



EXPERIENCIA EDUCATIVA: DESARROLLO DE CRITERIOS DE DISEÑO EN MATERIA DE ENERGÍAS RENOVABLES

Quintero, Camila*; Vergalito, Agustín; Alustiza, Diego; Wallace, Cristian

*Grupo IEC, Facultad Regional La Plata, Universidad Tecnológica Nacional.
60 y 124 S/N
caamicap@gmail.com*

RESUMEN

En la Asignatura Física II, de la Facultad Regional La Plata, UTN, se propuso como trabajo final a estudiantes de la carrera de Ingeniería Química, el desarrollo de un proyecto relacionado con energías renovables que permitiera poner en práctica los conocimientos adquiridos durante el desarrollo curricular de la materia. Los contenidos que se abordan en la asignatura son Termodinámica, Electricidad, Magnetismo y Óptica.

El proyecto consistió en el desarrollo de una planta solar fotovoltaica hipotética, que se ubicaría en las instalaciones del campo de deportes de la Facultad y fue dividido en cuatro grandes etapas. La primera, la elección del ángulo de inclinación y cálculo de la radiación anual total que recibirían los paneles a partir de datos solares relativos a la ubicación geográfica, utilizando el modelo de Liu-Jordan. La segunda etapa consistió en optimizar el espacio disponible, eligiendo una disposición que permitiera colocar el número máximo de paneles, y en una tercera etapa se realizó el cálculo de la energía producida por el sistema a lo largo de un año. En este punto el modelo generado por los estudiantes fue utilizado para verificar la elección del ángulo óptimo para la colocación de los paneles. La etapa final propuesta en el trabajo fue modificada por iniciativa de los alumnos, y consistió en realizar una breve investigación sobre las emisiones de CO₂ producidas por la utilización de la tecnología solar fotovoltaica, y hacer un balance del ahorro neto de estas emisiones a la atmósfera durante 20 años de funcionamiento de la planta, el cual fue más que positivo.

Palabras Clave: energía solar, experiencia educativa, física, generación de competencias

1. INTRODUCCIÓN

Con el objetivo de vincular a los estudiantes de los primeros años de las carreras de Ingeniería con las tecnologías de vanguardia y de esta forma motivarlos en su aprendizaje [1], la Cátedra de Física II para Ingeniería Química, de la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional la Plata tomó como referencia la tecnología solar fotovoltaica. El objetivo principal que motivó su realización fue el de fomentar en los alumnos el desarrollo de criterios básicos en materia de diseño de plantas fotovoltaicas, utilizando las herramientas y conocimientos que puede tener disponibles un estudiante de segundo año de la Carrera de Ingeniería proponiendo una situación problemática, fuera de las situaciones tradicionales de los libros de textos relacionados con la asignatura, como podrían ser el Física Universitaria, Sears, [2]; Física para la Ciencia y la Tecnología, Tipler [3]; entre otros.

El proceso de aprendizaje más importante fue la integración de la física y el pensamiento sistémico en pos de resolver un desafío. El hecho de relacionar conceptos físicos con la realidad fáctica del ingeniero produjo un claro interés en los estudiantes. [4]

[1] http://www.um.es/analesps/v19/v19_1/11-19_1.pdf

[3a] Sears, Zemansky, Young, Freedman (1999) *Física Universitaria*. Pearson.

[3b] Tipler, Mosca (2005) *Física para la Ciencia y la Tecnología*. Editorial Reverté

[4] <http://www.mincyt.gob.ar/noticias/calefon-solar-energia-renovable-consumo-inteligente-12189>

Se presentó ante el curso la consigna del diseño de una planta solar fotovoltaica en el predio del polideportivo de la Facultad, y se dio una breve guía y explicación de los métodos a utilizar. Se recomendó al alumnado la utilización de una planilla Excel para facilitar el desarrollo de los cálculos y del programa de diseño "Sketch up" [1] para realizar un layout de la planta.

Además, se orientó continuamente a los estudiantes durante el desarrollo del trabajo para lograr que, al finalizar el mismo, pudieran contar con un modelo propio que fuera aplicable para el diseño de una planta fotovoltaica en cualquier lugar del mundo, y a su vez sirviera para justificar su toma de decisiones a partir de los valores reflejados en la producción de energía de la planta.

2. MÉTODOS

En esta sección se describen los procedimientos utilizados por los alumnos en el desarrollo del trabajo, así como también se hacen breves comentarios acerca de las decisiones que los mismos debieron tomar, fundamentadas en la bibliografía y herramientas que se tuvieron al alcance.

A continuación se presenta el listado de pasos empleado por los estudiantes, dividido en 4 subsecciones: cálculo de la radiación solar incidente en el plano de los paneles; la elección de la distribución de paneles (con realización de un layout); el cálculo de energía producida anualmente y el cálculo de la reducción de emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera.

2.1 Cálculo de la radiación en el plano inclinado

2.1.1 Cálculo de la constante solar

Se comenzó calculando la constante solar I_{sc} mediante la ecuación de Stefan-Boltzman [2] (1)

$$I_{sc} = T^4 \sigma \left(\frac{R_s}{D_{st}} \right)^2 = 1366,87 \text{ W/m}^2 \quad (1)$$

Donde: T representa la temperatura del sol ($5844,5 \text{ K}$), R_s el radio solar ($6,8 \cdot 10^8 \text{ m}$), D_{st} la distancia media tierra-sol ($1,496 \cdot 10^{11} \text{ m}$) y σ es la constante de Stefan-Boltzman ($5,6697 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$).

Se realizó la modificación de I_{sc} debido a la excentricidad de la órbita terrestre para cada día medio de cada mes mediante la ecuación (2), donde n representa el número de día Juliano.

$$I_{on} = I_{sc} \left(1 + 0,33 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right) \quad (2)$$

Los resultados de los cálculos se muestran en Tabla 1

Tabla 1 Constante solar para cada día medio de cada mes

	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
día medio	17-ene	16-feb	16-mar	15-abr	15-may	11-jun	17-jul	16-ago	15-sep	15-oct	14-nov	10-dic
día Juliano	17	47	75	105	135	162	198	228	258	288	318	344
cte solar	1410,06	1398,00	1379,32	1356,29	1336,02	1324,54	1323,36	1334,91	1354,79	1377,82	1398,00	1409,06

2.1.2 Cálculo de radiación extraterrestre sobre el plano horizontal

Con el fin de poder llegar a calcular la radiación extraterrestre sobre el plano horizontal, debieron calcularse primero la declinación (δ), ángulo horario (ω_s) y duración del día para cada día medio de cada mes. Una vez calculados éstos, y teniendo en cuenta la latitud geográfica (Φ), pudo calcularse la radiación extraterrestre sobre el plano horizontal integrada a lo largo del día mediante la ecuación (3)

$$H_o = \left(\frac{24 I_{on}}{1000\pi}\right) \left[\cos\delta \cos\Phi \sin\omega_s + \left(\frac{\pi\omega_s}{180}\right) \sin\delta \sin\Phi \right] \quad (3)$$

Los resultados de los cálculos se presentan en la Tabla 2

Tabla 2 Radiación extraterrestre

	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
rad extraterrestre Ho	12,0039159	10,7981317	9,0376996	6,91625875	5,19410941	4,40854251	4,73227252	6,11529999	8,12536443	10,1486912	11,6351209	12,2719913

2.1.3 Cálculo de radiación directa y difusa

Para efectuar este cálculo, se tomaron los datos de radiación global (H) de la página de la NASA [3], y con ellos se calculó mediante la ecuación (4) el índice de claridad para cada día medio de cada mes.

$$K_T = \frac{H}{H_o} \quad (4)$$

Luego a partir de ello, y utilizando la correlación de Liu-jordan [4], ecuación (5), se calcularon tanto radiación difusa (H_d), con ecuación (6), como directa (H_b), con ecuación (7).

$$K_d = 1,390 - 4,027K_T + 5,531(K_T)^2 - 3,108(K_T)^3 \quad (5)$$

$$H_d = H K_d \quad (6)$$

$$H_b = H - H_d \quad (7)$$

Los resultados de los cálculos se presentan en la Tabla 3

Tabla 3 Radiación global, índice de claridad, radiación directa y difusa

	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
rad solar NASA H	6,92	6	4,91	3,6	2,74	2,19	2,46	3,3	4,5	5,38	6,5	7,01
índice de claridad Kt	0,57647855	0,55565168	0,54327984	0,52051263	0,52752066	0,49676282	0,51983481	0,53963011	0,55382131	0,53011762	0,55865341	0,57121944
Kd	0,31119472	0,32688176	0,33633337	0,35412488	0,3485838	0,37343636	0,35466424	0,33914726	0,32827248	0,34654607	0,32460605	0,31513654
Hd	2,15346747	1,96129053	1,65139685	1,27484957	0,95511962	0,81782563	0,87247403	1,11918596	1,47722616	1,86441785	2,1099393	2,20910715
Hb	4,76653253	4,03870947	3,25860315	2,32515043	1,78488038	1,37217437	1,58752597	2,18081404	3,02277384	3,51558215	4,3900607	4,80089285

2.1.4 Cálculo de radiación en el plano elegido

La radiación total en el plano inclinado se calculó en base a tres parámetros geométricos, R_b , R_d y R_r , a través de las ecuaciones (8), (9) y (10) respectivamente. Se eligió un ángulo de inclinación (β) igual al de la latitud geográfica, para lograr que el plano del panel sea perpendicular a los rayos solares incidentes.

$$R_b = \frac{\cos(\Phi - \beta) \cos\delta \sin\omega_s + \left(\frac{\pi}{180}\right) \omega_s \sin(\Phi - \beta) \sin\delta}{\cos\delta \cos\Phi \sin\omega_s + \left(\frac{\pi}{180}\right) \omega_s \sin\Phi \sin\delta} \quad (8)$$

$$R_d = \frac{1 + \cos\beta}{2} \quad R_r = \frac{1 - \cos\beta}{2} \quad (9,10)$$

Mediante la ecuación (11), se obtuvo la radiación solar en el plano inclinado elegido (H_T), utilizando estos parámetros y el dato de albedo o reflectividad (ρ) para la latitud y longitud correspondiente a la planta, tomado de la página de la NASA.

$$H_T = H_b R_b + H_d R_d + H \rho R_r \quad (11)$$

Los resultados de los cálculos se presentan en la Tabla 4

Tabla 4 Parámetros geométricos, albedo, radiación reflejada y radiación total

	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
Rb	0,808	0,951	1,164	1,468	1,807	2,016	1,918	1,599	1,272	1,015	0,843	0,771
Rd	0,910	0,910	0,910	0,910	0,910	0,910	0,910	0,910	0,910	0,910	0,910	0,910
Rr	0,090	0,090	0,090	0,090	0,090	0,090	0,090	0,090	0,090	0,090	0,090	0,090
albedo	0,14	0,13	0,13	0,12	0,1	0,11	0,1	0,11	0,13	0,13	0,13	0,14
Hr	0,969	0,780	0,638	0,432	0,274	0,241	0,246	0,363	0,585	0,699	0,845	0,981
Ht	5,898	5,697	5,355	4,612	4,119	3,532	3,861	4,539	5,243	5,330	5,698	5,799

2.2 Layout de planta

Teniendo en cuenta el espacio disponible (rectángulo de 70x100 m orientado hacia el norte) se consideraron distintas disposiciones de paneles para optimizar la producción de energía. Se dejó libre un pasillo central de un ancho de 2 m para mantenimiento, y los paneles se separaron 2 cm entre sí.

Se calculó una distancia mínima entre filas consecutivas de paneles con el fin de evitar pérdidas por sombra. Para ello se consideró el día de menor altura solar en el año, y se dio una separación equivalente a la sombra proyectada por una fila (la cual será la máxima sombra proyectada en todo el año).

Se efectuaron los cálculos con dos posibles disposiciones, la primera, con paneles dispuestos en filas sencillas, y la segunda, con filas dobles, constituidas por conjuntos de dos paneles, uno sobre otro. Si bien la segunda disposición permitía disponer doble número de paneles por fila, la sombra proyectada obligaba a tener una separación muy grande entre ellas, lo cual, reducía el número total de paneles que podían ser colocados, y por ende la superficie de absorción en aproximadamente un 3%.

Si bien el porcentaje es muy pequeño como para ser un factor decisivo, se tomó en cuenta que la disposición de filas simples sería más fácil de montar que la de filas dobles, y requeriría una menor estructura de soporte y mano de obra. Todo este análisis derivó en la colocación de un total de 2178 paneles dispuestos en filas simples.

Se realizó luego un layout de planta utilizando el programa "Sketch up" (Figuras 1, 2 y 3), y se simularon las sombras producidas por los paneles en distintos días del año a modo de verificación.

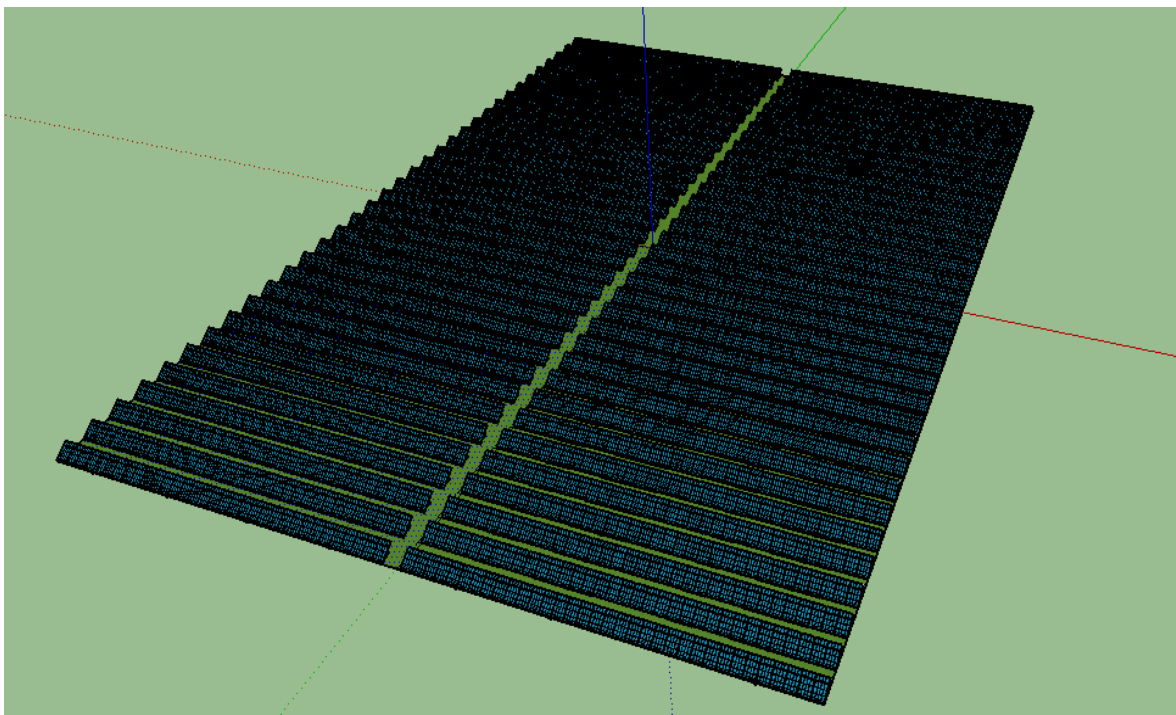


Figura 1: *Layout de planta*



Figura 2: disposición de paneles

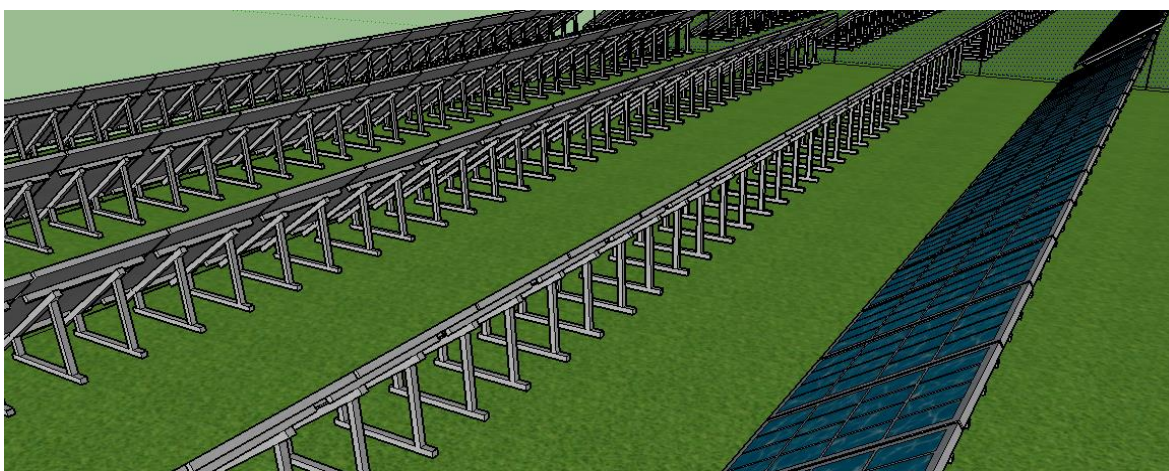


Figura 3: disposición de paneles

2.3 Cálculo de producción de energía

2.3.1 Cálculo del índice de desempeño

Como paso inicial en el cálculo de la producción de energía, se realizó el cálculo del índice de desempeño (PR%) del sistema mediante la ecuación (14). Para ello se tomaron en cuenta las distintas pérdidas:

- Por disponibilidad (L_{disp}), se tomó el valor máximo recomendado por IDAE [5].
- Por rendimiento de los paneles (A), incluyendo pérdidas por dispersión de los parámetros entre los módulos (A1), por polvo y suciedad (A2), por refractancia angular y espectral (A3) y debido al factor de sombra (A4). En todos estos casos se tomó el valor aproximado establecido por IDEA.
- Del cableado de corriente alterna (L_{ca}). Se tomó el valor de tabla III, anexo I del Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones Conectadas a Red [6], como lo indica la Sección 2.10.2 del mismo.
- Del cableado de corriente continua (L_{cc}), entre los paneles y en la entrada del inversor. Se tomó el valor máximo admisible según el Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones Conectadas a Red.
- Por rendimiento de los inversores (E)
- Por rendimiento del seguimiento del punto de máxima potencia del generador (F)

Los valores de los mismos se adjuntan en tablas (5) y (6).

Tabla 5 Pérdidas por rendimiento de los paneles

A1	0,02
A2	0,03
A3	0,03
A4	0,01
A=A1+A2+A3+A4	0,09

Tabla 6 Rendimientos

B=(1-Lcc)	0,985
C=(1-Lca)	0,98
D=(1-Ldisp)	0,95
E	0,95
F	0,95

Para calcular las pérdidas por temperatura (P_{temp}) con la ecuación (13), expresión que permite calcular las pérdidas debido a la operación de los módulos en condiciones distintas de las CEM (Sección 3.3.4 del Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones Conectadas a Red), fue necesario primero calcular la temperatura de trabajo de las celdas (T_c) mediante la ecuación (12), para lo cual se utilizó el dato de la temperatura de operación normal de la celda ($T_{ONC}= 40,6\text{ }^\circ\text{C}$) suministrado en la hoja de datos por el proveedor [7] y datos de temperatura ambiente descargados de la página de la NASA.

$$T_c = T_{amb} + (T_{ONC} - 20)(E/800) \quad (12)$$

Donde E = irradiancia solar en W/m^2 , medida con la célula de tecnología equivalente calibrada, dentro de un margen de ± 2 horas alrededor del mediodía solar, según anexo I del Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones Conectadas a Red. Al ser este un caso hipotético y no disponer de un equipo de medición, se tomó un valor ejemplificativo de 850 W/m^2 , de tabla IV del citado anexo.

$$P_{temp} = 100 - 100 [1 - g (T_c - 25)] \quad (13)$$

Donde $g = 0,0043\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ según las características térmicas de la hoja de datos del panel.

$$PR \% = (100 - A - P_{temp})B.C.D.E.F \quad (14)$$

Tomada de [8]

2.3.2 Cálculo de producción de energía para cada día medio de cada mes

Utilizando la radiación solar en el plano inclinado (H_T) calculada anteriormente, el performance ratio y el dato de potencia pico suministrado por el proveedor, se calculó la producción de energía para cada día medio de cada mes en KWh/día mediante la ecuación (15), según lo indica la sección 7.2.4 del Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones Conectadas a Red.

$$E_p = \frac{H_T \cdot P_{mp} \cdot PR}{G_{CEM}} \quad (15)$$

Donde P_{mp} es la potencia en condiciones estándar (245 Wp) multiplicada por el número de paneles, y G_{CEM} una constante de valor 1 KW/m^2 .

2.3.3 Cálculo de energía producida por año

Para efectuar este cálculo, E_p se multiplicó por el número de días en cada mes y simplemente se hizo una sumatoria de la energía producida durante los 12 meses del año.

2.4 Reducción de emisiones de CO_2 a la atmósfera

La parte final del trabajo consistió en calcular la reducción de emisiones de CO_2 a la atmósfera luego de 20 años de funcionamiento de la planta.

Se consideró que por cada KWh de energía producido en el país se liberan aproximadamente 600 g de CO_2 a la atmósfera [9], y, en base al total de energía que la planta produciría durante 20 años, se calcularon las toneladas de CO_2 que no se estarían emitiendo gracias al hecho de utilizar esta fuente de energía y no una convencional.

La utilización de sistemas fotovoltaicos no son ajenos a las emisiones de CO_2 . Esta se genera en los procesos de producción, transporte y montaje de los diferentes tipos de celda fotovoltaica. La que cita Fthenakis et al. [10] es de 30-50 g CO_2/KWh (para un ciclo de vida de 30 años con una radiación e índice de desempeño específicos). Utilizando un valor promedio se realizó una estimación de las emisiones de CO_2 durante el ciclo de vida de la planta solar.

Restando el CO_2 producido al CO_2 no emitido, se obtuvo una estimación la reducción neta de emisiones a la atmósfera que podría generar la planta.

3. RESULTADOS

3.1 Energía producida por año

Se obtuvo un valor de energía producida por año de un total de 76 GWh, con una distribución de energía producida por mes que se muestra en la Figura 4.

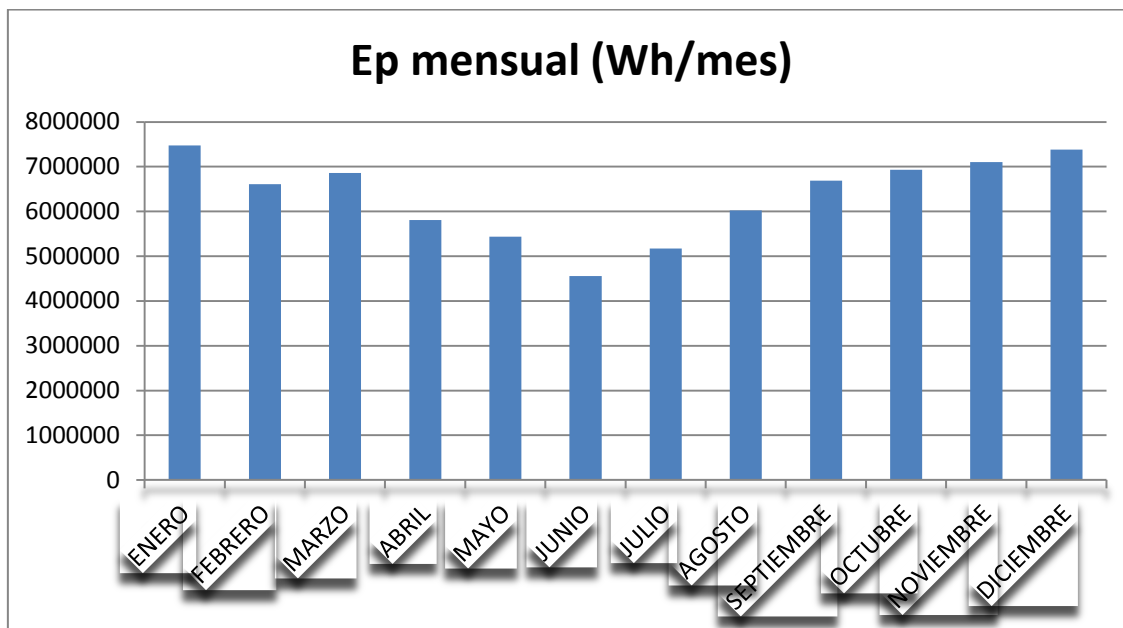


Figura 4 Energía producida por mes

3.2 Ahorro de emisiones de dióxido de carbono

En la figura 5 se ilustra el importante ahorro de emisiones de CO₂ mensual debido al funcionamiento de la planta hipotética.

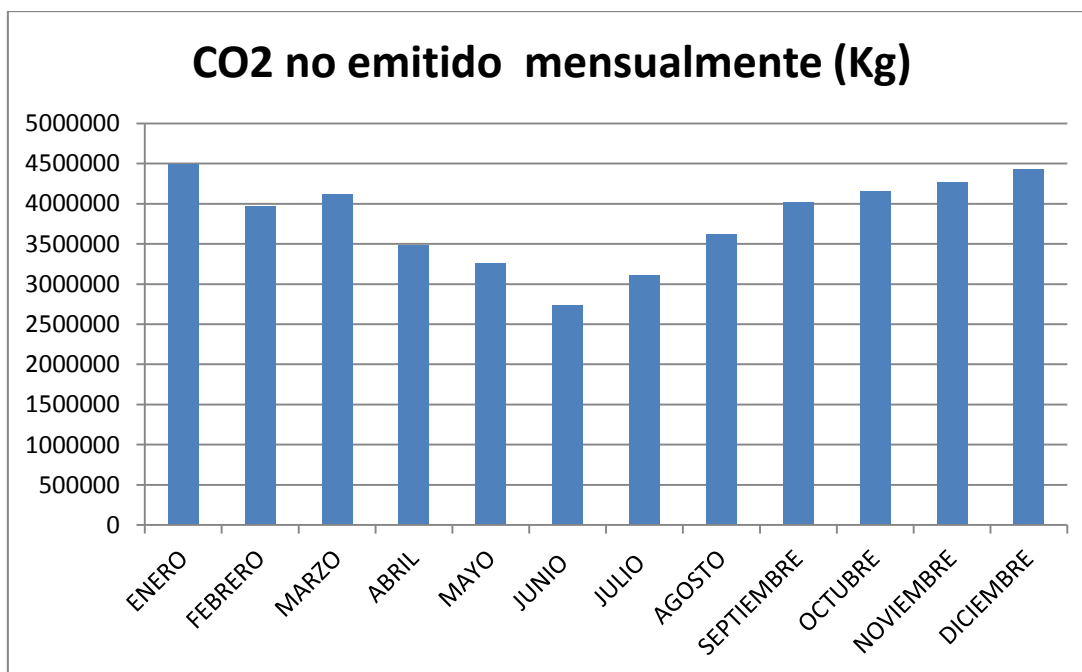


Figura 5 Ahorro mensual de emisiones de CO₂

Teniendo en cuenta las emisiones producidas por la fabricación, transporte y montado de la planta solar, los ahorros en emisiones continuaron siendo muy grandes. El total de ahorro calculado fue de unas 900000 toneladas de CO₂ en 20 años de funcionamiento de la planta.

4. CONCLUSIONES

En esta sección se presentan las principales conclusiones a las que se llegó en conjunto docentes y estudiantes durante la defensa oral del trabajo:

- Alumnos de un curso de 2° año de ingeniería lograron realizar la primera estimación de la energía producida por una planta solar fotovoltaica sin necesidad de utilizar software comercial, y partiendo desde las bases teóricas adquiridas en la Asignatura Física II.
- La planilla de cálculo generada por los estudiantes para la realización del trabajo puede ser utilizada en el cálculo y diseño de una planta fotovoltaica ubicada en cualquier lugar del mundo, mediante el ingreso de los datos solares correspondientes a la locación geográfica.
- La misma planilla puede ser utilizada para verificar el ángulo óptimo de inclinación de los paneles, ya que cambiando el valor de éste se puede observar al instante la variación de energía anual producida.
- Los criterios desarrollados permiten a los alumnos afrontar la utilización a consciencia de software especializado en diseño de plantas fotovoltaicas, como por ejemplo PVSyst.
- Se concluye que ésta es una buena estrategia disparadora para la construcción de bases de motivación necesarias en las primeras etapas del estudio universitario. La captación del interés de los estudiantes es fundamental como mecanismo paliativo para la sistemática deserción registrada cada año en la población universitaria.

5. REFERENCIAS.

- [1] <https://www.sketchup.com/es/download>
- [2] Iqbal, Muhammad. (1983). "An introduction to solar radiation". Department of Mechanical Engineering. The University of British Columbia. Vancouver, British Columbia, Canada.
- [3] <https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>
- [4] Liu B., Jordan R. (1962) "Daily insolation on surfaces tilted towards the equator". Trans. ASHRAE, pp. 526-541.
- [5] <http://www.idae.es/>
- [6] "Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones Conectadas a Red PCT". (2011). IDAE Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. C/ Madera, 8 E – 28004, Madrid, España.
- [7] <http://www.lv-energy.com/#!/-home/>
- [8]
- [9] Ministerio de Energía y Minería, Presidencia de la Nación. <http://www.energia.gob.ar/contenidos/verpagina.php?idpagina=2311>
- [10] Fthenakis, Vasilis M.; HyungChul, Kim; Alsema, Erik. (2008). "Emissions from Photovoltaic life cycles". Environmental Science and Technology. Volúmen 42, fascículo 6, páginas 2168-2174.