

ESTUDIO COMPARATIVO DE CENTRALES SOLARES TERMOELECTRICAS Y FOTOVOLTAICAS DE 50KW EN LOS VALLES CALCHAQUÍES. SALTA¹

Cadena² Carlos y Farfán³, Federico
Facultad de Ciencias Exactas - INENCO- UNSa
Av. Bolivia 5150 – 4400 – SALTA – cadena@inenco.net

RESUMEN: en el presente trabajo se exponen los resultados de un análisis comparativo de determinados factores que han sido tenidos en cuenta cuando se comparan servicio y costos, entre otros, de instalaciones solares eléctricas fotovoltaicas con termoeléctricas, ubicadas en tres sitios de los Valles Calchaquíes localizados unos muy cerca de otros, pero con algunas diferencias, propias de cada localidad. El análisis se realiza con algoritmos que son particulares de la *lógica difusa o borrosa*, y esta elección depende de variables que deben cuantificarse. Dada la incertidumbre que se maneja en la información de las mismas, se optó por utilizar un método basado en matemática difusa, sin embargo a las variables involucradas en el estudio para la elección del lugar, se les debe asignar un factor de peso, ya que no todas tienen el mismo grado de importancia. Este factor se determina en función del *método de ponderación*, que permite calcular la influencia y dependencia de cada una de las variables con el resto. Una vez calculados estos factores, se corrige el *valor de pertenencia* que entregan los subconjuntos difusos para cada localidad y mediante la *distancia de Hamming* se encuentra la zona más apta para los sistemas.

PALABRAS CLAVE: termoelectricidad, fotovoltaico, lógica borrosa, Hamming, valles calchaquíes

INTRODUCCIÓN

La producción de energía eléctrica convencional en el mundo y en Argentina en particular, se enfrenta a dos problemas: la reducción en la producción de petróleo y gas a corto plazo y la contaminación ambiental producida por el uso de derivados de petróleo y el gas natural. El uso de las energías renovables constituye una posible vía de solución de estos problemas. En especial, la energía solar se caracteriza por varias ventajas potenciales tales como la baja contaminación ambiental y la existencia de reservas muy abundantes que pueden abastecer una buena parte de las necesidades futuras con la posibilidad de atender tanto grandes requerimientos como aplicaciones pequeñas. En relación con la baja contaminación ambiental se solucionan una buena parte de esos problemas producidos por los combustibles tradicionales, en especial la contaminación ácida y la generación de CO₂ que provoca cambios climáticos. En relación con la baja reserva de petróleo y gas es de indicar que la disponibilidad de energía solar en Argentina en las regiones andinas y sub andinas es muy grande siendo posible suplir las necesidades de generación eléctrica a mediano y largo plazo.

Por otra parte, si bien se han producido importantes avances en la electrificación en las zonas rurales de nuestro país por medio de los Programas del PERMER, existen y seguramente seguirán existiendo centenares de miles de personas fuera de las redes eléctricas y su única posibilidad es un sistema aislado o una mini red. En ese sentido se propone la localización de una central de pequeño porte, como generación distribuida de 50KW, en alguna localidad ubicada en los Valles Calchaquíes, donde se plantean las variables del párrafo siguiente, solamente a modo de ejemplo.

ANÁLISIS DE LAS VARIABLES PARA LOS SITIOS ELEGIDOS

La elección de una zona para realizar una instalación Solar Termoeléctrica o Fotovoltaica depende de distintas variables que caracterizan el lugar donde se intenta proyectar dicha instalación. Identificar estas variables comunes a los dos tipos de instalaciones solares no es una tarea simple, sin embargo se observa que algunas de las variables que podrían considerarse en el estudio de una zona donde se quiera realizar una implementación solar son (y están mencionadas en orden aleatorio): *el Aprovechamiento de la Radiación* (debido a que los dos sistemas aprovechan en forma distinta la radiación), *el Costo Relativo del Terreno* (dado que el valor de la tierra difiere), *la Mano de Obra Local*, *el Aprovechamiento del Calor Residual* (para co-generación u otra aplicación de baja entalpía), *la Disponibilidad de Agua* (que es un requisito en un caso pero no en el otro), *la Probabilidad de Granizo* (que afecta de forma diferente a ambos tipos de sistemas), *el Costo de la Central*, *la Superficie del Terreno Ocupada*, *la Consecuencias de Sismos y los Efectos de la Erosión del Viento*, sobre los materiales.

Cuantificar estas diez variables permite caracterizar la zona y determinar cuál brinda las mejores condiciones de trabajo, ya sea para los sistemas Fotovoltaicos o Térmicos. Sin embargo, caracterizarlas y utilizar modelos matemáticos que permitan orientar la selección del lugar se vuelve digno del análisis, debido a que hay que emplear criterios de pertenencia a los que se les debe asignar a cada variable de estudio y definir una expresión analítica para tal propósito.

¹ Parcialmente financiado por CIUNSA

² CONICET y UNSa

³ INENCO y UNSa

Es por ello que se decidió trabajar con las variables involucradas en forma de conjuntos difusos, ya que el grado de pertenencia que asigne cada subconjunto a los elementos del conjunto, involucra cierto grado de incertidumbre, propias de la variable. En este trabajo, primeramente se definió un conjunto difuso denominado *Características del Lugar*, este se dividió en diez subconjuntos que citan en el párrafo precedente, y tal como se observa en la figura 1.



Figura 1. Esquema del Conjunto Difuso de Características del Lugar.

MATEMÁTICA DIFUSA Y DISTANCIA DE HAMMING EN LA ELECCIÓN DE UN LUGAR

Una vez definidos e identificados los subconjuntos difusos del problema, se debe definir la estructura matemática con la cual se representará un subconjunto. Un subconjunto difuso A, de un Conjunto E puede definirse como todo conjunto de pares ordenados de la forma:

$$A = \{ \langle x, \mu_A(x) \rangle \mid x \in E \}$$

Donde x es un elemento del conjunto E y μ_A es el grado de inclusión del elemento en el subconjunto, tomando este último valores entre cero y uno.

Por ejemplo, en el caso particular de nuestro problema, los elementos del subconjunto *Aprovechamiento de la Radiación* son el aprovechamiento de la Radiación en San Carlos, en Yacochuya y en Animaná para sistemas Térmicos y Fotovoltaicos. A cada uno de estos elementos se le asigna un grado de pertenencia.

$$Aprov. Rad = \{ \langle SC_{FV}, 1 \rangle, \langle SC_T, 0,9 \rangle, \langle Y_{FV}, 0,9 \rangle, \langle Y_T, 0,7 \rangle, \langle A_{FV}, 1 \rangle, \langle A_T, 0,8 \rangle \}$$

En el subconjunto Aprovechamiento de la Radiación se observa seis pares ordenados, los cuales indican que en este subconjunto encontramos seis elementos con sus respectivos grados de inclusión. La información que entregan estos pares ordenados es la siguiente:

$(SC_{FV}, 1)$; El valor de pertenencia de este elemento representa el Grado de Aprovechamiento de Radiación de una instalación Fotovoltaica en San Carlos.

$(SC_T, 0,9)$; El valor de pertenencia de este elemento representa el Grado de Aprovechamiento de Radiación de una instalación Térmica en San Carlos.

$(Y_{FV}, 0,9)$; El valor de pertenencia de este elemento representa el Grado de Aprovechamiento de Radiación de una instalación Fotovoltaica en Yacochuya.

$(Y_T, 0,7)$ El valor de pertenencia de este elemento representa el Grado de Aprovechamiento de Radiación de una instalación Térmica en Yacochuya.

$(A_{FV}, 1)$ El valor de pertenencia de este elemento representa el Grado de Aprovechamiento de Radiación de una instalación Fotovoltaica en Animaná.

$(A_T, 0,8)$ El valor de pertenencia de este elemento representa el Grado de Aprovechamiento de Radiación de una instalación Térmica en Animaná.

De la misma forma se le asigna al resto de los subconjuntos, el grado de pertenencia a cada elemento. Esta asignación permite armar la siguiente matriz, donde se especifica el grado de inclusión de todos los elementos perteneciente al conjunto difuso Características del Lugar en cada Subconjunto:

Conjunto \ Pertenencia	San Carlos (FV)	San Carlos (T)	Yacochuya (FV)	Yacochuya (T)	Animaná (FV)	Animaná (T)
Aprovechamiento de la Radiación	1	0,9	0,9	0,7	1	0,8
Costo relativo del terreno	1	1	0,4	0,4	0,8	0,8
Mano de obra local	1	1	0,3	0,3	0,6	0,6
Aprovechamiento del Calor Residual	0	1	0	0,3	0	0,6
Disponibilidad de agua	1	0,3	1	0,6	1	0,6
Probabilidad de granizo	0,1	0,2	0,3	0,4	0,2	0,3
Costo de la Central	0,3	0,6	0,3	0,6	0,3	0,6
Superficie de terreno ocupada	0,3	0,4	0,3	0,4	0,3	0,4
Consecuencias Sismos	0,5	1	0,5	1	0,5	1
Efectos de la Erosión del Viento	0,6	1	0,6	1	0,6	1

Tabla 1. Matriz de Pertenencia.

Dentro del Conjunto Difuso *Características del Lugar* podemos encontrar 6 subconjuntos denominados Características del Lugar San Carlos F.V., Características del Lugar San Carlos T., Características del Lugar Yacochuya F.V., Características del Lugar Yacochuya T., Características del Lugar Animaná F.V. y Características del Lugar Animaná T. Ordenar de esta manera los Subconjuntos nos permite cuantificar las características de las distintas zonas que se quieren evaluar, por lo tanto se puede enriquecer esta información con una medida que nos permita comparar estos subconjuntos con otro de referencia, que represente las características de una instalación solar ideal, como la que indica la figura 3.

Conjunto \ Pertenencia	Instalación Ideal
Aprovechamiento de la Radiación	1
Costo relativo del terreno	1
Mano de obra local	1
Aprovechamiento del Calor Residual	1
Disponibilidad de agua	1
Probabilidad de granizo	0
Costo de la Central	1
Superficie de terreno ocupada	0,1
Consecuencias Sismos	1
Efectos de la Erosión del Viento	0

Tabla 2. Pertenencia de una instalación Ideal.

Para obtener esta medida se utiliza el concepto matemático de distancia, obteniéndose por medio de este valor la diferencia que existe entre las características de cada una de las localidades y el ideal. Se pueden utilizar distintos esquemas para determinar distancia, en este trabajo se propone la utilización de la distancia de HAMMING que suministra información sobre aquello que diferencia a dos subconjuntos difusos. La *Distancia Absoluta de Hamming* se calcula por medio de la siguiente expresión:

$$d(A, B) \equiv \sum_{i=1}^n |\mu_A(x_i) - \mu_B(x_i)| \quad 0 \leq d(A, B) \leq n$$

Donde $\mu_A(x_i)$ representa el valor de pertenencia del elemento x_i del subconjunto Características del Lugar (San Carlos F.V., San Carlos T., Yacochuya F.V., Yacochuya T., Animaná F.V. o Animaná T) y $\mu_B(x_i)$ representa el valor de pertenencia del elemento x_i del subconjunto Características de una instalación Solar ideal. De la misma forma se puede obtener la *Distancia Relativa de HAMMING*, dividiendo la Distancia Absoluta sobre el número de características como indica la siguiente expresión.

$$\delta(A, B) \equiv \frac{d(A, B)}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n |\mu_A(x_i) - \mu_B(x_i)|}{n} \quad 0 \leq \delta(A, B) \leq 1$$

En el siguiente cuadro se observa las desviaciones de la pertenencia de cada uno de los elementos que caracterizan las localidades y la instalación ideal, mediante la cual se calcula las Distancias Absolutas y Relativas de Hamming como se especifica.

Instalación ideal	DESVIÓ SC(FV)	DESVIÓ SC (T)	DESVIÓ Y (FV)	DESVIÓ Y (T)	DESVIÓ A(FV)	DESVIÓ A (T)
1	0	0,1	0,1	0,3	0	0,2
1	0	0	0,6	0,6	0,2	0,2
1	0	0	0,7	0,7	0,4	0,4
1	1	0	1	0,7	1	0,4
1	0	0,7	0	0,4	0	0,4
0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,2	0,3
1	0,7	0,4	0,7	0,4	0,7	0,4
0,1	0,2	0,3	0,2	0,3	0,2	0,3
1	0,5	0	0,5	0	0,5	0
0	0,6	1	0,6	1	0,6	1
ABSOLUTA DE HAMMING	3,1	2,7	4,7	4,8	3,8	3,6
RELATIVA DE HAMMING	0,28	0,25	0,43	0,44	0,35	0,33

Tabla 3: matriz Distancias de Hamming.

Los valores más pequeños de distancias indican cuál conjunto difuso se acerca más a la referencia, de forma que la lectura que se puede realizar de acuerdo a los resultados obtenidos, indican que:

En la localidad de San Carlos es más conveniente realizar una instalación Térmica que una instalación Fotovoltaica.

En la localidad de Yacochuya es más conveniente realizar una instalación Fotovoltaica que una instalación Térmica.

En la localidad de Animaná es más conveniente realizar una instalación Térmica que una instalación Fotovoltaica.

Comparando las tres localidades se puede concluir que por este método de análisis:

En la localidad de San Carlos es más conveniente que Yacochuya y Animaná para realizar una instalación Fotovoltaica, y la localidad de Animaná conviene más que Yacochuya.

En la localidad de San Carlos es más conveniente que Yacochuya y Animaná para realizar una instalación Térmica, y la localidad de Animaná conviene más que Yacochuya.

Analizar lo realizado en forma de conjuntos difusos muestra que todas las características de una instalación solar tienen el mismo peso, sin embargo se puede inferir que no todas estas variables en la elección de una localidad tienen el mismo grado de importancia. Por ejemplo, se considera que tiene mucho más peso el Aprovechamiento de la Radiación que la Probabilidad de Granizo. Es por ello que a éste estudio, que nos permite elegir una localidad comparando sus características en forma de conjunto difuso, se le realizó alguna corrección. Esta consiste en multiplicar los valores de pertenencia de los subconjuntos difusos por un coeficiente, que se determina en función de un estudio de ponderación que indica, cuales de estas variables son las más importantes en función de su influencia y dependencia con el resto.

MÉTODO DE PONDERACIÓN

El método nos permite determinar cuáles son las variables más importantes de un conjunto de acuerdo a su influencia y dependencia con el resto. Esta priorización de variables se determina en función de la elaboración de una matriz y al cálculo de algunos valores que en forma consecutiva, indican qué variables son las más importantes según lo dicho previamente.

La información que se recoge del método, nos permite ubicar a las variables en cuatro zonas que se pasan a describir y se indican en la figura 2:

Zona de Poder: Son las más importantes, por que son las que más influyen en el resto y tienen menos dependencia de los demás.

Zona de Enlace: Son también las llamadas de conflicto. Son importantes por su influencia pero también dependen mucho del resto.

Zona de Salida: Son de menos importancia ya que por su alta dependencia del resto se solucionarán en forma consecutiva y se deberán atender luego de atender los de la zona de poder y enlace.

Zona Aislada: Son los que deben atenderse al final, ya que son las que tienen poca o ninguna dependencia o influencia del resto, razón por la cual se les denomina aisladas.

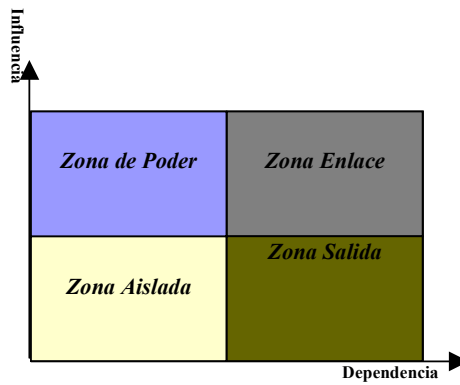


Figura 2: ejemplificación de las zonas.

Para implementar este método primero se debe definir una matriz de $N \times N$, donde N es el número de variables involucradas en el estudio. En el caso particular del problema, N está indicado por el número de características de la zona, por lo tanto debe armarse una matriz de 10×10 . A cada característica de la zona se la ubica en una fila, asignándole un número, y de la misma forma se la ubica en la columna con el mismo número. Los elementos de esta matriz contienen números que indican el grado de influencia de cada variable de la siguiente forma:

		x									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Aprovechamiento de la Radiación	0	2	1	2	1	0	2	2	0	0
2	Costo Relativo del Terreno	0	0	0	2	2	0	1	2	1	0
3	Mano de Obra Local	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0
4	Aprovechamiento Calor Residual	1	0	1	0	1	0	1	1	0	0
5	Disponibilidad de Agua	0	2	0	0	0	1	0	0	0	0
6	Probabilidad de granizo	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
7	Costo de la Central	2	2	1	1	1	2	0	1	1	1
8	Sup. de Terreno Ocupada	2	2	1	2	0	0	1	0	0	0
9	Consecuencias de Sismos	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
10	Efec. de Erosión del Viento	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0

Tabla 4: matriz relacional. (0 = No Influye, 1 = Influye Poco y 2 = Influye mucho)

La matriz de la tabla 4 relaciona todas las variables involucradas en el problema, y se puede encontrar información como la que se describe:

El Aprovechamiento de la Radiación Influye mucho con la Superficie del Terreno Ocupada, este valor pertenece al elemento de la matriz ubicada en la fila uno y columna ocho, cuyo elemento es 2.

Una vez que se definió la matriz de influencia, se realiza la suma de los elementos que se encuentran en cada fila y la suma de los elementos que se encuentran en cada columna como indica la figura 7. La suma de cada columna entrega el Valor de Dependencia de cada variable y la suma de cada fila dividido la Sumatoria Total de influencia (definida como la suma de todos los elementos de la matriz) nos brinda las Variables de Influencia de cada variable.

Estos valores calculados nos permite determinar el Promedio de Influencia definido como la suma de los valores de influencia dividido el número total de variables y el Promedio de Dependencia definido como la suma de los valores de dependencia dividido el número total de variables, que en el problema son diez.

		X										Suma en la Fila	Valores de Influencia
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1	Aprovechamiento de la Radiación	0	2	1	2	1	0	2	2	0	0	10	0,2
2	Costo Relativo del Terreno	0	0	0	2	2	0	1	2	1	0	8	0,16
3	Mano de Obra Local	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	2	0,04
4	Aprovechamiento Calor Residual	1	0	1	0	1	0	1	1	0	0	5	0,1
5	Disponibilidad de Agua	0	2	0	0	0	1	0	0	0	0	3	0,06
6	Probabilidad de granizo	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0,02
7	Costo de la Central	2	2	1	1	1	2	0	1	1	1	12	0,24
8	Sup. de Terreno Ocupada	2	2	1	2	0	0	1	0	0	0	8	0,16
9	Consecuencias de Sismos	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0,02
10	Efec. de Erosión del Viento	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0,02
Suma Columna: Valores de dependencia		5	8	4	7	7	3	8	6	2	1	51	Sumatoria Total de Influencia

Tabla 5: matriz resultante.

Con los cálculos realizados se encuentran, los *Valores de Dependencia e Influencia* de cada variable que intervienen en el problema y el *Promedio de Influencia y Dependencia*, como lo indica la siguiente figura.

	VARIABLES		PROMEDIOS	
	Influencia	Dependencia	Influencia	Dependencia
Aprovechamiento de la Radiación	0,2	5	0,1	5,1
Costo del Terreno	0,16	8	0,1	5,1
Mano de Obra Local	0,04	4	0,1	5,1
Aprovechamiento Calor Residual	0,1	7	0,1	5,1
Disponibilidad de agua	0,06	7	0,1	5,1
Probabilidad de granizo	0,02	3	0,1	5,1
Costo de la Central	0,24	8	0,1	5,1
Superficie de Terreno Ocupada	0,16	6	0,1	5,1
Consecuencias Sismos	0,02	2	0,1	5,1
Efectos de Erosión del Viento	0,02	1	0,1	5,1

Tabla 6: valores de dependencia e influencia

En función de estos parámetros zonas, de acuerdo al esquema

se ubican las variables en determinadas de la figura 9.

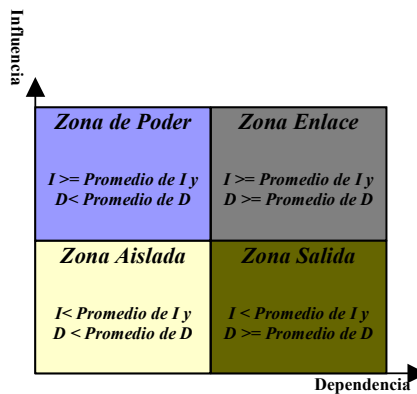


Figura 3: Variables por zona.

Los resultados que se encontraron al analizar el método de ponderación, indican que las variables involucradas en nuestro problema se encuentran en las siguientes zonas:

Zona Poder: Aprovechamiento de la Radiación.

Zona Enlace: Costo del Terreno, Costo de la Central, Superficie del Terreno.

Zona Salida: Calor Residual y Disponibilidad de Agua.

Zona Aislada: Mano de Obra Local, Probabilidad de Granizo, Consecuencia de Sismos y Efecto de Erosión del Viento.

CONCLUSIÓN

Los resultados obtenidos del método de ponderación permiten encuadrar las distintas variables para las diferentes zonas, esto permite asignar a cada zona un número que indique un factor de peso, que multiplicado a cada valor de pertenencia, incluyendo las pertenencias a las de la central ideal y modificar las desviaciones. Este factor intenta dar mayor importancia a las variables que se encuentran en la Zona de Poder y de Enlace, de manera que el método empleado tenga un criterio más adecuado.

Modificar los valores de pertenencia en los distintos subconjuntos modifica las distancias de Hamming y entrega la lectura siguiente:

En la localidad de San Carlos es más conveniente realizar una instalación Térmica que una instalación Fotovoltaica, mientras que en Yacochuya es mejor realizar una instalación Fotovoltaica que una instalación Térmica. Finalmente, en Animaná es más conveniente realizar una instalación Térmica que una instalación Fotovoltaica.

Comparando las tres localidades se puede concluir:

En la localidad de San Carlos es más conveniente que Yacochuya y Animaná para realizar una instalación Fotovoltaica, y en la localidad de Animaná conviene más que en Yacochuya. En la localidad de San Carlos es más conveniente que Yacochuya y Animaná para realizar una instalación Térmica, y en Animaná conviene más que en Yacochuya.

BIBLIOGRAFÍA

- Jiménez Cabrera Juan, y otros. 2006. "Energía solar térmica de concentración estado actual: actores del sector". CIEMAT. 2
- Cadena, C. 2005. Seminario Red CYTED, Difusión de Energías Renovables en zonas rurales. Conclusiones. Cochabamba.
- Cadena, C. 2005. "Electrificación fotovoltaica en zonas rurales de Salta: perspectivas". Rev. de Asades vol 9. pp 04-36.
- Página Web dirección de Estadísticas y Censos SALTA
- B. Martín del Brío, A Sanz Molina (1997). "Redes Neuronales y Sistemas Borrosos", RAMA.
- Escolano Ruiz F., Miguel Angel Cazorla Quevedo (2003), "Inteligencia Artificial", Thompson.
- Luisa L. Lazzari, 2004, "Matemática borrosa, técnicas de gestión para el tratamiento de la incertidumbre", Instituto tecnológico -Bs.As
- Abraham Kandel, Samuel C. Lee (1978). "Fuzzy Switching and Automata", Copyright
- Publicación interna de ESEDSA. 2005. (Empresa del suministro eléctrico disperso de Salta)
- Romero Álvarez, Manuel. 2003. "ENERGÍA SOLAR TERMOELÉCTRICA". Publicación CIEMAT.
- MR Consultores. 2005. "Mitigación de emisiones a través del desarrollo de la utilización de Energías Renovables, Tercer Informe". 2ª Comunicación Nacional del Gobierno de la República Argentina a las Partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático PROYECTO BIRF TF 51287/AR.
- Grossi Gallegos, H; Riggini, R. 2007. "Atlas de la República Argentina". Publicación de SECYT.

ABSTRACT

In the present paper are considered some factors (just like cost and quality service) when planning the installation of a non-conventional electric generator in three different places in the Valles Calchaquies, but located very close to each other. In this case, solar-thermoelectric or photovoltaic systems may complement existing conventional generation or not. The equipment could be interconnected to the national system, or a mini isolated network. The analysis is performed with algorithms that are unique to fuzzy logic, and this choice depends on variables to be quantified. Given the uncertainty of the information is handled the same, we decided to use a method based on fuzzy math, but the variables involved in the study to the choice of location should be assigned a weight factor as not all have the same degree of importance. The weighting factor is determined by the weighting method used to calculate the influence and dependence of each variable with the rest. Once calculated these factors, correcting the value of belonging to deliver the fuzzy subsets for each locality and by the Hamming distance is the most suitable for the systems.

KEY WORDS: solar energy, thermoelectricity, photovoltaic, fuzzy logic, Hamming, valles calchaquies