



## Automatización, Robótica y Sistemas Computacionales

### Estudio de generación de modelo práctico considerando una evaluación de planta fotovoltaica para la empresa Tesla Energy

#### *Generation Study and Evaluation of the Photovoltaic Plant in the Tesla Energy Company*

José Moraga<sup>1</sup>, Vladimir Esparza<sup>2</sup>, Jaime Rohten<sup>3</sup>, Luis García<sup>4</sup>

1- José Moraga. Universidad del Bío-Bío, Chile. E-mail:

[jose.moraga1401@egresados.ubiobio.cl](mailto:jose.moraga1401@egresados.ubiobio.cl)

2- Vladimir Esparza. Universidad del Bío-Bío, Chile. E-mail: [vesparza@ubiobio.cl](mailto:vesparza@ubiobio.cl)

3- Jaime Rohten. Universidad del Bío-Bío, Chile. E-mail: [jrohten@ubiobio.cl](mailto:jrohten@ubiobio.cl)

4- Luis García. Universidad de Concepción, Chile. E-mail: [luigarci@udec.cl](mailto:luigarci@udec.cl)

**Resumen:** Este trabajo presenta la evaluación de una planta fotovoltaica instalada de 66kWp en la lechería de Miraflores, en Angol, Región de la Araucanía, Chile, con el propósito de consumo eficiente de la energía. El principal objetivo de esta planta solar es minimizar el consumo energético proveniente de la red local, produciendo parte de la energía desde fuentes de energías renovables, como la energía fotovoltaica. La producción de energías renovables conlleva a otros aspectos como el programa de mantenimiento, donde las fallas son importantes. Los resultados a través del análisis de datos desde el año 2014 al 2017 muestra la eficiencia de la instalación al disminuir el costo total y al mismo tiempo da las principales guías para el mantenimiento del proceso para reparar fallas en los interruptores de potencia del convertidor, por sobre-voltaje, o cualquier otro problema en el sistema. Adicionalmente, este artículo muestra la eficacia en la detección de malfuncionamiento utilizados el método de las zonas calientes, con el objetivo de encontrar fallas en los paneles y poder cambiarlos o bien activar el proceso de garantía. Por lo tanto, el estudio ayuda a la lechería Miraflores a maximizar la cosecha de energía solar y al mismo tiempo implementar un método de mantenimiento que permita extender la vida útil de la planta completa.

**Abstract:** This paper presents the evaluation of a photovoltaic plant installed in Miraflores dairy farm close to Angol city, Region of Araucanía – Chile, for efficiency energy consumption purpose. The main objective of this solar plant is to minimize the energy consumption from the local grid, producing part of the energy from renewable energy by using photovoltaics panels. The renewable energy production entails some other aspects



as the maintenance program, where the failure identification takes relevance. The results through an analysis using data from the year 2014 up to 2017 shows the efficiency of the installation by reducing the total cost, and at the same time give guidance in the maintenance process to overcome or repair failures on the power converter switching, for overvoltage, or any other system issues. In addition, this paper shows the effectiveness of the hot spot detection method to find some malfunctioning on the panels to be able to change them or activate the warranty process. Therefore the study helps the Miraflores dairy farm to maximize the solar energy harvest and at the same time implement a maintenance method that allows to extend the useful life of the entire plant.

**Palabras Clave:** Sistema de energía eléctrica; eficiencia energética; sistemas fotovoltaicos; efectos fotovoltaicos; análisis de desempeño; mantenimiento de sistemas fotovoltaicos.

**Keywords:** Power Energy System; Energy Efficiency; Photovoltaic Systems; performance analysis, photovoltaic system maintenance.

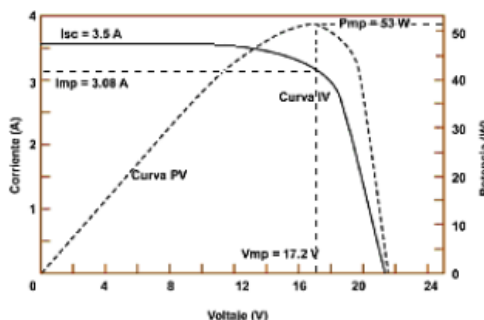
## 1. Introducción

La generación distribuida se ha estado implementando a nivel mundial con objetivo de otorgar a los clientes el derecho de generar su propia energía, autoconsumirla y permitir la venta de los excedentes energéticos a las empresas distribuidoras.

En Chile, las normas que rigen este concepto se concentran en la denominada Ley 20.571 creada bajo el Decreto Supremo No. 71. Además, se le conoce como Ley de Generación Distribuida, Ley de Facturación Neta y Ley de Net-Billing. Esta Ley permite a cualquier ciudadano o empresa chilena, vender energía a la red eléctrica, convirtiéndose de esta forma en un generador de energía eléctrica primordialmente utilizando fuentes de energía renovables no convencionales.

Para todos los sistemas solares instalados en sectores residenciales o empresariales que cumplen con la normativa vigente es necesario evaluar el rendimiento de la instalación con el fin de mantener de manera óptima la generación de energía y compensar así los costos de la inversión.

Tesla Energy es una empresa relacionada con los sistemas solares que evalúa continuamente el rendimiento de sus instalaciones fotovoltaicas con el fin de suministrar el mejor servicio a los usuarios.



\*Fuente: Datasheet Solarex VLX-53

Fig. 1. Curva I-V y P-V para un módulo fotovoltaico.

## 2. Metodología

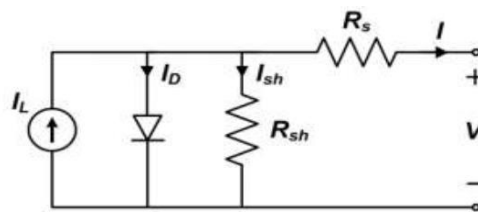
Este trabajo presenta la instalación de una planta fotovoltaica (FV) en la lechería del Fundo Miraflores en el año 2014, ubicada en la comuna de Angol (Región de la Araucanía) por la entrada Sur de la Ciudad en el país de Chile.

Las instalaciones de los paneles FV, están implementados en la cubierta de los galpones y un estacionamiento de la lechería, estos están montados en una estructura metálica con un ángulo de 30 grados, con el fin de incidir positivamente en el impacto ambiental, cuidando así las tierras fértiles que sirven para el crecimiento del forraje verde para la alimentación del ganado allí presente.

La energía generada por el sistema solar FV, es utilizada para el riego de 150 hectáreas (donde pastorean 500 bovinos), la sala de ordeña (que produce 15 mil litros de leche diaria), los equipos de frío y una casa residencial, logrando cubrir hasta el 50% de la necesidad energética anual. El 60% de la energía producida por el sistema solar FV es auto-consumida y el 40% restante es inyectado a la red. El proyecto tiene una cantidad de 279 paneles FV que en total tienen una potencia instalada 66 kWp distribuidos en 4 inversores trifásicos.

## 3. Marco Teórico

El comportamiento eléctrico de los paneles está dado por las curvas de corriente v/s voltaje (curva I-V) o potencia v/s voltaje (curva P-V). La curva de potencia está dada por el producto entre la corriente y el voltaje en cada punto de la curva IV. La Fig. 1. muestra las curvas I-V y P-V características de un panel, bajo las condiciones estándares de prueba como las de corto circuito (ISC) y tensión a circuito abierto (VOC), cada modelo de panel tiene una curva I-V o P-V, debido a su construcción propia. La corriente nominal ( $I_{mp}$ ) y el voltaje nominal ( $V_{mp}$ ) del panel se alcanzan en el punto de máxima potencia. Mientras el panel opere fuera del punto de máxima potencia, la potencia de salida será significativamente más baja.



\*Fuente: Photovoltaic module modeling using Simulink/Matlab, 2012

Fig. 2. Modelo de circuito equivalente para celdas FV.

El circuito eléctrico equivalente exacto de una celda FV, Fig. 2, la ecuación que rige para este circuito equivalente se formula usando la ley de corriente de Kirchoff para corriente:

$$I = I_L - I_D - I_{SH} \quad (1)$$

En la ecuación anterior,  $I$  representa la corriente generada por la luz en la celda,  $I_D$  representa la corriente dependiente de voltaje de pérdida por recombinación,  $I_{SH}$  representa la corriente de pérdida debido a las resistencias de derivación. Este modelo de diodo único,  $I_D$  se modela usando la ecuación de Shockley para un diodo ideal:



$$I_D = I_0 \left[ e^{\frac{q(V+IR_S)}{kT_c A}} - 1 \right] \quad (2)$$

Donde:

$I$  : Corriente de salida del panel [A].

$V$  : Tensión de salida del panel [V].

$I_0$  : Corriente de saturación inversa [A].

$R_S$  : Resistencia en serie [ $\Omega$ ].

$q$  : Carga de un electrón ( $1.6 \times 10^{-19}$  [C]).

$m$  : Constante de Boltzman ( $1.38 \times 10^{-23}$  [J/K]).

$T_C$  : Temperatura de la celda [ $^{\circ}$ K].

$A$  : Factor de idealidad (por lo general entre 1 y 2 para una sola celda de unión).

Al representar la corriente de derivación como  $I_{SH} = (V - IR_S)/R_{SH}$  y combinar las ecuaciones anteriores se obtiene la ecuación completa para el modelo de un solo diodo:

$$I = I_L - I_0 \left[ e^{\frac{q(V+IR_S)}{kT_c A}} - 1 \right] - \frac{V+IR_S}{R_{Sh}} \left[ e^{\frac{q(V+IR_S)}{kT_c A}} - 1 \right] \quad (3)$$

#### A. Temperatura del panel

La temperatura del panel obedece la siguiente ecuación:

$$T_p = G * e^{a+b*v} \quad (4)$$

Donde:

$T_P$  : Temperatura del panel [ $^{\circ}$ C].

$G$  : Radiación total incidente [kWh/m<sup>2</sup>].

$v$  : Velocidad del viento [m/s].

$a$  y  $b$  : Coeficientes de transferencia de calor de convección empírico. Como en este caso, la instalación está montada en una estructura en altura aislada, se utilizan los siguientes coeficientes  $a = -3,47$  y  $b = -0,0594$  ( $m/s$ )<sup>-1</sup>.

#### B. Temperatura de la celda

Por su parte, la temperatura de la celda obedece a:

$$T_c = T_p + \frac{G}{G_{STC}} * \Delta T_c \quad (5)$$

Donde:

$T_P$  : Temperatura del panel [ $^{\circ}$ C].

$G$  : Radiación total incidente [kWh/m<sup>2</sup>].

$G_{STC}$  : Radiación incidente en condiciones estándar, en este caso utilizar 1000 [W/m<sup>2</sup>]



$\Delta T_C$  : Coeficiente de caída de la temperatura de conducción. Por ser una estructura montada se utiliza el coeficiente  $\Delta T_C = 3$ .

### C. *Performance Ratio*

El rendimiento del panel se calcula como:

$$PR = \frac{Y_f}{Y_R} * 100\% \quad (6)$$

Donde:

$Y_f$  : Rendimiento real o final obtenida en la instalación en un período de tiempo.

$Y_R$  : Rendimiento referencial calculado en la instalación en un período de tiempo.

### D. *Rendimiento real*

Rendimiento real:

$$Y_f = \frac{E_{PV,AC}}{P_0} \quad (7)$$

Donde:

$E_{PV}$  : Energía generada por el sistema FV en corriente alterna [kWh].

$P_0$  : Potencia máxima de la matriz FV [kW].

- *Rendimiento referencial*

El rendimiento referencial:

$$Y_R = \frac{H_i}{G_{STC} * F_c} \quad (8)$$

Donde:

$H_i$  : Irradiación diaria media sobre el plano del generador FV [kWh/m<sup>2</sup>].

$G_{STC}$  : Irradiación de ref. según condiciones estándar (STC), en este caso 1 [kW/m<sup>2</sup>] a 25°C.

$F_c$  : Factor de corrección dependiendo de la condición meteorológica real.

### E. *Factor de corrección*

El factor de corrección:

$$F_c = \left( 1 - \frac{\delta}{100} * (T_{cell,avg} - T_c) \right) \quad (9)$$

Donde:

$\delta$  : Coeficiente de temperatura para la potencia correspondiente a los módulos instalados [%/°C].

$T_c$  : Temp. de la celda calculada a partir de los datos meteorológicos medidos [°C].



$T_{CELL,AVG}$  : Temperatura promedio de la celda a partir de un año de datos meteorológicos medidos [°C].

#### 4. Plan De Mantenimiento Para Las Plantas Fotovoltaicas

Los principales componentes de un plan de manteniendo que se pueden aplicar a este medio de generación FV son: mantenimiento preventivo, correctivo y predictivo. Para la lechería el plan de mantenimiento que se dará a conocer es el preventivo, ya que se busca evitar o mitigar las consecuencias de fallas de los equipos y del sistema para aumentar su disponibilidad y vida útil.

Los principales componentes que requieren de mantenimiento preventivo son los módulos e inversores. Estas acciones las puede realizar el usuario una vez al mes, o bien la empresa dos veces al año en los meses de agosto y diciembre con el fin de optimizar el rendimiento.

##### A. Módulos:

##### 1) Limpieza en los paneles

La acumulación de polvo y suciedad en los módulos, al igual que otros materiales como hojas, papeles, excremento de animales, etc. impiden el ingreso de la radiación en las células FV y ocasionan un mal performance ratio (PR).

Este tipo de acción es económica y eficiente, y se ejecuta de la siguiente forma:

- Desconectar inversores del sistema antes de efectuar la limpieza.
- No rociar agua sobre paneles dañados.
- No usar agua destilada a alta presión.
- No utilizar instrumentos metálicos ni agentes abrasivos (detergentes).



\*Fuente: Conermex/efecto de las sombras en paneles solares

Fig. 3. Sombra de árboles proyectada en paneles FV.

##### 2) Revisión del entorno en los paneles

Para un buen rendimiento de los módulos FV se debe evitar que los objetos en el entorno produzcan sombra sobre ellos, como se ejemplifica en la Fig. 3. La sombra no sólo disminuye la generación de energía, sino que también puede ocasionar que los módulos se sobrecalienten, acortando su vida útil. La operación de revisión del entorno la puede realizar también el usuario una vez por mes con el fin de evitar el fenómeno de los puntos calientes.





### 3) Observar la temperatura del panel

Al tener una mala distribución uniforme del calor, las células se sobrecalientan afectando la vida útil del panel. Así, el uso de la termografía infrarroja resulta ser indispensable para conocer si un punto del panel está fuera del rango de temperatura permitido por el fabricante.

### 4) Observar existencia de sulfatación de contactos, degradación del laminado y soldadura de las células

La degradación del laminado, sulfatación de contactos y la soldadura de las células afectan no sólo la intensidad de energía solar sino que puede desencadenar corrosión y una serie de fallas internas. La exposición del laminado a la intemperie genera un envejecimiento del panel, que algunas veces está acompañado por la decoloración entre amarillo y marrón.

### 5) Observar existencia de roturas en las células

Puede ser causado por estrés mecánico o térmico sobre la celda durante la fabricación, transporte, instalación o por condiciones ambientales como el viento. Es importante identificarlas e informar al fabricante de su existencia, pues siempre está el riesgo que aumenten su tamaño y generen, en el futuro, una reducción del rendimiento. Esta inspección, de carácter visual, la puede realizar un operador pertinente.

### 6) Comprobación de estado y adherencia de los cables a los terminales de los paneles

Un cableado bajo las normas vigentes minimiza el riesgo de fallas. Por ello, es importante revisar el cableado que está expuesto a la intemperie para identificar roturas en el aislamiento, lo que puede llevar a fallas tales como: arco eléctrico e incendio. Esta comprobación la puede, el usuario, realizar mensualmente y la empresa de manera bianual.

La conexión de conectores al cable debe ser efectuado por el personal competente con herramientas adecuadas y según las instrucciones del fabricante.

## *B. Inversores:*

### 1) Lectura de datos archivados y de la memoria de fallos

La lectura de datos se extrae de manera inalámbrica por lo que no posee un grado de peligrosidad en la maniobra. Los registros ayudarán a monitorear cuál fue la producción diaria por cada inversor y además, saber qué factor es el relacionado a las fallas implicadas en el sistema.

### 2) Comprobar que el Electronic Solar Switch no presente señales de desgaste

Cuando se realiza la apertura reiterada del inversor, se produce un desgaste en las lengüetas metálicas o un daño permanente en el contacto, afectando su funcionamiento. En el caso de evidenciar este tipo de desperfecto, se sugiere cambiar dicho elemento a la brevedad.

### 3) Comprobar la disipación de calor

Cuando el inversor sufre un sobrecalentamiento, su potencia activa se ve reducida. Esto puede deberse:



- A que las rejillas de ventilación de los laterales están obturadas con suciedad.
- A que uno de los ventiladores está bloqueado.

#### 4) Comprobar que el protector de sobretensión no presente fallas

Un protector de sobretensión regula la diferencia de potencial que se aplica a un dispositivo eléctrico bloqueando o enviando a tierra las tensiones superiores a un umbral seguro. Para realizar la comprobación del protector se debe observar la etiqueta rotulada en el dispositivo, donde una línea de color verde indica un correcto estado y una línea de color rojo indica un estado de avería.

#### 5) Comprobar el correcto funcionamiento de los varistores

Los varistores son piezas de desgaste cuya funcionalidad va disminuyendo con el tiempo o a causa de repetidos esfuerzos por sobretensiones. Es posible que uno de los varistores con control térmico haya perdido su función protectora.

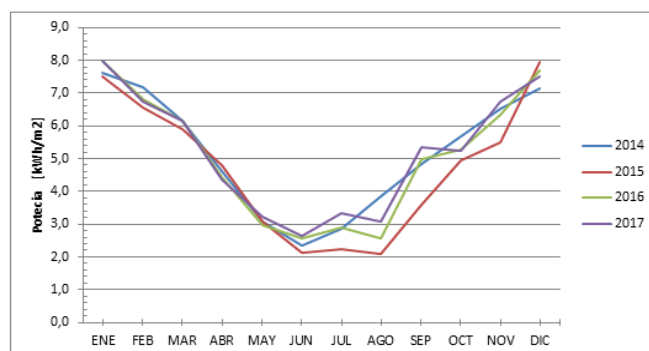
#### C. Estructura de montaje:

Si el montaje no corresponde a estructuras de aluminio, se sugiere revisar regularmente los elementos (tornillos, fijaciones, bandejas, soportes, etc.) con la finalidad de detectar problemas de corrosión e iniciar las contramedidas pertinentes.

## 5. Resultados y discusión

### A. Irradiación solar incidida

Los datos de irradiación incididas sobre la planta son proporcionados diaria y mensualmente por la compañía SolarGis. Los registros que se observan en la Fig. 4 indican una tendencia homogénea en los mismos períodos mensuales con respecto a los años 2014 hasta el 2017 variando los indicadores de potencia en una mínima cantidad en el primer semestre no así el segundo.

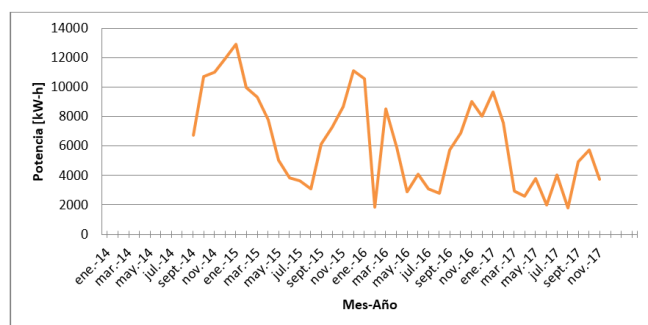


\*Fuente: Elaboración propia, datos proporcionados por Tesla Energy, 2017.

Fig. 4. Irradiación incidente mensual sobre las Celdas FV.

Las mayores lecturas anuales se presentan en el mes de enero con un promedio de 7,77 kWh/m<sup>2</sup> durante los 4 años. Por otro lado, la menor lectura de insolación predomina en el mes de Junio con un promedio de irradiación de 2,42 kW/m<sup>2</sup>.





\*Fuente: Elaboración propia, datos proporcionados por Tesla Energy, 2017.

Fig. 5. Data histórica de generación FV mensualmente.

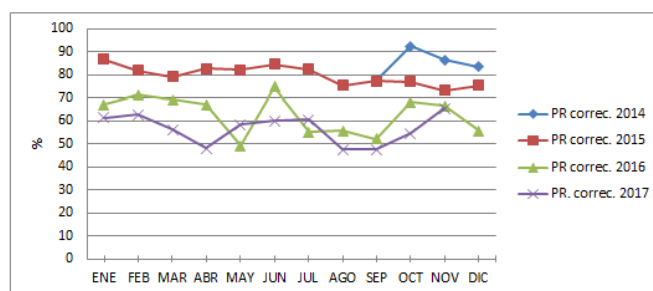
### B. Generación de Energía

La mayor alza de producción anual de energía, entre los años 2014 y 2017 (véase Fig. 5), se encuentra entre los meses de octubre y marzo. El punto de máxima generación se alcanza en el solsticio de verano (Diciembre-Enero) y el de menor producción se produce en el mes de agosto, esto debido a que los paneles se ensucian más producto del polvo en suspensión.

### C. Performance Ratio de la Instalación

La definición de performance ratio (PR) expresa la relación del rendimiento energético real con respecto al rendimiento energético nominal, a partir de esto se puede cuantificar el PR según los resultados obtenidos por generación e irradiación.

El PR mensual, considera un factor de corrección por temperatura ( $PR_{FC}$ ), ya que resulta más fidedigno para el rendimiento real del sistema, debido a que el cálculo depende de la temperatura de los módulos en las distintas estaciones del año.



\*Fuente: Elaboración propia, datos proporcionados por Tesla Energy, 2017.

Fig. 6. Rendimiento mensual con factor de corrección.

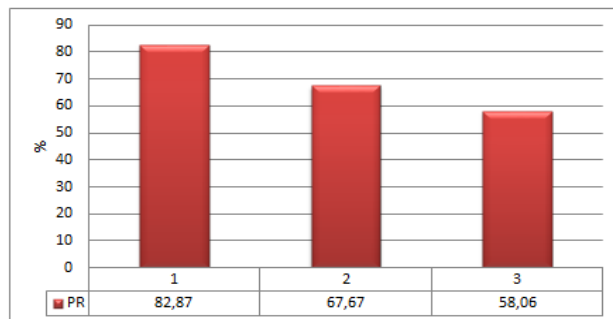
Los últimos 3 meses de operación del año 2014 presentan un buen rendimiento del PR, Fig. 6.

En el año 2015, se presenta un PR con leves variaciones, pero decayendo su porcentaje sutilmente. Para el año 2016, se observa una alteración drástica en el mes de mayo hasta el mes de octubre debido a la suciedad alojada en los módulos.

Por último, en el año 2017 el PR es bastante bajo e inestable, ya que el sistema sufrió bastantes interrupciones; además, de otras causantes como suciedad, sombras en los paneles, etc.



Por lo anterior, se puede observar que el primer año de funcionamiento del sistema presenta un rendimiento de un 82,87%, Fig. 7, evidenciando una eficiencia relativa del sistema. Sin embargo, este reduce su PR a un 16,27%, año a año.



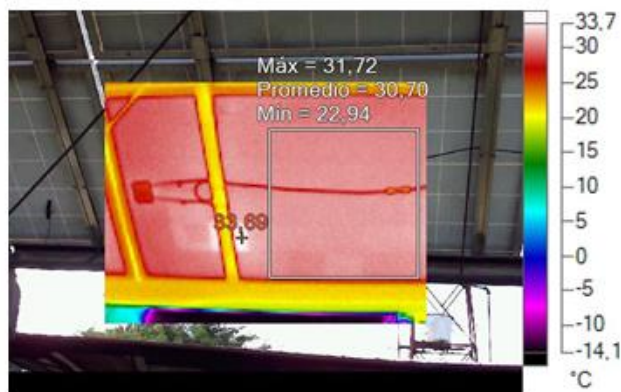
\*Fuente: Elaboración propia, datos proporcionados por Tesla Energy, 2017.

Fig. 7. Rendimiento en relación a los años de uso.

#### D. Generación de procedimiento

##### 6) Termografía realizada en el sistema

La inspección con el uso de la cámara termográfica tiene como propósito identificar la existencia de Hot Spot (HS) en las celdas fotovoltaicas; además, de determinar cuándo y dónde se necesita el recambio de módulo o identificar a largo plazo los posibles paneles con HS.



\*Fuente: Elaboración propia, marzo 2018.

Fig. 8. Termografía con leves grados de HS.

En la instalación se observó un total de 4 paneles con HS, la diferencia de temperatura de estos módulos varía en un rango de 3 grados. Se observó que sólo una celda tiene mayor temperatura en relación a la temperatura dominante en el módulo, Fig. 8.

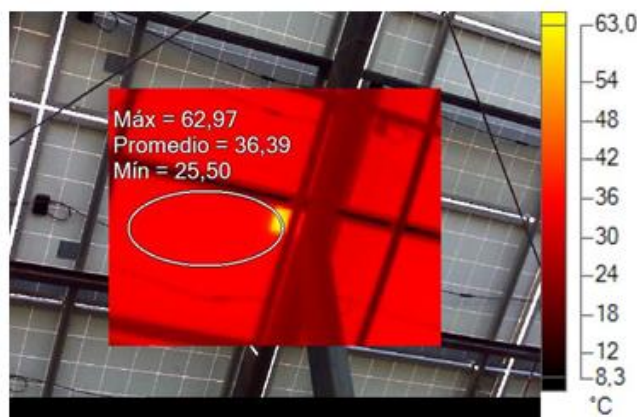
Además, se identificaron dos módulos con una gran área de HS y una distribución variable de temperatura en las celdas, Fig. 9, estos paneles tendrán un rendimiento menor de producción y una vida útil reducida.



\*Fuente: Elaboración propia, Marzo 2018

Fig. 9. Termografía con varios HS y distribución variada de temperatura.

El panel con mayor temperatura de HS, tiene una temperatura de 62,97°C, en relación al promedio del panel (36,39°C). Esta condición, a largo plazo, podría generar un incendio en el módulo, lo que hace necesario el recambio del panel por otro de igual especificación técnica Fig. 10.



\*Fuente: Elaboración propia, Marzo 2018.

Fig. 10. Termografía con HS crítico en posición E10.

### 7) Rendimiento del Inversor

Los inversores SMA Sunny Tripower 17000TL presentan un excelente factor de potencia debido al sistema de control en su relé multifunción manteniendo estable la corriente, tensión y frecuencia, de acuerdo a la Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio, y la Norma NCh Elec 4/2003.

En cuanto al rendimiento del inversor este no presenta ningún déficit, logrando un rendimiento promedio de 97,98% entre los 4 inversores, arrojando un valor muy similar, al indicado por el fabricante que es alrededor de un 97%.

### 8) Curva I-V

Las curvas I-V siempre muestran una ligera pendiente en la parte horizontal, causada por la corriente de fuga que fluye a través de la unión semiconductor del material cristalino.

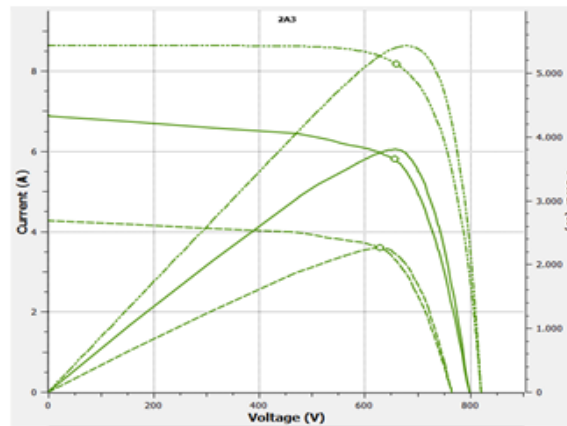


Cuanto menor sea la corriente de fuga mayor será su resistencia shunt; sin embargo, la resistencia shunt disminuye a medida que los módulos envejecen.

Otros factores que influyen sobre la curva I-V, son los siguientes:

- ❖ Degradación del módulo, pardeamiento del encapsulado, delaminación y/o fallos del diodo de derivación, estos efectos reducen la magnitud de la corriente de cortocircuito en la curva I-V.
- ❖ Diodos de derivación cortocircuitados o degradación inducida potencial (PID), estos eventos reducen la tensión en circuito abierto.

Al realizar las medidas en el bloque 2 del string A3, las condiciones ambientales presentan una irradiación de 617,9 [W/m<sup>2</sup>], una temperatura ambiente de 23,89°C y una temperatura del panel de 31,84°C. En la Fig. 11 se visualiza la curva con un PR de 67,97% dejando en evidencia una disminución significativa de la potencia. Por otro lado, se presenta un FF de un 68,96% indicando una degradación celular en el panel.



\*Fuente: Elaboración propia, marzo 2018.

Fig. 11. Curva I-V realizada en String A3 del inversor 2.

El porcentaje de la corriente de máxima potencia en relación a la corriente de cortocircuito tiene un valor de 83,92%, indicando una alta corriente de fuga (menor  $R_{SH}$ ). Por otro lado, la relación de corriente de cortocircuito ajustada a las condiciones nominales es de un 80,19% lo que implica una pérdida de flujo de corriente. Estas disminuciones, respecto a las corrientes, son debidas a la delaminación y a la degradación del panel.

Al analizar la relación de tensión de circuito abierto ajustado a las condiciones estándar con respecto a la nominal, esta arroja un porcentaje de 97,35%. Esta disminución de 2,65%, se debe al PID por efectos de humedad y variadas temperaturas del módulo.

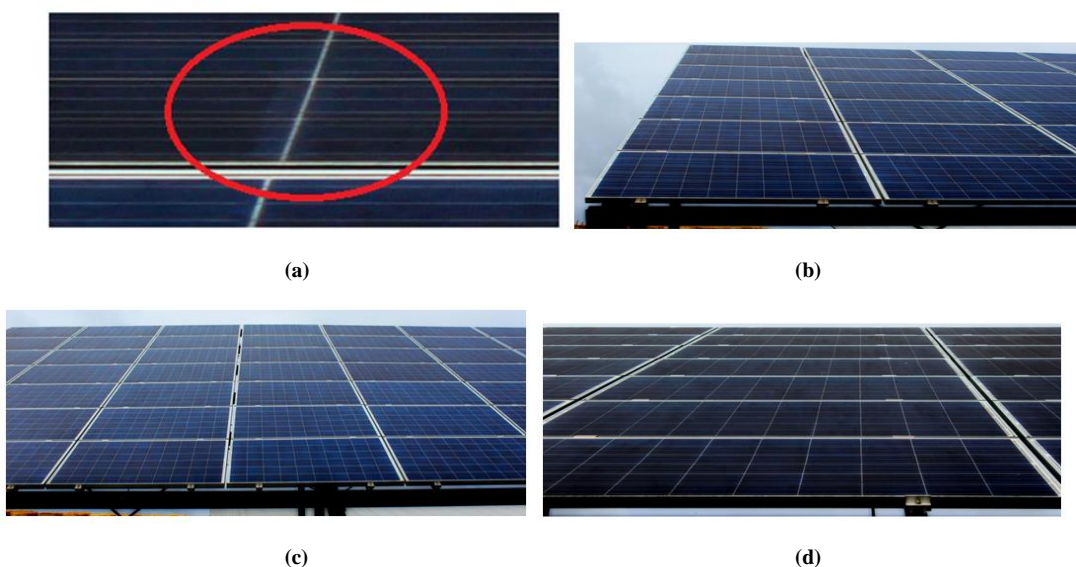
En relación al delaminado, los paneles que presentan una delaminación bastante notoria se encuentran en la esquina inferior derecha de la estructura Fig. 12 formado por 6 paneles.



\*Fuente: Elaboración propia, marzo 2018.

Fig. 12. Delaminación crítica en sistema FV.

Por otro lado, la delaminación que presentan los otros paneles es leve, pero bastante abrasiva en varios puntos sobre el módulo. Las delaminaciones leves presentan una tonalidad más clara como se observa en la Fig. 13 (a), estas delaminaciones serán más notorias e irán incrementando su grado en el transcurso del tiempo.



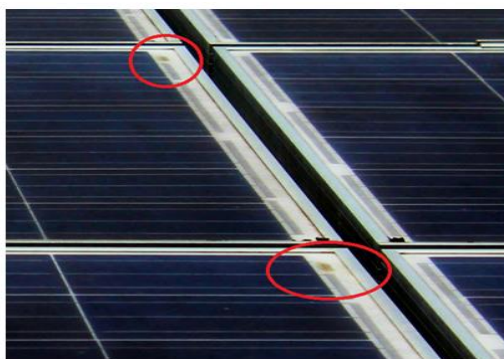
\*Fuente: Elaboración propia, Marzo 2018

Fig. 13. Delaminación leve en sistema FV.

Esta anomalía como se mencionó antes, se presenta en todos los paneles de diversas magnitudes y en distinta distribución; tal como se muestra en las Fig. 13 (c) – (d).

Esta delaminación leve como se mencionó en los análisis de las curvas, es debida a la humedad y temperaturas variables. Además, en los paneles se observaron ligeros indicios de corrosión en componentes de conducción eléctrica ubicados en las esquinas superiores del módulo (lado positivo del panel) Fig. 14. La corrosión no es tan significativa a la hora de considerar el rendimiento, ya que los puntos de corrosión no son tan abrasivos en los módulos, pero a largo plazo se presentarán en mayor magnitud.



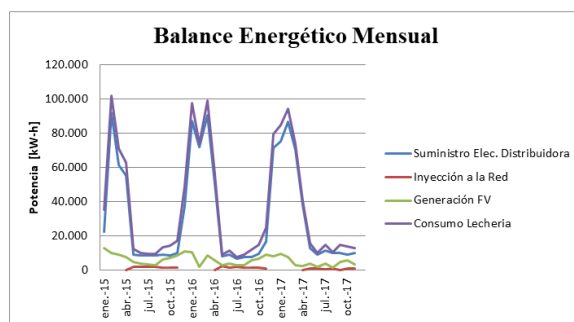


\*Fuente: Elaboración propia, Marzo 2018.

Fig. 14. Corrosión en componentes de conducción eléctrica.

### E. Balance Energético en la Instalación

El balance energético de la instalación se constituye en un marco contable que integra la información estadística de los consumos, inyección a la red, generación y suministro eléctrico por parte de la distribuidora.



\*Fuente: Elaboración propia, datos proporcionados por Tesla Energy, 2017.

Fig. 15. Balance Energético mensual.

En relación al balance energético mensual de la instalación de Angol, se observa un alza de potencia activa en el consumo de lechería año a año. Esta alza comienza en el mes de noviembre y finaliza en el mes de marzo alcanzando una potencia promedio de 57.440 kW. Esto se debe a la utilización de los sistemas de regadío en la época de verano; sin embargo, en los meses lluviosos (abril a octubre) se tiene una potencia promedio de 14.747 kW Fig. 15.

### F. Sistema Tarifario

#### 9) Verificación del correcto pago por inyecciones

Para verificar los precios de la valorización por inyección se considera el precio total calculado v/s el precio cobrado. De esto se puede concluir que la empresa distribuidora de energía eléctrica (Frontel) efectuó un correcto pago por inyección a pesar de existir pequeñas fluctuaciones entre los valores informados en los meses de octubre 2016, julio 2017 y noviembre 2017.

#### 10) Opciones tarifarias para la instalación

El cálculo de las tarifas eléctricas se realiza para verificar e informar al cliente si el tarifado que posee la instalación es la conveniente.

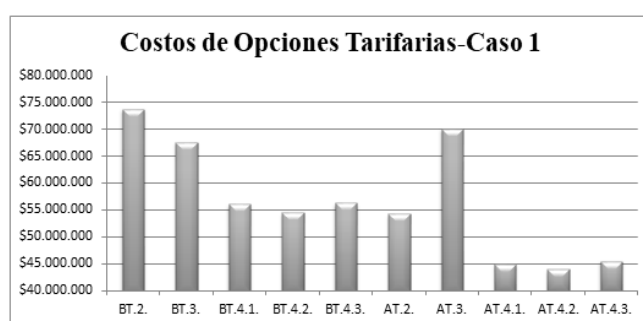


El análisis tarifario efectuado se hizo en relación a las facturas históricas de los años 2015 hasta noviembre de 2017 considerando 2 situaciones:

- ❖ Potencia instalada igual a la conectada (150kW).
- ❖ Con mayor potencia instalada (185kW).

a) *Opción 1*

En relación a los valores de potencia utilizada en el cálculo, se tiene una potencia contratada fuera de hora de punta igual a 150kW y una potencia contratada en hora punta de 55kW. Los resultados de la simulación de tarifas eléctricas se muestran en la Fig. 16, e indican que la opción tarifaria más adecuada para la lechería es la AT.4-2 con un costo anual de aproximadamente 44.5 millones de pesos chilenos (US\$65493), que implica un ahorro respecto de la actual tarifa AT.4-3 de \$1,506,570 pesos chilenos (US\$2250).

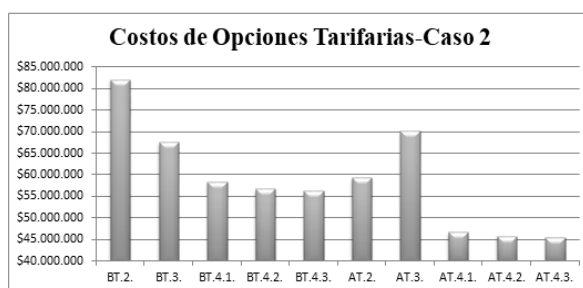


\*Fuente: Elaboración propia, datos proporcionados por Tesla Energy y Frontel, 2017.

Fig. 16. Costos relacionados para las diferentes opciones tarifarias.

b) *Opción 2*

En la opción 2 se consideró una potencia conectada de 185 kW puesto que la máxima potencia leída a lo largo de los años fue de 184,9 kW evidenciando un aumento notable en potencia inscrita en la SEC debido a un recambio de maquinarias o sobrecarga en las máquinas. Además, se considera una potencia contratada en hora punta de 55kW. Los resultados de la simulación de tarifas se muestran en la Fig. 17, e indican que la opción tarifaria más adecuada para la lechería es la AT.4-3 con un costo anual de aproximadamente 45.9 millones de pesos (US\$ 66522), que implica un diferencia respecto a la AT.4-2 de \$305.155 pesos, unos US\$456 dólares americanos.



\*Fuente: Elaboración propia, datos proporcionados por Tesla Energy y Frontel, 2017.

Fig. 17. Costos relacionados para las diferentes opciones tarifarias caso 2





## **6. Conclusiones**

El bajo rendimiento del sistema fotovoltaico se debe principalmente al delaminado y a la prominente degradación del panel sufrido durante sus 4 años de uso.

Cabe mencionar, que un factor importante a la hora de cuantificar el rendimiento, es el factor de suciedad, ya que éste reduce considerablemente la captación de insolación incidente en los módulos. Por lo anterior, se recomienda a la empresa ejecutar el plan de mantenimiento preventivo propuesto, con el fin de mantener el sistema óptimo en todo momento. Finalmente, los String que presentan un rendimiento mayor al 90% (valor que asegura el fabricante dentro de los 12 años) son los paneles ubicados en 1-A2 y 1-A3 con una media de un 97,14%, mientras que el resto de los paneles tienen en promedio un PR de 64,59%.

Este rendimiento deficiente, hace exigible el cobro de la garantía de los paneles por sobrepasar el 10% de pérdidas garantizado por el fabricante Jiangyin Hareon Power S.A.

## **7. Referencias bibliográficas**

- [1] SMA SUNNY TRIPOWER 17000TL, Inversor Fotovoltaico, Instrucción de Instalación, Versión 3.2.
- [2] Ministerio de Energía, "Guía de Operación y Mantenimiento de Sistemas Fotovoltaicos", República de Chile, 2016.
- [3] National Renewable Energy Laboratory, "Weather –Corrected Performance Ratio", Technical Report, April 2013.
- [4] Alejandra Molina y Francisco Martínez, "Modelo de Generación Fotovoltaica", Explorador Solar, Marzo 2017.
- [5] B.Shiva and K. Sudhakar, "Performance evaluation of 10MW grid connected solar photovoltaic power plant in India", Energy Reports, May 2017.
- [6] D.L. King, W.E. Boyson and J.A. Kratochvill, "Photovoltaic Array Performance Model", Sandia National Laboratories, December 2004.
- [7] Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción - Subsecretaría de Economía, Fomento y Reconstrucción, "Decreto Supremo N° 276", República de Chile, Noviembre 2004.
- [8] IEC 61724, "Photovoltaic system performance monitoring - Guidelines for measurement, data exchange and", 1998.
- [9] Adrián Sánchez, "Estudio de viabilidad de una instalación fotovoltaica para una vivienda unifamiliar situada en Cabo de Palos", Tesis Master, Cartagena, Colombia. Diciembre 2014.
- [10] Grupo Saesa, "Opciones Tarifarias", "Tarifas de Suministro Eléctrico".
- [11] National Technology and Engineering Solutions of Sandia, "PVPerformance Modeling Collaborative", 2018.