



Instituto Tecnológico de Buenos Aires

PROYECTO FINAL

INGENIERÍA MECÁNICA

Análisis y desarrollo de un sistema fotovoltaico para alimentación de un clorizador

AUTORA: SOFÍA BASSI – 52029

TUTOR: J. RICARDO LAURETTA

AGOSTO 2017

Resumen

La conversión de la radiación solar en corriente eléctrica es una manera práctica de generar energía para alimentar dispositivos eléctricos en ubicaciones remotas. Por otra parte, existe una creciente necesidad de tener acceso a agua potable en zonas rurales o marginadas, aisladas de la red eléctrica. En este trabajo se diseña y ensaya un prototipo de clorizador alimentado por energía solar, el cual permite obtener cloro por electrólisis a emplearse posteriormente en procesos de potabilización de agua. El trabajo se centra en la optimización de la obtención de energía solar para llevar a cabo el proceso de generación de cloro, y en el diseño de la instalación de menor costo que permita un adecuado control del funcionamiento del dispositivo. Se hace un estudio teórico del problema, se analizan distintas soluciones, y se selecciona la mejor alternativa de sistema fotovoltaico. Luego se lo prueba y se validan los resultados. Por último, se mencionan algunos trabajos a realizarse en un futuro.

Tabla de contenido

Resumen	II
Tabla de contenido	III
1 Introducción	1
2 Clorizador	2
2.1 Reacciones del cloro en el agua	2
2.2 El dispositivo	4
2.3 Reacciones químicas de la electrólisis	4
2.4 Curva de concentración de cloro	6
2.5 Curvas características.....	8
2.6 Decaimiento del cloro	10
3 Energía solar.....	13
3.1 Radiación solar	14
3.2 Curvas de paneles fotovoltaicos	17
3.3 Análisis de radiación solar según ubicación.....	20
3.3.a) Buenos Aires, Argentina.....	20
3.3.b) Nagpur, India.....	23
3.3.c) Madoi Huangheyuan, China.....	25
3.3.d) Resumen de resultados.....	26
3.4 Determinación de la potencia a instalar en Buenos Aires	27
4 Sistema fotovoltaico	29
4.1 Opciones de conexión.....	29
4.1.i. Conexión directa	29
4.1.ii. Conexión con convertidor.....	32
4.1.iii. Conexión con batería y convertidor.....	32
4.1.iv. Otras alternativas.....	35
4.2 Análisis de las alternativas	36
4.3 Instalación final	38
5 Ensayo del sistema.....	41
5.1 Modelo generación-decaimiento.....	42
6 Trabajos a futuro.....	45
7 Conclusiones	46
Referencias.....	IV

1 Introducción

Alrededor de 3 de cada 10 personas (2100 millones de personas) carecen de acceso a agua potable y disponible en el hogar, y 6 de cada 10 (4500 millones), carecen de un saneamiento seguro en todo el mundo¹. Surge entonces el interés por encontrar formas sencillas y de bajo costo que faciliten la disponibilidad de agua potable, principalmente en zonas rurales o de bajos recursos.

Consecuentemente, se busca crear un sistema de captación de energía solar optimizado para alimentar un prototipo de clorizador, para potabilización de agua en zonas aisladas de la red eléctrica. Dicho prototipo, creado en el Instituto Tecnológico de Buenos Aires en un trabajo anterior, es un equipo de producción de cloro gaseoso e hipoclorito de sodio por electrólisis de una solución acuosa de cloruro de sodio. Con este equipo se puede obtener, al cabo del proceso de producción, una solución de hipoclorito de sodio en agua con una concentración de 10 g de cloro por litro.

La desinfección del agua de consumo humano con cloro o los derivados de cloro es un proceso aceptado a nivel mundial para el suministro de agua de buena calidad bacteriológica. En los países en vías de desarrollo, el abastecimiento regular del desinfectante a ciudades apartadas o comunidades rurales puede ser un problema al no disponerse de un sistema adecuado de distribución del desinfectante. La aplicación de la electrólisis de salmuera a nivel local para el tratamiento de agua surge como una alternativa segura que requiere equipos simples y de bajo costo, evitando el riesgo de manipulación de cloro gas o inconvenientes en el uso del hipoclorito sódico, sumados los costes de adquisición, transporte y acumulación. La generación *in situ* minimiza la acumulación de hipoclorito, ahorra las continuas pérdidas por degradación y garantiza una disponibilidad inmediata de producto. Asimismo, la sal usada como materia prima es un producto de precio estable y fácil de conseguir, cuya acumulación no presenta ningún riesgo significativo.

El cloro es el agente más utilizado en el mundo como desinfectante en el agua de consumo humano [1], debido principalmente a:

- su carácter fuertemente oxidante, responsable de la destrucción de los agentes patógenos (en especial bacterias) y numerosos compuestos causantes de malos olores.
- su inocuidad en las concentraciones utilizadas.
- la facilidad de controlar y comprobar niveles adecuados de concentración.

La dosis de aplicación depende de las características microbiológicas del agua, así como del valor del pH. Para la desinfección inicial del agua se utilizan generalmente dosis de cloro de alrededor de 1 mg/l, o incluso superiores en función de las características del agua. Por lo tanto, alcanzando una concentración de cloro en el clorizador de 10 g/l, se podrían tratar 10.000 litros de agua con un litro de la solución obtenida. Dado que el prototipo ensayado cuenta con un tanque de 30 litros de capacidad, sería posible potabilizar 300.000 litros de agua con el contenido del tanque.

Del trabajo anterior se sabe que tal concentración de cloro se alcanza en el equipo prototipo desarrollado, luego de 24 horas de electrólisis con una corriente de 19 A, partiendo de una solución con una concentración inicial de 30 gramos de cloruro de sodio por litro de agua.

¹ Datos extraídos del informe de la OMS y el UNICEF titulado *Progresos en materia de agua potable, saneamiento e higiene: informe de actualización de 2017 y evaluación de los ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible)*, que presenta la primera evaluación mundial de los servicios de agua potable y saneamiento «gestionados de forma segura».

2 Clorizador

2.1 Reacciones del cloro en el agua

El cloro en el agua es un agente químico muy activo. Si una pequeña cantidad se agrega al agua, reacciona con las sustancias disueltas o suspendidas en ella, quedando anulado su poder desinfectante. Por ejemplo, el cloro reacciona rápidamente con el manganeso, el hierro y los nitritos, lo cual da como resultado una desinfección nula. Si se agrega la cantidad suficiente de cloro para que reaccione con estos compuestos, llamados compuestos reductores, el resto de la dosis de cloro agregada reacciona con cualquier sustancia orgánica presente o amoníaco, para producir compuestos orgánicos de cloro o cloraminas, respectivamente. Estas últimas tienen cierto poder desinfectante. Si se agrega cloro en cantidad suficiente para que reaccione con todas las sustancias reductoras, la materia orgánica, y el amoníaco, cualquier exceso de cloro agregado queda como cloro residual libre, disponible, el cual es un agente desinfectante muy activo. En la *Figura 1* aparece una representación gráfica típica de las reacciones del cloro en el agua, que se conoce como “curva de demanda de cloro”.

La cantidad de sustancias reductoras, materia orgánica, y amoníaco, depende del origen del agua y del momento de extracción de la misma. Constantemente, también varía la cantidad de cloro que debe agregarse para su desinfección. La cantidad de cloro que consumen las sustancias reductoras y la materia orgánica se conoce como demanda de cloro. Cuantitativamente se define la demanda de cloro como la cantidad que se agrega, menos la cantidad que hay después del periodo de reacción seleccionado, generalmente de diez minutos. La cantidad de cloro que permanece después del periodo de reacción se define como “cloro residual total” o simplemente “cloro total”, y se expresa en miligramos por litro (mg/l) o en partes por millón (ppm). El cloro total es la suma del cloro presente en compuestos clorados de materia orgánica y amoníaco (“cloro residual combinado”), y el “cloro residual libre”. En consecuencia, “cloro suficiente” es la cantidad requerida para producir un residuo total deseado, después de un período de contacto definido [2].

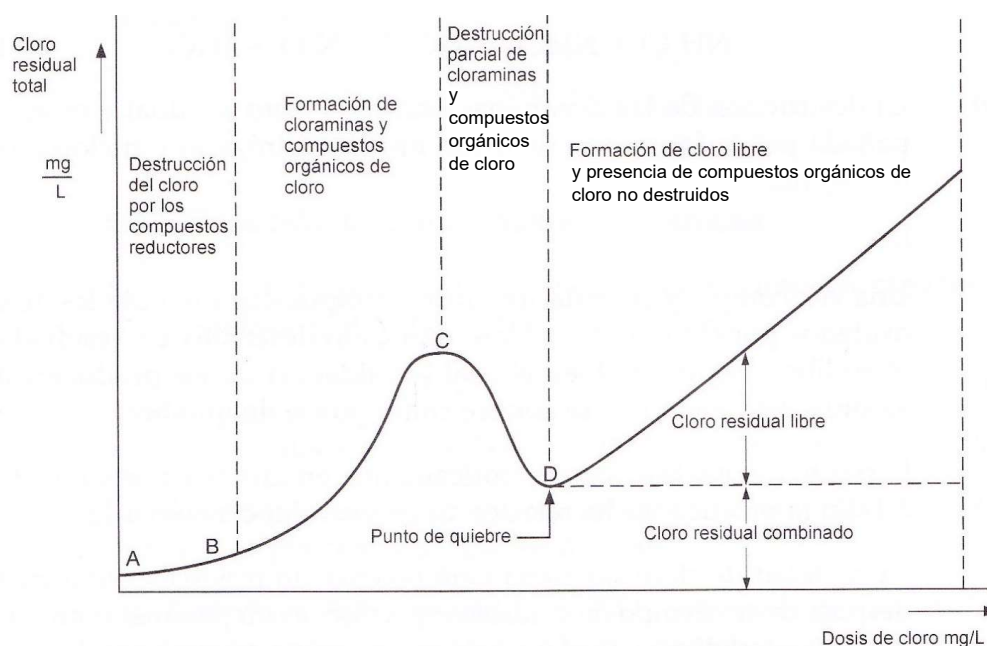
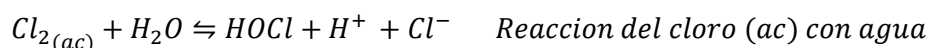
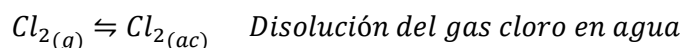
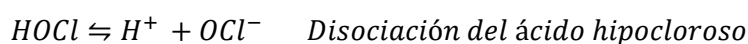


Figura 1: Reacciones del cloro en el agua.

Cuando se añade cloro al agua, en pocos segundos se forma una mezcla de ácido hipocloroso ($HOCl$) y ácido clorhídrico (HCl), el cual se disocia completamente bajo condiciones de solución acuosa diluida:

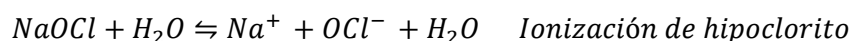


El ácido hipocloroso a su vez se ioniza o disocia en hidrógeno e ion hipoclorito en una reacción prácticamente instantánea y reversible:



La cantidad relativa de las diferentes especies oxidadas del cloro ($HOCl$ y OCl^-) es una función del pH y la temperatura [3].

Las soluciones de hipoclorito de sodio se ionizan en el agua y dan lugar a iones hipoclorito, generándose también un equilibrio entre los iones hipoclorito y los iones hidrógeno en función del pH:



Por tanto, se establece el mismo equilibrio independientemente de que se utilice cloro gaseoso o compuestos de cloro en forma de hipocloritos. La única, pero importante diferencia, es el pH resultante y por lo tanto las cantidades relativas del $HOCl$ y OCl^- existentes en el equilibrio. El cloro tiende a disminuir el pH inicial, mientras que los hipocloritos tienden a aumentarlo.

Ahora entonces, se distingue en más detalle entre las distintas formas activas del cloro en solución (Figura 2):

- Cloro combinado: es el cloro que está asociado con materia orgánica o amoníaco y que aún tiene un determinado poder desinfectante.
- Cloro libre: es el cloro que se halla disuelto en agua y que no está asociado con la materia orgánica. Este se compone del cloro presente en forma de ácido hipocloroso (la forma del cloro más activa para la desinfección), y en forma de ion hipoclorito.
- Cloro total: es la suma del cloro libre y el cloro combinado. Es al que se refiere al especificarse concentraciones de cloro en este trabajo.

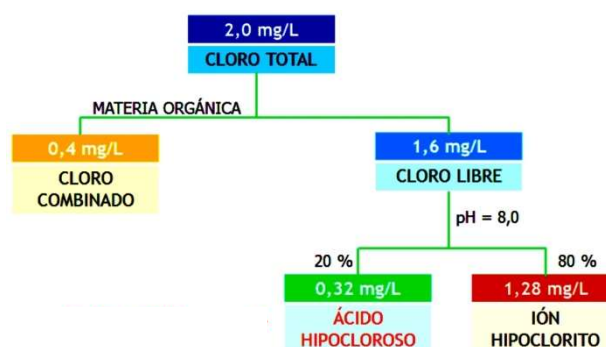


Figura 2: Explicación esquemática de las formas activas del cloro.

2.2 El dispositivo

El clorizador, mostrado en la *Figura 3*, consiste en un recipiente de polietileno con tapa y una base. Dentro del recipiente se coloca la solución acuosa o electrolito. Si bien tiene tapa, el recipiente no es hermético. De esta forma, se permite el escape al ambiente de los gases generados durante la electrólisis. Esto es necesario principalmente dado que uno de los productos es gas hidrógeno (H_2), altamente inflamable aún en baja concentración. En el fondo del recipiente se encuentran los electrodos (*Figura 4*), dispuestos de manera tal que permanecen completamente sumergidos dentro del electrolito en todo momento. En esta configuración el ánodo se ubica entre dos cátodos de titanio.

Los electrodos deben tener buena resistencia mecánica, alta conductividad eléctrica y generar bajas sobretensiones para la reacción de producción del cloro. Para este fin se utilizan electrodos de titanio, metal no-ferroso de alta dureza, excelente resistencia a la corrosión, y bajos sobre-potenciales. Para mejorar la durabilidad del ánodo y bajar aún más el sobre-potencial, el ánodo además se reviste con mezclas de óxidos de metales nobles como rutenio e iridio. De esta manera el ánodo tiene un índice de consumo muy bajo, pudiendo llegar a operar hasta 5 años ininterrumpidamente.



Figura 3: Clorizador solar.



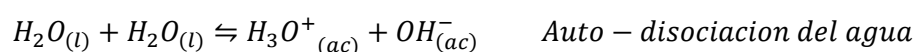
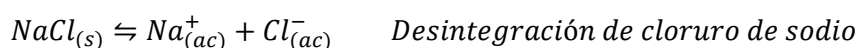
Figura 4: Fondo del recipiente.

La solución acuosa de cloruro de sodio inicial se obtiene disolviendo 900 gramos de sal industrial en 30 litros de agua. De esta forma se obtiene el electrolito, el cual tiene la concentración deseada de 30 g/l.

Se considera que el hipoclorito de sodio se genera bajo demanda. Es decir, el dispositivo se prende para generar hipoclorito a ser usado inmediatamente luego de que se finalice el proceso.

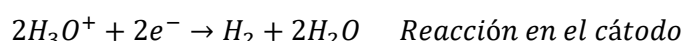
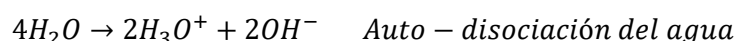
2.3 Reacciones químicas de la electrólisis

Al disolver la sal industrial en agua para formar el electrolito ocurren dos reacciones. La primera es la desintegración de la molécula de cloruro de sodio en iones Na^+ y Cl^- . La segunda, consiste en la auto-disociación del agua en iones hidroxilo e hidronio [3]. Dichas reacciones se detallan a continuación:



Durante la electrólisis (Figura 5), las reacciones desencadenadas pueden separarse entre aquellas que tienen lugar en el cátodo y aquellas que ocurren en el ánodo [3]:

- Reacciones en el cátodo:

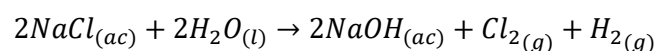


- Reacciones en el ánodo:

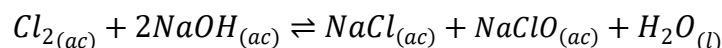


El ion hidroxilo y el ion sodio se pueden combinar para formar hidróxido de sodio. En consecuencia, la electrólisis de la solución acuosa de cloruro de sodio genera hidróxido de sodio, cloro e hidrógeno:

- Reacción total:



El cloro y el hidróxido de sodio a su vez reaccionan para formar hipoclorito de sodio, de acuerdo con la ecuación:



El hipoclorito de sodio ($NaClO$) es un compuesto químico fuertemente oxidante. La temperatura debe mantenerse debajo de los 60°C durante el proceso, ya que las altas temperaturas fomentan la generación de clorato de sodio ($NaClO_3$) a expensas de hipoclorito de sodio. El clorato no posee poder desinfectante.

Por lo tanto, durante el proceso de electrólisis, una parte de la energía alimentada se consume en la producción del cloro, ya sea en forma de ácido hipocloroso ($HOCl$) o ion hipoclorito (OCl^-). Otra parte,

se consume en la transformación del cloro en cloratos y cloruros. Adicionalmente, parte de la energía se disipa en forma de calor durante las reacciones.

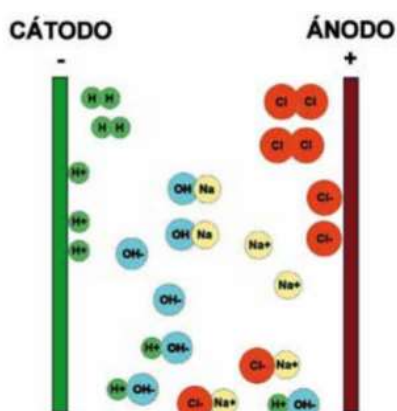


Figura 5: Proceso de electrólisis.

2.4 Curva de concentración de cloro

Para estudiar el comportamiento del clorizador en un primer análisis, el mismo se conecta a una fuente de corriente directa a 19 A. Se encuentra que, utilizando dicha solución inicial de 30 gramos de cloruro de sodio por litro de agua, la concentración de cloro buscada de 10 g/l se alcanza tras 24 horas de electrólisis. Ergo, son necesarios 456 Ah para obtener una solución final apta para el tratamiento de agua:

$$19A \cdot 24hs = 456 Ah \quad \text{Carga necesaria}$$

Las mediciones de concentración de cloro en el electrolito se hacen a intervalos de una hora, a partir de la puesta en marcha de la electrólisis. La electrólisis no se interrumpe durante las 24 horas que dura el proceso. Consecuentemente, como se ve en la Figura 7, no se tomaron muestras durante la 5ta y 20ava hora de electrólisis debido al horario laboral.

Las muestras se analizan utilizando un TOTAL CHLORINE CHECKER® HC - HI701 de HANNA INSTRUMENTS (Figura 6), cuya precisión en la lectura es $\pm 0,03$ ppm y su rango especificado es hasta 3,5 ppm de cloro. Por lo tanto, las muestras obtenidas directamente del clorizador se deben diluir en agua previo a analizarse en el 'Checker', ya que el nivel de concentración esperado es de 10 000 ppm.

Además, como para diluir las muestras se utiliza agua de la red, la cual ya contiene cloro, se debe medir su concentración inicial de cloro en cada medición para luego restarse del resultado obtenido de concentración de cloro presente en el clorizador.

De las ecuaciones químicas de la sección 2.2 es posible determinar la concentración teórica de cloro (CC_{teo}) en función del tiempo. Por cada hora de proceso se entregan 19 Ah, lo que es igual a una carga de 68400 C. Asimismo, siendo que por cada dos moles de electrones generado en la reducción en el cátodo



Figura 6: Medidor de cloro total de HANNA Instruments.

se obtiene un mol de cloro gaseoso, y a partir de este un mol de hipoclorito de sodio (idealmente), se deduce que para una muestra de cloro i :

$$CC_{teo,i} = CC_{teo,i-1} + \frac{68400 C}{e * N * 30l} * Ar_{Cl}$$

siendo e la carga elemental del electrón, N el número de Avogadro, y Ar_{Cl} la masa molar del cloro. Reemplazando:

$$CC_{teo,i} = CC_{teo,i-1} + \frac{68400 C}{1,6 * 10^{-19} C * 6,022 * 10^{23} \frac{1}{mol} * 30l} * 35,453 \frac{g}{mol}$$

Los valores de concentración se comparan con la concentración de cloro real (CC_{real}) medida a lo largo del proceso y se define una eficiencia:

$$\eta_{Cl} = \frac{CC_{real}}{CC_{teo}}$$

Tal como se observa en la *Figura 7*, los valores de concentración de cloro real son menores a los teóricos. Sin embargo, la curva para la concentración real también asume una tendencia lineal. Luego de 24 horas de electrólisis la eficiencia obtenida es del 52%, implicando que aproximadamente solo la mitad del cloro generado permanece en la solución acuosa dentro del recipiente. Esto se debe a que, como ya se explicó, parte del cloro gaseoso generado, al entrar en contacto con la solución, sufre una serie de reacciones por las cuales se consume por varios constituyentes del agua y por descomposición. Por ejemplo, reacciona con compuestos reductores inorgánicos, como ser Mn^{+2} o Fe^{+2} , presentes en el agua de red utilizada para formar la solución. Otra parte del cloro producido en la electrólisis escapa al ambiente como gas Cl_2 , sin formar parte de alguna otra reacción.

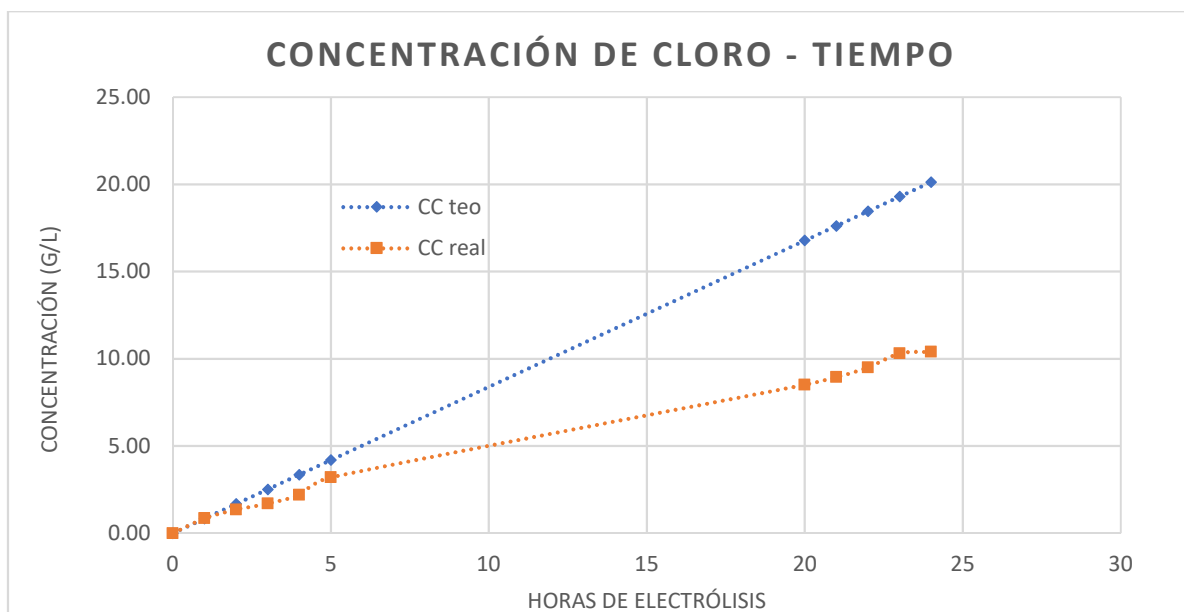


Figura 7: Concentración de cloro en función de horas de electrólisis.

De la figura anterior se observa que la concentración de cloro buscada se alcanza entre la hora 22 y 23. Esto verifica que tras 24 horas de proceso se alcanza la concentración de cloro deseada.

En la *Figura 8* se muestra la evolución de la tensión aplicada con el tiempo. Durante las primeras horas de proceso ocurre una rápida caída de tensión, pero a partir de la cuarta hora de proceso se observa que se mantiene prácticamente constante.

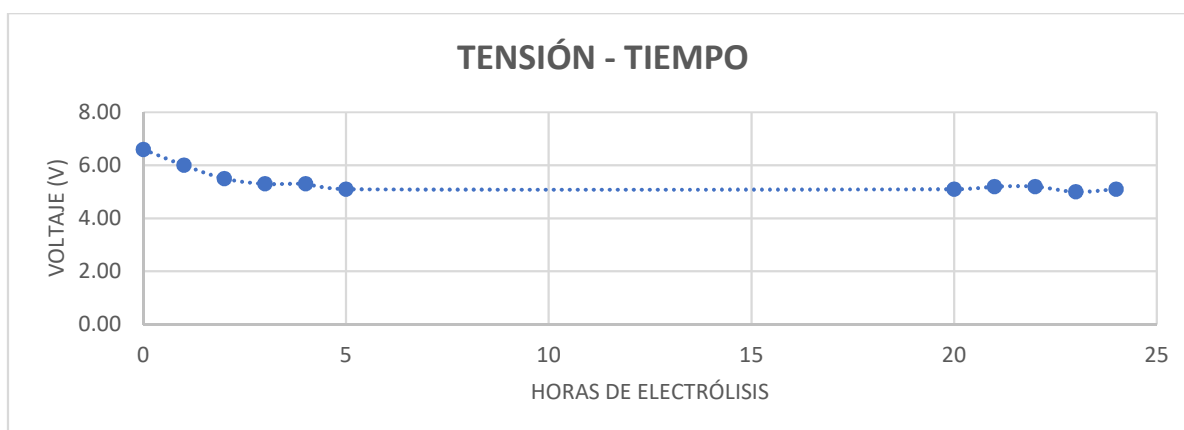


Figura 8: Tensión en el clorizador a través del tiempo a 19 A.

2.5 Curvas características

Se determinan las curvas características del clorizador en cuatro situaciones diferentes. Para ello se miden los valores de tensión y corriente en cada situación, regulando los valores de corriente desde la fuente. Estas curvas se utilizan luego para determinar el punto de operación del clorizador al conectarlo con los paneles solares.

Dado que la solución se calienta durante el funcionamiento del clorizador, las cuatro situaciones para las cuales se llevan a cabo las mediciones son: previo al comienzo de la electrólisis, a temperatura ambiente (20 °C) y a la temperatura de trabajo (42 °C aproximadamente), y luego de 24 horas de

proceso, a 20 °C y 42 °C. Para calentar la solución y alcanzar la temperatura de trabajo, se sumerge una resistencia en el electrolito. Los resultados se muestran en la *Figura 9*.

Se ve que el valor mínimo de voltaje necesario para que comience a circular corriente es menor luego de las 24 horas de electrólisis que al comienzo. Además, el gradiente de la curva característica es mayor a la temperatura de trabajo que a la temperatura ambiente. Otra observación es que, a la temperatura de trabajo, las curvas se cruzan a los 20 A mientras que, a la temperatura ambiente, las curvas se cruzan antes (7 A). Por último, a temperatura ambiente, el valor máximo de tensión medido luego del proceso es mayor al máximo medido previo al comienzo de la electrólisis.

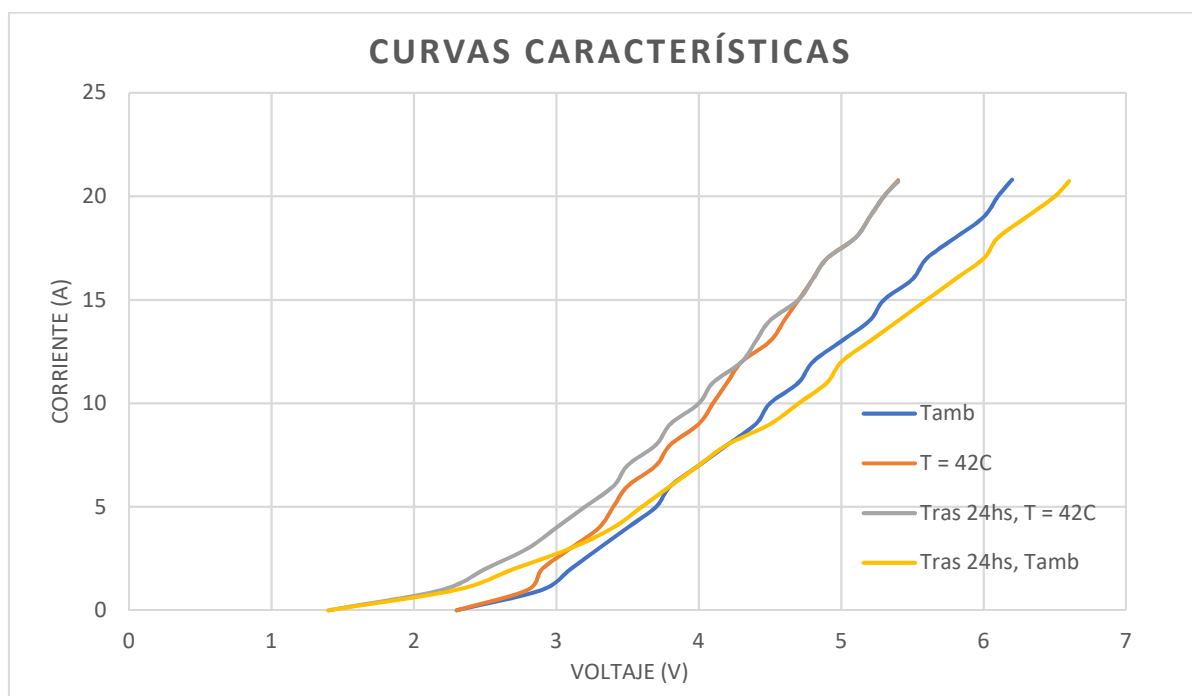


Figura 9: Curvas características del clorizador.

Esta información se utiliza para determinar las características generales de funcionamiento del clorizador. Para ello se promedian las funciones anteriores y se define la curva característica promedio. Luego se linealiza dicha curva para obtener la función que se muestra en la *Figura 10*.

Como se observa en la *Figura 10*, la resistencia eléctrica que presenta el clorizador no es constante.

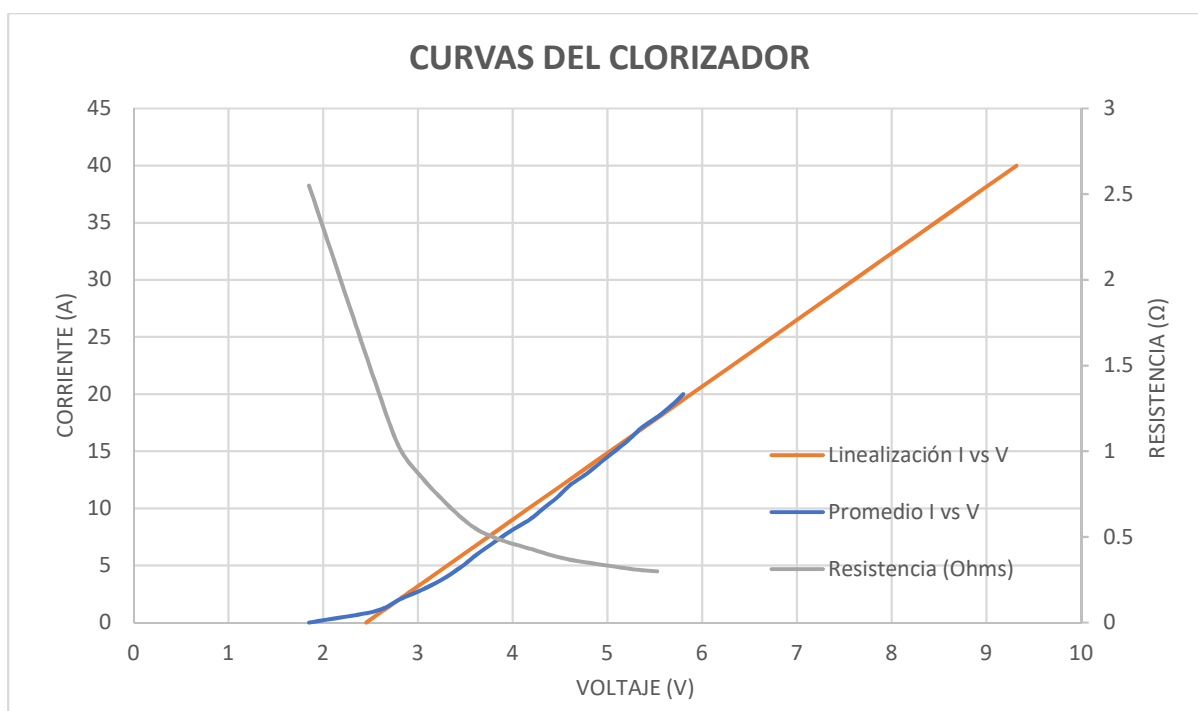
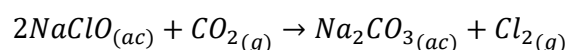


Figura 10: Curva característica promedio, linealmente aproximada.

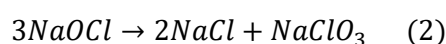
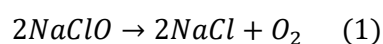
2.6 Decaimiento del cloro

A lo largo del tiempo, el cloro tiende a escapar de la solución. Como se vio, el cloro gaseoso se disuelve en agua obteniéndose un equilibrio. No obstante, al ser un recipiente no hermético, el cloro gaseoso siempre tiende a escapar al ambiente con lo cual el equilibrio se desplaza continuamente hacia la formación de cloro gaseoso para compensar el que se ha perdido [5]. Además, el hipoclorito de sodio reacciona con el dióxido de carbono presente en el aire según la ecuación:



Por lo tanto, importa el tamaño de la superficie libre en contacto con el aire. Cuanto mayor sea la superficie de la solución expuesta al aire, la pérdida del cloro se dará con mayor facilidad.

Asimismo, el ion hipoclorito (ClO^-) es inestable, y las soluciones de hipoclorito de sodio comienzan a descomponerse gradualmente desde el inicio de la preparación hasta perder totalmente su concentración. Las soluciones de hipoclorito de sodio se descomponen de dos maneras, a cloruro de sodio y oxígeno (1), o por desproporción a cloruro de sodio y clorato de sodio (2):



Los metales catalizan las reacciones de producción de oxígeno, mientras que el tiempo de almacenamiento y la temperatura promueven la formación de cloratos. Asimismo, el hipoclorito de sodio reacciona con ácidos fuertes como el ácido clorhídrico, liberando gas cloro, o con ácidos débiles, como ser el ácido hipocloroso. Por tanto, en medio ácido, el hipoclorito se descompone con mayor facilidad que en medio básico.

De hecho, la estabilidad del hipoclorito depende de cinco factores: la concentración de la solución, el pH, la temperatura (tanto durante la preparación como en el almacenaje), la concentración de impurezas, y la exposición a la luz. La descomposición es más rápida a mayores concentraciones de hipoclorito. La descomposición debido a la temperatura sigue la reacción de formación de clorato (2), e idealmente debe mantenerse la temperatura por debajo de los 40°C durante la producción. La solución de hipoclorito también es más estable si se mantiene alcalina, idealmente a un pH cercano a 11. Es por ello que en algunos casos se agrega hidróxido de sodio o cal a la solución desinfectante para hacerla más alcalina y estable, especialmente cuando la temperatura es mayor a 10°C. Por otro lado, las sales metálicas u óxidos son impurezas que catalizan la reacción de producción de oxígeno (1). El cobre, hierro, níquel y cobalto son catalizadores poderosos de la descomposición. Por último, la exposición a la luz solar directa acelera en gran medida la descomposición de las soluciones de hipoclorito de sodio, mientras que la luz artificial tiene una influencia intermedia pero importante a temperaturas mayores a los 10°C. Consecuentemente, utilizando recipientes que no sean transparentes o traslucidos se reduce drásticamente la descomposición [4].

Considerando que el objetivo perseguido es que el clorizador se utilice finalmente conectado exclusivamente a módulos fotovoltaicos, toma relevancia estudiar el decaimiento de la concentración de cloro en la solución en función del tiempo. Esto se debe a que dependiendo del tipo de sistema fotovoltaico y la cantidad de paneles instalados, el proceso puede llegar a tardar más de un día y la electrólisis puede llegar a desarrollarse de forma intermitente. Asimismo, la energía obtenida de los paneles con la cual se alimenta el clorizador es variable y depende de varios factores. Por lo tanto, durante los períodos sin suministro de energía, o con muy bajo nivel de corriente, (como sucedería durante las noches o durante días muy nublados donde la radiación es mínima), el cloro liberado al ambiente desde la solución y la degradación del hipoclorito podría competir con la producción, haciendo que no se alcance la concentración deseada. Conocer dicho modo de decaimiento servirá para determinar la configuración final de la instalación, que permita asegurar que el proceso alcance la concentración buscada.

Como un primer estudio de la forma de decaimiento, se estudia el cambio en la concentración de cloro una vez completado el proceso de electrólisis, teniendo como alimentación la fuente de corriente directa. Se procede a realizar la electrólisis por 24 horas, se deja reposar la solución dentro del recipiente y se mide la concentración de cloro a lo largo del tiempo (*Figura 11*). Se puede observar que hay un decaimiento significativo durante el almacenamiento, y luego de una semana, solo mitad del cloro generado permanece en la solución. El mayor gradiente en la caída de la concentración (que ocurre apenas se apaga el clorizador), puede llegar a asociarse al hecho de que la solución se encuentra a alta temperatura, siendo que el dispositivo viene de operar de forma continua durante 24 horas a alta carga (19 A). Sin embargo, no se tomaron suficientes muestras durante dicho intervalo como para hacer un análisis de mayor profundidad.

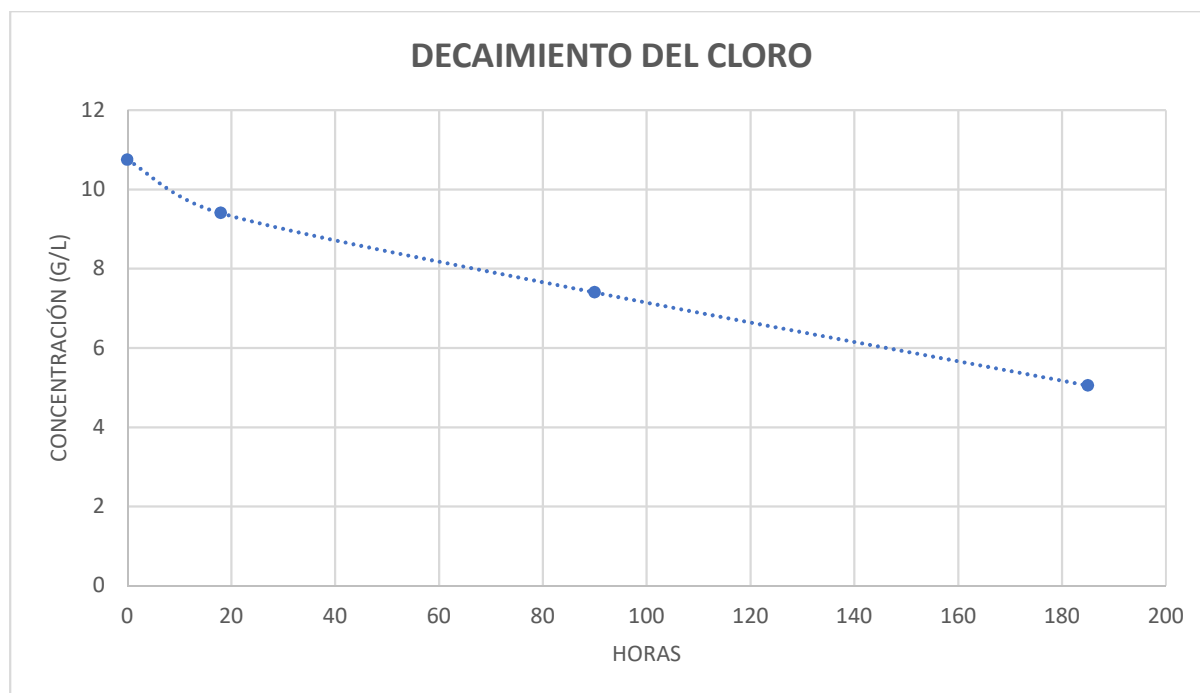


Figura 11: Disminución de la concentración de cloro en solución con el tiempo.

Para el caso en el cual el clorizador se encuentre alimentado por los paneles solares de forma directa, resulta más apropiado tomar como referencia la tasa de decaimiento que se tiene en la parte lineal de la curva. Esto se debe a que a medida que cae el sol, la corriente generada va decayendo de a poco y la solución no mantiene una temperatura tan alta al momento de comenzar la noche. El gradiente que se obtiene para dicha parte de la curva es una disminución de 0,3 g/l por noche de almacenamiento sin actividad del clorizador (14 horas aproximadamente). Sin embargo, una vez determinado el sistema fotovoltaico a instalar, se hará un mejor estudio de la relación generación-decaimiento. Por el momento, solo se quiere mostrar que el almacenamiento del hipoclorito de sodio en condiciones inadecuadas favorece el rápido deterioro con la consecuente pérdida de su efectividad en el proceso de desinfección, y que la tasa de decaimiento del cloro es altamente dependiente del clorizador utilizado, sus características, y sus condiciones de operación.

3 Energía solar

Actualmente la búsqueda de nuevas formas para generar energía de manera renovable ha cobrado gran importancia en todo el mundo. El aprovechamiento de la energía solar juega un papel muy importante en la producción de electricidad, la cual puede ser procesada con el uso de convertidores de energía eléctrica y empleada en un sin número de aplicaciones, tanto de corriente directa como de corriente alterna.

La radiación solar puede aprovecharse para producir calor o electricidad. Esta última se genera en los llamados módulos fotovoltaicos, donde la transformación de energía lumínica en energía eléctrica se lleva a cabo en unos dispositivos electrónicos llamados células o celdas fotovoltaicas. Estas últimas están compuestas de un material semiconductor, el cual se ve directamente alterado con la radiación solar: presenta el efecto fotoeléctrico. De esta forma:

1. Un fotón ingresa a la célula.
2. El fotón es absorbido dentro del semiconductor.
3. Un electrón (-) y un hueco (+) son creados a partir de la energía contenida en el fotón.
4. El campo eléctrico interno, creado por la estructura de la parte semiconductor de la celda, separa al electrón del hueco. El electrón se mueve hacia un contacto superior y el hueco se dirige a una capa de metal.
5. Electrones y huecos producen una corriente eléctrica.

La *Figura 12* pone en perspectiva el potencial de las diversas fuentes de energía renovables y nuclear frente a las fuentes fósiles, emisoras de gases de efecto invernadero. Es posible observar que el recurso solar supera a todo el resto por órdenes de magnitud [5].

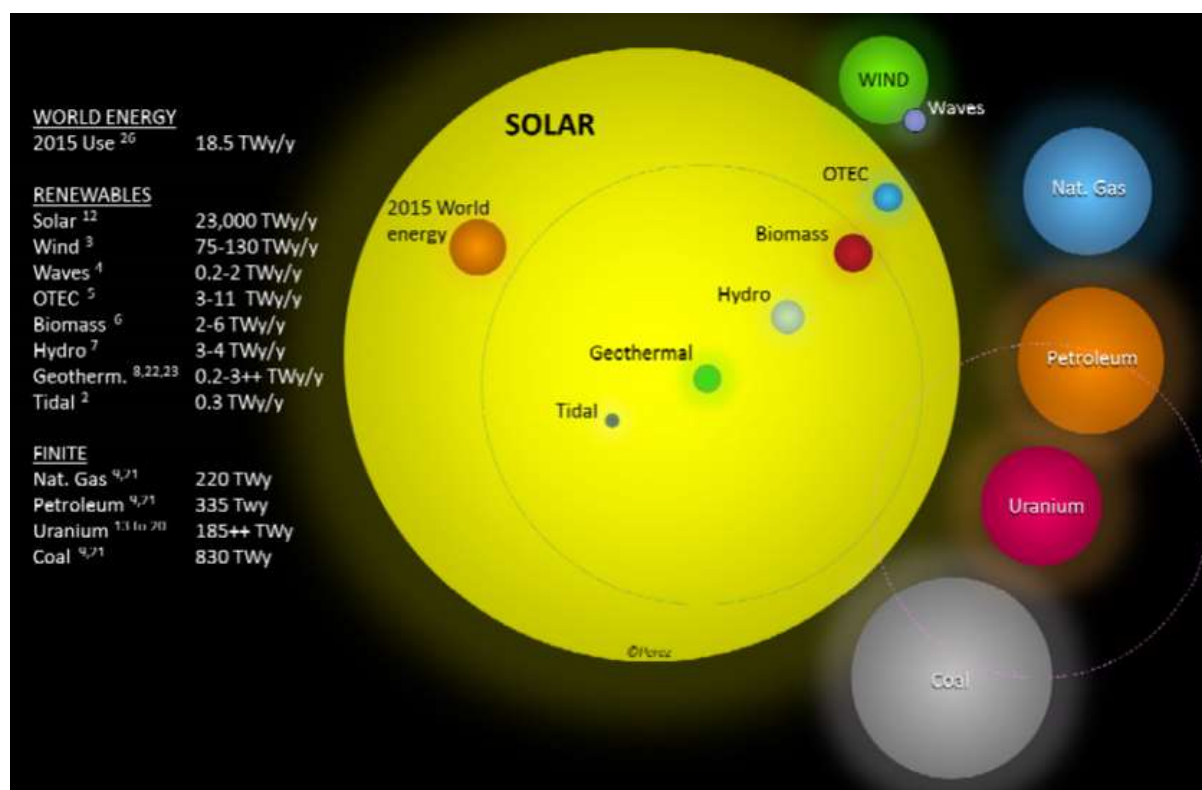


Figura 12: Estimación de las reservas de energía renovables y finitas en el planeta en 2015 (Terawatt-años). Para los recursos finitos se muestra el total recuperable de las reservas y para los renovables se muestra el potencial anual.

La energía solar fotovoltaica puede aprovecharse en zonas aisladas de la red eléctrica y no produce contaminación durante su generación. Dentro de las ventajas respecto de otras alternativas, los módulos fotovoltaicos actuales requieren de poco mantenimiento y tienen una durabilidad de 25 años aproximadamente. Asimismo, no producen contaminación sonora. Por último, el precio por kW generado de los paneles solares ha decrecido significativamente a lo largo de los últimos años, siendo en agosto de 2016 0,477 USD por kW (Figura 13)².

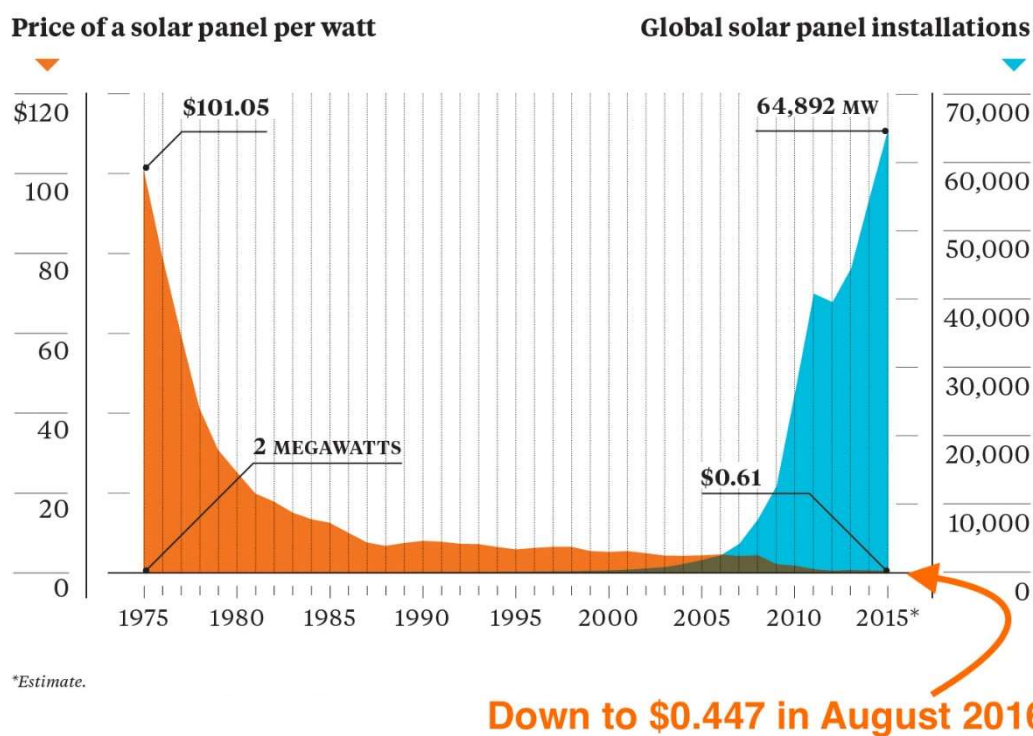


Figura 13: Precios y número de instalaciones de paneles solares a través de los años.

3.1 Radiación solar

Al entrar en la atmósfera, parte de la radiación solar es reflejada, absorbida y dispersada (Figura 14). Aproximadamente una irradiancia de 1.350 W/m² llega al exterior de la atmósfera terrestre desde el sol, considerando que esta última tiene un espesor de 8000 km. En promedio, alrededor del 20% la irradiancia solar es reflejada por las nubes, 6% por las moléculas en la atmósfera, y 4% por la superficie terrestre. En total, un 30% se pierde por reflexión. Otro 19% de irradiancia solar se pierde por absorción de las nubes, partículas y moléculas en la atmósfera. Solo un 51% de la

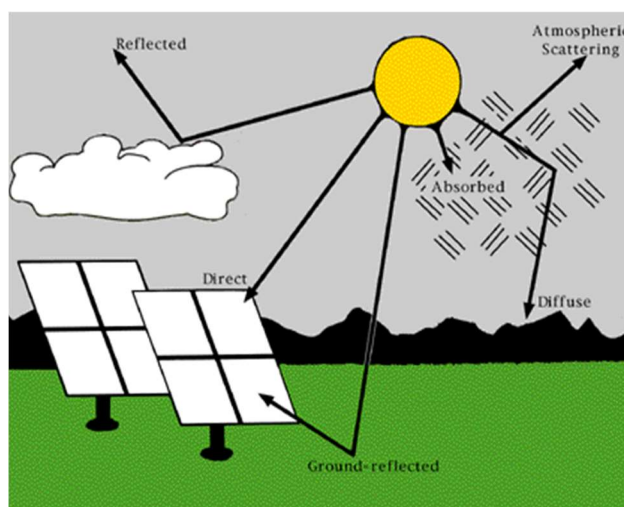


Figura 14: Radiación solar al entrar a la atmósfera.

² Información obtenida del *Earth Policy Institute*. Fuente online: www.earth-policy.org

irradiación es absorbido en la superficie terrestre.

La longitud del camino que haga la luz a través de la atmósfera determina la cantidad de pérdidas por dispersión y absorción. Por lo tanto, las pérdidas serán más grandes a mayores latitudes, ya que el sol tiene un camino más largo a través de la atmósfera hasta la superficie terrestre. La longitud del camino que hace la luz está definida por la masa de aire, la cual se calcula según:

$$MA = \sec \varnothing \quad \text{Masa de aire}$$

donde \varnothing es la latitud en grados. Una masa de aire igual a 1 corresponde al camino de menor longitud posible, la longitud del camino en el ecuador. Una masa de aire de 1,5 significa que la longitud del camino de absorción es 1,5 veces mayor a la correspondiente en el ecuador. Este valor es la longitud promedio del camino que hace la luz a través de la atmósfera a una latitud de $48,2^\circ$ al mediodía, ignorando las estaciones [6].

La radiación solar total que llega a una superficie horizontal sobre la tierra se caracteriza por la irradiancia global horizontal (GHI por su nombre en inglés), y es la suma de la irradiancia normal directa (DNI), la irradiancia horizontal difusa (DHI), y la radiación reflejada por el suelo. La DNI llega como una línea recta directa desde el sol, y la DHI es aquella cuya dirección ha sido modificada por diversas circunstancias (densidad atmosférica, partículas u objetos con los que choca, reemisiones de cuerpos, etc.). Por sus características, se la considera proveniente de todas direcciones. Como la radiación reflejada por el suelo es despreciable frente a las otras magnitudes, para mayor practicidad se considera a la irradiancia global como la suma de la irradiancia directa y difusa (*Figura 15*):

$$GHI = DHI + DNI * \cos(Z) \quad [W/m^2] \quad \text{Irradiancia global horizontal}$$

En la relación anterior Z representa el ángulo de cénit, el ángulo entre la vertical y el sol. El azimut es el ángulo que forman la dirección de referencia (sur) y la proyección vertical del sol sobre el horizonte del observador (*Figura 16*). Se define entonces la GHI como la energía total radiante del sol por unidad de tiempo, atenuada por todos los constituyentes de la atmósfera, que llega a una superficie horizontal sobre la tierra.

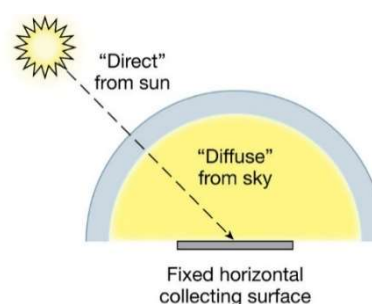


Figura 15: Componentes de la irradiancia global horizontal.

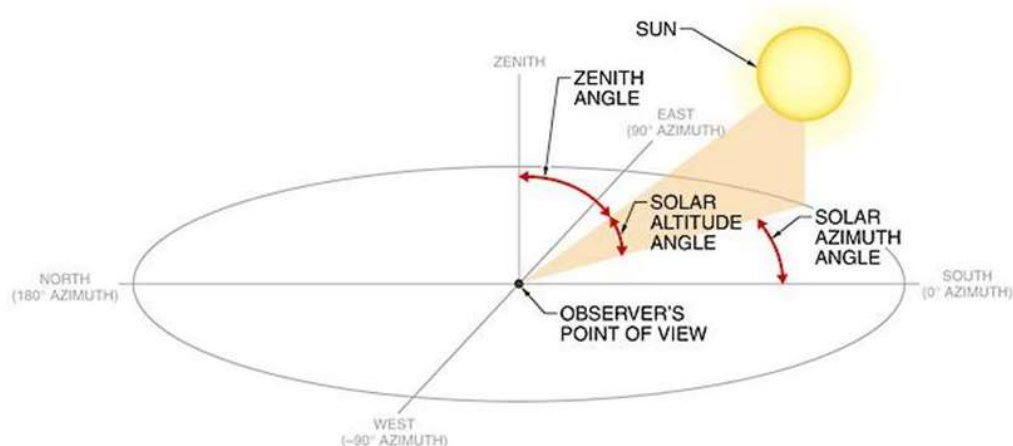


Figura 16: Ubicación del sol en el cielo.

Los paneles solares se deben orientar convenientemente dependiendo del lugar donde se los pretenda instalar. La orientación de un módulo fotovoltaico se define mediante coordenadas angulares, similares a las utilizadas para definir la posición del sol:

- Ángulo de azimut (α): ángulo que forma la proyección sobre el plano horizontal de la perpendicular a la superficie del generador y la dirección sur.
- Ángulo de inclinación o 'tilt' (β): ángulo que forma la superficie del panel con el plano horizontal.

Una superficie recibe la mayor cantidad posible de energía si es perpendicular a la dirección del sol. Es decir, para todo instante, los módulos entregan el máximo de potencia posible cuando se los orienta mirando directamente al sol. Como la posición del sol varía a lo largo del día (y de los días), la posición óptima de la superficie también es variable. Aunque hay módulos fotovoltaicos capaces de seguir la trayectoria solar, lo habitual es que la orientación de estos sea fija ya que los sistemas de tracking solar biaxiales encarecen la instalación y la hacen más compleja. La orientación óptima es entonces un valor constante, con una inclinación (β) que depende de la latitud ϕ del lugar y un azimut (α) que depende del hemisferio en el que está situado el módulo [7] (Figura 17).

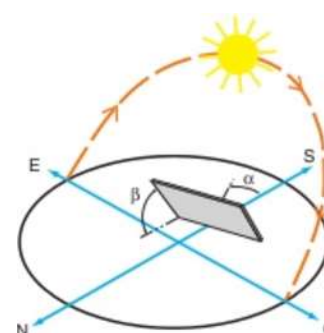


Figura 17: Orientación de una superficie en el hemisferio norte ($\alpha = 0$).

De estar en el hemisferio norte, los paneles deben orientarse mirando al sur, y viceversa, de manera tal de recibir radiación solar a lo largo de todo el día, mientras el sol hace su recorrido de este a oeste. Para determinar la inclinación óptima de una superficie fija se usa una fórmula basada en análisis estadísticos de radiación solar anual sobre superficies con diferentes inclinaciones situadas en lugares de diferentes latitudes, que proporciona la inclinación óptima en función de la latitud del lugar:

$$\beta_{\text{opt}} = 3,7 + 0,69 * \phi \quad \text{Ángulo de inclinación óptima}$$

Claramente, cuanto más alejado se esté del ecuador, mayor será la inclinación óptima. De la práctica se ha visto que con los ángulos óptimos se alcanza entre un 70% y 80% de la producción máxima de un panel.

3.2 Curvas de paneles fotovoltaicos

Como se explicó, un panel solar es un conjunto de celdas solares interconectadas eléctricamente e integradas en un paquete resistente a las diversas condiciones climáticas. Los parámetros estándar que se utilizan para caracterizar cada panel son, entre otros:

- **Tipo de célula fotovoltaica:** monocristalina, policristalina, o de capa fina.
- **Cantidad de células y tipo de conexión entre ellas**
- **Voltaje de circuito abierto (V_{OC}):** voltaje en las terminales del panel cuando no se aplica carga. Es decir, cuando el circuito está abierto y no abastece de corriente a ningún dispositivo.
- **Voltaje de potencia máxima (V_{MP}):** voltaje en las terminales del panel cuando se está extrayendo la máxima potencia nominal.
- **Corriente de cortocircuito (I_{SC}):** máximo valor de corriente que puede entregar el panel.
- **Corriente de potencia máxima (I_{MP}):** valor de corriente que fluye por las terminales del panel cuando se está extrayendo la máxima potencia nominal.
- **Potencia nominal (P_M):** valor máximo de potencia nominal, medido bajo condiciones estándar.
- **Eficiencia del módulo:** determina el porcentaje de irradiación solar convertida en energía eléctrica.

Las curvas características muestran la performance eléctrica del panel solar. Las mismas permiten determinar dónde se encuentra el punto de máxima potencia (MPP) para cada panel. Para todas las curvas de corriente-tensión se observa que, a mayor valor de voltaje, la corriente se mantiene aproximadamente constante hasta que se aproxima a la V_{OC} , para la cual cae a cero. El codo de la curva se corresponde con el MPP, y para dicho punto se leen los valores de I_{MP} y V_{MP} . Para la correspondiente curva de potencia, este punto será el máximo de la función (*Figura 18.b*).

Las curvas de corriente-tensión y por lo tanto de potencia-tensión dependen de la irradiación solar así como de la temperatura (*Figura 18*). Para un valor fijo de temperatura, las curvas se desplazan hacia abajo a medida que desciende la irradiancia, lo cual era de esperarse ya que, a menor irradiancia absorbida por un panel, menor es la potencia generada. Dicho esto, a menor irradiancia, menor será el valor de las corrientes I_{SC} e I_{MP} , pero los valores de voltaje V_{MP} y V_{OC} se mantienen más o menos constantes. Por lo contrario, incrementos en la temperatura generan un aumento muy pequeño en el valor de corriente, pero una gran reducción en el voltaje. Es decir, la curva de corriente-tensión para una irradiancia dada se desplazará hacia la izquierda a medida que aumente la temperatura de las celdas, y se observan los siguientes efectos:

- V_{OC} disminuye al aumentar la temperatura
- I_{SC} aumenta al aumentar la temperatura
- La potencia del módulo disminuye al aumentar la temperatura

La temperatura de trabajo de una celda depende de la temperatura ambiente (T_A [$^{\circ}C$]) y de la irradiancia (I [W/m^2]). Se calcula aproximadamente con la fórmula:

$$T_C = T_A + I * \frac{TONC - 20^{\circ}C}{800 \frac{W}{m^2}} \quad \text{Temperatura de trabajo de una celda (}^{\circ}C\text{)}$$

El valor de la temperatura nominal de la célula ($TONC$ [$^{\circ}C$]) es un parámetro que se obtiene de las hojas características de los módulos fotovoltaicos y representa la temperatura que alcanza la celda bajo una irradiancia de 800 W/m^2 con una velocidad de viento nominal de 1 m/s y una temperatura ambiente de $20^{\circ}C$.

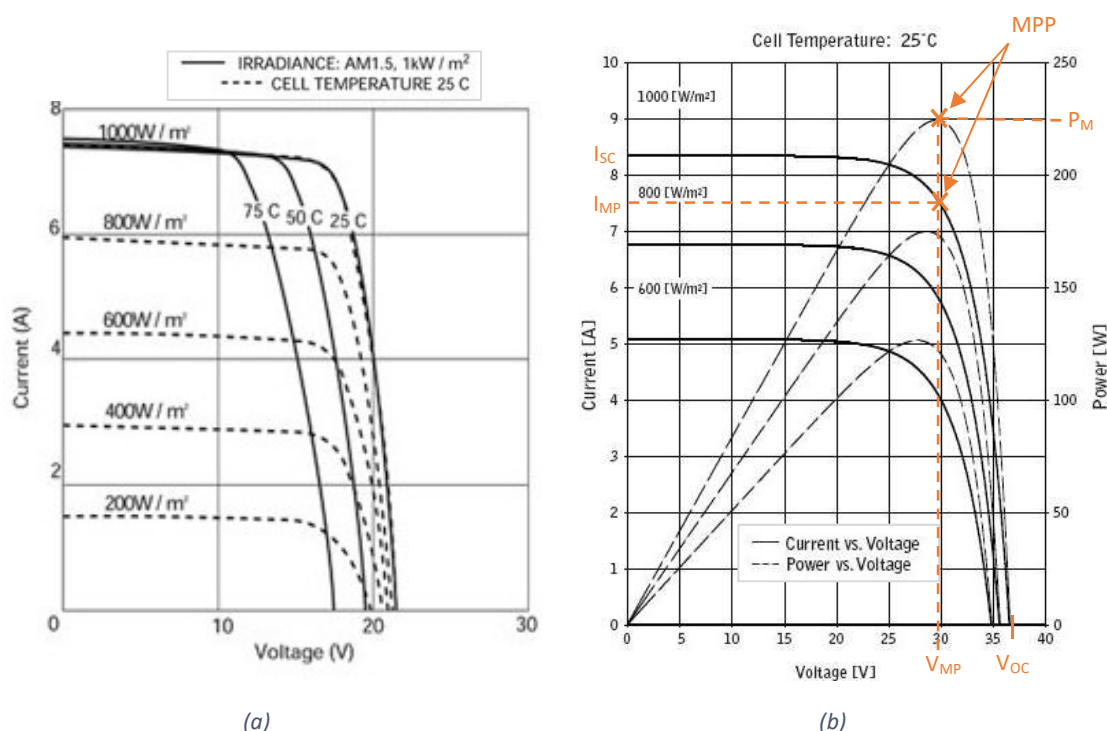


Figura 18: Ejemplos de curvas características de paneles solares.

Resumiendo, a menor irradiancia y a mayor temperatura, el área bajo las curvas de corriente-tensión disminuye, disminuyendo entonces los valores de potencia generada y la eficiencia del panel. Por lo tanto, las mejores condiciones ambientales para la operación de un módulo fotovoltaico es un día de baja temperatura con mucho sol.

Las condiciones estándar (o de referencia) bajo las cuales se prueba un panel solar son una temperatura del módulo igual a $25^{\circ}C$, una irradiancia en el plano del módulo igual a 1000 W/m^2 , y una distribución espectral de la irradiancia correspondiente a un valor de MA igual a $1,5$.

En cada instante, el módulo fotovoltaico opera a un determinado valor de corriente y tensión. El punto de trabajo en la característica I-V del módulo lo fijan la resistencia R de la carga conectada y la corriente I_m aportada por el módulo que depende de la radiación solar. La tensión V_m proporcionada por el módulo se obtiene aplicando la ley de Ohm:

$$V_m = I_m * R \quad \text{Ley de Ohm}$$

Asimismo, un punto de trabajo en la curva I-V se corresponde con un único punto de trabajo en la curva P-V. Este punto determina la potencia entregada al resto del sistema fotovoltaico y eventualmente la carga:

$$P = I_m * V_m \quad \text{Potencia entregada}$$

Por lo tanto, resulta ventajoso que el módulo opere en el MPP. De lo contrario, parte de la potencia generada se perderá en forma de calor en los paneles solares.

En la *Figura 19* se muestran características I-V de cargas típicas presentes en un sistema fotovoltaico, y los puntos de operación para diversos niveles de irradiancia. Se observa que la curva correspondiente a una carga ideal siempre interseca el codo de las curvas características I-V de los paneles solares, y por lo tanto el punto de operación del sistema siempre se encuentra en el MPP.

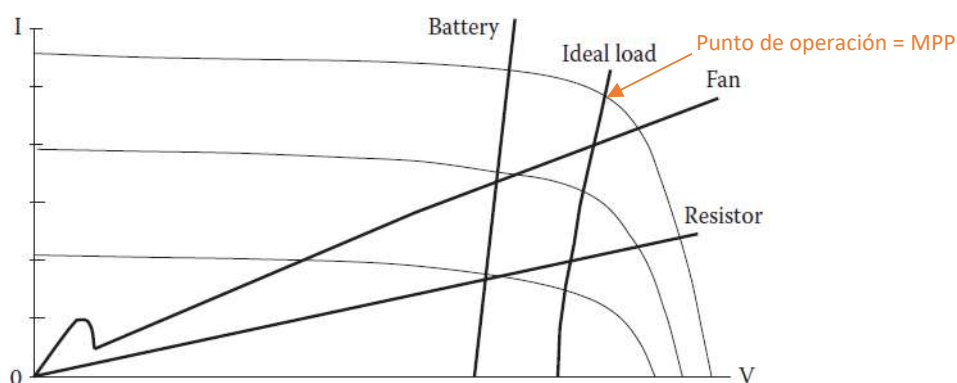


Figura 19: Curvas características para distintas cargas y diferentes niveles de irradiancia.

De la misma manera, superponiendo la curva característica promedio del clorizador (*sección 2.5*) con la curva característica I-V de un módulo fotovoltaico determinado, es posible encontrar el punto de operación al cual trabajará el sistema. Cuanto más cerca se encuentre este punto al MPP, mayor será la potencia generada por el panel y menor será el área de panel necesaria. Esto se verá más adelante en la *sección 4*.

La eficiencia de un panel solar o el rendimiento de conversión ($\eta_{nominal}$) indica el porcentaje de energía solar recibida sobre la superficie del panel que se convierte en energía eléctrica. Se calcula con el cociente entre la potencia eléctrica máxima (P_M) y el producto del área superficial del panel (A_p) por la irradiancia incidente en condiciones estándar de medida (1000 W/m^2):

$$\eta_{nominal} = \frac{P_M}{A_p * 1000 \frac{W}{m^2}} \quad \text{Eficiencia nominal de un panel solar}$$

3.3 Análisis de radiación solar según ubicación

Previo a determinar la cantidad o superficie de paneles necesaria para completar el proceso de generación de cloro, debe estudiarse la radiación solar disponible en la ubicación donde se instalará el sistema. Asimismo, deberá especificarse el tiempo durante el cual se permite que se lleve a cabo el proceso.

Así siendo, se estudia la radiación solar para tres lugares diferentes, entre ellos la ciudad de Buenos Aires, Argentina, donde se hacen los ensayos finales de la instalación. Las otras dos ubicaciones elegidas son Nagpur, India, y Madoi Huangheyang, en China. Estos últimos son lugares potencialmente aptos para el uso del clorizador solar, dada la escasez de agua potable y el gran porcentaje de asentamientos rurales. Mediante el uso del software SYSTEM ADVISOR MODEL (SAM) es posible analizar la irradiancia para cada locación y encontrar las características de funcionamiento de una gran variedad de paneles solares en el mercado. Luego, es posible llevar a cabo una simulación, obteniendo resultados del comportamiento de los módulos fotovoltaicos correspondientes en la ubicación determinada.

Para realizar el primer análisis, se consideran paneles convencionales policristalinos de 8 V (*Figura 20*) conectados en paralelo. Con estos, se mantiene un voltaje de trabajo cercano a los 7 V y, mediante la conexión en paralelo, es posible ubicar el codo de la curva de los paneles sobre la curva característica del clorizador.

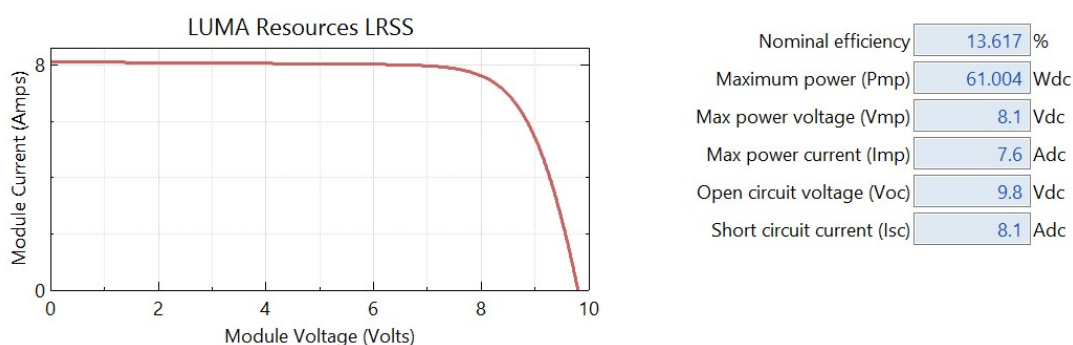


Figura 20: Características del panel de 8 V en condiciones de referencia.

Para las tres locaciones, entonces, se estudia la radiación durante los días de invierno y de verano, de forma tal de determinar un promedio de las Ah generadas por día, por panel, durante cada época.

3.3.a) Buenos Aires, Argentina

En la *Figura 21* se observa la variación de irradiancia a lo largo del año para la ciudad de Buenos Aires (-34,82 °N, -58,53 °E). Estando en el hemisferio sur, los paneles se orientan al norte (azimut de 180°) y con una inclinación de 30°. La condición límite bajo la cual operan los paneles es durante los meses de mayo a julio. Se consideran entonces tres días típicos de invierno, y a partir de la curva de la corriente de salida en función del tiempo (*Figura 22*), se calcula un promedio de las Ah generadas por panel en un día invernal.

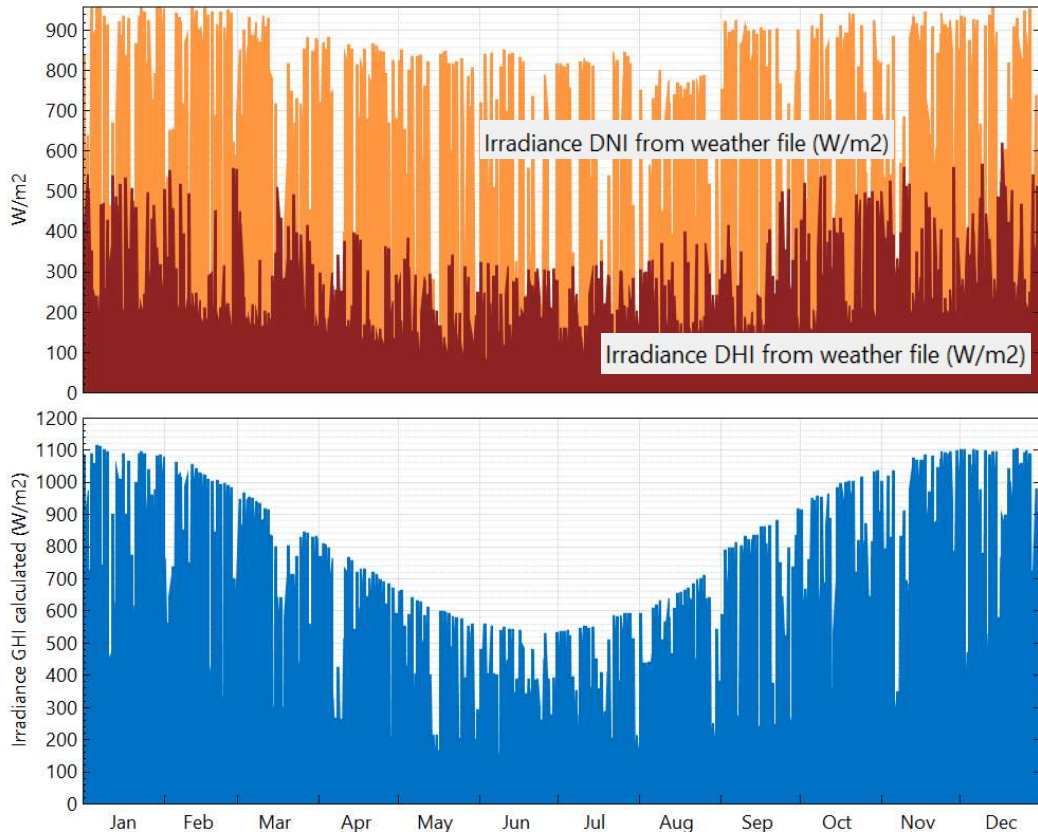


Figura 21: Variación de la irradiancia a lo largo del año en Buenos Aires, Argentina.

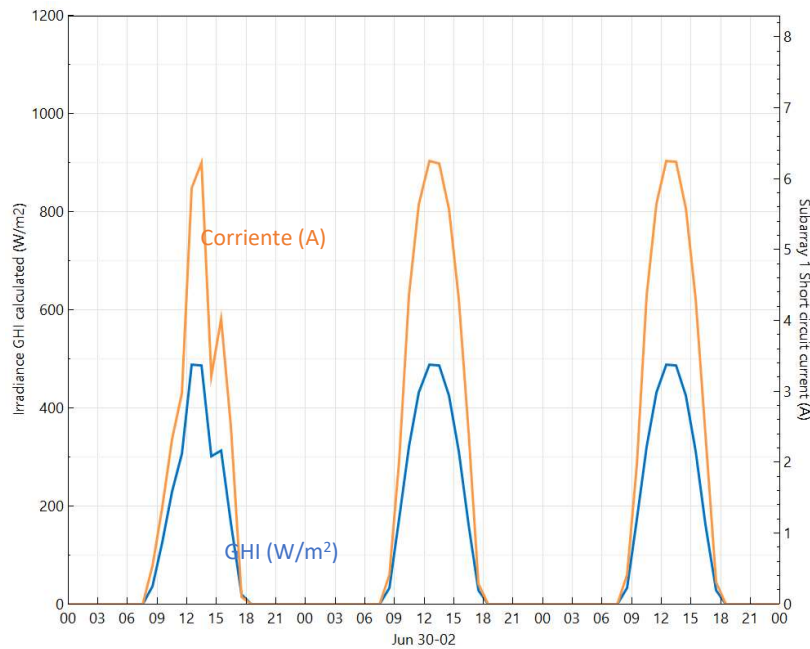


Figura 22: Variación de la irradiancia y la corriente generada para tres días en invierno en Buenos Aires, Argentina.

Integrando de forma gráfica el área bajo las curvas de la *Figura 22*, y haciendo un promedio, se llega a que se generan 36,4 Ah por día, por panel. De la misma forma, se calcula el promedio de las Ah

generadas por panel en un día de verano, siendo la situación de mayor irradiancia recibida y corriente generada. Para este caso, se calcula que se llegan a generar 60,9 Ah por panel, en un día típico de verano.

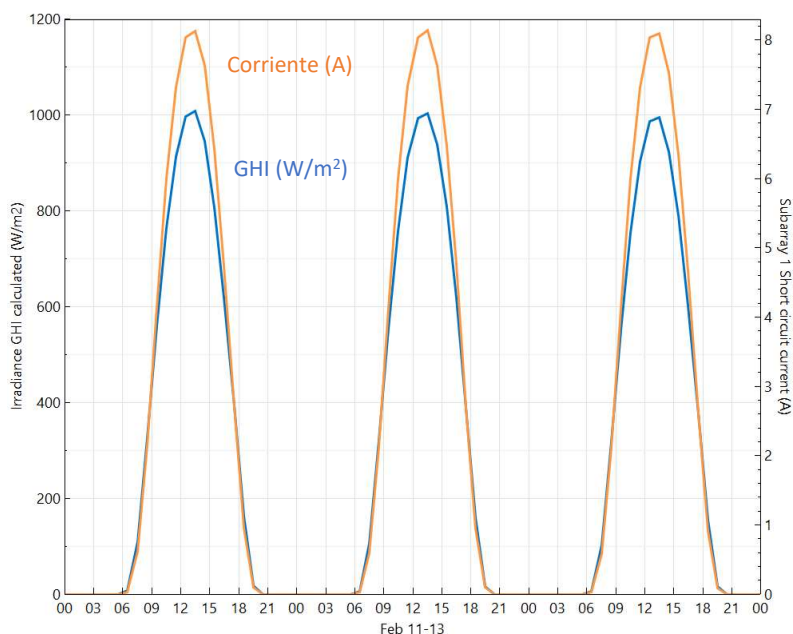


Figura 23: Variación de la irradiancia y la corriente generada para tres días en verano en Buenos Aires, Argentina.

Si el ángulo de inclinación se varía a lo largo del año, mes a mes (en lugar de mantenerse fijo en 30°), la energía generada aumenta, especialmente durante los meses de invierno. En la Figura 24 se muestra dicho ángulo de inclinación óptimo para cada mes en la ciudad de Buenos Aires.

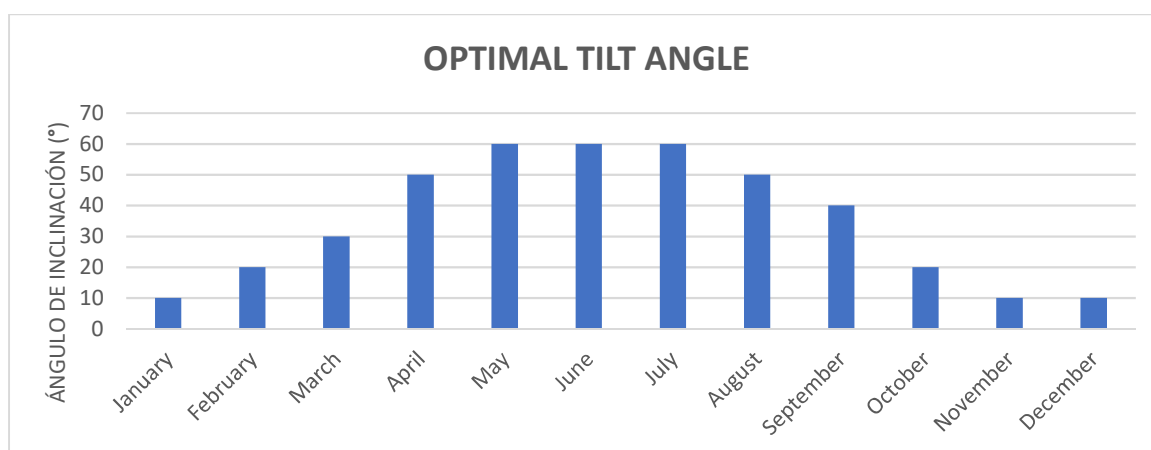


Figura 24: Ángulo de inclinación óptimo para cada mes.

3.3.b) Nagpur, India

La ciudad de Nagpur (21,1 °N, 79,05 °E) se encuentra en el hemisferio norte y por tanto los paneles deben orientarse hacia el sur (azimut de 0°), con un ángulo de inclinación de 20°. En la *Figura 25* se observa la variación de irradiancia a lo largo del año, siendo junio, julio y agosto los meses donde se presentan las peores condiciones de trabajo para los paneles. Se toman 3 días de dicho período (*Figura 26*) y se calculan las Ah generadas por día, por panel, en promedio.

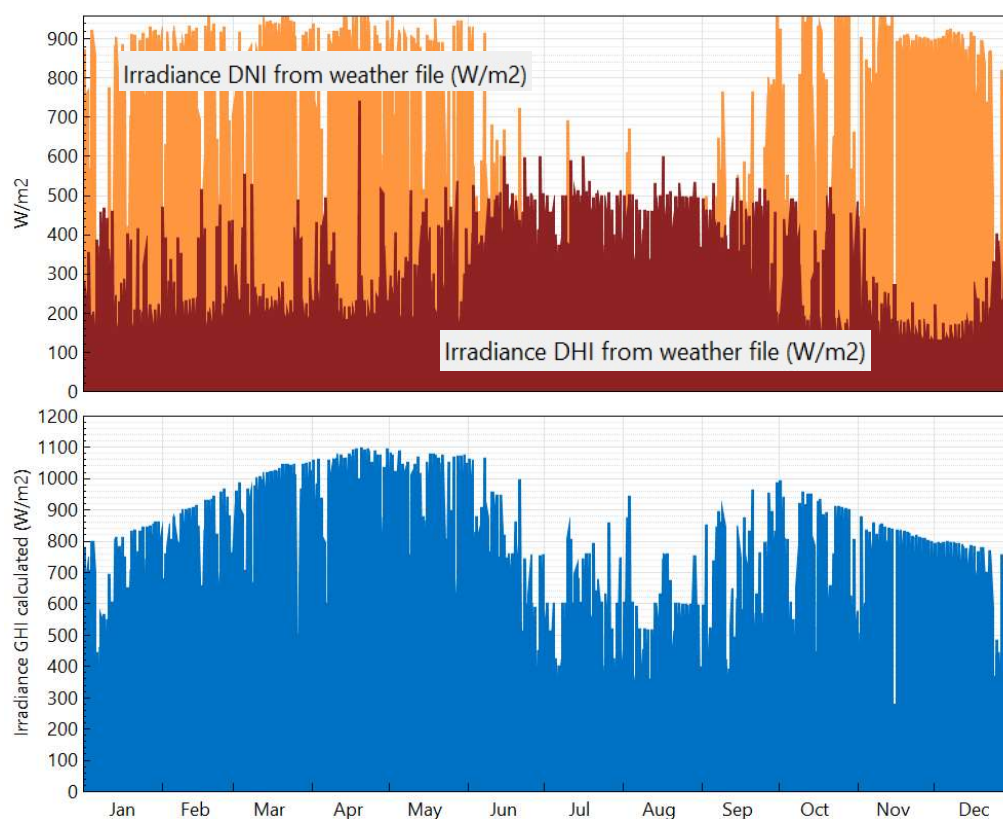


Figura 25: Variación de la irradiancia a lo largo del año en Nagpur, India.

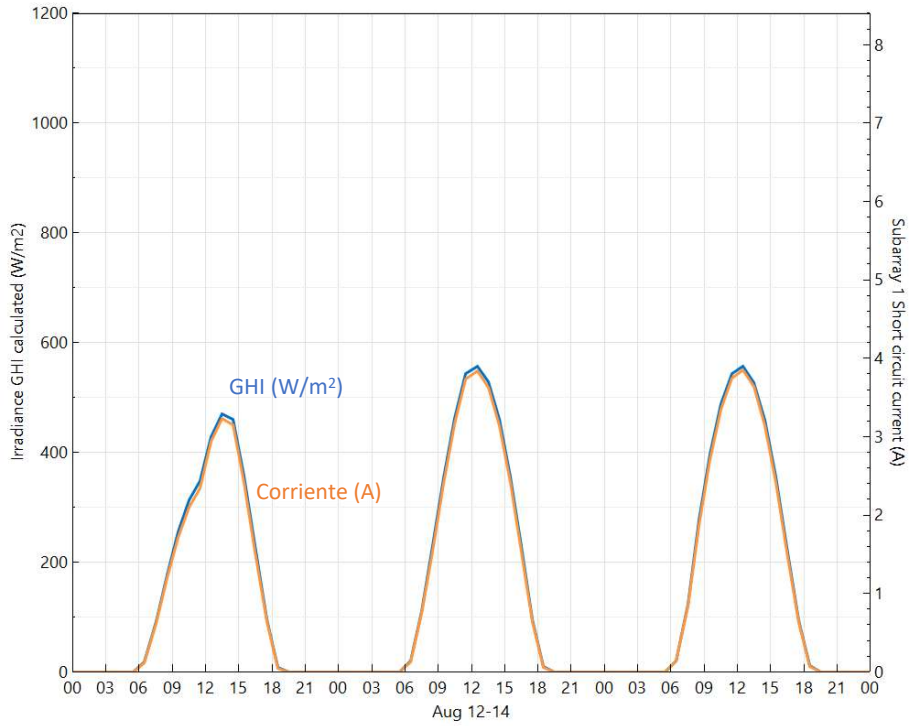


Figura 26: Variación de la irradiancia y la corriente generada para tres días en invierno en Nagpur, India.

Integrando gráficamente se obtiene un promedio de 27,3 Ah a generarse por panel por día en invierno. Se analiza asimismo para los meses de verano, donde la irradiancia alcanza los valores más altos. Seleccionando dos días del mes de abril (Figura 27), se obtiene que por día pueden generarse en promedio 56,1 Ah por panel.

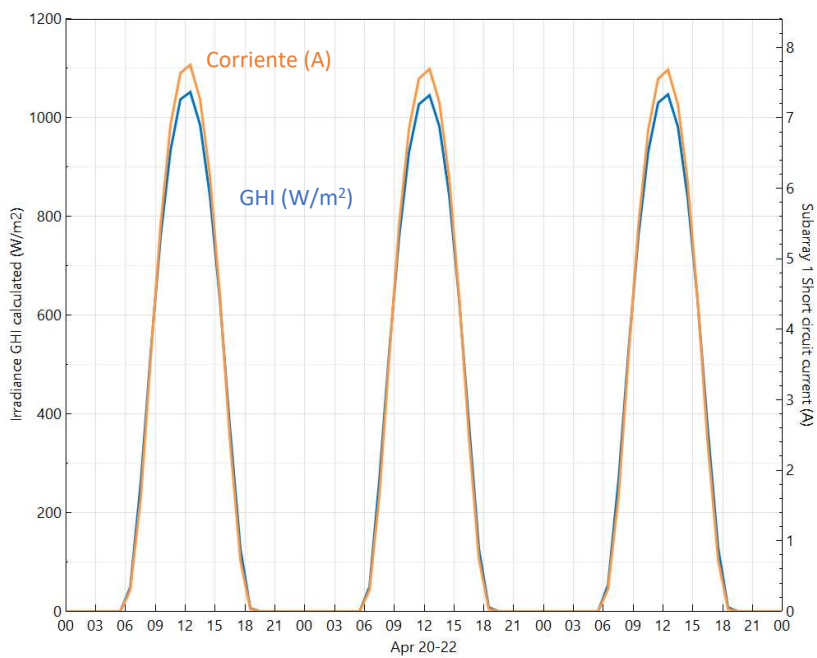


Figura 27: Variación de la irradiancia y la corriente generada para tres días en verano en Nagpur, India.

3.3.c) Madoi Huangheyuan, China

Se analiza de la misma manera para la ciudad de Madoi Huangheyuan en China (34,92 °N, 98,22 °E), para la cual los paneles se orientan al sur al realizar la simulación (azimut de 0°) y con una inclinación fija de 30°. La irradiancia medida a lo largo del año se muestra en la *Figura 28*. Integrando el área bajo las curvas de corriente-tiempo durante tres días de invierno (*Figura 29*) y tres de verano (*Figura 30*), se demuestra que es posible obtener aproximadamente 40,2 Ah y 59,8 Ah por panel, por día, respectivamente.

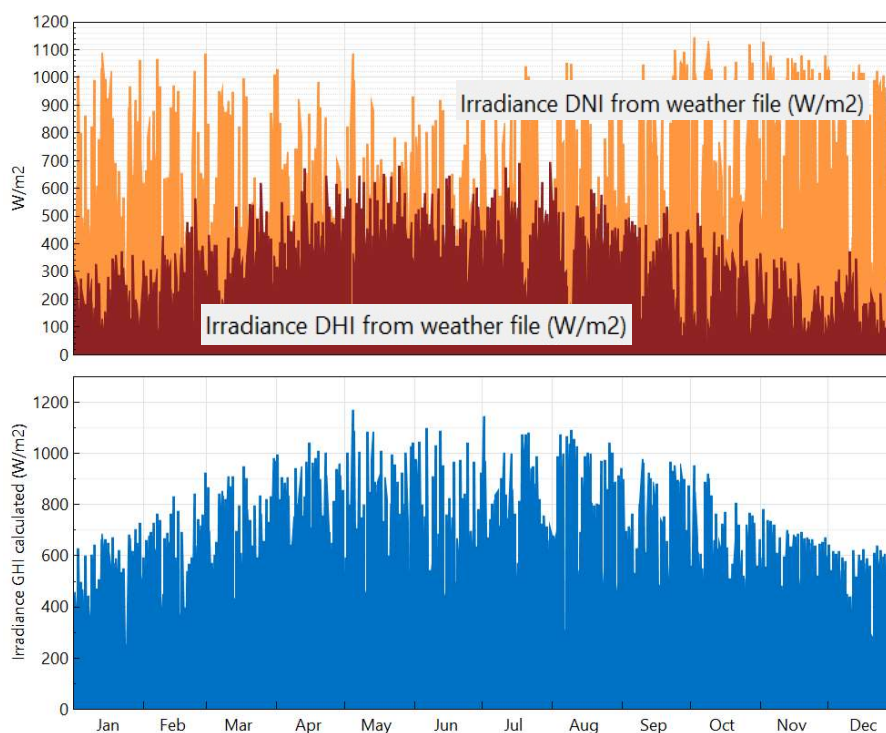


Figura 28: Variación de la irradiancia a lo largo del año en Madoi Huangheyuan, China.

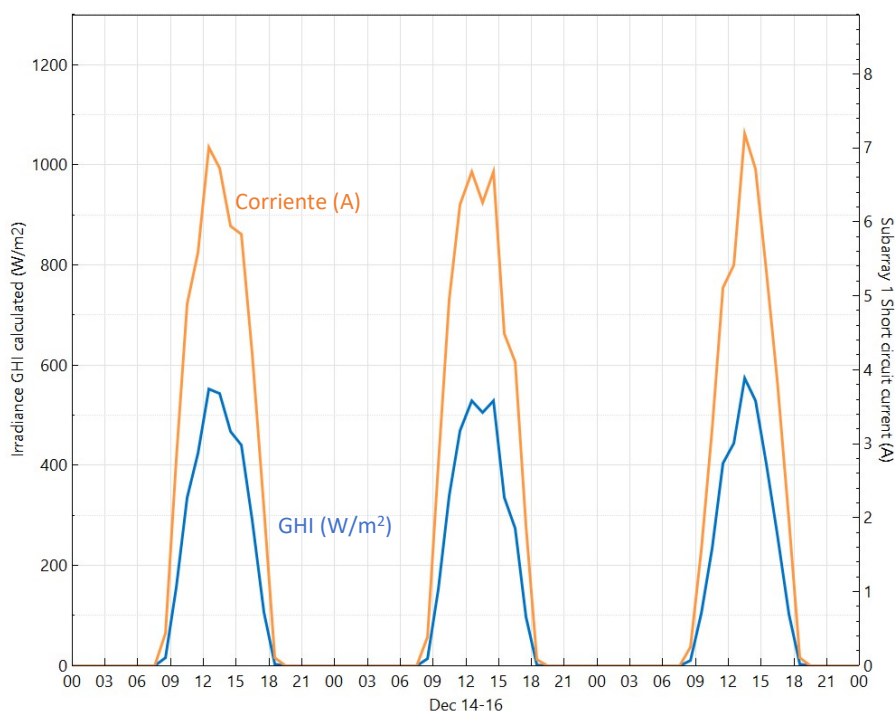


Figura 29: Variación de la irradiancia y la corriente generada para tres días en invierno en Madoi Huangheyan, China.

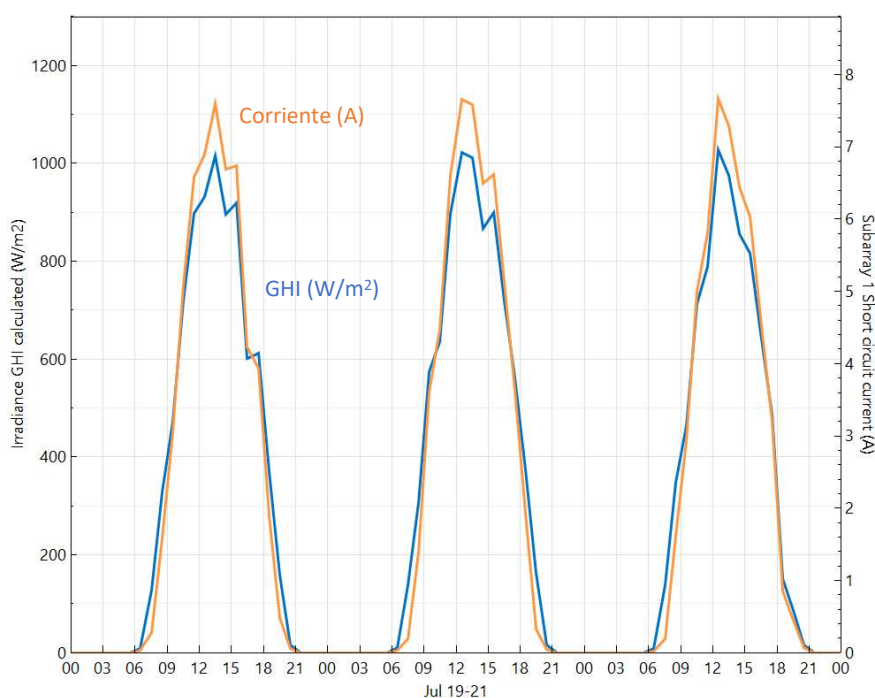


Figura 30: Variación de la irradiancia y la corriente generada para tres días en verano en Madoi Huangheyan, China.

3.3.d) Resumen de resultados

En la *Tabla 1* se resumen los resultados obtenidos para las tres ubicaciones. Para calcular la carga necesaria no se tuvo en cuenta el decaimiento del cloro durante las horas improductivas de la noche, lo cual se va a estudiar más adelante en este trabajo.

Ah generadas por día, por panel de 8V		
Ubicación	Invierno (días de menor irradiancia)	Verano (días de mayor irradiancia)
Buenos Aires	36,4	60,9
Nagpur	27,3	56,1
Madoi Huangheyán	40,2	59,8

Tabla 1: Resumen de resultados obtenidos según ubicación.

3.4 Determinación de la potencia a instalar en Buenos Aires

La cantidad de paneles a instalar en el caso que el clorizador se ubique en Buenos Aires, dependerá de la cantidad de días a lo largo de los cuales se permita que se desarrolle el proceso. Considerando las Ah generadas por panel, por día en invierno, y sabiendo que en total son necesarias 456 Ah para llevar a cabo el proceso de generación de cloro, es posible calcular la cantidad de paneles necesarios según la cantidad de días:

$$\text{Paneles necesarios} = \frac{\text{Ah totales necesarias}}{\frac{\text{Ah generadas}}{\text{día} * \text{panel}} * \text{Cantidad de días de proceso}}$$

Por lo tanto,

$$\text{Paneles necesarios} = \frac{456 \text{ Ah}}{\frac{36,4 \text{ Ah}}{\text{día} * \text{panel}} * \text{Cantidad de días de proceso}}$$

En la siguiente tabla (Tabla 2) se muestra la cantidad de paneles de 8 V a instalar según la cantidad de días de proceso. Como se ve, a partir de los 13 días en adelante, es necesario un único panel. Asimismo, en la Figura 31, es posible apreciar que cuanto menos se desea que dure la producción de cloro, mayor es la relación entre paneles a instalar por cada día menos de proceso.

Días	Carga generada por panel (Ah/panel)	Paneles necesarios	Área total (m ²)	Potencia (W)
1	36,4	13	5,82	793
2	72,8	7	3,13	427
3	109,2	5	2,24	305
4	145,6	4	1,79	244
5	182	3	1,34	183
6	218,4	3	1,34	183
7	254,8	2	0,89	122
8	291,2	2	0,89	122
9	327,6	2	0,89	122
10	364	2	0,89	122
11	400,4	2	0,89	122
12	436,8	2	0,89	122
13	473,2	1	0,44	61

Tabla 2: Potencia a instalar según los días de proceso.

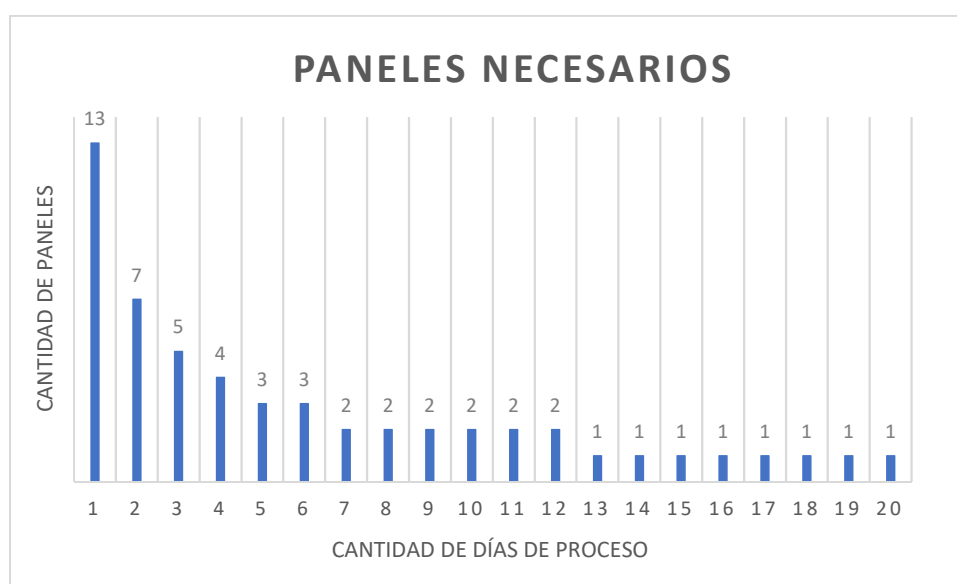


Figura 31: Cantidad de paneles en función de los días de proceso.

4 Sistema fotovoltaico

4.1 Opciones de conexión

Una vez estudiado cómo variar los parámetros de los módulos fotovoltaicos y la potencia a instalar para un correcto funcionamiento del clorizador según la ubicación, se analizan las distintas opciones de conexión posibles en un sistema fotovoltaico a instalarse en Buenos Aires. Como se dijo anteriormente, se busca lograr la mayor eficiencia del sistema, como así también el menor costo de la instalación. Este último es el factor decisivo a la hora de elegir la alternativa final, para la cual se ensaya y se verifican los resultados.

El sistema fotovoltaico bajo estudio es de tipo autónomo o independiente, dependiendo únicamente de la luz del sol. Como se dijo, la intención es que se instale en zonas rurales aisladas o marginadas que no cuenten con conexión a la red eléctrica.

Para todas las alternativas estudiadas, se incluye un medidor de Ah mediante el cual es posible registrar el progreso del proceso de electrólisis a medida que pasa el tiempo. El dispositivo funciona integrando la corriente que llega al clorizador sobre el tiempo, permitiendo deducir cuándo se alcanza la concentración de cloro buscada. Asimismo, el medidor controla el funcionamiento del clorizador, cortando el suministro de energía a este último una vez alcanzadas las Ah necesarias (fijadas por el usuario). Dadas las características del clorizador, sólo se analizan sistemas fotovoltaicos para alimentación de carga con corriente directa (CD).

De aquí en adelante, se considera que el proceso debe completarse al cabo de tres días. Como se demostró anteriormente, está es una decisión que depende del usuario. Sin embargo, se lo toma como condición a la hora de analizar las alternativas y de ensayar el prototipo dado que tres días de operación representan un buen equilibrio entre cantidad de paneles requeridos y presteza bajo demanda.

4.1.i. Conexión directa

La conexión directa entre los paneles y el clorizador implica que no se suma ningún otro componente a la instalación aparte de los ya mencionados. En la *Figura 32* se muestra un esquema sencillo (no se incluye el circuito de alimentación del medidor). La condición que debe cumplir el sistema conectado de esta forma es que las características de funcionamiento de los paneles sean compatibles con las características de la carga. Dicho de otra forma, el punto de operación debe estar cercano al MPP de los paneles de forma tal de no perder energía y obtener una buena eficiencia del sistema. La solución a esta condición es utilizar paneles cuyo MPP se encuentre cercano a los 7 V. Con los paneles considerados anteriormente en la *sección 3*, se alcanza una eficiencia en el aprovechamiento de energía del 86% respecto del MPP (*Figura 33*). De la *Tabla 2*, deben instalarse 5 paneles en paralelo, generando una potencia total de 305 W³.

³ Mediante la conexión en paralelo, en condiciones de referencia se genera una corriente máxima de 38 A a 8,1 V.

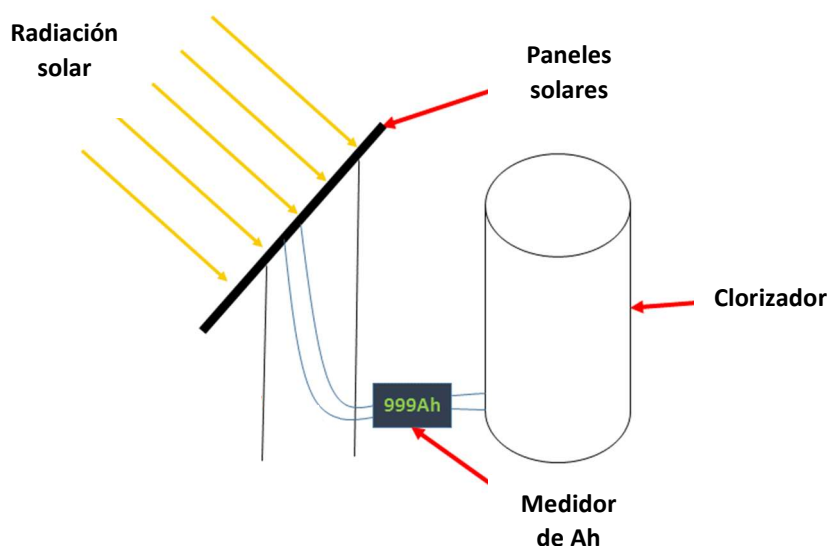


Figura 32: Esquema simplificado de la conexión directa entre los paneles y el clorizador.

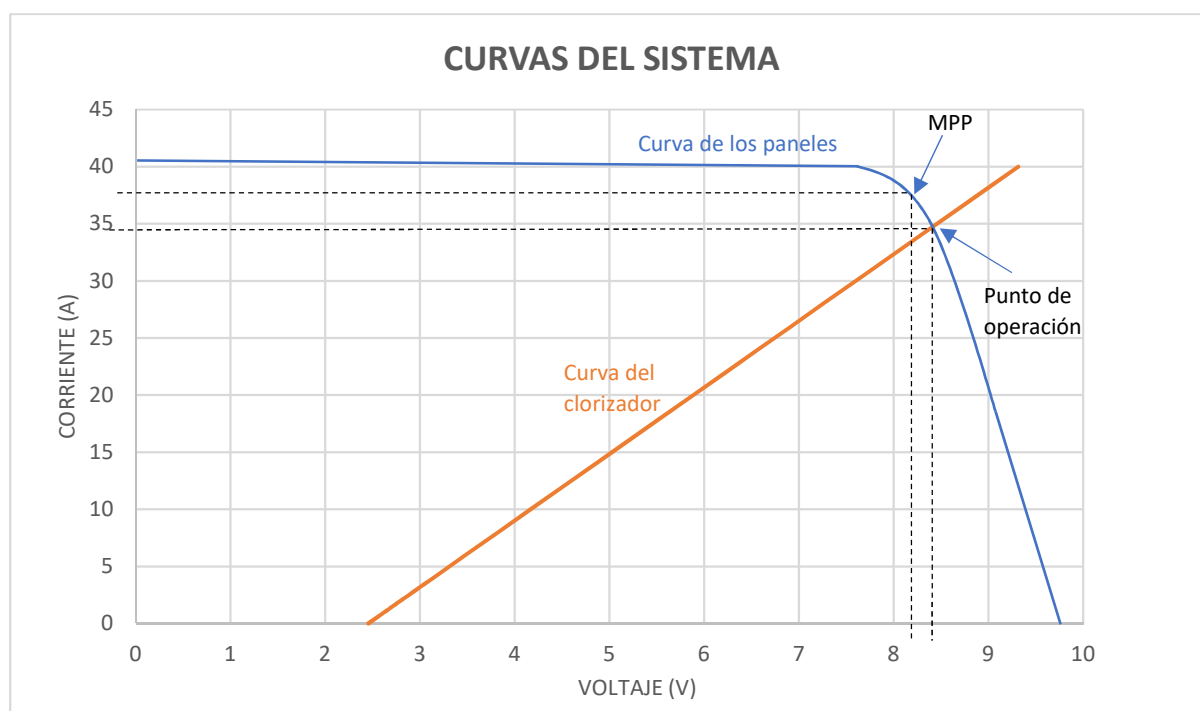


Figura 33: Curvas del sistema utilizando 5 paneles LUMA Resources LRSS de 8,1 V – 7,6 A en paralelo.

También se puede utilizar otro tipo de paneles, como ser de 12 V, de los cuales hay una gran oferta en el mercado, con altos valores de eficiencia y precios competitivos. Sin embargo, se presenta la desventaja de que el MPP se encuentra muy lejos del punto de operación, empeorando la eficiencia del sistema. Aproximadamente solo un 50% de la potencia máxima del panel es generada cuando el punto de operación está en 8 V. Consecuentemente, la potencia instalada debe ser mayor. Se simula dicho caso con unos paneles que presentan las características detalladas en la *Figura 34*, y se obtienen

las curvas del sistema (Figura 35). Utilizando la configuración en paralelo, habría que instalar 500 W (en lugar de 305 W) de potencia en Buenos Aires, equivalente a un área de 2,4 m², para asegurar que se complete el proceso durante los meses de invierno.

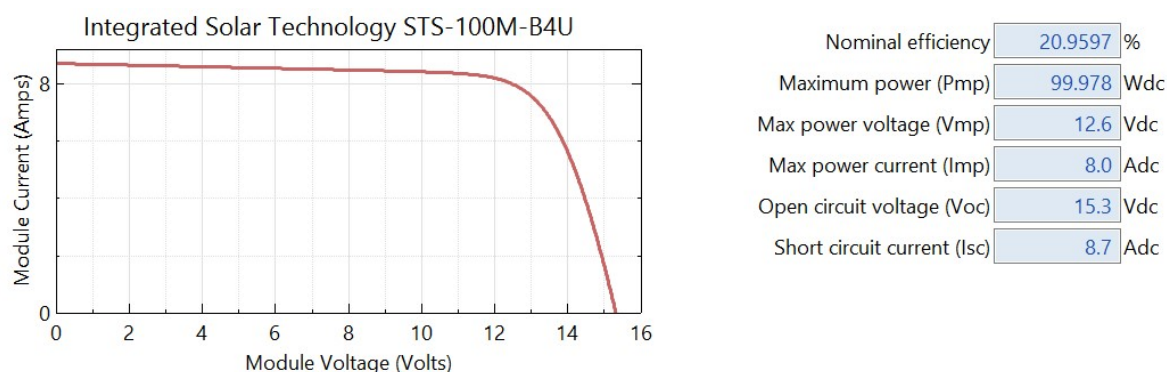


Figura 34: Características del panel de 12 V en condiciones de referencia.

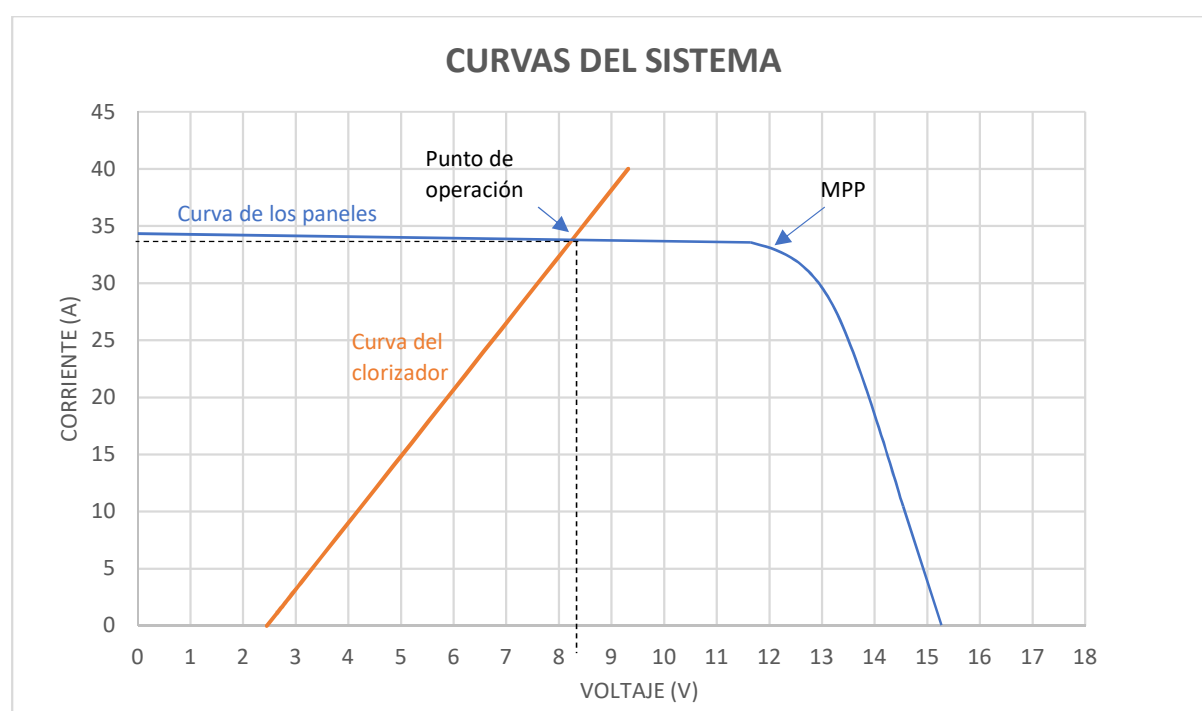


Figura 35: Curvas del sistema utilizando 5 paneles STS-100M-B4U de 12,6 V – 8 A en paralelo.

Este tipo de conexión, en la cual los paneles se encuentran directamente conectados a la carga, es el sistema más simple. No requiere baterías ni componentes electrónicos adicionales. Sin embargo, es un sistema únicamente de uso diurno. Al no existir baterías, la energía no puede ser almacenada y sólo puede ser utilizada durante el día.

4.1.ii. Conexión con convertidor

Al usar paneles de 12 V, la intersección de la curva característica I-V de la carga con la de la fuente fotovoltaica se encuentra lejos del MPP. Para trabajar en el punto de máxima potencia, se requiere que la carga sea capaz de usar toda la potencia disponible de los módulos fotovoltaicos en todo momento.

En la *Figura 36* se muestra un esquema simplificado de la conexión que incluye un convertidor buck o reductor. El nivel de tensión y corriente a la salida del convertidor mantiene el mismo nivel de potencia de entrada, excepto por las bajas pérdidas de conversión. El dispositivo funciona como un transformador eléctrico para voltajes y corrientes en DC, bajando el valor de voltaje proveniente de los paneles, con un consecuente aumento de corriente. En condiciones nominales de 12 V de entrada de los paneles, el convertidor ajusta la salida al voltaje de trabajo del clorizador, cercano a los 7 V. De esta forma, se optimiza la transferencia de potencia entre el módulo fotovoltaico y la carga introduciendo una etapa de adaptación que permite que el panel y la carga trabajen ambos en condiciones óptimas. Consecuentemente, se aumenta la eficiencia del sistema.

Al incluir el convertidor se necesitan 300 W de potencia instalada. Sin embargo, dado que el convertidor tiene una eficiencia aproximada del 90%, se requieren 335 W y por lo tanto se deben instalar cuatro paneles en paralelo (400 W, 1,9 m²).

La ventaja de esta opción es que al incluir un convertidor es posible optar por paneles de mayor voltaje y adaptar la salida de estos para que sea compatible con los requerimientos de la carga. Sin embargo, al incluir un nuevo componente se incurre en un nuevo costo, no solo en términos del costo del dispositivo si no en las pérdidas de potencia en el convertidor.

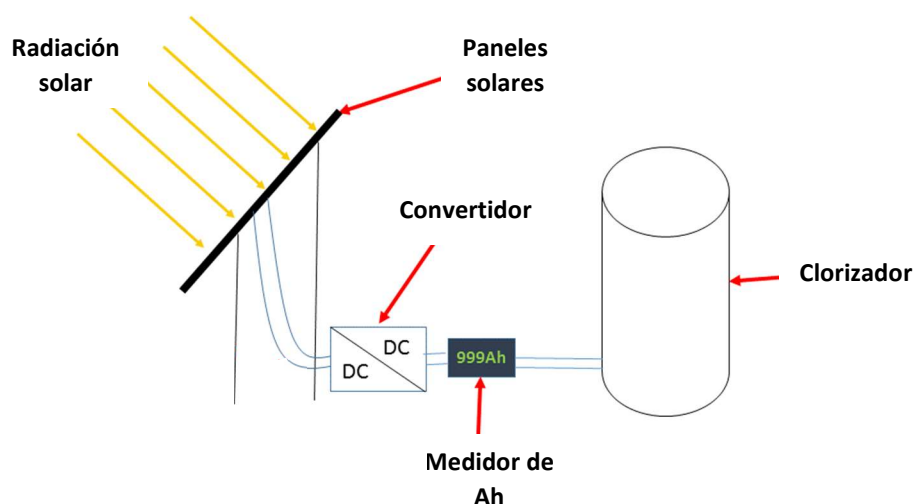


Figura 36: Esquema simplificado de la conexión directa con convertidor.

4.1.iii. Conexión con batería y convertidor

Dada la intermitencia de las fuentes de energía renovables, surge la necesidad de almacenar energía. En el caso de los sistemas fotovoltaicos, la intermitencia de la fuente es de dos tipos: diaria (la variación de irradiancia en un período de 24 horas) y estacional (la variación de la irradiancia a través de los meses de invierno y verano). Las baterías tienen la densidad de energía y potencia justa para satisfacer la demanda diaria de almacenamiento en el sistema fotovoltaico. Son una opción confiable,

y su facilidad de implementación y eficiencia es imbatible en comparación con otro tipo de tecnologías.

Las baterías recargables son dispositivos electroquímicos que convierten energía química en energía eléctrica de forma reversible. Es decir, pueden recargarse cuando se revierte la reacción química usando un sobre-potencial. Las baterías de plomo-ácido constituyen la tecnología de batería más antigua y madura.

Al incluir una batería en el sistema, la energía del sol en exceso que pueda llegar a haber durante el día puede ser almacenada. La batería puede después descargarse durante los períodos de baja irradiancia o de noche, pudiendo cumplir con la demanda de la carga que de otra forma no se alcanzaría.

Cada batería se califica según su voltaje y capacidad. El valor de voltaje representa el voltaje nominal al cual se espera que funcione la batería, y su capacidad (especificada en Ampere-horas) representa la cantidad de carga que la batería puede entregar a su voltaje nominal. La multiplicación de estos dos valores determina la capacidad de energía en Watt-horas, y representa la cantidad total de energía que puede almacenar la batería.

Otro parámetro, la vida de la batería, depende en gran medida de la profundidad de descarga y la temperatura. La profundidad de descarga en un ciclo representa el porcentaje de la capacidad de la batería que se ha descargado. De la *Figura 37* se puede ver que la batería tiene una vida mayor a menores valores de temperatura. Además, para una temperatura determinada, la cantidad de ciclos de vida depende de una manera no lineal con la profundidad de descarga o DOD. Cuanto menor sea la DOD, mayor será la vida de la batería. Sin embargo, dicha mayor cantidad de ciclos de vida pueden ser usados para una menor profundidad de descarga. Por lo tanto, puede decirse que la batería durará más si la DOD promedio pudiera reducirse durante su operación normal. Asimismo, el sobrecalentamiento de la batería debe controlarse estrictamente. Un sobrecalentamiento puede ocurrir por una sobrecarga y un consecuente sobre-voltaje de la batería de plomo-ácido. Esto, a su vez, puede provocar la generación de gases a partir del electrolito y una pérdida de capacidad [6].

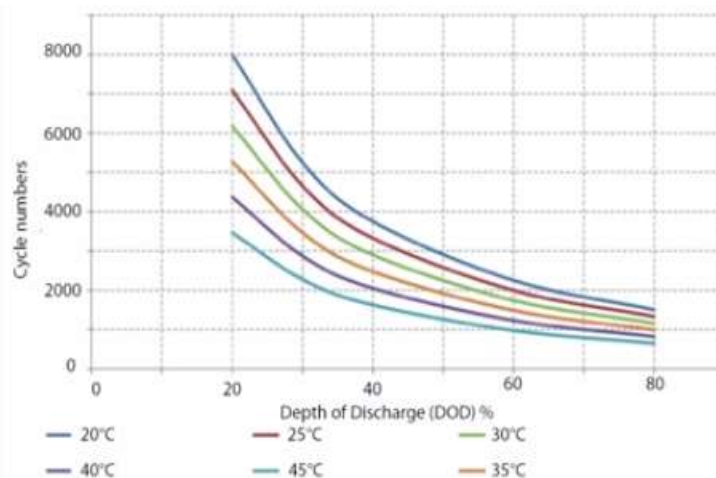


Figura 37: Dependencia de la vida con la temperatura y profundidad de descarga para una batería típica de plomo-ácido sellada,

Las baterías más utilizadas en los sistemas fotovoltaicos son las de plomo-ácido de ciclo profundo, selladas, las cuales pueden ser descargadas hasta un 80% de su capacidad y son libres de mantenimiento, alcanzando hasta 10 años de vida [8].

Si bien las baterías requieren un pequeño sobre-potencial para su carga, para optimizar su funcionamiento deben respetarse determinados límites de voltaje. Asimismo, la cantidad de corriente enviada por los paneles solares a la batería y la corriente de descarga hacia la carga, deben estar dentro de los límites que aseguren el correcto funcionamiento de la batería. Además, dado que los

paneles solares responden dinámicamente a condiciones ambientales como la irradiancia, temperatura, y sombreado, la salida de los módulos fotovoltaicos varía en un rango muy grande. Bajo dichas circunstancias, la conexión directa entre los módulos fotovoltaicos, batería, y la carga, sería muy poco saludable para la batería.

Consecuentemente, debe agregarse otro componente en la instalación, el regulador de carga, de manera tal de asegurar que los parámetros eléctricos alrededor de la batería se mantengan entre las especificaciones del fabricante. El regulador de carga controla la corriente de carga de la batería, y protege a la batería frente a sobrecargas y descargas profundas. Controlando constantemente el estado de carga de la batería, regula la intensidad de carga de la misma para alargar su vida útil. Esto implica un ahorro en costos de mantenimiento y reemplazo de baterías. El regulador de carga es un dispositivo indispensable en los sistemas fotovoltaicos independientes.

La selección de una batería adecuada para un sistema fotovoltaico requiere de un análisis completo de los requerimientos de descarga de la batería. Las kilowatt-horas de energía almacenadas en la batería dependen de las necesidades de la carga, la cantidad de días de almacenamiento, los patrones de irradiancia en la zona geográfica de la instalación, la variación de la temperatura de trabajo y la salida de los paneles. Si el voltaje de carga es muy bajo, el tiempo de recarga es muy largo o incluso puede no llegar a completarse la recarga.

De esta forma, una instalación con batería puede utilizarse para limitar la corriente dirigida al clorizador desde los paneles, y todo el resto de la energía generada se almacena en la batería para ser usada posteriormente, durante la noche o momentos de baja irradiancia. En este caso, se selecciona un tamaño de batería pequeño. Se calcula que al limitar la corriente hacia el clorizador en 25 A (considerando la instalación en paralelo de los paneles de 12 V en Buenos Aires), deben almacenarse 35 Ah. Dicho esto, una batería de 12 V – 40 Ah es suficiente [9]. La ventaja de esta alternativa es que es posible generar energía en los paneles a muy altos valores de tensión y corriente, manteniendo controladas las condiciones de alimentación hacia el clorizador. Por último, se incluye también el convertidor de voltaje, de manera de alcanzar el voltaje de trabajo del clorizador.

Otro tipo de instalación con batería consiste en almacenar el total de la energía proveniente de los paneles, y que el clorizador se alimente directamente de dicha batería. Importa entonces, seleccionar una batería de tamaño adecuado, con suficiente capacidad de almacenamiento. Se la elige de forma tal de que sea capaz de aceptar la máxima potencia de salida de los paneles sin generarse un daño por sobrecarga. Si se permite que el proceso se lleve a cabo en 3 días (se necesitan 1067 Wh por día), se debe instalar una capacidad de 140 Ah, considerando un batería de ciclo profundo y uno a dos días de autonomía. Se opta por una batería de 12 V – 160 Ah, ya que es más barato que poner dos baterías de 70 Ah en paralelo. La batería se carga durante el día, pudiendo alimentar el clorizador de manera continua [9]. Dado que las condiciones de alimentación son constantes, es posible controlar el progreso del proceso con un contador de horas en lugar de un medidor de Amper-horas. Se presenta la ventaja de que el proceso de electrólisis se realiza de forma ininterrumpida, evitando el fenómeno de decaimiento del cloro generado durante las horas improductivas del clorizador. En la *Figura 38* se observa un esquema simplificado que incluye todos los componentes presentes en la instalación.

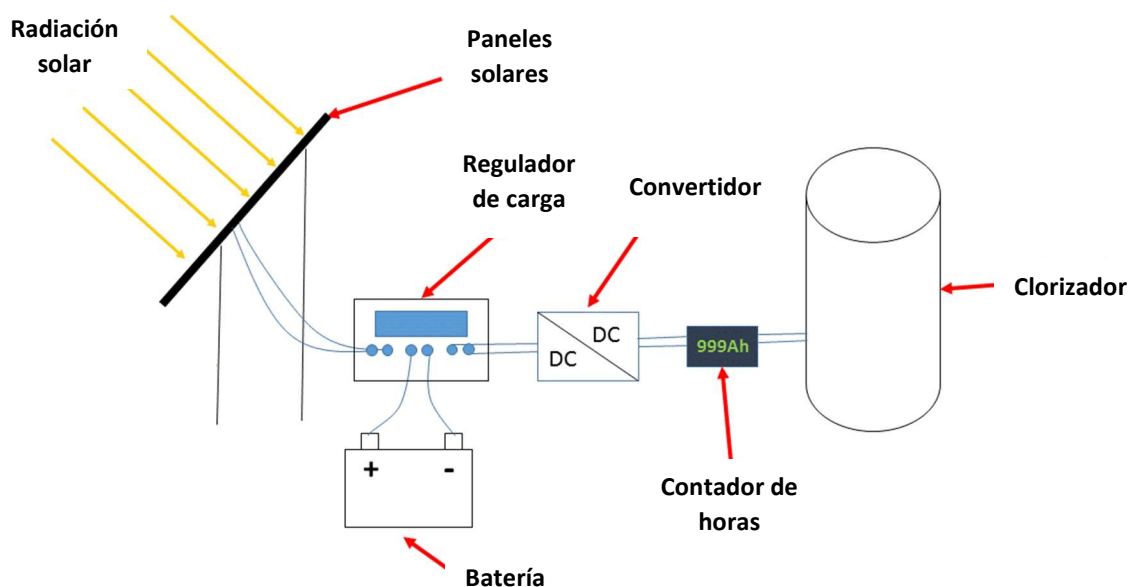


Figura 38: Esquema simplificado de la conexión con batería y convertidor.

4.1.iv. Otras alternativas

De manera de reducir las Ampere-horas necesarias, se considera reducir la cantidad de solución acuosa de cloruro de sodio en el clorizador. Con un tercio del volumen de solución dentro del recipiente, manteniendo los 900 g de sal al preparar el electrolito, las Ampere-horas requeridas pasan a ser un tercio de las necesarias originalmente. Bajo estas condiciones, el proceso podría terminarse al cabo de un día manteniendo la potencia instalada de paneles. Para validar dicha hipótesis, se lleva a cabo el proceso con solo 10 litros de electrolito.

Realizando la medición de concentración de cloro de la misma forma, a intervalos de una hora, se obtienen los resultados de la Figura 38. Se demuestra que la eficiencia del proceso bajo estas condiciones es mucho menor, siendo de un 40%. Esto se asocia al hecho de que la solución alcanza temperaturas mayores al trabajarse con un menor volumen, superándose los 50°C. Dicho aumento en la temperatura de trabajo tiene una gran influencia sobre la estabilidad de la solución desinfectante, favoreciendo su degradación y formación de cloratos en lugar de hipoclorito. Consecuentemente, se decide descartar esta opción y se mantienen las condiciones originales.

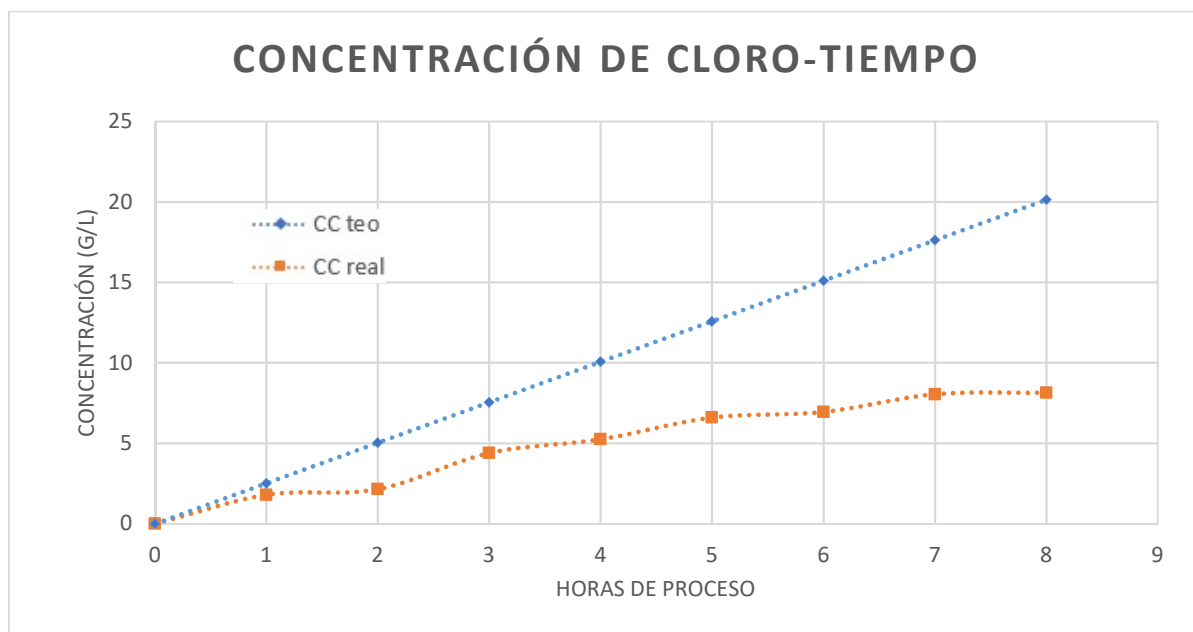


Figura 39: Concentración de cloro en función de horas de electrólisis, partiendo de 10 litros de electrolito.

4.2 Análisis de las alternativas

Para decidir cuál sistema es el más apto, se califica cada alternativa según su costo, eficiencia, superficie requerida de paneles, duración del proceso de electrólisis, y mantenimiento. Para ello, se considera la siguiente tabla:

Calificación	Puntos
Muy malo	1
Malo	2
Suficiente	3
Bueno	4
Muy bueno	5

Tabla 3: Tabla de calificación.

A continuación se muestran los resultados para cada alternativa, teniendo el doble de relevancia el costo total de la instalación.

Tipo de conexión	Directa paneles 8V	Directa paneles 12V	Con convertidor	Con batería 40Ah	Con batería 160Ah
Precio (x 2)	2	4	5	3	3
Eficiencia	5	2	4	3	3
Superficie de paneles	4	3	5	5	5
Duración del proceso	4	4	4	4	5
Mantenimiento	5	5	4	3	3
Calificación total	22	22	27	21	22

Tabla 4: Calificación de cada alternativa de conexión.

La primera opción de conexión directa con paneles de 8 V tiene la mejor eficiencia ya que el punto de trabajo se encuentra muy cercano al MPP de los paneles. Además, no se incluyen componentes adicionales que pudieran reducir dicha eficiencia. Sin embargo, el costo de dichos paneles es mayor y la posibilidad de conseguirlos en el mercado es estrecha, implicando posibles costos de envío desde el exterior. Dicho esto, los paneles de 12 V demuestran una mejor calificación cuando se trata del costo de la instalación, pero al incluir baterías, dicho costo total aumenta. La eficiencia de la conexión directa con paneles de 12 V es baja dada la lejanía del punto de trabajo del MPP, pero al incluir el convertidor, se aumenta considerablemente la eficiencia (a pesar de que no es la óptima dado que el propio convertidor trae aparejada una eficiencia del 85%). A medida que se agregan componentes, como ser las baterías y el regulador de carga para las mismas, la eficiencia disminuye. Con los paneles de 12 V y el convertidor se tiene la menor superficie de paneles (1,9 m²). La única alternativa que garantiza que el proceso de electrólisis se complete al cabo de tres días es aquella con la batería de 140 Ah, ya que tiene una autonomía de uno a dos días. Para el resto de las opciones, de haber un día totalmente nublado o de muy baja irradiancia, el proceso se retrasa. Por último, a medida que se agregan componentes, el mantenimiento de la instalación aumenta, como así también la posibilidad de fallas.

Para analizar el precio de cada alternativa, se investiga la disponibilidad de los diversos componentes en el mercado y sus precios correspondientes, reflejados en la *Tabla 5*. Todos los precios están en dólares estadounidenses, y se consideran los costos de envío en el caso que corresponda.

Tipo de conexión	Directa paneles 8V	Directa paneles 12V	Con convertidor	Con batería 40Ah	Con batería 160Ah
Precios (USD)					
Paneles	610	315	162	162	162
Convertidor	-	-	144	144	144
Batería	-	-	-	100	350
Regulador de carga	-	-	-	20	20
Medidor de Ah	275	275	275	275	-
Contador de horas	-	-	-	-	32
Precio total	885	590	581	701	708
Calificación	1	4	5	3	3

Tabla 5: Precios de los componentes de la instalación y calificación de cada alternativa.

Se obtiene entonces que la mejor instalación es aquella que incluye el convertidor y paneles estándar de 12 V. Dicha alternativa combina una buena eficiencia y una instalación sencilla, e implica la menor superficie de paneles. Más importante, es la opción más económica.

4.3 Instalación final

Para probar el prototipo y obtener resultados que validen las simulaciones hechas, se arma un circuito con el clorizador y todos los componentes nombrados para la mejor alternativa de instalación. Aprovechando los módulos fotovoltaicos ya instalados en el lugar de ensayo de Buenos Aires, se trabaja con seis paneles de 18,3 V – 4,1 A en lugar de 12 V. Estos se conectan en paralelo, alcanzando una potencia nominal total de 450 W.

El circuito final se muestra en la *Figura 39*, el cual incluye además del clorizador, los paneles, el convertidor, y el medidor de Ampere-horas, una batería pequeña de 12 V – 7 Ah para alimentar el medidor siempre que el proceso esté llevándose a cabo. La batería almacena energía durante el día para ser usada cuando la potencia generada en los módulos fotovoltaicos no es suficiente para alimentar el medidor. Consecuentemente, también se incluye un regulador de carga para dicha batería, de forma tal de asegurar que las especificaciones eléctricas de la batería sean respetadas por el resto del circuito.

El medidor de Ampere-horas instalado también mide el voltaje y la corriente sobre el clorizador en cada instante, como así también muestra el tiempo acumulado desde el inicio del proceso.

Dada la capacidad del convertidor conseguido, de 270 W de potencia, se ponen dos de estos en paralelo para estar por encima de la potencia nominal de los módulos fotovoltaicos.

Asimismo, se agrega un interruptor y una luz testigo que permiten controlar el sistema de una mejor manera. Al prender dicho interruptor, se permite la corriente hacia el clorizador y comienza el proceso. Asimismo, simultáneamente se prende el medidor de Ah, sobre el cual se programa el límite de Ah necesarias para generar el cloro requerido (456 Ah). De esta forma, al alcanzarse dicho valor programable de Ah, el proceso ha finalizado y la rama del circuito del clorizador se abre. La luz testigo ayuda a visualizar cuándo se está llevando a cabo la electrólisis.

Se observa un diodo a la entrada del regulador de carga en la conexión con los paneles solares. Sin un diodo de bloqueo, cuando los paneles producen un voltaje muy bajo, es posible que la batería descargue hacia estos haciendo que consuman la potencia de la batería. Consecuentemente, se incluye el diodo para evitar la 'descarga hacia atrás' de la batería a través de los módulos fotovoltaicos.

Mediante la conexión mostrada, la batería siempre continúa siendo cargada por la energía generada por los paneles solares, independientemente de que se haya puesto a funcionar el clorizador o no. De esta forma, se asegura que la instalación siempre estará en condiciones de comenzar el proceso de electrólisis, evitando la descarga total de la batería si el prototipo no se usa por un largo período de tiempo.

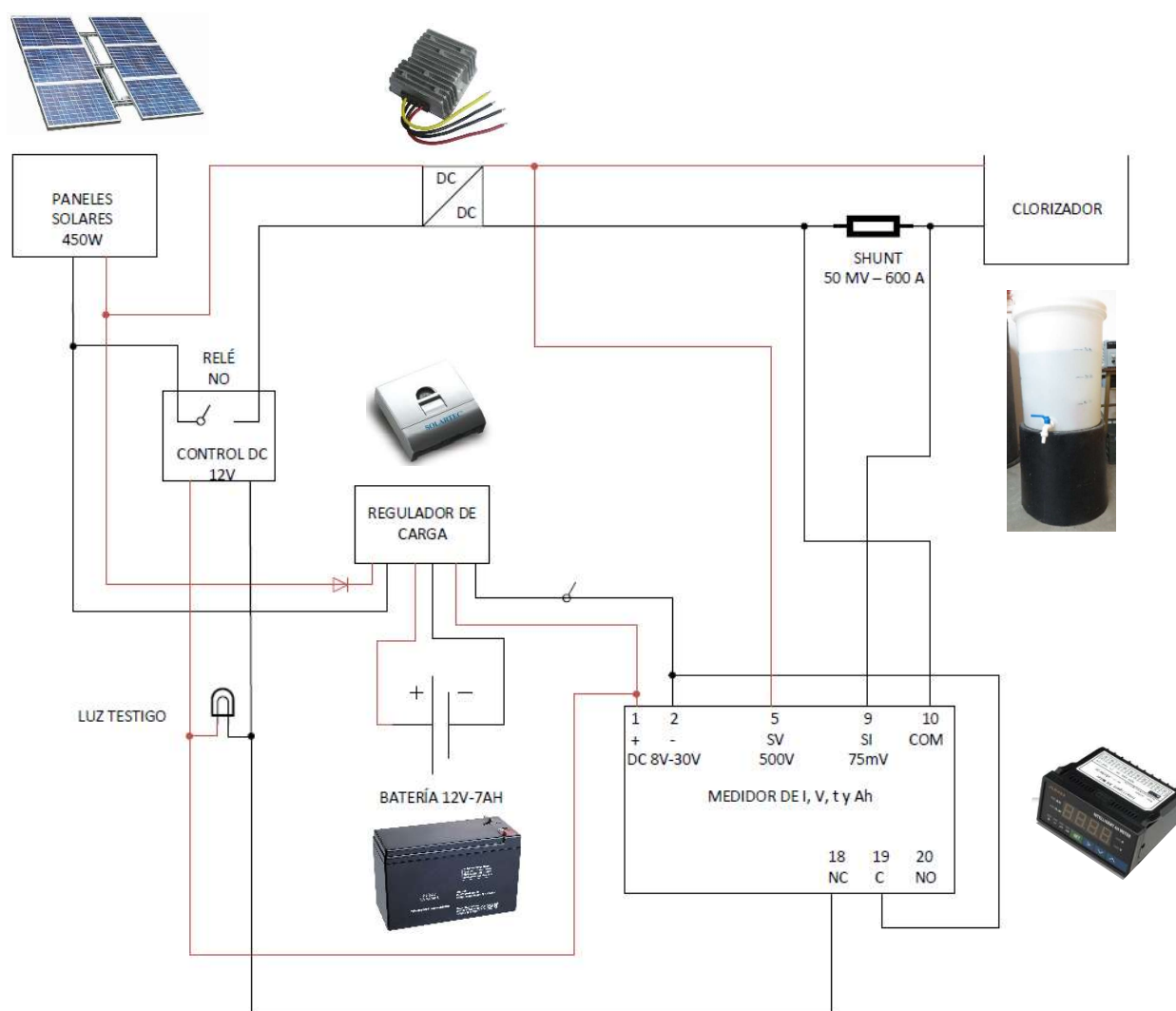


Figura 40: Circuito de la instalación final.

Por último, todo el circuito de medición y control se ubica dentro de un gabinete plástico, el cual brinda protección del sol y de la lluvia. Asimismo, el gabinete permite una ventilación natural por medio de unos orificios en su base y una salida en la parte superior (Figura 41).



(a)



(b)

Figura 41: Gabinete y clorizador del sistema fotovoltaico final.

5 Ensayo del sistema

El ensayo del prototipo se realizó durante tres días consecutivos en Buenos Aires, en el mes de Agosto (invierno). Los días de ensayo resultaron ser días soleados con muy pocas nubes, con una temperatura ambiente máxima alrededor de los 19 °C. La evolución de la irradiancia durante los tres días fue semejante a la mostrada en la *Figura 42*, en la cual se observa un pico de aproximadamente 750 W/m² cerca de la una de la tarde⁴. El clorizador se mantuvo en un ambiente ventilado y sin incidencia directa de la luz solar.

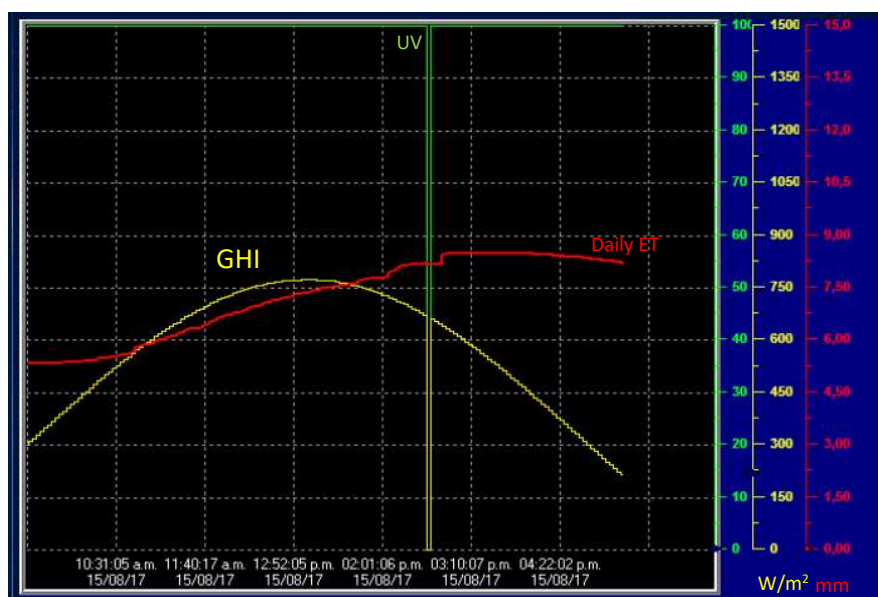


Figura 42: Irradiancia en la ciudad de Buenos Aires registrada durante los días de ensayo.

El medidor fue programado de forma tal de cortar el suministro de energía al clorizador cumplidas las 456 Ah. De esta forma, fueron necesarias 67,2 horas para completar el proceso de generación de cloro, lo cual se encuentra dentro de las 72 horas máximas para las cuales se diseñó el sistema. Los paneles solares recibieron luz solar únicamente durante 19,3 horas, de forma intermitente. La evolución del proceso se muestra en forma reducida en la *Tabla 6*.

	Tiempo de actividad del clorizador	Tiempo acumulado de proceso	Ah acumuladas	Concentración de cloro (g/l)
14-Ago	15 hs a 16:40 hs	1 hr 40 min	65,92	-
15-Ago	08:45 hs a 16:40 hs	9 hrs 45 min	231,91	3,7
16-Ago	08:45 hs a 16:40 hs	17 hrs 50 min	432,74	9,55
17-Ago	08:45 hs a 10:15 hs	19 hrs 20 min	456	9,81

Tabla 6: Ensayo del prototipo.

⁴ Según datos de la Central Meteorológica de Parque Avellaneda, CABA. Fuente online: <http://www.paranauticos.com/central-pa/web-page/cpa-rad-solar-graf.htm>

Como se observa, la concentración medida transcurridas las 456 Ah es de 9,81 g/l de cloro, levemente menor a los 10 g/l deseados.

De haber comenzado el ensayo por la mañana, el proceso se podría haber completado al cabo de dos noches en lugar de tres. De esta forma, se hubiera evitado el decaimiento asociado a las horas de inactividad del clorizador durante una noche, lográndose una mayor concentración al cabo de las Ah programadas. Asimismo, cabe aclarar que los paneles sufren un sombreado prematuro dado el lugar donde se decidió instalarlos, especialmente durante la tarde. Los paneles dejan de ser impactados de forma directa por la luz del sol cerca de las 16:30 hs, perdiéndose de esta forma aproximadamente una hora más de proceso por día. Por lo tanto, esto también hizo que fuera necesario sumar un día más para acumular las Ah requeridas.

5.1 Modelo generación-decaimiento

Habiendo ensayado el equipo bajo las condiciones especificadas, es posible hacer un modelo sencillo de generación-decaimiento del cloro en solución. Es importante aclarar que este modelo es válido únicamente para el clorizador bajo estudio. Asimismo, siendo que la generación del cloro en el clorizador (alimentado por los paneles fotovoltaicos), es altamente dependiente de la ubicación geográfica donde se hace funcionar la instalación, y su decaimiento está relacionado de manera directa con las condiciones ambientales, sitio donde se ubica el clorizador, y calidad del agua con la cual se prepara el electrolito, los resultados que se derivan a continuación son representativos del funcionamiento del sistema únicamente bajo condiciones similares a las del ensayo.

Durante el ensayo, el decaimiento medido durante cada noche fue de aproximadamente 0,31 g/l. Para obtener dicho resultado, se registró la concentración de cloro una vez interrumpido el proceso al caer el sol, y luego se lo midió a la mañana siguiente, tras las horas de inactividad.

Ahora es posible calcular la carga necesaria (Ah) para generar los 10 gramos de cloro por litro, según la cantidad de días de proceso, teniendo en consideración el decaimiento registrado.

Recordando que al alimentar el clorizador con una fuente la relación entre la generación de cloro y el tiempo es lineal, se puede calcular la cantidad diaria de cloro que debe generarse durante las horas de luz según la cantidad de días bajo los cuales se permite que se desarrolle el proceso:

$$\text{Producción diaria} * \text{Cantidad de días} - \text{Decaimiento por noche} * \text{Cantidad de noches} = 10 \frac{g}{l}$$

$$\text{Produccion diaria} = \frac{10 \frac{g}{l} + (\text{Cantidad de días} - 1) * 0,31 \frac{g}{l * noche}}{\text{Cantidad de días}}$$

Luego, teniendo en cuenta la pendiente de la curva de generación de la *Figura 7*, se observa que por cada g/l producido de cloro, se invierten aproximadamente 2,4 horas. Por lo tanto, es posible calcular la carga necesaria por día, la cual, multiplicada por la cantidad de días de proceso, da la cantidad de Ah totales necesarias para alcanzar la concentración final deseada:

$$Carga\ necesaria = Producción\ diaria * 2,4 \frac{horas}{g/l} * 19A * Cantidad\ de\ días$$

Por último, de la misma forma que se hizo en la *sección 3.4*, se calcula la cantidad de paneles requeridos para el caso en el cual la conexión entre estos y el clorizador es de manera directa:

$$Paneles\ necesarios = \frac{Ah\ totales\ necesarias}{\frac{Ah\ generadas}{día * panel} * Cantidad\ de\ días\ de\ proceso}$$

En la *Tabla 7* se resume la carga promedio generada por día por panel de 8 V y 12 V.

	Carga generada por día, por panel (Ah)	Área (m ²)
Panel 8 V	36,4	0,448
Panel 12 V	35,28	0,477

Tabla 7: Carga diaria generada por panel en Buenos Aires.

Los resultados en función de los días de proceso se observan en la *Tabla 8*. Haciendo una comparación con los resultados mostrados en la *Tabla 2*, donde se da la cantidad de paneles necesarios sin considerar el decaimiento, se observan tres diferencias principales.

Primero, tras considerar el decaimiento, a partir de una duración de 2 días de proceso la carga requerida para completar el proceso es mayor y crece conforme aumenta la cantidad de días.

Segundo, si se decide que el proceso dure entre 13 a 19 días, será necesario instalar un panel adicional a lo calculado anteriormente. Sin considerar el decaimiento se calculó que, a partir de una duración de 13 días, solo era necesario instalar un único panel. Sin embargo, tras considerar el decaimiento, se necesitan 2 paneles para llevar a cabo el proceso entre 13 a 19 días, y recién se precisa instalar un solo panel para una duración de 20 días o más.

Tercero, para el caso en el cual se decida que el proceso se lleve a cabo durante 7 días, serán necesarios 3 paneles en lugar de dos.

Fuera de estas diferencias, el dimensionamiento del sistema es el mismo. Por ejemplo, para una duración de proceso de hasta 6 días, la cantidad de paneles a instalar es la misma. La única diferencia es que se necesita generar una carga mayor y por tanto debe configurarse el medidor de amperes-horas para abrir el circuito en el momento adecuado.

Dado que la idea es que el clorizador funcione bajo demanda, produciéndose el cloro cuando se lo requiera, una duración de proceso muy larga no resulta muy funcional. Por lo tanto, la mayor diferencia que se observa entre 1 a 6 días de proceso es que, cuando se tiene decaimiento de cloro durante las noches, se requiere generar una carga mayor pero el dimensionamiento del sistema es el mismo.

Días	Producción por día (g/l)	Carga necesaria por día (Ah)	Carga total necesaria (Ah)	Paneles 8 V necesarios ⁵	Paneles 12 V necesarios ⁵
1	10,0	456,0	456,0	13	13
2	5,2	234,8	469,6	7	7
3	3,5	161,1	483,3	5	5
4	2,7	124,3	497,0	4	4
5	2,2	102,1	510,7	3	3
6	1,9	87,4	524,4	3	3
7	1,7	76,9	538,0	3	3
8	1,5	69,0	551,7	2	2
9	1,4	62,8	565,4	2	2
10	1,3	57,9	579,1	2	2
11	1,2	53,9	592,8	2	2
12	1,1	50,5	606,4	2	2
13	1,0	47,7	620,1	2	2
14	1,0	45,3	633,8	2	2
15	0,9	43,2	647,5	2	2
16	0,9	41,3	661,2	2	2
17	0,9	39,7	674,8	2	2
18	0,8	38,3	688,5	2	2
19	0,8	37,0	702,2	2	2
20	0,8	35,8	715,9	1	2

Tabla 8: Resultados del modelo generación-decaimiento para el clorizador bajo estudio.

Por ejemplo, para 3 días de proceso, el aumento en la cantidad de carga a generar es de un 3%. Esta diferencia es muy baja. Sin embargo, para 7 días de proceso, no solo la carga a generar aumenta en un 18% sino que además se deberá invertir en un panel adicional.

⁵ En el caso en el cual la conexión al clorizador sea directa, sin ningún otro componente en el medio.

6 Trabajos a futuro

Se mencionaron algunas de las ventajas de producir cloro y sus derivados *in situ*, como ser la seguridad, eliminación de transporte, y generación bajo demanda evitando las pérdidas por degradación durante el almacenamiento. Sin embargo, queda como trabajo pendiente comparar el costo de dicha alternativa con la opción de transportar directamente el desinfectante a la zona en cuestión, u otras técnicas disponibles de potabilización de agua.

Por otra parte, podría considerarse una optimización del clorizador. Como ejemplos, podría analizarse el beneficio de usar electrodos de mayor superficie, el recipiente podría cambiarse por un material opaco, y se podría estudiar cómo mejorar la refrigeración de la solución durante el proceso de electrólisis. Estos últimos dos puntos jugarían un papel importante en la estabilización de la solución de hipoclorito de sodio.

7 Conclusiones

Entendiendo la dificultad que existe en las zonas rurales o marginadas para acceder a fuentes de agua apta para el consumo humano, se propuso diseñar un sistema fotovoltaico para alimentar un clorizador cuyos productos puedan utilizarse en la potabilización de agua.

Se trabajó con un prototipo de clorizador de 30 litros de capacidad, desarrollado en un trabajo anterior en el Instituto Tecnológico de Buenos Aires. Se explicaron las reacciones químicas intervinientes en el proceso de generación de cloro por electrólisis, y se calculó la eficiencia del dispositivo. Se encontró la carga necesaria en Ampere-horas para generar 10 gramos de cloro por litro de electrolito, siendo posible potabilizar 10.000 litros de agua con un litro de dicha solución. Asimismo, se determinó la curva característica I-V del clorizador y se analizó el decaimiento del cloro generado con el tiempo.

Previo a analizar distintas soluciones y seleccionar la mejor alternativa de sistema fotovoltaico, se estudiaron los mecanismos de aprovechamiento de la energía solar y el principio de funcionamiento de una celda solar. Se nombraron los parámetros intervinientes a la hora de instalar un módulo fotovoltaico (como ser los ángulos de orientación), y se explicaron las curvas características de dichos dispositivos y su relación con la irradiación y la temperatura.

Considerando paneles estándar policristalinos de 8 V, se analizó la radiación solar en tres ubicaciones potencialmente aptas para el uso del clorizador (Buenos Aires, Nagpur, y Madoi Huangheyan) mediante simulaciones en el programa *SYSTEM ADVISORY MODEL*. Luego se determinó la potencia a instalar en Buenos Aires, en función de los días de operación. Se observó que a medida que se reduce la duración del proceso, la relación entre la cantidad de paneles a instalar por cada día menos de producción aumenta.

Siendo necesario que la instalación funcione de forma autónoma e independiente, sin conexión a la red eléctrica, se analizaron distintas alternativas de conexión incluyendo diferentes componentes eléctricos: conexión directa, conexión con convertidor, y conexión con batería y convertidor. Para dicho análisis se consideró que el proceso debe completarse la cabo de tres días de operación. Cada alternativa se valoró según su costo, eficiencia, área de paneles a instalar, duración del proceso, y mantenimiento. Luego se diseñó el circuito eléctrico correspondiente a la mejor solución: utilizar paneles estándar de 12 V con un convertidor.

Finalmente, el sistema fotovoltaico fue puesto a prueba para validar los resultados. En los ensayos se encontró que la concentración de cloro deseada se logra con éxito. El decaimiento del cloro durante las horas improductivas del clorizador es un inconveniente que puede producir ligeros apartamientos en la concentración final respecto al valor deseado. Se hizo un modelo simple de la generación de cloro teniendo en cuenta el decaimiento medido durante el ensayo, y a partir de este es posible dimensionar el sistema para alcanzar la concentración de cloro deseada en función de la duración que se permite tenga el proceso.

No solo se vio la dependencia de la generación del cloro con la ubicación geográfica de la instalación, sino también la relación directa que existe entre el tipo de clorizador, dónde se lo ubica, y la calidad del agua con la que se prepara el electrolito, con la producción y el decaimiento del cloro en la solución.

Referencias

- [1] Agbar Agua, «Ficha sobre calidad del agua,» 2014.
- [2] Asociación Española de Abastecimientos de Agua y Saneamiento, Manual de la cloración, 1994.
- [3] D. D. Ebbing y S. D. Gammon, General Chemistry, Boston: Cengage Learning, 2013.
- [4] R. Rojas Vargas y S. Guevara Vásquez, «Estabilidad de la solución de hipoclorito de sodio producido in situ,» Lima, 2000.
- [5] R. Perez y M. Perez, «UPDATE 2015 - A fundamental look at energy reserves for the planet,» The International Energy Agency-SHCP-Vol. 62, 2015.
- [6] P. M. a. D. D. TU Delft, *DelftX Course 'Solar Energy'*, 2016.
- [7] G. Gomez, «Módulos Fotovoltaicos,» Universidad de Castilla - La Mancha, 2016.
- [8] A. Smets y K. Jager, Solar Energy, the physics and engineering of photovoltaic conversion technologies and systems, UIT Cambridge, 2016.
- [9] D. M. Bush y J. L. Chamberlin, Handbook of Secondary Storage Batteries and Charge Regulators in Photovoltaic Systems, Pennsylvania: Exide Management and Technology Company, 2002.
- [10] V. Wesslak y S. Voswinckel, Photovoltaic, Berlin: Springer, 2012.
- [11] S. Cuk y R. Middlebrook, Advances in Switched-Mode Power Conversion Part I+II, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1983.
- [12] A. Ibrahim, «Analysis of Electrical Characteristics of Photovoltaic Single Crystal Silicon Solar Cells at Outdoor Measurements,» *Smart Grid and Renewable Energy*, pp. 169-175, 16 May 2011.
- [13] N. Blair y A. Dobos, *System Advisor Model (SAM)*, National Renewable Energy Laboratory, 2015.
- [14] Endecon Engineering & Regional Economic Research, Inc., «A Guide To Photovoltaic (PV) System Design And Installation,» San Ramon, California, 2011.
- [15] C. L. Mantell, Ingeniería Electroquímica, Reverte, 1980.
- [16] J. Marcó, «Química del agua,» 2013. [En línea]. Available: <http://www.quimicadelagua.com/index.html>.
- [17] J. M. Gratacós, «Generadores de cloro por electrólisis de salmuera con tecnología de célula con membrana,» TecnoAqua, 2014.
- [18] R. A. Messenger y A. Abtahi, Photovoltaic Systems Engineering, Fourth Edition, CRC Press, 2017.