meteorológica pertinente a este proyecto de investigación. Por lo tanto, establecer la selección de los elementos (Toscano, 2005) de la estación meteorológica se encuentra fundamentada en las

prestaciones, el conocimiento que se tenga de las condiciones ambientales y de los instrumentos de medida; en este caso del anemómetro, sensor de dirección de viento, sensor de humedad relativa, sensor de presión barométrica y el sensor de radiación solar son de gran requisición con el objeto de tener a fin con las variables que registra el Ideam.

Por tal razón, se realizó el estudio con base en las características de los instrumentos usados por esta entidad para buscar reducción de costos con equipos adecuados. Comparar los fabricantes como Met One, NGR Class, Lambrecht, Campbell Scientific, Siap+Micros y Kipp&Zonen fueron fundamentales para establecer qué equipo funciona con mejores prestaciones ante el requerimiento de la variable solicitada; esto con el fin de efectuar la implementación en la adquisición de datos de parámetros meteorológicos para evaluar la condición de generación de energía solar y eólica.

El conocimiento de las características mencionadas en el anterior párrafo resulta idóneo para aplicar la técnica AHP. En ella existen diversos parámetros de criterios para efectuar la selección acertada conforme a qué es conveniente adquirir realizando poco pago por los instrumentos de medición.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, para el anemómetro, a pesar de que el instrumento NGR Class1 efectúa muy buenas referencias, se opaca ante el costo del sensor Met One Modelo 034B. Aun así, las prestaciones eléctricas y físicas son muy similares.

En el sensor de dirección de viento, el instrumento Met One Modelo 034B tiene un 61,2% de favorabilidad ante otros instrumentos; es de alta confiabilidad.

En el instrumento higrómetro, sobresale el de referencia Campbell Scientific CS215 por ofrecer un 72,1% de favorabilidad debido a una enorme diferencia en precio frente a una desproporcionada no tan favorable con Met One Modelo 083E; sin

cuestionar el peso y la entrada de potencia, que hace que ofrezca una mejor prestación en la fiabilidad del instrumento.

Con respecto al instrumento que mide la presión barométrica, el Met One Modelo 092E emplea un 59,7% de favorabilidad. En contraposición a su próximo rival comparativo: el Campbell Scientific CS 106, que obtiene un 32,4% no tan favorable; su gran aceptación obedece al rango y temperatura de operación, precisión, estabilidad, peso y diferencia en sus precios.

El instrumento de radiación solar que maneja un 52,3% de favorabilidad es el Met One Modelo 095, mientras que el Kipp&Zonen Ref CMP3 obtiene un 27,8% no tan favorable, debido a su espectro de respuesta, dependencia de temperatura, irradiancia, peso y precio, que hizo al Met One Modelo 095 merecedor de su favorabilidad.

5. CONCLUSIONES

Desde el punto de vista técnico, el anemómetro para fijar la dirección del viento sería el Met One Modelo 034B; además, el higrómetro Campbell Scientific CS215, el barómetro Campbell Scientific CS106 y el pyranómetro Met One Modelo 095 son preferencialmente ideales y recomendables para el proyecto, dado a sus costos y mejores prestaciones eléctricas y físicas.

Hay que tener en cuenta que este análisis se realiza sin tener en cuenta el dispositivo datalogger y el software, los cuales son dispensables para recopilar la información de cada uno de los sensores expuestos en este documento. Por otro lado, si se comparara el criterio para el viento y el sol vital en el proyecto de la convocatoria 616 de Colciencias–UPME, es altamente fiable y recomendable adquirir los mismos con el fabricante Met One Instrument por contener los instrumentos sensibles del proyecto «MET ONE MODELO 034B» y «MET ONE MODELO 095», estipulados como sensores altamente recomendados

para su adquisición y evitaría controversia en el canal de comunicación, debido a compatibilidad en los conectores.

Por otra parte, conforme a los estudios recientes, se ha determinado el potencial eólico y solar en los demás departamentos de la Región Caribe y en especial, del departamento de Bolívar, por lo cual se hace necesario incrementar el muestreo de variables que permitan cuantificar los recursos solar y eólico en el departamento y así, en toda la Región Caribe. Para ello, el Ideam en sus estudios previos, determinó que en los predios de la Universidad Tecnológica de Bolívar Sede Ternera, se ubica un punto estratégico para la instalación de la estación meteorológica completa que cumple con los estándares para la escogencia de estos sitios y, además, permite la medición adecuada de los parámetros de interés para la cuantificación del recurso solar y eólico, entre otros, cuyo punto se localiza en las coordenadas 10°22'04.7" N 75°27'56" W.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo dado por los investigadores Ricardo Arjona, Laura Hinestroza, Guillermo Valencia y el grupo de Investigación GIAEL, de la Fundación Universitaria Tecnológico Comfenalco, y al Grupo de Investigación Gestión Eficiente de la Energía KAI, de la Universidad del Atlántico, por depositar la confianza en el desarrollo de esta investigación.

Además, se agradece a Colciencias por la financiación del proyecto «Desarrollo e implementación de un programa integral de evaluación y aprovechamiento del recurso eólico y solar en la región caribe colombiana con énfasis en la Guajira». Por otro lado, toda la gratitud también para aquellas instituciones de educación superior que hicieron parte del proyecto de investigación anteriormente mencionado.

REFERENCIAS

Da Hora, H. R. M., y Costa, H. G. (2009). O Problema Da Inversão De Ordem Em Métodos Multicritérios: Um Experimento Com O Electe Iii/Iv. Brasi: Universidade Federal Fluminense.

Gómez, J. O., Umaña, M. H., y Vinasco, M. A. (2008). Modelo para la evaluación del desempeño de los proveedores utilizando AHP. Ingeniería & Desarrollo, 23, 43-58.

MacLellan, J. I. (2007). Brokering the Local Global Dialectic. Linking Climate and Impact Models to Decision and Policy Making. Edited by A. Fenech, and JI MacLellan. Toronto: Environment Canada.

Pasqualino, J., Cabrera, C., y Chamorro, M. V. (2015). Los impactos ambientales de la implementación de las energías eólica y solar en el Caribe Colombiano. Prospect, 13(1), 68-75.

Saaty, T. L. (1987). Principles of the analytic hierarchy process. In Expert judgment and expert systems (pp. 27-73). Berlin: Springer Berlin Heidelberg.

Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. International journal of services sciences, 1(1), 83-98.

Tejero Aranda, M. D. C. (2015). Estudio comparativo de modelos de toma de decisión multicriterio para la selección del trazado de una vía. Trabajo de grado fin de Master. España: Universidad de Jaén.

Toskano, G. B., y Bruno, G. (2005). El proceso de Análisis Jerárquico (AHP) como Herramienta para la Toma de Decisiones en la Selección de Proveedores (Trabajo de grado). Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.