

Energía solar en la operación del acueducto municipal de González, departamento del Cesar

Solar energy in the operation of the municipal aqueduct of González, department of Cesar

Yury Tatiana Cárdenas-Hernández¹ ; Libeth Argenida Sarabia² ; Diego Armando Vargas-Silva³

¹Universidad Santo Tomás, Bucaramanga, Colombia. yury.cardenas@ustabuca.edu.co.

²Universidad Santo Tomás, Bucaramanga, Colombia. libeth.sarabia@ustabuca.edu.co

³Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. diego.vargas4@correo.uis.edu.co

Recibido: 12 de agosto de 2019 Aceptado: 19 de noviembre de 2019.

Resumen- El departamento del Cesar históricamente ha presentado inconvenientes en cuanto a la disponibilidad de energía, lo cual ha obstaculizado la puesta en marcha y continuidad de algunos proyectos. Una de las alternativas de solución se enfoca en el uso de la energía solar en esta zona del país, teniendo en cuenta que los mayores valores de brillo solar medio diario están en la región Caribe y la Orinoquia. Por tal motivo el municipio de González, del departamento de Cesar, promovió la construcción del primer acueducto en Colombia que operara únicamente con energía hidráulica y solar. Lo cual permite garantizar la continuidad en el servicio de agua potable, y la contribución con la disminución de las emisiones de CO₂, teniendo en cuenta que ya no se requeriría combustible para su operación.

Como apoyo a la propuesta anterior, se plantea el presente proyecto de investigación, cuyo objeto tiene dos ejes principales; estimar el potencial de radiación en el municipio de González y establecer el dimensionamiento del sistema solar fotovoltaico para aprovechar dicha energía. El modelo matemático seleccionado para la temática inicial del proyecto es de tipo empírico y fue propuesto por Bristow-Campbell, basados en la disponibilidad de información, y el buen ajuste presentado en estudios previos, en cuyo desarrollo se analizó información secundaria proveniente de la estación climática Aeropuerto Aguas Claras, y la información disponible en la página POWER, siendo esta un conjunto de datos solares y meteorológicos de la investigación de la NASA para el apoyo de energía renovable. Para el dimensionamiento del sistema solar fotovoltaico se utilizó una metodología fundamentada en el potencial de radiación disponible en

la zona, el requerimiento energético en la operación de la planta de tratamiento de agua potable, las instalaciones administrativas y de laboratorio del acueducto municipal y el dimensionamiento del subsistema de generación, de acumulación y del regulador inversor.

Es posible concluir que el potencial de radiación para el municipio de González estimado en un rango entre (4,5 y 6) KWH/m²/día, es suficiente para suplir el consumo promedio, así mismo, el dimensionamiento propuesto tiene la capacidad para suministrar electricidad en la operación de la planta de tratamiento de agua potable, las instalaciones administrativas y el laboratorio del acueducto.

Palabras clave- Energía solar, radiación solar, modelo matemático, energías renovables, sistema fotovoltaico.

Abstract- The Cesar's Department has presented historically problems in terms of availability energy, which has hindered the implementation and continuity of some projects. One of the alternatives solutions focuses on the use of solar energy in this area, considering that the highest daily average brightness values are in the Caribbean region and the Orinoquia. For this reason, the Municipality of González, in the Cesar Department, promoted the construction of the first aqueduct in Colombia that operates only with hydraulic and solar energy, which ensures continuity in the drinking water service, and the contribution with the reduction of CO₂ emissions at the atmosphere, In order to minimized the use of fuel for this operation.

Citar este artículo como: Cárdenas-Hernández Y. T., Sarabia L., & Vargas-Silva D. A. Energía solar en la operación del acueducto municipal de González departamento del Cesar. ITECKNE, 17(1), 38 - 48. doi: <https://doi.org/10.15332/iteckne.v17i1.2428>

In support of the above investigation, the object of the present project has two main ideas; the first one is estimate the radiation potential in the municipality of González and the second one is establish the dimensions of the photovoltaic solar system to take advantage of this kind of energy. The mathematical model selected, is an empirical one proposed by Bristow-Campbell, based on the availability of information, and the match presented in previous studies, in which was analyzed secondary information, coming from the Aguas Claras Airport weather station, and the information available on the POWER page, that is a set of solar and meteorological data from NASA's researchs for renewable energy. For the evaluation of the photovoltaic solar system, it was used a methodology based on the radiation potential available in the area, the energy requirement in the operation of the drinking water treatment plant, the administrative and laboratory facilities of the municipal aqueduct and the measure that were used of the generation, accumulation and investment regulator subsystem.

It was conclude that the radiation potential for the Municipality of González, is estimated in a range between (4.5 and 6) KWH/m²/day, and that value is enough to meet the average, as well as the measurement proposed, have the capacity to supply electricity in the operation of the potable water treatment plant, the administrative and laboratory facilities of the aqueduct.

Keywords Solar energy, solar radiation, mathematical model, renewable energies, photovoltaic system.

1. INTRODUCCIÓN

En Colombia, "las fuentes disponibles de información de recurso solar indican que el país cuenta con una irradiación promedio de 4,5 kWh/m²/d (UPME, IDEAM 2005), la cual supera el promedio mundial de 3,9 kWh/m²/d y está muy por encima del promedio recibido en Alemania (3,0 kWh/m²/d) (ARTICSUN, SF) país que hace mayor uso de la energía solar fotovoltaica" [5]. Así mismo, la región caribe no es la excepción, presenta amplios sectores de brillo solar medio diario en la Guajira y en el norte del Cesar, con promedios entre 7 y 9 horas de sol al día (hSd); en gran parte del centro y el resto del norte de la región, valores entre 6 y 7 (hSd); mientras que al sur de esta región está entre 4 y 6 (hSd) [1], [11]

En virtud de lo anterior, la presente investigación estuvo enfocada en hacer un análisis completo de la zona que permitiera un aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica, a través del uso

de paneles solares para el suministro de electricidad en la operación de la planta de tratamiento de agua potable, las instalaciones administrativas y de laboratorio. Con la motivación de desarrollar un proyecto amigable con el medio ambiente, en cuanto a la disminución de emisiones asociadas al consumo de combustible; autosostenible en el tiempo dado que no requiere un pago de factura mensual por parte del acueducto para el suministro de energía, y que favorezca la continuidad del servicio de agua potable a los usuarios.

En cuanto al área de estudio, se seleccionó el municipio González que se encuentra ubicado al sur del departamento del Cesar, limita por el norte, oriente y occidente con el departamento de Norte de Santander y por el sur con el municipio de Río de Oro (Cesar). Sus coordenadas geográficas son 8°23' latitud norte y 73°19' longitud oeste de Greenwich. La cabecera municipal está a 1.240 metros sobre el nivel del mar, la temperatura varía entre los 19° y 22° grados centígrados, el clima es templado, ligeramente húmedo en la parte alta y semihúmedo en la parte baja [6].

Con la finalidad de estimar el potencial de radiación en la zona de estudio, se obtuvo y analizó la información secundaria, procedente de la estación climática Aeropuerto Aguas Claras del municipio de Ocaña, tomando como referencia la distancia más próxima y que su latitud de 8,315°N es similar con respecto a la ubicación de la obra a 8,393°N, donde se tuvieron en cuenta datos de T_{máx}: temperatura máxima, [°C] y T_{mín}: temperatura mínima [°C] de los años: 1985, 1996, 2001, 2011, y 2012. De igual manera se tomó información del aplicativo web disponible en la página POWER conjunto de datos solares de la NASA. Posteriormente, se estimó el potencial de radiación a través del modelo matemático propuesto por Bristow-Campbell, teniendo en cuenta la disponibilidad de información, y el buen ajuste presentado en los estudios publicados por el Dr. Becquer Frauberth Camayo, en Perú, titulados *Desarrollo del modelo Bristow Campbell para estimar la radiación solar global de la región de Junin*, [2] y *Validación y aplicación del modelo Bristow Campbell para estimar la radiación solar global de la región de Junin* [3], en los que se discutieron las variables y condiciones de uso para el modelo trabajado. Así mismo, resalta su buen ajuste para el cálculo de la radiación; por lo que es posible

afirmar que este tipo de modelos empíricos proveen una buena aproximación al dato real de la zona que se desee estimar. Cabe destacar que las condiciones de la zona de estudio del autor mencionado, comparte características similares a las de la presente investigación, en lo referente a la disponibilidad de la información.

Finalmente, partiendo de la ausencia de líneas de transmisión de energía eléctrica cercana a la ubicación del proyecto (zona no interconectada - ZNI), se planteó un dimensionamiento del sistema energético, de una instalación solar fotovoltaica autónoma, a partir del potencial de radiación de la zona, y los consumos estimados para suplir el requerimiento energético en la operación de la planta de tratamiento de agua potable, las instalaciones administrativas y de laboratorio del acueducto municipal. De acuerdo con la literatura se propone la siguiente ruta: [6], [7], [10]

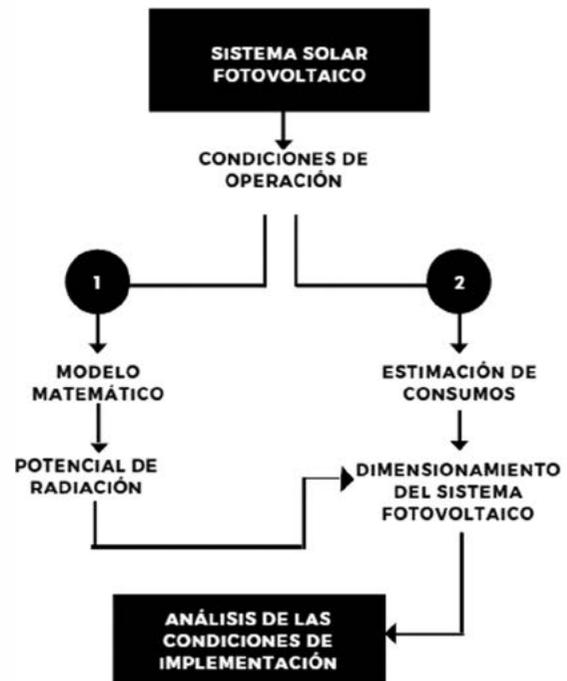
1. Dimensionamiento del subsistema de generación: Se selecciona el tipo de panel solar y se determina el número de paneles necesarios.
2. Dimensionamiento subsistema de acumulación: Se realizará la selección del tipo de acumulador considerando la capacidad nominal diaria de la batería y la profundidad de descarga.
3. Dimensionamiento del regulador-inversor: Se determinó la potencia del regulador inversor en relación con la distribución de energía a través de los elementos que lo conforman.

Es de resaltar que cada vez son más los proyectos estructurados con criterio sostenible como el caso del estudio denominado *Marco de referencia para la planificación de generación distribuida en zonas no interconectadas*, teniendo en cuenta los efectos ambientales, tales como el calentamiento global y las emisiones de gases [8].

4. METODOLOGÍA

La Fig. 1 muestra el diseño metodológico llevado a cabo en la presente investigación, clasificada de tipo aplicada, descriptiva y experimental cualitativa. La cual se dividió principalmente en dos partes, la primera enfocada a determinar el potencial de radiación de la zona y la segunda proponer un dimensionamiento del sistema fotovoltaico.

Fig. 1. Diseño metodológico



Fuente: Los autores.

PARTE I: POTENCIAL DE RADIACIÓN DE LA ZONA

La radiación solar es la energía procedente del sol en forma de ondas electromagnéticas. La irradiancia es la densidad de potencia incidente en una superficie [9]. La metodología que se muestra a continuación tomó como referencia el estudio desarrollado por el Dr. Becquer Frauberth Camayo, que es un modelo de tipo empírico propuesto por Bristow-Campbell (1984), que permite el cálculo de la radiación solar global, tal y como se describe en la Ecuación (1) y está en función de la temperatura y de la irradiancia solar extraterrestre, definida como la fracción de la energía total incidente en la parte superior de la atmósfera.

$$\frac{H_{gh}}{H_e} = a * (1 - e^{-b*(T_{max} - T_{min})^c}) \quad (1)$$

Donde:

H_g : Radiación solar global, [Wh/m²]

H_e : Irradiancia solar extraterrestre, [Wh/m²]

T_{max} : temperatura máxima, [°C]

T_{min} : temperatura mínima, [°C]

a: coeficientes b: coeficientes c: coeficientes

Para resolver el modelo planteado en la Ecuación (1) se deben determinar el valor de los coeficientes y el valor de la irradiación solar extraterrestre.

1.1 Determinación de los coeficientes para la zona de estudio: Inicialmente se ajusta el valor del coeficiente “a” que representa el máximo valor característico de cada área de estudio y depende de la latitud, y “b y c” que determinan el efecto del incremento del ΔT , sobre la temperatura de la atmósfera. Para estimar el coeficiente “a” se analizaron datos diarios de la Estación de Aguas Claras Aeropuerto Ocaña de Tmáx y Tmín; así como también los datos de Radiación solar Global [KWH/m²/día] de la página POWER NASA, para los años 1985, 1996, 2001, 2011, y 2012. El cual corresponde a un único valor a lo largo del periodo de estudio.

Los otros coeficientes “b” y “c” se calcularon diariamente con la Ecuación (2) y la Ecuación (3), respectivamente.

$$c = 2,116 - 0,072 * (T_{\max} - T_{\min}) + 57,57e^{\phi} \quad (2)$$

$$b = 0,107 * c^{-2,6485} \quad (3)$$

Donde:

Latitud (ϕ), [grados].

1.2 Estimación de la radiación solar extraterrestre (H_{ch}): Luego de tener el coeficiente “a” de la zona, se determina la radiación solar extraterrestre a partir del desarrollo de la Ecuación (4)

$$H_{ch} = \frac{24 * 60}{\pi} * I_{SC} * E_0 * \left[w_{sh} \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \sin w_{sh} \right] \quad (4)$$

Donde:

$$I_{SC} = \text{Constante solar } 0,082 \text{ MJm}^{-2} \text{ día}^{-1}$$

(E_0) = Factor de corrección de la excentricidad de la órbita terrestre

(w_{sh}) = Ángulo horario para una superficie horizontal

(δ) = Declinación solar en radianes

Como se puede evidenciar se desconocen los parámetros relacionados con el factor de corrección de la excentricidad de la órbita terrestre, el ángulo horario para una superficie horizontal y la declinación solar en radianes. Por tanto, se procede de la siguiente manera:

1.2.1 Determinación del factor de corrección de la excentricidad de la órbita terrestre: Se determinó a partir del desarrollo de la Ecuación (5)

$$E_0 = 1 + 0,033 * \cos\left(\frac{2\pi d_n}{365}\right) \quad (5)$$

Donde:

d_n corresponde al número del día Juliano del año ($1 \leq d_n \leq 365$), Variando desde 1 para primero de enero, hasta 365 para 31 de diciembre.

1.2.2 Determinación del ángulo horario para una superficie horizontal: Se determinó a partir del desarrollo de la Ecuación (6)

$$w_{sh} = A \cos(-\tan \phi \tan \delta) \quad (6)$$

Donde:

(w_{sh}) = Ángulo horario para una superficie horizontal

1.2.3 Determinación de la declinación solar en radianes: Se determinó a partir del desarrollo de la Ecuación (7)

$$\delta = 0,49 * \sin\left(\frac{2\pi d_n}{365}\right) - 1,39 \quad (7)$$

Donde:

(δ) = Declinación solar en radianes

Una vez aplicado el modelo matemático y determinando el potencial de radiación en la zona de estudio, se realizó el dimensionamiento del sistema solar fotovoltaico [4] [7].

PARTE II: DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO

Para el dimensionamiento del sistema solar fotovoltaico se tuvo en cuenta el potencial de radiación disponible en la zona (enunciado en la PARTE I), el requerimiento energético en la operación de la planta de tratamiento de agua potable, las instalaciones administrativas y el laboratorio del acueducto municipal y el dimensionamiento del subsistema de generación, de acumulación y del regulador inversor [12].

2.1 Estimación del consumo: Se determinaron las cargas y consumos de todos los elementos eléctricos de la planta de tratamiento de agua potable, las instalaciones administrativas y de laboratorio del acueducto municipal, teniendo en cuenta que este será operado por un sistema híbrido, hidráulico y solar. En todo caso cabe resal-

tar que el presente estudio se enfoca únicamente en el sistema solar fotovoltaico.

2.2 Dimensionamiento del sistema solar fotovoltaico: Se considera un montaje autónomo, provisto de un sistema de acumulación, que posibilita alimentar la carga en aquellos momentos que el sistema fotovoltaico no se encuentra operativo. A continuación, se muestran cada una de las partes que lo conforman:

2.2.1 Dimensionamiento del sistema de generación: Es formado por un grupo de paneles montados sobre una estructura que lo sujeta, buscando el máximo de radiación solar incidente. Para calcular el número de módulos necesarios se considera la Ecuación (8) y la Ecuación (9).

Escenario 1: El número total de módulos fotovoltaicos que se deben instalar se calcula a partir del consumo diario

$$N_T = \frac{L_{md}}{P_{MPP,STC} * G_d * P_G} \quad (8)$$

Donde:

L_{md} : Consumo medio diario mensual (wh/día)

$P_{MPP,STC}$: Potencia pico del módulo en condiciones STC (w_p)

G_d : Radiación solar global. También indica la HPS

P_G PR: Factor global de funcionamiento del generador

Escenario 2: Se estima la potencia mínima (P_{min}) para cubrir las necesidades del consumo mencionado anteriormente y se calculan cuántos paneles cubren este requerimiento.

$$P_{min} = \frac{E_D * G_{GEM}}{G_{dm}(\alpha, \beta) * P_R} \quad (9)$$

Donde

P_{min} : Potencia mínima

E_D : Consumo diario

G_{GEM} : Irradiación estándar (1kw/m²)

$G_{dm}(\alpha, \beta)$: Irradiación sobre el generador

P_R : Rendimiento energético de la instalación

2.2.2 Dimensionamiento del sistema de acumulación: Sirve para almacenar energía y dar una tensión estable, aunque los paneles no estén reci-

biendo radiación. La carga eléctrica de una batería es el número de Ah que es capaz de almacenar [9].

La (Energía diaria) se convierte en Ah que es la unidad de capacidad y se denomina consumo diario (Load daily), para lo anterior se divide la energía en el voltaje. De acuerdo con la Ecuación (10)

$$L_D = E_D / V \quad (10)$$

Donde:

E_D : Energía diaria

V : Voltaje

La capacidad de la batería se calcula según la Ecuación (11)

$$C = \frac{L_D * A}{P_{Dmax} * \eta_{rd} * \eta_{inv}} \quad (11)$$

Donde:

C : capacidad del acumulador Ah

A : autonomía del sistema en días. 6 horas, es decir 0,25 días en el que la batería dará energía y no recibirá.

L_D : Consumo diario medio de carga en Ah

P_{Dmax} : Profundidad de descarga máxima. $P_D = 70\%$

η_{rd} : Rendimiento energético del regulador + batería. Consumo regulador y batería un 20% de su potencia $\eta_{rd} 80\%$

η_{inv} : Rendimiento energético del inversor. Consumo inversor 15% de su potencia $\eta_{inv} 85\%$

2.2.3 Dimensionamiento del regulador: Controla las sobrecargas y las descargas en las baterías, lo que acorta su vida útil, evita la descarga de las baterías a través de los paneles durante la noche, cuando el voltaje de salida del panel FV es nulo.

La tensión nominal será la misma que la de la batería. Se eligió en función de la máxima corriente que puede controlar (ítem a y b).

- De los paneles al regulador: La corriente es la de cortocircuito (I_{cc}) del campo solar.
- De la batería hacia las cargas. Se calcula la corriente de paso, a partir de la potencia de las cargas.

Adicionalmente, soporta al mismo tiempo una sobrecarga del 25% de las corrientes anteriores.

2.2.4 Dimensionamiento del inversor: Transforma la energía eléctrica continua en energía eléctrica alterna. Determinada a partir de la suma de potencia de todos los equipos que funcionan simultáneamente sobre el voltaje.

5. RESULTADOS

PARTE I: Estimación del potencial de radiación de la zona

El coeficiente “a” se determinó asociado a la pendiente de la línea recta, teniendo en cuenta el planteamiento que se evidencia a continuación, para el cual, se estableció un valor diario, para cada uno de los años seleccionados.

Ecuación de la línea recta: $y=m*x$

$$\frac{H_{gh}}{H_{eh}} = a * (1 - e^{-b*(T_{max}-T_{min})^c}) \quad (1)$$

Donde:

$\frac{H_{gh}}{H_{eh}}$: Corresponde al valor de “y”

a: Valor de la pendiente

$(1 - e^{-b*(T_{max}-T_{min})^c})$: Valor de “x”

A modo de ejemplo la Fig. 2 permite evidenciar la secuencia de cálculo para los primeros días del año 1985. Se procesaron un total de 1825 datos (columna de dn) correspondientes a los días analizados durante los 5 años del periodo de estudio. La columna de resultados se calcula una vez haya definido el coeficiente.

Con respecto al análisis global la Fig. 3 muestra un valor estimado para “a” de 0,7858.

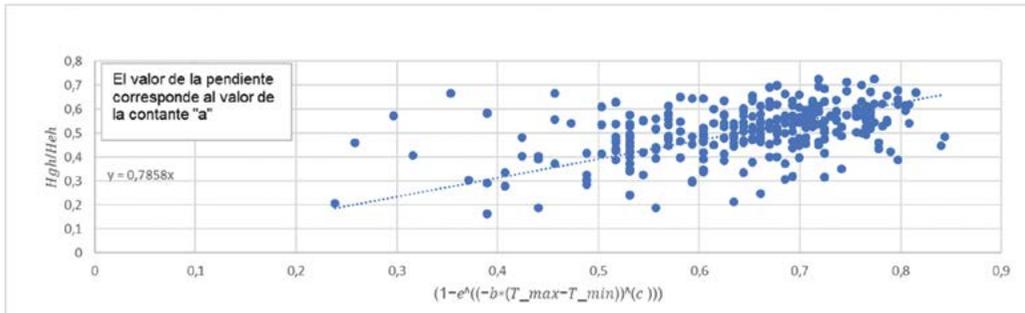
Para ampliar el análisis y definir el valor del coeficiente se realizó un histograma de frecuencia tal y como se evidencia en la Fig. 4, donde el valor más

Fig. 2. Secuencia de cálculo para los datos analizados

DATOS DE ENTRADA - ESTACIÓN				CALCULOS INTERMEDIOS						RESPUESTA		PÁGINA POWER		PENDIENTE			
dn	TMAX	TMIN	altitud [rac]	Eo	i [rad]	wh [grados]	Heh [MJ/m2/día]	H [Horas/día]	eB	bB	Hgh [MJ/m2/día]	Hgh [KWh/m2/día]	Hgh [KWh/m2/día]	Hgh [MJ/m2/día]	y	x	m
2	23.4	14.4	0.1451	1.0330	-0.3396	1.5094	32.0278	11.5282	1.4821	0.0377	18.2032	4.5009	5.1	18.360001	0.573262	0.624578	0.917821
4	24	18	0.1451	1.0329	-0.3363	1.5100	32.0995	11.5325	1.6381	0.0263	11.0251	3.0825	4.3	15.48	0.48225	0.424031	1.137299
5	25.2	19	0.1451	1.0329	-0.3345	1.5103	32.1388	11.5348	1.6117	0.0302	15.4625	3.7396	4.1	14.78	0.455258	0.517744	0.888066
6	24.6	17.4	0.1451	1.0329	-0.3325	1.5106	32.1802	11.5374	1.6117	0.0302	13.4739	3.7444	4.8	17.28	0.536575	0.517744	1.033347
7	24.6	13.4	0.1451	1.0328	-0.3306	1.5109	32.2239	11.5400	1.3237	0.0509	18.5966	5.9857	4.9	17.64	0.54742	0.710478	0.788338
8	24.2	13	0.1451	1.0327	-0.3884	1.5113	32.2897	11.5428	1.3237	0.0509	18.6230	5.1731	5.6	20.160001	0.624734	0.710478	0.876851
11	25	13	0.1451	1.0324	-0.3813	1.5125	32.4197	11.5521	1.2661	0.0573	18.3253	5.3682	5	18.000001	0.555216	0.738325	0.754445

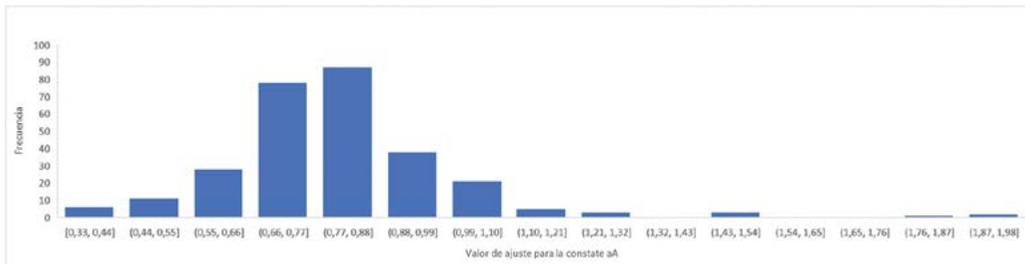
Fuente: Los autores.

Fig. 3. Análisis de los datos mediante regresión lineal



Fuente: Los autores.

Fig. 4. Análisis de frecuencia de datos para la determinación de la constante “a”



Fuente: Los autores.

próximo se situó en el rango comprendido entre [0,77 y 0,88]. Para instaurar el valor exacto se calculó el PERCENTIL.50 el cual da una aproximación más exacta al valor deseado.

Siendo como resultado más cercano, un valor para “a” de 0,79. Posteriormente se determinaron los coeficientes “b” y “c” los cuales estuvieron entre los rangos [1, 11-1, 62 y 0,02 -0,06], respectivamente.

Una vez estimado el valor de las contantes se procedió a determinar la radiación para los años 2016, 2017 y 2018, tal y como se evidencia en la Fig. 5, se realizó el análisis para cada día durante los tres años, estableciendo que los meses con menor radiación fueron enero y diciembre. Distribuidos en los primeros 31 días del año y los últimos 60 días. De igual manera, es posible apreciar que con respecto al año 2016 la radiación de 2018 presentó un aumento aproximado de 0,5 KWH/m²/ día. A partir de los resultados obtenidos se establecen 5 horas de Sol Pico (HSP).

PARTE II: Dimensionamiento del sistema fotovoltaico

En relación con los consumos, cabe resaltar que el acueducto debe operar las 24 horas du-

rante los 7 días de la semana de forma continua. La Tabla I muestra la caracterización de todos los consumos establecidos en la planta.

Se estimó un consumo diario de 17,31 KWh/día, para suplir el requerimiento energético de la planta de tratamiento de agua potable, las instalaciones administrativas y de laboratorio del acueducto municipal. En virtud de las diferentes facilidades eléctricas planeadas para instalar en la PTAP. La Fig. 6 muestra el perfil de carga para cada elemento.

De acuerdo con los voltajes, cargas y horarios de operación de cada elemento y en concordancia con las fuentes de energía seleccionada hidráulica y fotovoltaica se tiene lo siguiente:

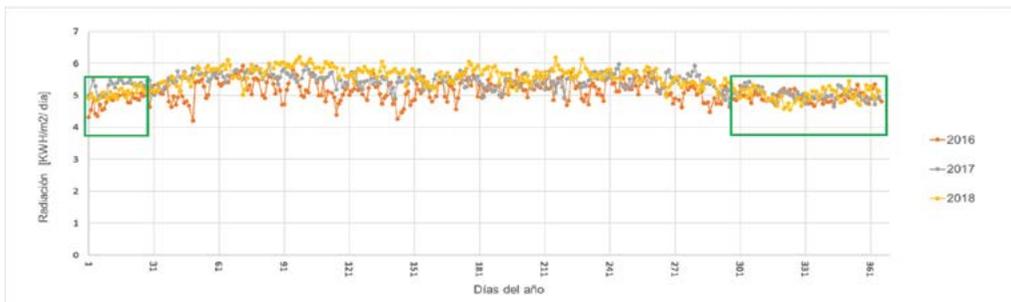
Sistema fotovoltaico:

$$161,22 \frac{KWh}{mes} * \frac{1mes}{30días} = 5,37 \frac{KWh}{días}$$

Turbina y/o fotovoltaico:

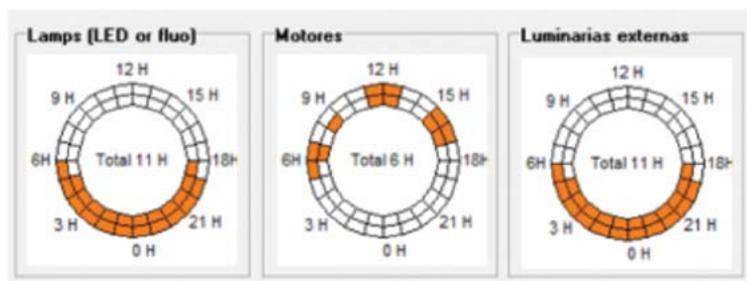
$$357,95 \frac{KWh}{mes} * \frac{1mes}{30días} = 11,93 \frac{KWh}{días}$$

Fig. 5. Estimación de la radiación solar mediante el modelo matemático



Fuente: Los autores.

Fig. 6. Perfiles de carga del consumo de energía en la planta



Fuente: Los autores.

TABLA I
ESTIMACIÓN DE CONSUMOS DE ENERGÍA

CANT	ELEMENTOS	ZONA	CARGA UNITARIA	VOLTAJE	AMPERIOS	CARGA TOTAL (W)	HORAS DE OPERACIÓN	CONSUMO DIARIO KWh/DIA	CONSUMO MENSUAL KWh/MES	SISTEMA QUE LO GARANTIZA
5	LUMINARIAS VOLTANA 1, TIPO LED (8.30.208v)	EXTERIOR	30	120	0,3	150,00	11	1,65	49,50	Fotovoltaico
1	MOTORES Y AGITADORES (2.5HP)	PTAP-CASETA DE OPERACIÓN	1864,25	120	15,5	1864,25	6	11,19	335,57	Turbina y/o Fotovoltaico
6	LUMINARIAS	EXTERIOR DECORATIVA	40	120	0,3	240,00	11	2,64	79,20	Fotovoltaico
3	LUMINARIAS	TABLERO DE CONTROL Y AREA DE TRABAJO DE LA TURBINA	12	120	0,1	36,00	11	0,40	11,88	Turbina y/o Fotovoltaico
7	LUMINARIAS	ZONA ADMINISTRATIVA	12	120	0,1	84,00	11	0,92	27,72	Fotovoltaico
1	EQUIPO DE PRUEBA DE JARRAS	LABORATORIO	350	120	2,9	350,00	1	0,35	10,50	Turbina y/o Fotovoltaico
1	RADIO	GARITA DE CELADURIA	40	120	0,3	40,00	4	0,16	4,80	Fotovoltaico
	TOTALES	2764,25		17,31	519,165					

Fuente: Los autores.

Cabe resaltar que para realizar el dimensionamiento del sistema solar fotovoltaico se definieron las especificaciones técnicas del sistema, teniendo en cuenta que la presente investigación constituye un soporte técnico teórico en relación con la selección del sistema que fue implementado en el acueducto municipal de González.

Dimensionamiento del sistema de generación: Se consideraron paneles solares de la marca TRINA 335 W, referencia TSM-PD14 constituido por 72 células módulo multicristalino. La Tabla II muestra las especificaciones dadas por el fabricante.

TABLA II
FICHA DEL PANEL

Datos eléctricos	TSM-335 PD14
Potencia nominal-P _{máx} (Wp)*	335
Tensión en el punto P _{máx} -V _{MP} (V)	37,5
Corriente en el punto P _{máx} -I _{MPP} (A)	8,91
Tensión en circuito abierto -V _{OC} (V)	46,1
Corriente de cortocircuito - I _{SC} (A)	9,35

Fuente: Los autores.

Para determinar el número de paneles solares se relacionan las ecuaciones (8), (9) y la Tabla II.

Escenario 1

$$N_T = \frac{17300 \frac{wh}{día}}{(335w) * \left(\frac{5h}{día}\right) * (0,9)}$$

$$= 11,47 \approx 12 \text{módulos}$$

De acuerdo con los cálculos realizados se requieren 12 módulos solares.

Escenario 2

$$P_{\min} = \frac{17300wh/día * 1kw/m^2}{\frac{5000wh}{m^2} / día * 0,9} = 3,84kw$$

Poniendo 12 paneles solares de 335W se obtiene una potencia de 4,02 kW, cubriendo las necesidades de la planta.

Dimensionamiento del sistema de acumulación: La batería seleccionada corresponde a la referencia LPG SERIES-GEL BATTERY, LPG12-200 [12V200AH].

La selección de la tensión se basa en la potencia requerida en los equipos, 2764,25 W (Tabla I) y en la Tabla III se presentan los voltajes recomendados para cada caso [9].

TABLA III
REFERENCIA DE ELECCIÓN

Referencia de elección	
Potencia < 800 < Wp	12 V
800 Wp < potencia < 1600 Wp	24 V
1600 Wp < potencia < 3200 Wp	48 V
3200 Wp < potencia < 6400 Wp	>48 V

Fuente: Los autores.

Se considera una potencia de 48 V.

Se dimensiona la capacidad del banco de baterías, el cual debe poseer un Voltaje de 48V, con una autonomía de 6 horas diarias al 70% de descarga diaria, en ausencia de ambas fuentes de energía (hidroeléctrico y fotovoltaico).

$$L_D = \frac{17300wh}{48v} = 360,41Ah/día$$

La capacidad de la batería se calcula:

$$C = \frac{360,41 \frac{Ah}{día} * 0,25día}{0,7 * 0,8 * 0,85}$$

$$C = 189,29Ah$$

Por lo tanto, para suplir los 48 V y la capacidad de la batería, se seleccionaron 4 baterías de 12 V y 200Ah.

Dimensionamiento del regulador: El modelo seleccionado corresponde a un VS70, en relación con las características eléctricas, cuenta con una corriente máxima de salida de 70 A. [9]

- c) De los paneles al regulador: De las especificaciones del panel solar seleccionado: I_{cc} = 9,35 A. Y teniendo en cuenta que se instalaron 6 filas de 2 paneles, la I_{ccT} = 9,35*6=56,1 A
- d) De la batería hacia las cargas (Tabla I). Se calcula la corriente de paso, a partir de la potencia de las cargas.

Adicionalmente soporta al mismo tiempo una sobrecarga del 25% de las corrientes anteriores. La Tabla IV resume las condiciones de operación del regulador

TABLA IV
ESTIMACIÓN DE LAS CONDICIONES DEL REGULADOR

Parámetro	Valor	Comentario
Corriente cortocircuito total I_{CCT}	56,1 A	I_{CCT} del campo solar
Corriente de carga I_{carga}	$2764,25W/48V=57,58$ A	$I_{carga} = P_{carga}/V_{nom}$ (Tabla I)
Intensidad entrada regulador I_{entra}	$56,1 * 1,25 = 70$ A > 70A	$I_{entra} > 1,25 * I_{CCT}$
Intensidad salida regulador I_{sal}	> 57,58A	$I_{sal} > 1,25 * I_{carga}$

Fuente: Los autores.

Se necesita un regulador de 48V, con una $I_{entra} > 70A$ y una $I_{sal} > 58,57A$

Dimensionamiento del inversor: Se seleccionó un inversor Studer Innotec referencia XTM 2600-48 Xtender, el cual cumple con los requerimientos del sistema.

- Voltaje: 48V
- Potencia de operación: 2600 W
- Rendimiento mayor al 80%
- Máxima corriente de entrada: 56 A

La Fig. 7 muestra el diagrama preliminar de la configuración del sistema solar fotovoltaico

6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

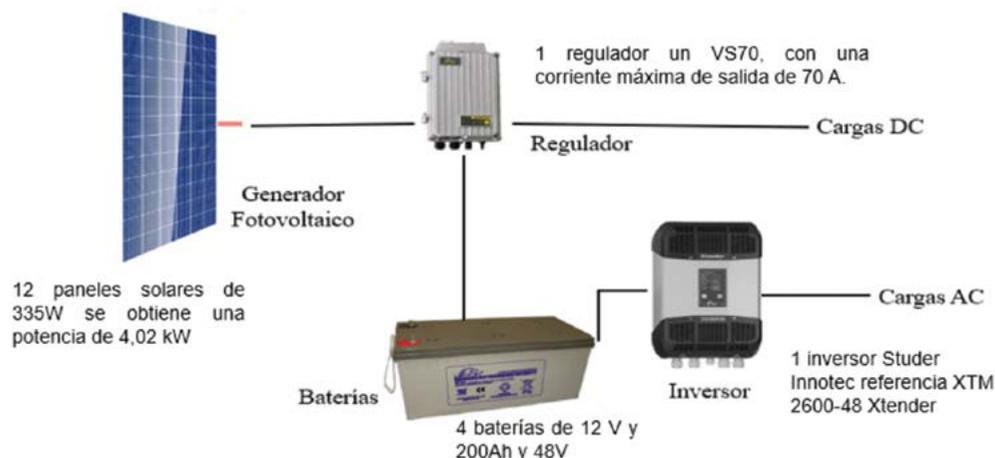
El modelo matemático seleccionado corresponde al propuesto por Bristow-Campbell, dado que es el que presenta mejor ajuste con las variables disponibles en el área de estudio, corroborado con los resultados publicados por el Dr.

Becquer Frauberth Camayo, en Perú. Donde las condiciones de la zona de estudio son similares a las presentadas en este trabajo.

Se estimó el potencial de radiación solar diaria de 5 kWh/m²/día utilizando el modelo propuesto por Bristow-Campbell, tomando como variables la temperatura máxima, la temperatura mínima, la radiación solar, latitud, día, meses, y año; proporcionado por la estación climática Aeropuerto Aguas Claras, del municipio de Ocaña, considerada la más cercana al área de estudio, así como la página del Proyecto POWER de la NASA.

Para el sistema solar fotovoltaico, el cual opera como una fuente de energía de respaldo, con una autonomía de operación de 6 horas al día, se realizó un dimensionamiento preliminar, el cual consta de: 12 paneles solares de la marca TRINA 335 W, referencia TSM-PD14, constituido por 72 células módulo policristalino; 4 baterías de 12 V - 200Ah, cuya configuración permitió obtener 48V; un regulador VS70, con una corriente máxima de salida de 70 A; y un inversor Studer Innotec referencia XTM 2600-48 Xtender.

Fig. 7. Diagrama de la instalación preliminar



Fuente: Los autores.

AGRADECIMIENTOS

Trinium Ingeniería Sostenible SAS, identificado con el NIT: 900.245.974-5 empresa ejecutora del proyecto, “Construcción de la planta de tratamiento de agua potable, tanque de almacenamiento y macro medición del sistema de acueducto de la cabecera urbana del municipio de González, departamento del Cesar” Suscrito el 26 de julio de 2018.

Aguas del Cesar y municipio de González como inyectores de recursos al proyecto.

Ingeniera Libeth Argenida Sarabia por el apoyo y experiencia profesional.

Universidad Santo Tomás Seccional Bucaramanga, por los conocimientos brindados en el marco de la Maestría Ciencias y Tecnologías Ambientales.

REFERENCIAS

- [1] Autoridad Nacional de Licencias Ambientales - ANLA, 5 3 2018. [En línea]. “El sistema de generación fotovoltaica tiene una capacidad a instalar de 70 kWp y permite producir unos 92.930 kWh/año de energía eléctrica”. [Último acceso: 1-8-2019]. Available: <http://portal.anla.gov.co/noticias/se-expide-certificacion-beneficio-ambiental-al-terminal-pereira>
- [2] IDEAM-UPME, «Atlas de radiación solar ultravioleta y ozono de Colombia,» Imprenta Nacional de Colombia, Bogotá, 2017. ISSN: 978 958 8067 94 0.
- [3] G. Digital, «Alcaldía municipal de González en Cesar,» 9 7 2018. [En línea]. [Último acceso: 3 2 2019]. Available: <http://www.gonzalez-cesar.gov.co/municipio/geografia>
- [4] D. B. Fraubert, «Desarrollo del modelo Bristow Campbell para estimar la radiación solar global de la región de Junin, Perú,». *RTQ* vol. 35 no.2, Santiago de Cuba, mayo-ago. 2015. Versión On-line ISSN 2224-6185.
- [5] D. Frauberth, «Validación y aplicación del modelo Bristow Campbell para estimar la radiación solar global de la región de Junin,». *RTQ* vol.37 no.3, Santiago de Cuba, sep.-dic. 2017. Versión On-line ISSN 2224-6185.
- [6] A. C. Alvarado Fajardo y H. Carvajal Osorio, «Diseño, simulación y análisis de sistema solar FV para suministro eléctrico en zonas rurales,» *Avances Investigación en Ingeniería*, vol. 11 no. 1 2014, <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.305>
- [7] J. C. Vega de Kuyper y S. Ramírez Morales, «Fuentes de Energía, Renovables y No Renovables,» México: Editorial: Marcombo, Ediciones Técnicas. ISBN: 9788426721570
- [8] G. J. Correa Henao y J. C. Rojas Zerpa, «Marco de referencia para la planificación de,» *ITECKNE*, vol. 14, n° 1, pp. 70-87, 2017. ISSN 1692-1798.
- [9] M. Casa y M. Barrio, «Instalaciones Solares Fotovoltaicas,» Barcelona: Marcombo S.A, 2012. ISBN 10: 8426718132 / ISBN 13: 9788426718136.
- [10] J. Aguilera, L. Hontoria y F. J. Muñoz, «ACADEMIA,» [En línea]. [Último acceso: 1 8 2019]. Available: https://www.academia.edu/27963057/Dimensionado_de_sistemas_fotovoltaicos_aut%C3%B3nomos
- [11] UPME, «Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia,» Editores S.A, Bogotá, 2015. ISBN No. 978-958-8363-26-4.
- [12] C. M. Tobajas Vásquez, «Instalaciones fotovoltaicas,» Bogotá: Ediciones de la U, 2015. ISBN: 9789587622676.