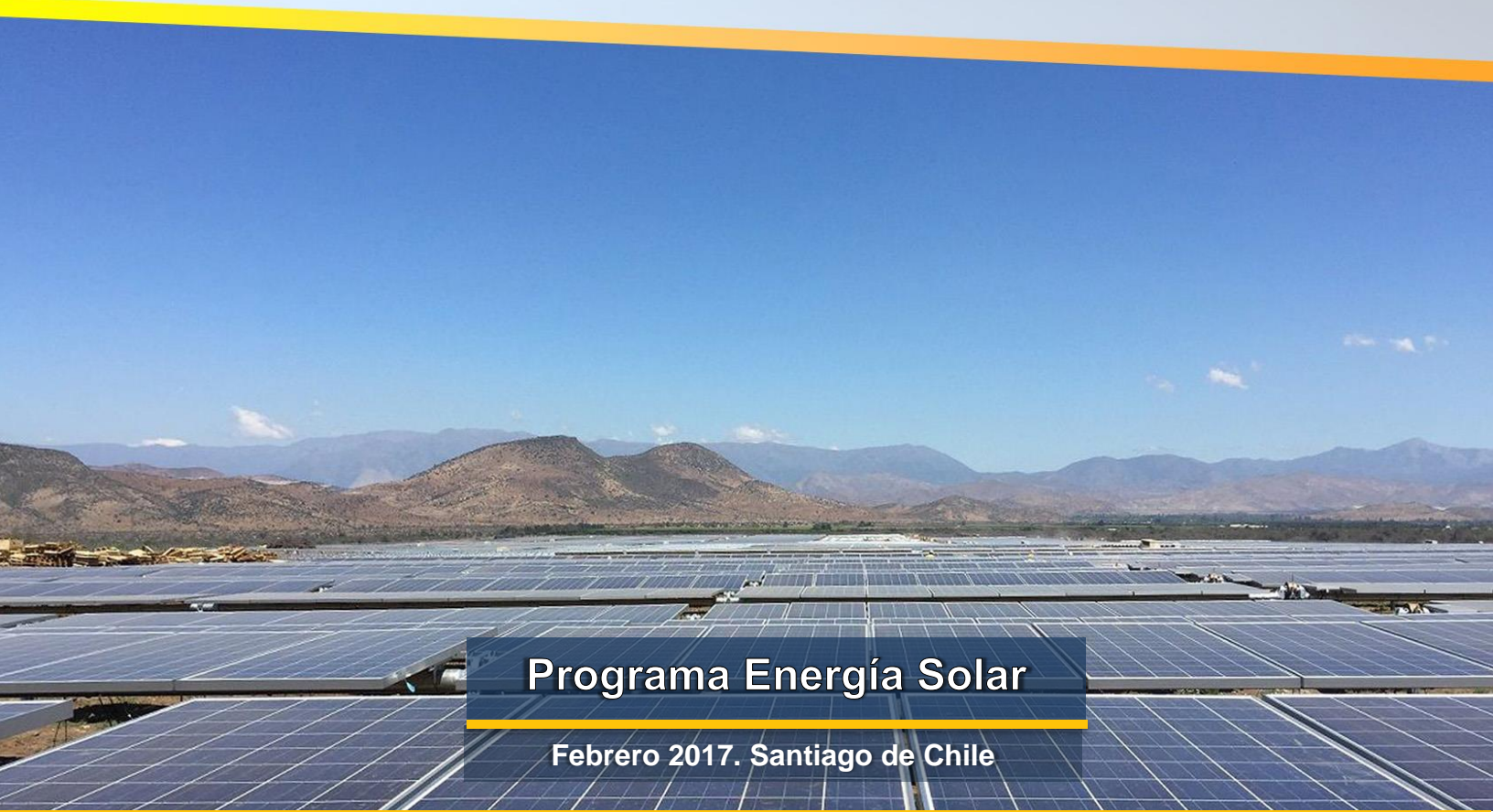


# Estudio Benchmarking de Plantas Solares Fotovoltaicas en Chile



Programa Energía Solar

Febrero 2017. Santiago de Chile



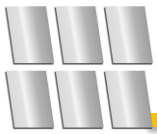
COMITÉCORFO



PROGRAMA  
ENERGÍA SOLAR

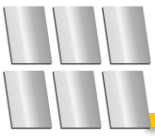
Desarrollado por





## Indice

1. Resumen Ejecutivo .....	3
2. Introducción.....	5
3. Marco Conceptual .....	6
4. Política de Confidencialidad (Antitrust) .....	12
5. Empresas participantes .....	13
6. Alcances del estudio .....	16
7. Metodología .....	17
7.1 Levantamiento de Requerimientos .....	17
7.2 Construcción del Cuestionario .....	18
7.3 Recopilación de Información .....	18
7.4 Procesamiento de la Información.....	18
7.5 Confección de Informes .....	18
7.6 Entrega y discusión de resultados .....	19
8. Descripción de las fuentes de información .....	20
8.1 Elaboración del instrumento de medición .....	20
8.2 Selección de empresas participantes .....	21
9. Desarrollo del estudio .....	22
9.1 Antecedentes Generales.....	22
9.2 Planta Fotovoltaica.....	23
9.3 Subestación Elevadora y Línea de Transmisión.....	41
10. Propuesta de medidas preventivas y de mitigación para distintos tipos de fallas.....	45
11. Identificación, definición y propuesta metodología para realizar un análisis periódico de indicadores de operación y mantención de plantas solares fotovoltaicas .....	49
11.1 Alcance y Periodicidad:.....	49
11.2 Metodología.....	49
12. Bibliografía, fuentes .....	53
13. Anexo .....	54



## 1. Resumen Ejecutivo

Chile ha demostrado gran potencial en el desarrollo de Energías Renovables en Latinoamérica y en el mundo por sus características geográficas y climáticas. Principalmente se destaca en la generación de energía solar, ya que posee la radiación más alta del planeta, lo cual hace muy atractiva la inversión en plantas solares fotovoltaicas en el país. Sin embargo las tecnologías ocupadas en la implementación de estas plantas se ajustan a realidades distintas a las climáticas y geográficas de Chile.

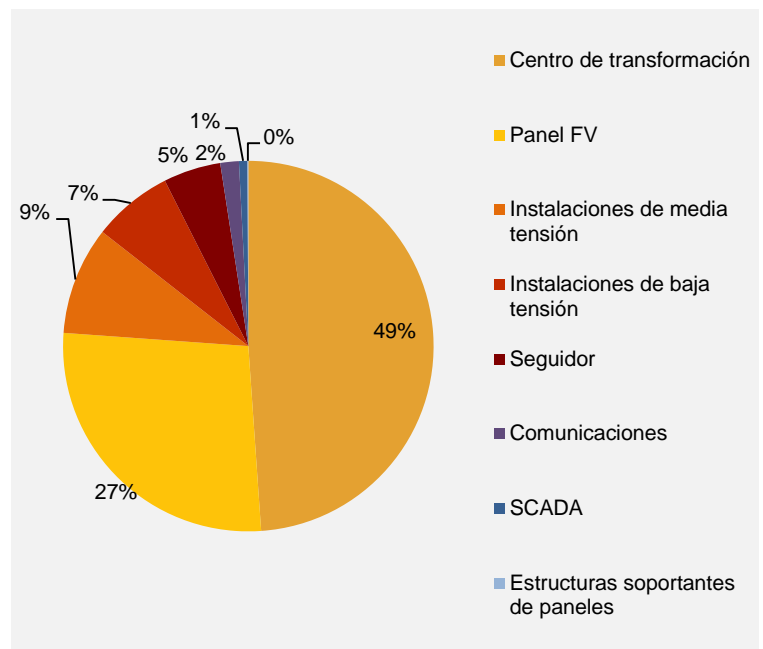
Este hecho impulso al Programa Energía Solar a presentar el desafío de realizar un levantamiento de aspectos técnicos y operacionales, específicamente enfocado en tipos y tasas de falla de plantas solares fotovoltaicas en Chile. Se consideró una muestra que logró abarcar el 42% de la potencial total del país, que suman un total de 585 MW instalados.

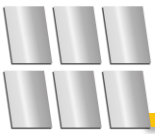
El estudio se basó en un modelo metodológico de benchmarking adaptado a los requerimientos específicos del mandante. En primera instancia, se hizo un levantamiento de los requerimientos en donde se definió los objetivos del estudio y las empresas participantes. Se construyó un cuestionario como herramienta de recopilación de información, el cual fue utilizado en las entrevistas presenciales con cada uno de las empresas participantes. Se procesó y validó la información para la obtención de los resultados, los que fueron finalmente incluidos en un informe final.

El estudio se separó en dos grandes capítulos que son: Planta Fotovoltaica y Subestación Elevadora con Líneas de Transmisión. La muestra indicó que las Plantas Fotovoltaicas tienen la mayor cantidad de fallas con un 95% de ellas.

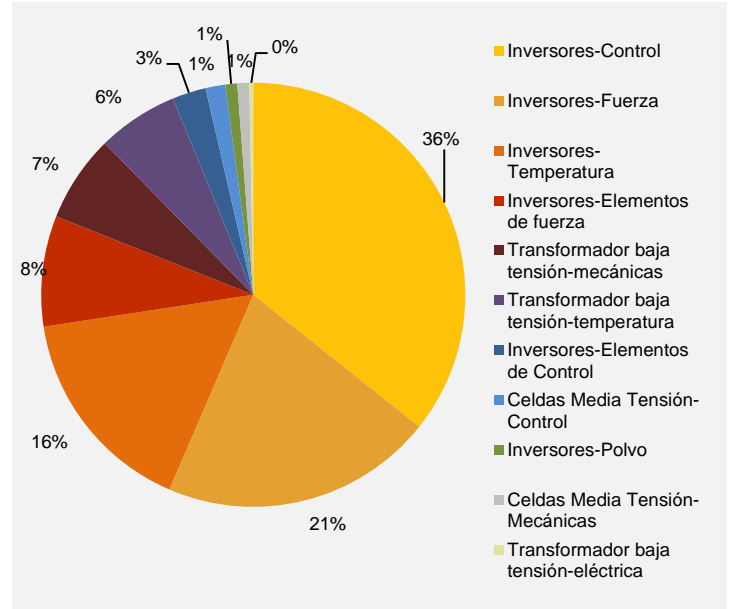
Como resultado del estudio de benchmarking se observó que un 49% de las fallas obtenidas proviene de los centros de transformación, seguido por los paneles fotovoltaicos con un 27%.

Dentro de los centros de transformación, la muestra indica que hay una media de 7,69 fallas/mes, y es el inversor de potencia el elemento que ha presentado una mayor cantidad de problemas, especialmente en lado control, lado fuerza y en el exceso de temperatura. A diferencia de otras secciones de la planta, las fallas en los centros de

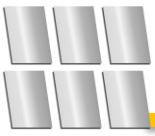




transformación son más trascendentes debido a la importancia de un inversor en la planta, que representan aproximadamente un MW de producción. De acuerdo a los datos revelados, todas estas fallas, obedecen a problemas inherentes a los mismos equipos, es decir, a fallas del fabricante, ya sea por firmware, programación de inversores, componentes o elementos con fallas de fabricación y/o instalación. La manera de erradicar estas fallas es realizar un trabajo de análisis de causa raíz en conjunto con los fabricantes, para que ellos puedan hacer los ajustes necesarios.



El estudio es el primer paso para entrar en un proceso de análisis periódico, no sólo de los tipos y tasas de fallos, sino también de indicadores de gestión, operación y mantención que puedan ser comparables con estándares de mejores prácticas. Se contempla la participación de plantas fotovoltaicas de Chile para que puedan realizar de manera periódica y permanente en el tiempo, un estudio que permitirá ir analizando el envejecimiento de las plantas.



## 2. Introducción

Chile ha demostrado gran potencial en el desarrollo de Energías Renovables en Latinoamérica y en el mundo por sus características geográficas y climáticas. Principalmente se destaca en la generación de energía solar, ya que posee la radiación más alta del planeta, lo cual hace muy atractiva la inversión en plantas solares fotovoltaicas en el país.

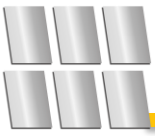
A pesar de las características favorables y de la gran inversión que se está realizando, existe preocupación respecto a las tecnologías ocupadas en la implementación de estas plantas en el Desierto de Atacama. Esto se debe a que los diseños y materiales utilizados se ajustan a realidades distintas, con otras características climáticas y geográficas, diferencias que pueden provocar impacto en la duración y rendimiento de las instalaciones, afectando la evaluación económica del proyecto, su financiamiento y por lo tanto impactar negativamente las potenciales inversiones.

Lo mencionado anteriormente es la principal razón que ha incentivado la realización de este estudio, cuyo objetivo es identificar los aspectos técnicos y operacionales de tipos y tasas de fallas de plantas fotovoltaicas; principalmente para identificar las causales de falla más recurrentes, las medidas preventivas y de mitigación más adecuadas.

Este estudio muestra:

- Mediante tablas y gráficos la clasificación de los tipos de fallas y obtención de tasas de fallas por cada componente de la planta.
- Medidas preventivas y de mitigación para cada uno de los tipos de falla identificados.
- Propuesta metodológica sobre un estudio periódico que muestre indicadores de interés identificados en estudio.

El presente estudio será entregado a todas las empresas participantes, resguardando las políticas de confidencialidad y la legislación internacional de antitrust.



### 3. Marco Conceptual

#### Generación Fotovoltaica de gran escala

El despliegue de plantas de tecnología solar fotovoltaica en Chile ha tenido un dinamismo disruptivo en los últimos 10 años. La celeridad de su incorporación al sistema eléctrico chileno, ha sorprendido a todos los actores del mercado, desarrolladores, proveedores e inversionistas. Si bien en una primera etapa, fue relevante la constitución de un marco de promoción de inversiones y de obligaciones legales que motivaran la incorporación de Energías Renovables No Convencionales (ERNC), en los últimos años ha sido cada vez más influyente la competencia dentro de la industria de desarrollo nacional que adoptó la tecnología solar fotovoltaica (cada vez más económica) para su despliegue acelerado. Este fenómeno corresponde a una situación global y no acotada a Chile, las condiciones de nuestro país para la inversión son suficientemente atractivas como para reflejar el crecimiento de la industria solar fotovoltaica.

En el año 2008, Chile promulgó la ley 20.257, la que estableció una obligación a partir del 2010 de participación de ERNC en los retiros del sistema eléctrico<sup>1</sup>, contemplando un incremento desde 5% al 2014 hasta 10% al 2024. La motivación principal de dicha ley fue diversificar las fuentes de suministro, con el fin de mejorar la seguridad energética del país, reducir el costo de suministro, y lograr un mix energético bajo en emisiones de CO<sub>2</sub>. Esta política no modificó el carácter neutral del marco regulatorio, ni tampoco se basó en subsidios a la inversión como lo estaban realizando algunos países a esa fecha. Junto con esto y desde 2007, CORFO puso a disposición fondos para el fomento de la energía solar, a través de sucesivos concursos para cofinanciar estudios de pre-inversión y crear una cartera de desarrollo de proyectos, además de asignar créditos blandos gracias al aporte de bancos extranjeros.

En esa etapa embrionaria de la industria, algunas empresas mineras como Codelco, Collahuasi y Antofagasta Minerals, participaron en la comercialización de las primeras plantas conectadas a la red. De este modo, se forjaría una relación simbiótica entre el ecosistema energía solar y la industria minera, que hasta hoy sigue presente.

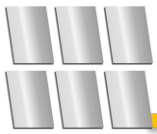
Ya durante el 2013 y comenzando el 2014, entran en combinación una serie de factores que acelerarían el despliegue de la energía solar fotovoltaica en Chile. Primero, se duplica la aspiración establecida inicialmente por la ley 20.257, mediante la aprobación de la Ley 20.698 (o ley 20/25) que incrementa la meta de ERNC para llegar a un 20% al 2025<sup>2</sup>. Segundo, la tecnología solar fotovoltaica visibiliza una abrupta caída en sus costos (desde un LCOE de 350 US\$/MWh al 2009 hasta una cota inferior de 49 US\$/MWh para el 2016, según el informe de Lazard)<sup>3</sup>, lo que redundaría en que los desarrolladores

<sup>1</sup> Sólo aplicable para los retiros afectos, esto es, excluyendo los contratos con clientes regulados de parte de las empresas distribuidoras.

<sup>2</sup> A la fecha (febrero 2017), la obligación de la ley 20.698 es ampliamente superada por la inyección reconocida de ERNC.

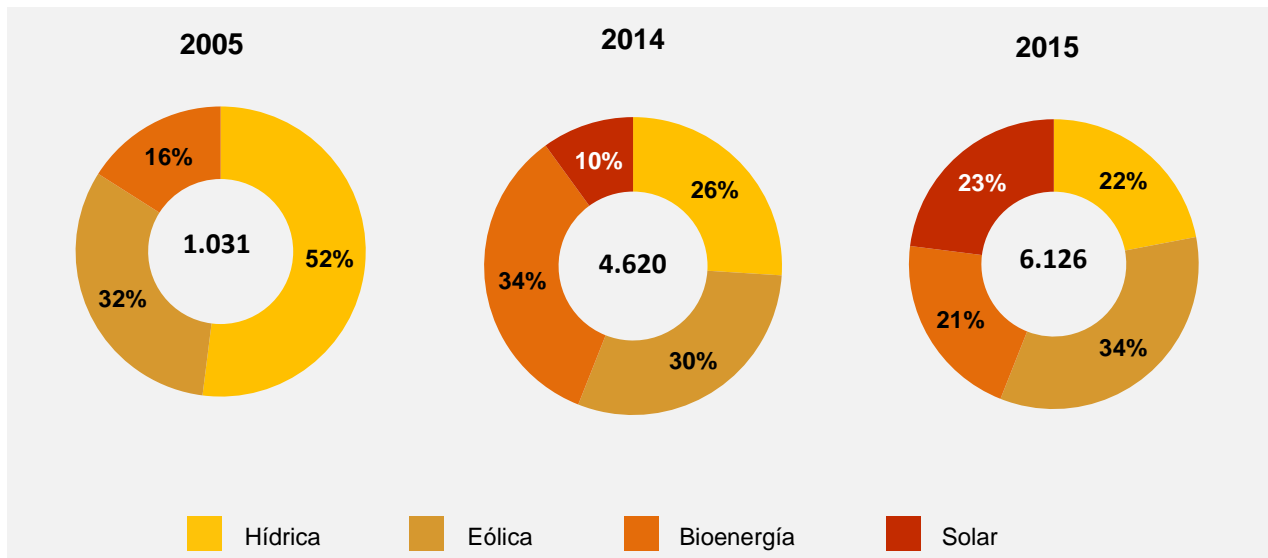
<sup>3</sup> Fuente: <https://www.lazard.com/media/438038/levelized-cost-of-energy-v100.pdf>





empiecen a considerar esta tecnología como interesante para capitalizar el potencial de radiación que tiene el país. Tercero, y más importante, se genera un apetito por invertir y financiar proyectos al mercado spot, para aprovechar el alza de precios asociada a una expectativa de demanda proveniente del sector minero. Así a fines del 2014, la potencia instalada en el país de energía solar fotovoltaica llegó a 220.75 MW. Destacan en esta etapa el proyecto Luz del Norte de First Solar (141 MW) y el proyecto Amanecer Solar de CAP/SunEdison (100 MW). Dichas iniciativas, así como otros proyectos fotovoltaicos en operación, son fruto de una industria financiera local que ha podido aprender rápido las características y riesgos de estos proyectos, como también de instituciones financieras internacionales como la Overseas Private Investment Corporation (OPIC) y el IFC (del Banco Mundial). La Figura 1 demuestra la evolución de la energía solar fotovoltaica en la participación de ERNC en el sistema eléctrico chileno, reflejando una incorporación acelerada desde el 2014 que permitió superar la participación de la energía hidroeléctrica de pequeña escala al 2015.

Figura 1: Participación de tecnologías ERNC en inyecciones asociadas a Ley 20.257 (fuente: CNE, CIFES)



El último gran cambio regulatorio, que terminó por abrir el mercado a la participación de la generación solar fotovoltaica, fueron las modificaciones a los términos de licitación de suministro eléctrico para clientes regulados a fines del 2014. Esta habilitó ofertas en bloques horarios, que calzan con la disponibilidad del recurso solar. El 2014 se lanzó el segundo llamado del proceso de licitación 2013/03 para clientes regulados del SIC que estrenó este mecanismo. Luego se replicó en la convocatoria 2015/02 y 2015/01. La siguiente tabla resume los precios mínimos ofertados para el bloque coincidente con las horas de sol, de modo de ilustrar la baja abrupta en las propuestas económicas de energía solar:

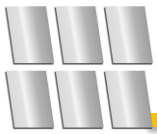


Tabla 1: Precios mínimos ofertados en bloque día para licitación de distribuidora (fuente: CNE)

Año de la presentación de ofertas	2014	2015	2016
Nombre de la convocatoria	2013/03-2	2015/02	2015/01
Precio más competitivo para bloque diurno (US\$/MWh)	79,9	64,9	29,1
Volumen adjudicado (GWh/año)	120	110	280
Año inicio de suministro	2016	2017	2021
Empresa adjudicada	Santiago Solar S.A. (hoy de propiedad EdF)	SolarPack	SolarPack

Es relevante indicar que en los últimos años las convocatorias han logrado converger las ofertas a precios cada vez más bajos. Por ejemplo, en la convocatoria 2015/01, 4 de las ofertas presentadas para el bloque horario solar estuvieron bajo los 30 US\$/MWh. Dicha circunstancia ilustra lo competitivo de la tecnología a la fecha.

A enero 2017 la capacidad total instalada de energía solar fotovoltaica (1,6 GW) constituye un 7% de la capacidad instalada del país (23 GW). Por otra parte, la expectativa de crecimiento del parque de generación solar fotovoltaico para el corto plazo queda señalizado por los proyectos en construcción (792 MW), los proyectos con RCA aprobada (14.058 MW) y aquellos proyectos en calificación ambiental (5.159 MW). Si bien a diciembre 2016 los proyectos solares declarados en construcción pronosticaban una entrada en operación durante 2017 y no más allá de este año, es importante destacar que esta tecnología es muy rápida de instalación, por lo que no es necesario declarar su construcción con tanta anticipación (para proyectos con operación 2018 y posterior). (Fuente Ministerio de Energía).



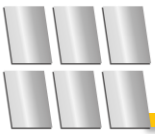
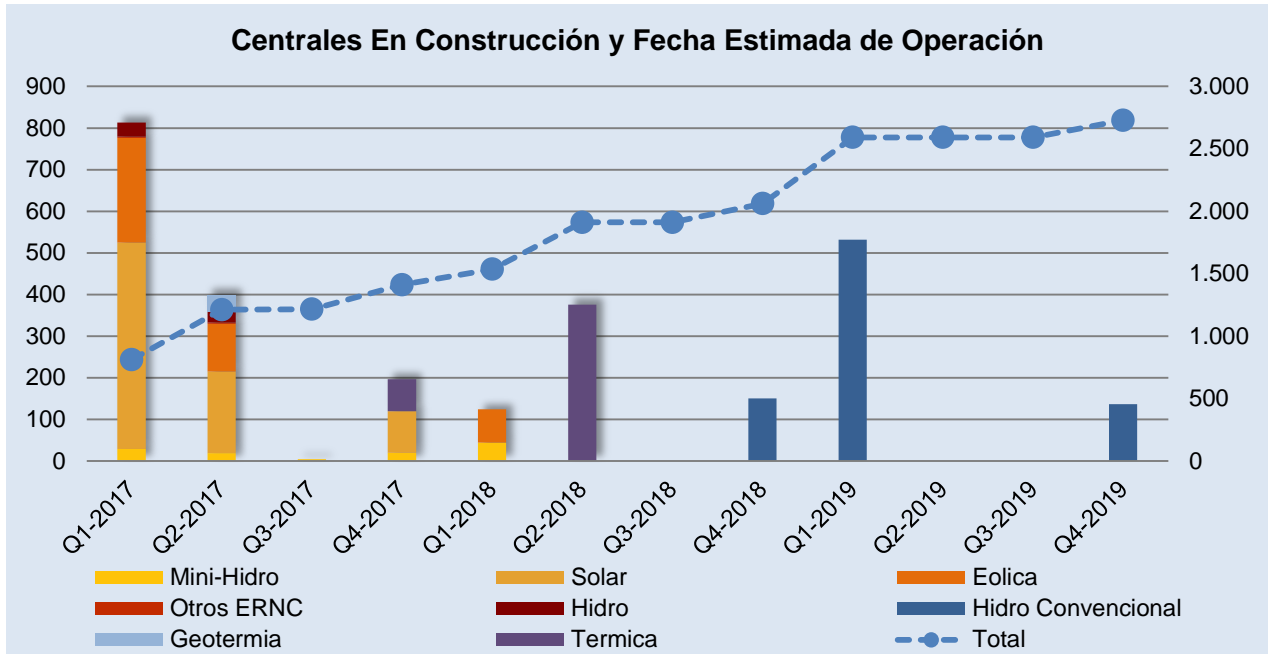
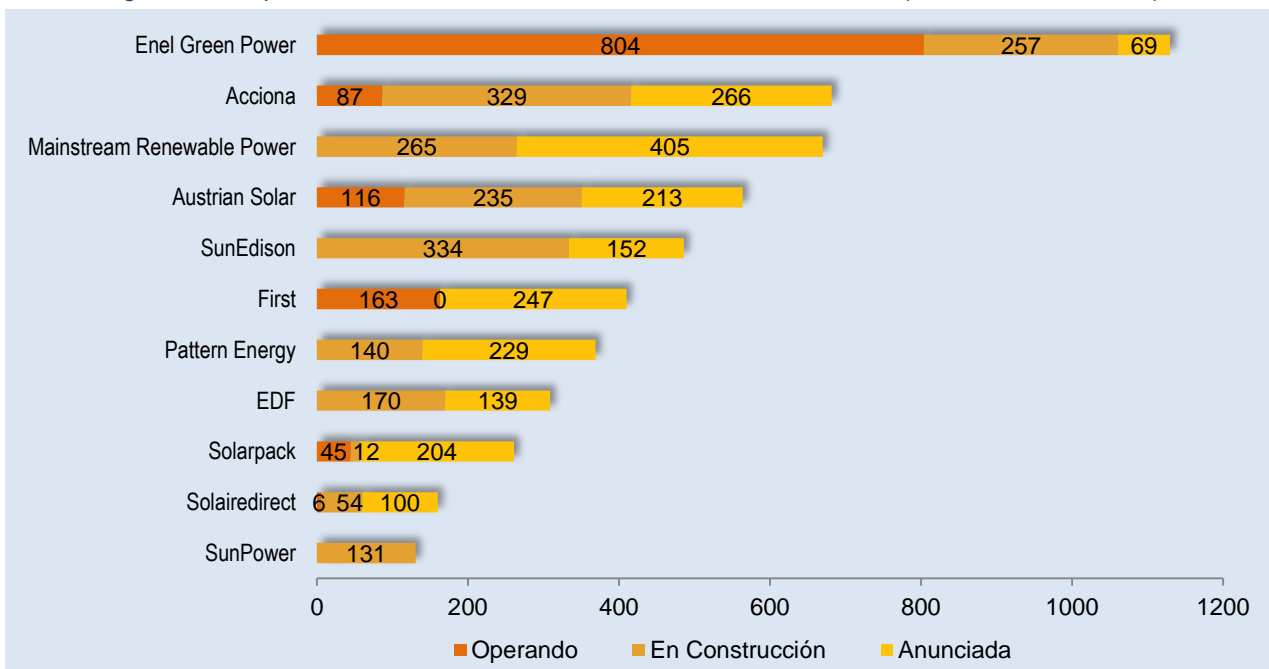


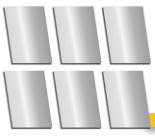
Figura 2: Ingreso a operación estimada de ERNC (fuente: Ministerio de Energía, UGP)



Desde la perspectiva de los desarrolladores, este mercado es dominado por empresas de perfil internacional, entre las que lidera Enel, Acciona y Mainstream. Esto entrega indicios del origen de capacidades para abordar las distintas etapas de implementación de proyectos.

Figura 3: Principales desarrolladores en mercado solar fotovoltaico chileno (fuente: GTM Research)





Las barreras que impedirían que la energía solar fotovoltaica crezca con la tasa de incorporación que ha tenido hasta ahora, y que impida la incorporación de actores nuevos serían:

1. Las restricciones de transmisión son una barrera crítica sobre la capacidad de implementar proyectos en las zonas de mayor potencial de Chile (regiones de Atacama hacia el norte). Esto implica tanto posibles vertimientos, como también desacoples de precios entre inyecciones y retiros. En el corto plazo se hace fundamental impedir el retraso de la línea de Cardones-Polpaico, que determina el valor de la interconexión de ambos sistemas eléctricos mayores (SIC y SING). Una vez resuelto esta limitación, flujos de energía solar podrían libremente llegar a las zonas de mayor consumo en el centro del país. Para resolver esta problemática en el largo plazo, se aprobó durante el año 2016 la Ley de Transmisión 20.936 que contempla proyectar holguras en la expansión de transmisión del sistema.
2. El acceso a financiamiento estaría condicionado a la contratación de los proyectos, dada la volatilidad del spot y su caída en horario diurno.

Se espera que el país siga incorporando grandes volúmenes de ERNC en su sistema eléctrico. De hecho, en el marco de la iniciativa Energía2050, se estableció una meta de lograr que al año 2050 el 70% de la energía provenga de fuentes renovables (incluyendo generación hidroeléctrica de embalse). Algunos actores de la industria (ACERA) promueven una meta de 100% basado en energía renovable.

### **Pequeños Medios de Generación Distribuida (PMGDs)**

El fomento a la incorporación de la energía solar fotovoltaica a pequeña escala (superior a 1MW) en las redes de distribución se gestó principalmente por las modificaciones a la ley general de servicios eléctricos llamada Ley Corta 1 y el Decreto Supremo 244, que estableció un régimen de precio estabilizado para PMGDs (centrales menores a 9 MW conectadas en distribución), lo que permitió el acceso a financiamiento sin la necesidad de participar de las subastas de distribuidoras.

Adicionalmente, los proyectos de menor tamaño (inferiores a 3 MW) han proliferado dado el hecho de no requerir ingresar al Sistema de Evaluación Ambiental (SEA) para su desarrollo, lo que ha permitido llegar con generación fotovoltaica a lugares remotos (conectados a la red de distribución) y sin necesidades de grandes períodos de tiempo en permisos como el ambiental. Otra de las principales ventajas de los proyectos PMGDs, es que se pueden llevar a cabo en períodos de tiempo más breves y de menor costo, como también estar ubicados en zonas de menor riesgo de congestión de transmisión.

Se espera que para los próximos años la participación de la generación distribuida crezca con más fuerza, ralentizando su crecimiento desde el 2020 en adelante.

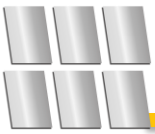
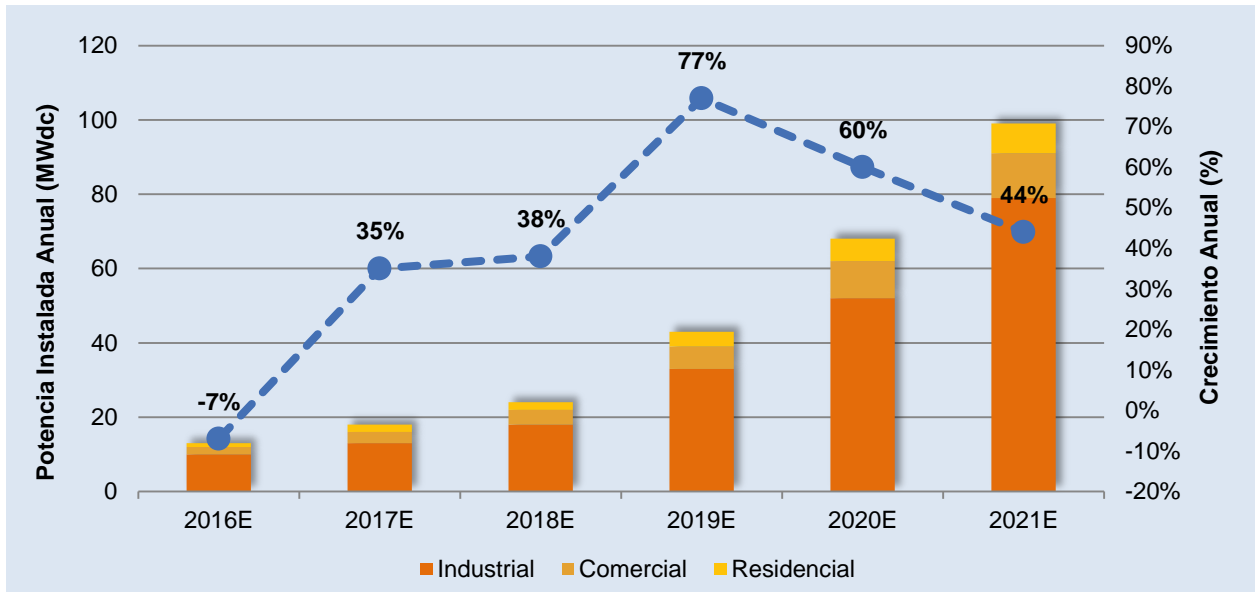
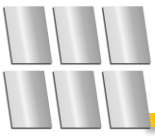


Figura 5: Fuentes de generación Fotovoltaica de pequeña escala (Fuente: GTM Research)



### Comparación de Chile y otros países de la región Latinoamericana:

A la fecha, Chile se destaca por ser el país en Latinoamérica con más capacidad instalada operacional y más MW en construcción. Dentro de Chile destaca Atacama como la región con más capacidad en operación y luego Antofagasta, con la mayor capacidad de MW en construcción (fuente: GTM Research). Ambos lugares poseen una de las radiaciones solares más altas del Planeta.

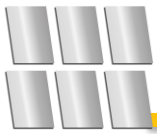


## 4. Política de Confidencialidad (Antitrust)

El estudio de Benchmarking Plantas Solares Fotovoltaicas ha sido desarrollado en el marco de la regulación nacional en materia de la Ley Antimonopolio y las legislaciones internacionales en materia de Antitrust.

La información contenida en este documento ha sido proporcionada y autorizada su publicación por las compañías participantes en el estudio y complementada por información de carácter público obtenida de reportes, estudios de investigación y fuentes digitales.

Con tal de asegurar los compromisos de antitrust se ha firmado un acuerdo de confidencialidad con cada empresa participante para poder acceder, trabajar y publicar resultados con la información de las empresas.



## 5. Empresas participantes

Parque Solar Los Loros	
Propietario	SolaireDirect
Ubicación	61 kms al Sureste de Copiapó, Región de Atacama
Generación Anual Neta <sup>4</sup>	N/D
Potencia Nominal informada a CDEC	46 MW
Puesta en Servicio (Primera Sincronización)	17 de Agosto 2016
Tasa de Degradación anual <sup>5</sup>	N/D
Razón de Desempeño <sup>6</sup>	N/D

Luz del Norte	
Propietario	First Solar
Ubicación	67 kms al Noreste de Copiapó, Región de Atacama
Generación Anual Neta	419,9 GWh
Potencia Nominal informada a CDEC	141 MW
Puesta en Servicio (Primera Sincronización)	24 de Febrero 2016
Tasa de Degradación anual	0,5%
Razón de Desempeño	78%

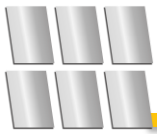
  

Salvador	
Propietarios	Etrion – Total - Solventus
Ubicación	30 kms al Suroeste de El Salvador, Región de Atacama
Generación Anual Neta	159,4 GWh
Potencia Nominal informada a CDEC	68 MW
Puesta en Servicio (Primera Sincronización)	07 de Julio 2015
Tasa de Degradación anual	0,8%
Razón de Desempeño	98,9%

<sup>4</sup> Generación Neta: Generación efectiva inyectada al Sistema

<sup>5</sup> Tasa de Degradación Anual: Tasa medida de degradación de la Planta como conjunto

<sup>6</sup> Razón de Desempeño: Razón entre desempeño real y desempeño teórico (modelo)



### Solar Jama

Propietario	Rijn Capital
Ubicación	28 kms al Sureste de Calama, Región de Antofagasta
Generación Anual Neta	169,2 GWh
Potencia Nominal informada a CDEC	52,7 MW
Puesta en Servicio (Primera Sincronización)	Fase 1: 16 de Abril 2015
	Fase 2: 23 de Enero 2016
Tasa de Degradación anual	0,5%
Razón de Desempeño	N/D

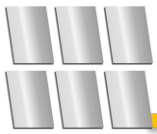
### Chañares

Propietario	Enel Green Power
Ubicación	4 kms al Noroeste de Diego de Almagro, Región de Atacama
Generación Anual Neta	96,3 GWh
Potencia Nominal informada a CDEC	36 MW
Puesta en Servicio (Primera Sincronización)	28 de Mayo 2015
Tasa de Degradación	N/D
Tasa de Degradación anual	N/D

### Solar Diego de Almagro

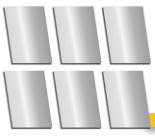
Propietario	Enel Green Power
Ubicación	3 kms al Noreste de Diego de Almagro, Región de Atacama
Generación Anual Neta	81,9 GWh
Potencia Nominal informada a CDEC	32 MW
Puesta en Servicio (Primera Sincronización)	11 de Diciembre 2014
Tasa de Degradación	N/D
Tasa de Degradación anual	N/D





Finis Terrae	
Propietario	Enel Green Power
Ubicación	86 kms al Oeste de Calama, Región de Antofagasta
Generación Anual Neta	419,0 GWh
Potencia Nominal informada a CDEC	138 MW
Puesta en Servicio (Primera Sincronización)	09 de Enero 2016
Tasa de Degradación	N/D
Tasa de Degradación anual	N/D

Lalackama	
Propietario	Enel Green Power
Ubicación	35 kms al Norte de Taltal, Región de Antofagasta
Generación Anual Neta	383,2 GWh
Potencia Nominal informada a CDEC	71,5 MW
Puesta en Servicio (Primera Sincronización)	Fase 1: 02 de Junio 2015 Fase 2: 31 de Agosto 2015
Tasa de Degradación	N/D
Tasa de Degradación anual	N/D



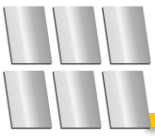
## 6. Alcances del estudio

Frente al desafío del Programa Energía Solar de realizar un levantamiento de aspectos técnicos y operacionales, específicamente enfocado en tipos y tasas de falla de plantas solares fotovoltaicas en Chile se ha contratado a Encare Ltda., para la realización de un estudio de Benchmarking que permita identificar las principales causales de falla, los planes de mitigación y medidas preventivas de las principales empresas del sector. A su vez Encare fue apoyado técnicamente para éste propósito, por los asesores en gestión de operación y mantenimiento de plantas ERNC, Energía 360.

Para una correcta representatividad en el estudio se consideró una muestra de empresas participantes que por lo menos debía abarcar un 25% de la capacidad instalada fotovoltaica del país a Septiembre 2016 (Capacidad Instalada Solar a Sep-16 según CNE: 1.395 MW), sin embargo se logró una muestra que considera el 42% de la potencia total, con ocho plantas solares encuestadas que suman un total de 585 MW instalados

La muestra, a su vez, debía considerar plantas solares con más de un año de antigüedad desde su inicio de operación, pero para que esta lograra ser más representativa se decidió considerar también plantas solares con sólo meses de operación con tal de entender si éstas estaban presentando fallas en etapas tempranas de su funcionamiento.

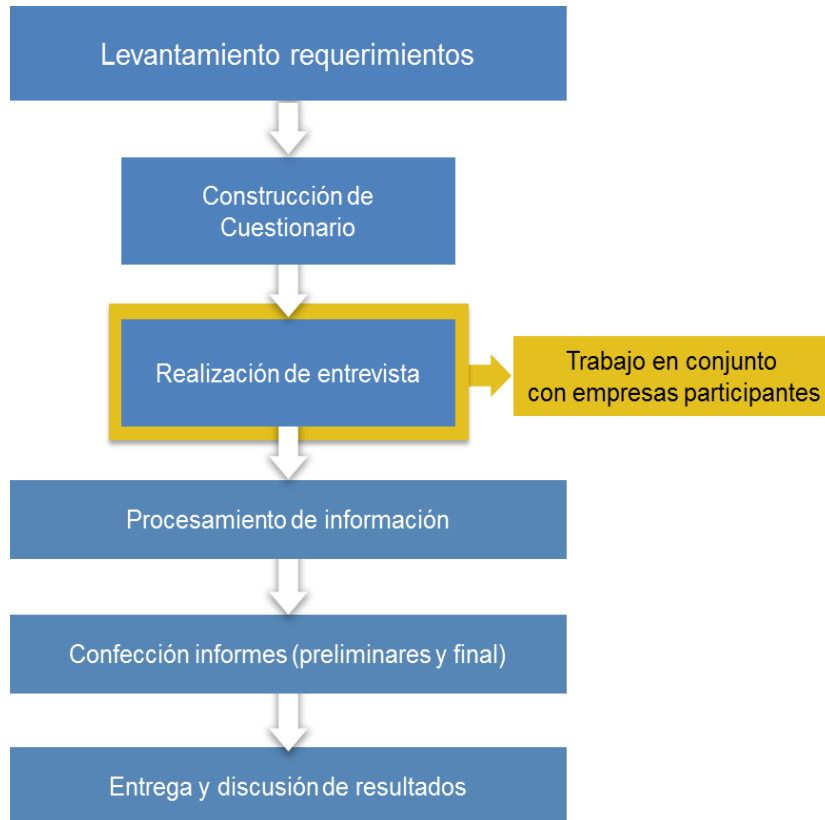
El reporte resume los resultados obtenidos a partir de un levantamiento de información realizado a través de entrevistas presenciales en el sitio con los técnicos de cada una de las empresas participantes.



## 7. Metodología

La metodología utilizada en el estudio se basa en un modelo de benchmarking adaptado a los requerimientos específicos del estudio del mandante. La estructura del modelo se presenta en la Figura 7, y consta de seis hitos fundamentales.

Figura 6: Estructura de la metodología

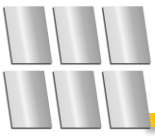


### 7.1 Levantamiento de Requerimientos

Esta etapa es fundamental, ya que es donde se determinan los objetivos de estudio. Estos se basaron en las bases técnicas entregadas y fue complementada con las necesidades del mandante.

En esta etapa se definió:

- El objetivo del estudio
- Cómo se realizará la recopilación de información
- Validar la información que requiere el mandante en base a la oferta técnica
- Empresas que participarán en el estudio.



## 7.2 Construcción del Cuestionario

El cuestionario es la principal herramienta para la recopilación de información, este debe contener toda la información cuantitativa y cualitativa que se desea incluir en el estudio.

Se debe seleccionar en conjunto con el mandante la información que contendrá esta herramienta, siempre teniendo en consideración, el objetivo del estudio, qué indicadores se pueden generar, y cuáles de estos entregarán valor real al estudio.

Es necesario agregar al cuestionario definiciones de las variables que serán solicitadas y límites de procesos si es necesario.

## 7.3 Recopilación de Información

La recopilación de información se realiza mediante una entrevista estructurada en forma presencial con los encargados de planta de cada una de las empresas participantes, con el objetivo de completar en conjunto el cuestionario mencionado. Para esto, se realizaron visitas en terreno a plantas solares ubicadas en las regiones de Antofagasta y Atacama. Las primeras entrevistas se realizaron la semana del 9 de Enero 2017 en Atacama y el segundo grupo, la semana del 16 de Enero 2017 en la región de Antofagasta. Junto con la entrevista se realizaron recorridos por las instalaciones, lo que permitió corroborar in situ los posibles problemas que presentaba cada planta.

En esta etapa es necesario mantener comunicación constante con los participantes, ya que pueden surgir consultas posteriores a la entrevista que deben ser resueltas.

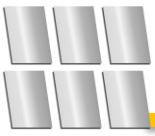
## 7.4 Procesamiento de la Información

Una vez obtenida y validada la información es necesario procesarla para analizar los posibles resultados que se desean obtener y la estructura y presentación del informe.

Esta es una instancia en donde se vuelve a revisar y confirmar con las empresas participantes, ciertos datos de la muestra que puedan parecer atípicos.

## 7.5 Confección de Informes

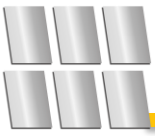
Finalmente se confecciona un informe preliminar que debe ser revisado y validado por el mandante para luego. Una vez revisado, se incluyen modificaciones si es necesario para obtener el informe final que será entregado a todos los participantes.



## *7.6 Entrega y discusión de resultados*

El estudio considera también la realización de un taller final cuyo objetivo es la presentación de los resultados y que se expongan mejores prácticas. Se considera la asistencia de las empresas solares participantes, el mandante y otros actores de la industria.

El resultado de un benchmarking genera la identificación de las brechas y oportunidades de mejora en el área estudiada y en consecuencia entrega al cliente y los participantes las herramientas para el diseño de un programa de mejoras y su posterior implementación.



## 8. Descripción de las fuentes de información

### 8.1 Elaboración del instrumento de medición

Se elaboró un cuestionario específico para el levantamiento de los requerimientos del estudio de benchmarking. El cuestionario fue realizado por Encare Ltda. en conjunto con Energía 360° quienes con el respaldo del Comité Solar de CORFO, en el marco del Programa Energía Solar, trabajaron para lograr la elaboración de un instrumento que permitiese abarcar de mejor forma los objetivos del proyecto. Después de una serie de reuniones y revisiones se estableció un cuestionario tipo que fue enviado a la Asociación Chilena de Energías Renovables A.G. (Acera) quienes colaboraron en su revisión, que luego derivó en la aprobación final del instrumento.

El cuestionario se estructuró en dos secciones, Planta Fotovoltaica y Subestación Eléctrica. Cada una de las cuales se subdividió en los elementos fundamentales que las componen. La Planta Fotovoltaica se subdividió en:

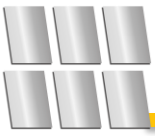
1. Estructuras soportantes de paneles
2. Seguidor
3. Panel Fotovoltaico
4. Instalaciones de baja tensión
5. Centro de transformación
6. Instalaciones de media tensión
7. SCADA
8. Comunicaciones

Subestación Elevadora se subdividió en:

1. Subestación eléctrica (seccionadora/elevadora)
2. Instalaciones de alta tensión (línea de transmisión adicional)
3. SCADA
4. Comunicaciones

Cada uno de estos subtemas a su vez se separó en las posibles fallas que podían presentarse en ellas. Para cada caso se dejó la posibilidad de incluir una nueva falla en caso de que no estuviese presente en el listado.





La pregunta principal en cada caso era indicar ¿Qué tipo de fallas se presentan? Una vez identificada la falla se debía responder ¿A cuál o cuáles de las siguientes causas corresponde? Lo que derivaba al detalle de la causa de la falla. Al identificar una falla era necesario responder la siguiente serie de preguntas:

- Número de fallas que corresponde a la categoría
- Descripción de la falla
- Causa de la falla
- Impacto principal de la falla
- Medida correctiva de la falla
- Tiempo estimado de reparación de la falla
- Capacidad técnica-humana para solucionar la falla (regional, nacional o internacional)

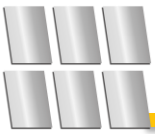
Con este conjunto de preguntas fue posible obtener una visión general del funcionamiento de la planta en temas operativos y de mantenimiento.

## 8.2 Selección de empresas participantes

La selección de las empresas participantes surgió del compromiso por considerar una muestra que representara de mejor manera la situación actual de la industria energética solar del país. Se consideraron las regiones de Antofagasta y Atacama para las visitas, por ser escenarios ideales para la instalación de plantas solares y por contar con la mayor cantidad de plantas solares en la actualidad. Sin embargo, coyunturas de cada empresa (como la realización de procesos de venta), imposibilitó la participación de un mayor número de estas.

Se determinó que la muestra debía abarcar de mejor manera la diversidad de tecnologías presentes en el mercado, para lo cual se decidió invitar a participar a la mayor cantidad de empresas del sector, sin importar la capacidad instalada, pero que estuvieran en operación.

Se realizaron visitas técnicas a la Planta Solar Los Loros, Luz del Norte, Salvador, Solar Jama y el Bolero (esta última aún no entraba en operación al momento de la visita). En el caso de plantas Lalackama, Finis Terrae, Chañares y Diego de Almagro, se visitaron las oficinas centrales en Santiago para el levantamiento de la información dado que en ese lugar se mantiene en detalle el registro del comportamiento de cada unidad generadora.



## 9. Desarrollo del estudio

### 9.1 Antecedentes Generales

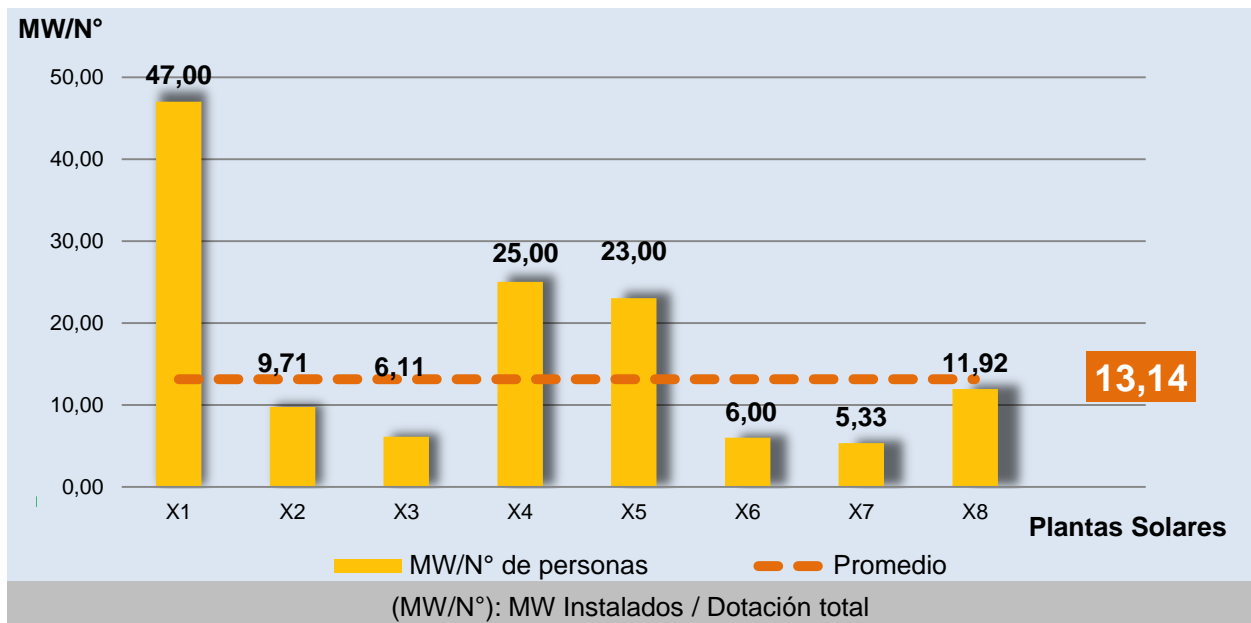
Este capítulo presenta información de las problemáticas más recurrentes existentes en una planta solar fotovoltaica. Se mostrarán específicamente los tipos y tasas de falla de los distintos equipos y/o componentes de la planta. La información presente corresponde a data desde el inicio de la operación de cada planta hasta diciembre del año 2016.

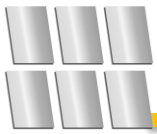
Las compañías seleccionadas en general se encuentran en lugares alejados de las principales ciudades en su respectiva región. El funcionamiento de las operaciones tiene desafíos entre los que se encuentran condiciones ambientales, geográficas, climáticas, infraestructura, logística y localización en relación a líneas de transmisión.

El estudio consideró plantas solares de diversas capacidades instaladas lo que permitió tener una muestra más diversa y entender de mejor manera el comportamiento en temas de funcionamiento, manejo y equipos de trabajo.

En el siguiente gráfico se aprecia en primera instancia la relación entre la capacidad instalada y la dotación total de la planta (que considera toda las personas que trabajan en la operación, equipo técnico, de mantenimiento y jefes de planta).

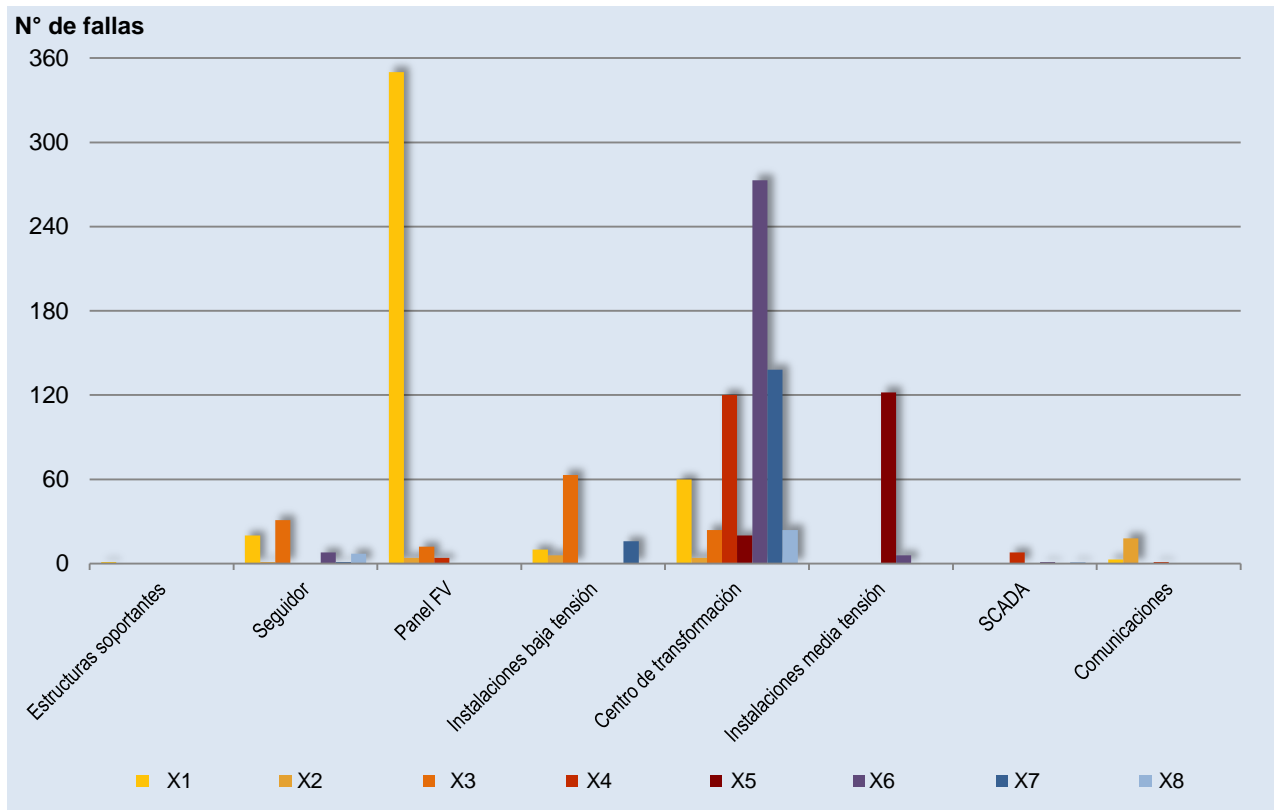
Figura 7: Relación Capacidad instalada vs Dotación Total (MW/Nº)





En el siguiente gráfico se presenta la cantidad de fallas por planta solar para cada una de las secciones de una planta fotovoltaica. Se observan datos atípicos que se escapan del promedio que serán explicados en los capítulos correspondientes.

Figura 8: Cantidad de fallas por tipo

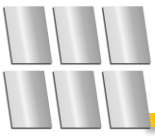


## 9.2 Planta Fotovoltaica

El objetivo de una Planta Fotovoltaica es captar la energía solar y transformarla en energía eléctrica. La energía de estas plantas es introducida a las redes de distribución, lo que permite alimentar innumerables aplicaciones, hogares e industrias entre otros.

Las Plantas Fotovoltaicas están compuestas por paneles solares, que a su vez están formados por un conjunto de celdas fotovoltaicas, cuya función es captar la energía del sol y transformarla en energía eléctrica continua. La producción de electricidad de dichas celdas depende principalmente de las condiciones meteorológicas existentes en el lugar donde se encuentren instaladas.

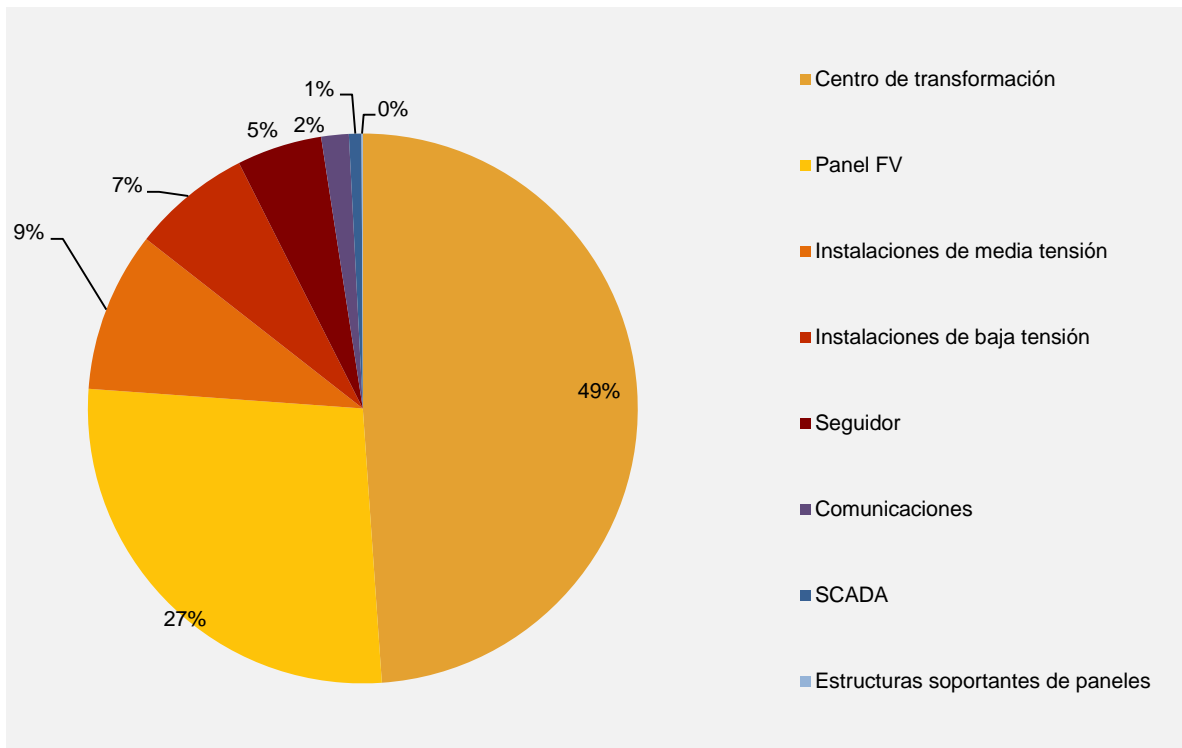
La energía generada por las celdas, es concentrada y llevada hasta los inversores, que son los equipos encargados de transformarla de corriente continua a corriente alterna. Luego es conducida a través de



transformadores y una red de distribución interna hasta la subestación elevadora, donde finalmente la tensión es elevada a la tensión de distribución

Se muestra en el siguiente gráfico una visión general de la distribución de todas las fallas que presenta una planta fotovoltaica. Como primera observación, es importante destacar que la mayor cantidad de fallas en la muestra se presentan en los centros de transformación, quienes representan un 49% de las fallas totales de la muestra.

Figura 9: Distribución por tipo de falla Planta Fotovoltaica



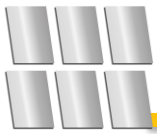
## 1. Estructuras soportantes de paneles

Se considera como estructura la sección que sostiene el panel fotovoltaico. Esta estructura se compone del pilar, la parrilla y las uniones pilares/parrilla.

Las fallas de esta sección corresponden principalmente a:

**Fallas Estructurales:** Corresponden a las fallas que puedan presentar las distintas estructuras de soporte de paneles a causa de problemas de diseño estructural o de calidad. Debido a estas fallas, las estructuras presentan torsiones, dobleces, quiebres, etc. Esta categoría, se subdivide en las distintas partes de la estructura: uniones pilares/parrillas, pilares y parrillas

**Fallas por Corrosión:** Corresponden a las fallas que puedan presentar las distintas estructuras de soporte de paneles a causa de los problemas de corrosión debido a los lavados de paneles, mala



aplicación del anticorrosivo y problemas presentes desde la etapa de construcción/montaje, como la falta de retoques del anticorrosivo.

Las estructuras soportantes de los paneles se consideran uno de los elementos con menores fallas dentro de las Plantas Fotovoltaicas. Sólo se identificó una falla en una de las parrillas, la cual se soltó de la estructura. La causa se basa principalmente en un problema de construcción que en su momento no se detectó. Esta falla no tuvo un impacto en la planta, el equipo técnico se encargó de cambiar oportunamente la parrilla por una nueva.

Tabla 2: Tasas de falla de las estructuras soportantes de paneles

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8
N° de falla/mes	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

## 2. Seguidor

Es un dispositivo que orienta los paneles solares en dirección al sol durante el transcurso del día, por lo tanto, las plantas que utilizan esta tecnología tienen un rendimiento mayor a las que usan paneles fijos.

Las fallas de esta sección corresponden a:

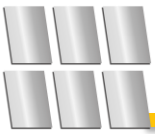
**Fallas de Control:** Corresponden a las fallas en el sistema de seguimiento del sol a causa del dispositivo de control de los elementos de seguimiento. Las partes de control corresponden al área que le da la inteligencia, instrucciones de movimiento y entrega las señales de posición al SCADA del sistema de seguimiento. Esta categoría, se subdivide en las distintas partes del sistema de control: sistema de control propiamente tal, cables de control y fibra óptica.

**Fallas Mecánicas:** Corresponden a las fallas en los elementos mecánicos de sistema de seguimiento. Esta categoría se subdivide en sus distintos componentes: uniones del seguidor a la estructura, reductor<sup>7</sup> y brazo<sup>8</sup>.

**Fallas Eléctricas:** Corresponden a las fallas de los componentes de fuerza del sistema de seguimiento, Esta categoría se subdivide en sus distintos componentes: motor, suministro de energía y cables de fuerza.

<sup>7</sup> Reductor: Conjunto de engranajes dentro de una caja, con la cual se ajusta la velocidad del motor, para así poder generar movimiento controlado en velocidad.

<sup>8</sup> Brazo o palanca, que se utiliza para provocar el giro de los paneles en 1 eje.



Como se muestra en la Figura 11, un 44% corresponde a fallas mecánicas que se debe a problemas en los reductores y en las uniones del seguidor a la estructura. Los reductores se ven afectados por el polvo que les entra, sin embargo los sistemas entregan una alerta de inmediato para realizar el cambio. Las uniones de los seguidores se ven afectados generalmente por la desconexión de la planta la cual al volver a energizarse afecta el componente.

En el caso de las Fallas de Control, que corresponden al 38%, el sistema de control de los seguidores es el que se ve mayormente afectado al energizar y desenergizar la planta, ya que hace que los seguidores se queden sin movimiento alguno. Es importante considerar que al tratarse de plantas con miles de seguidores, la falla no es significativa en temas de disminución de producción. Son fallas que se reparan rápidamente y no implican una mayor dificultad.

Las Fallas Eléctricas se deben en mayor medida a problemas de motor, los cuales se queman o bajan su rendimiento debido al exceso de movimiento. Estas fallas son menos comunes y su reparación generalmente no tarda más de medio día. Su impacto en la producción es mínimo.

Figura 10: Seguidor

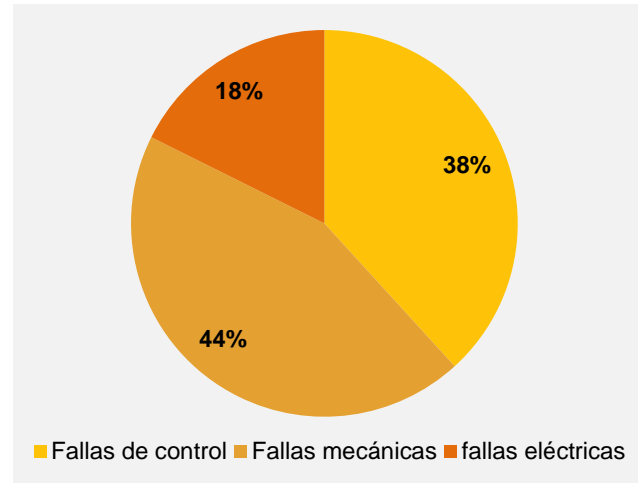
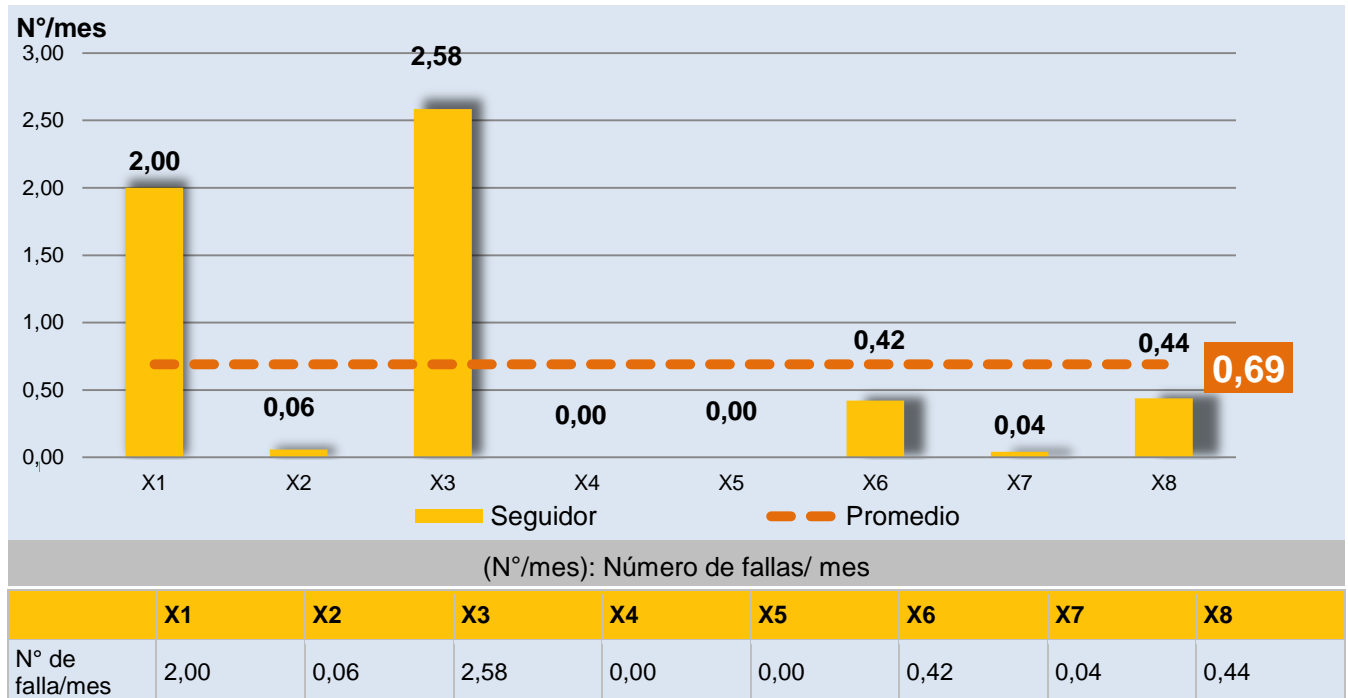


Figura 11: tasa de falla del Seguidor

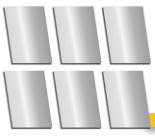




En la siguiente tabla se presentan los tipos de fallas consideradas para los seguidores y la descripción de estas. En general se observa que son fallas que tienen un impacto de pérdida de producción menor en la planta. Sus reparaciones son en general bastante rápidas y pueden ser realizadas por el equipo técnico propio de la planta. Las plantas cuentan con el stock necesario de repuestos para reemplazar las piezas y dispositivos que tienden a fallar más comúnmente.

Tabla 3: Detalle de fallas de los seguidores

Falla	Compañía	Descripción de la Falla	Causa de la Falla	Impacto principal de la falla	Medida Correctiva Falla	Tiempo estimado de reparación	Capacidad técnica-humana para solucionar la Falla
<b>Fallas de Control</b>							
Sistema de control de seguidores	X1	Falla en tarjeta de control	Energizar y desenergizar la planta	Pérdida de producción	Se cambia tarjeta de control	3 horas	Técnicos en planta
Sistema de control de seguidores	X2	Trackers se quedan atascados al desenergizar la planta	Planta desenergizada	Pérdida de producción menor	Se resetea sistema	Minutos	Técnicos sala de control
Sistema de control de seguidores	X7	Falla en control	Desconocida	Pérdida de generación menor			
Sistema de control de seguidores	X8	Falla en control	Desconocida	Pérdida de producción menor			
Cables de control	X2	Ratón comió cable	Ratones	Pérdida de producción menor	Cambio de la fibra	6 horas	Técnicos sala de control
<b>Fallas Mecánicas</b>							
Uniones del seguidor a estructura	X1		Desconexión de planta	Pérdida de producción menor		3 horas	Técnicos en planta
Reductor	X3	Seguidor se queda atascado	Protector se rompe y entra polvo	Pérdida de producción menor	Se re-establece con un control manual de tracker	Media hora	Técnicos en planta
<b>Fallas Eléctricas</b>							
Motor	X1		Se quema motor del tracker		Se cambia motor		Técnicos en planta
Motor	X3	Falla de motor	Mucha inversión de giro	Motor anda más lento que el resto	Se cambia motor	Medio día	Técnicos en planta
Energía	X6	Falla variador de frecuencia	Desconocida	Perdida menor de generación			
Energía	X8	Falla en alimentación	Desconocida	Pérdida menor de energía			
Cables de Fuerza	X8	Falla en terminal	Desconocida	Pérdida menor de energía			



### 3. Panel Fotovoltaico

Se componen de un conjunto de celdas o células fotovoltaicas que producen electricidad gracias a la luz solar que incide sobre ellos.

Se dividieron los distintos tipos de fallas de los paneles en: rotura, punto caliente y conectores. En el subgrupo de rotura, se consideraron distintas causas: delincuencia, estrés térmico y construcción/montaje.

La Falla por Punto Caliente, corresponde al mal funcionamiento de las células fotovoltaicas que al momento de generarse el problema se presentan puntos de mayor temperatura con respecto al resto del panel.

Las fallas en los conectores, corresponden al mal funcionamiento en la caja de conexión y/o conectores propiamente tal del panel fotovoltaico.

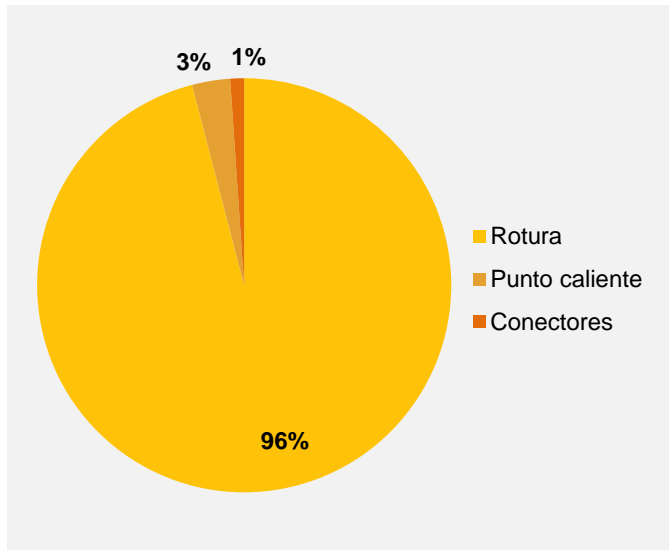
Las fallas de los Paneles Fotovoltaicos se centran en un 96% en las de rotura. Esto se debe principalmente a los problemas que ha tenido una de las plantas con temas de delincuencia o vandalismo, en donde se han encontrado bastantes paneles trizados y módulos rotos debido al impacto de piedras. Como se puede apreciar en la Figura 14 la tasa de fallas por mes para la operación X1, está muy por sobre el resto, exclusivamente por este problema. En el resto de las operaciones se han encontrado casos de rotura por estrés térmico a causa del lavado de paneles, problemas por paneles mal instalados o simplemente se ha detectado baja en el rendimiento del panel que se atribuye a una falla de fábrica del panel.

Un 3% de las fallas corresponde a problemas de punto caliente en donde los diodos se queman.

El 1% de las fallas restantes se debe a problema en los conectores. No existe una razón conocida de por qué ocurre la falla.

En general las fallas de Paneles Fotovoltaicos no implican un impacto significativo en la planta debido a la cantidad de paneles que existe en cada una de las operaciones aproximadamente 32.000 paneles por cada 10MW de capacidad instalada. Al ocurrir una falla, el panel tarda entre 30 minutos a una hora cambiarlo y el equipo técnico propio de la planta está capacitado para realizar la tarea. Es importante destacar que todas las operaciones cuentan con un stock de paneles suficiente para suplir cualquier problema en planta.

Figura 12: Panel Fotovoltaico



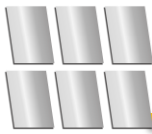


Figura 13: Tasa de falla Panel Fotovoltaico

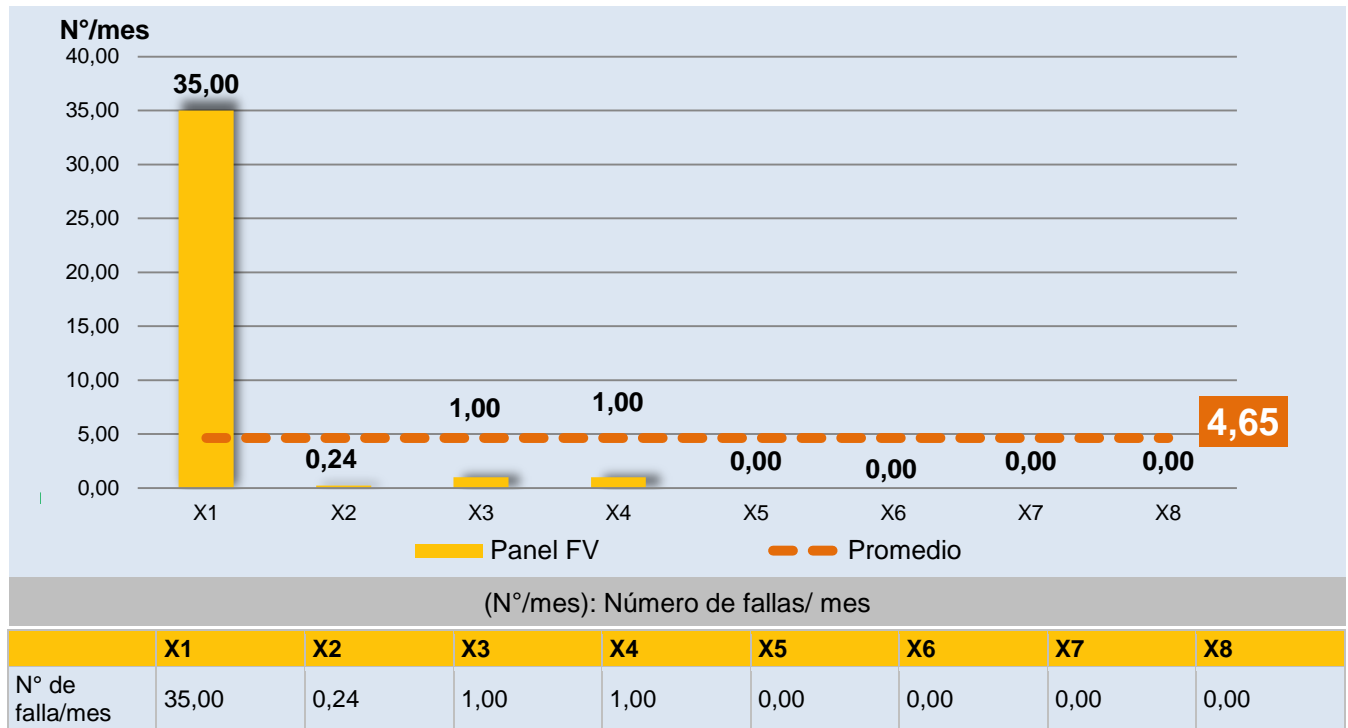
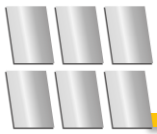


Tabla 4: Detalle de fallas de los paneles fotovoltaicos

Falla	Compañía	Descripción de la Falla	Causa de la Falla	Impacto principal de la falla	Medida Correctiva Falla	Tiempo estimado de reparación de la falla	Capacidad técnica- humana para solucionar la Falla
<b>Rotura</b>							
Delincuencia	X1	Paneles trizados y modulo roto	Impacto de piedra	Pérdida de producción	Se cambia panel	30 minutos	Técnicos Propios
Estrés térmico	X4	Paneles se quebraron por estrés térmico	Lavado de paneles	Pérdida de producción menor	Se cambia panel	Horas	Técnicos Propios
Construcción / Montaje	X1	Paneles mal instalados	Mal montaje	Pérdida de producción	Se cambia panel	30 min	Técnicos propios
Otros	X1	Falla de fábrica, paneles no funcionan	Fabricación	Pérdida de producción	Se cambia panel	30 min	Técnicos propios
Otros	X2	Bajo rendimiento de paneles	Falla de fabricación	Pérdida de producción menor	Se cambia panel	1 hora	Técnicos propios
Otros	X3	Se detectó panel rayado	Desconocida	Pérdida de producción menor	Se cambia panel	Horas	Técnicos propios
<b>Punto Caliente</b>							
Punto Caliente	X1	Falla por punto caliente	Diodos quemados	Baja en producción menor	Se cambian paneles, se deben hacer termografía	4 horas	Técnicos en planta
<b>Conectores</b>							
Conectores	X4	Conectores no funcionan	Desconocida	Baja en producción	Se cambian conectores	Algunos minutos	Técnicos propios en planta



#### 4. Instalaciones de baja tensión (desde *String box* hasta *Combiner box*)

Componentes que van desde la conexión de los módulos fotovoltaicos en serie (*String*) hasta una caja que los une paralelo (*Combiner box*). Luego las salidas de estas *Combiner box* se unen en paralelo para llevar la energía eléctrica continua generada por los paneles a la entrada de los inversores.

El principal foco de fallas para las instalaciones de baja tensión corresponde al mal funcionamiento de fusibles con un 97%. En general se trata de fusibles que se queman, ya sea por falla propia del fusible, por exceso de irradiancia o por otras causas desconocidas. En general los sistemas de las distintas operaciones arrojan una alerta inmediata cuando uno de estos falla. El cambio del fusible no tarda más de 15 minutos en todos los casos y son reparados por el equipo técnico en planta.

El 3% restante se debe a fallas con los conectores y se desconoce su causa.

Las tasas de falla son bastante bajas considerando el universo de fusibles y conectores en una Planta Fotovoltaica, donde se observan aproximadamente 1.600 fusibles y 65.000 conectores en una planta de 10MW de capacidad instalada.

Figura 14: Instalación baja tensión

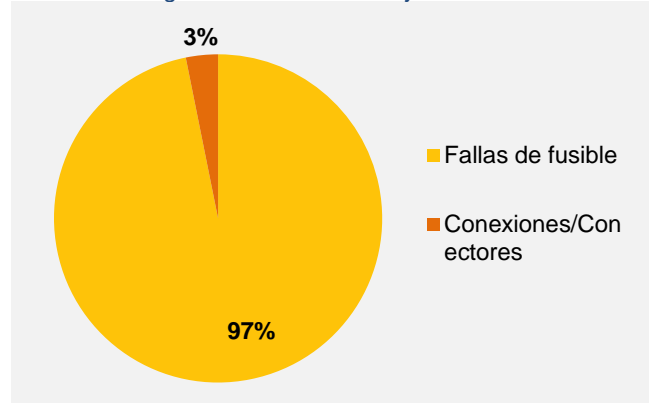
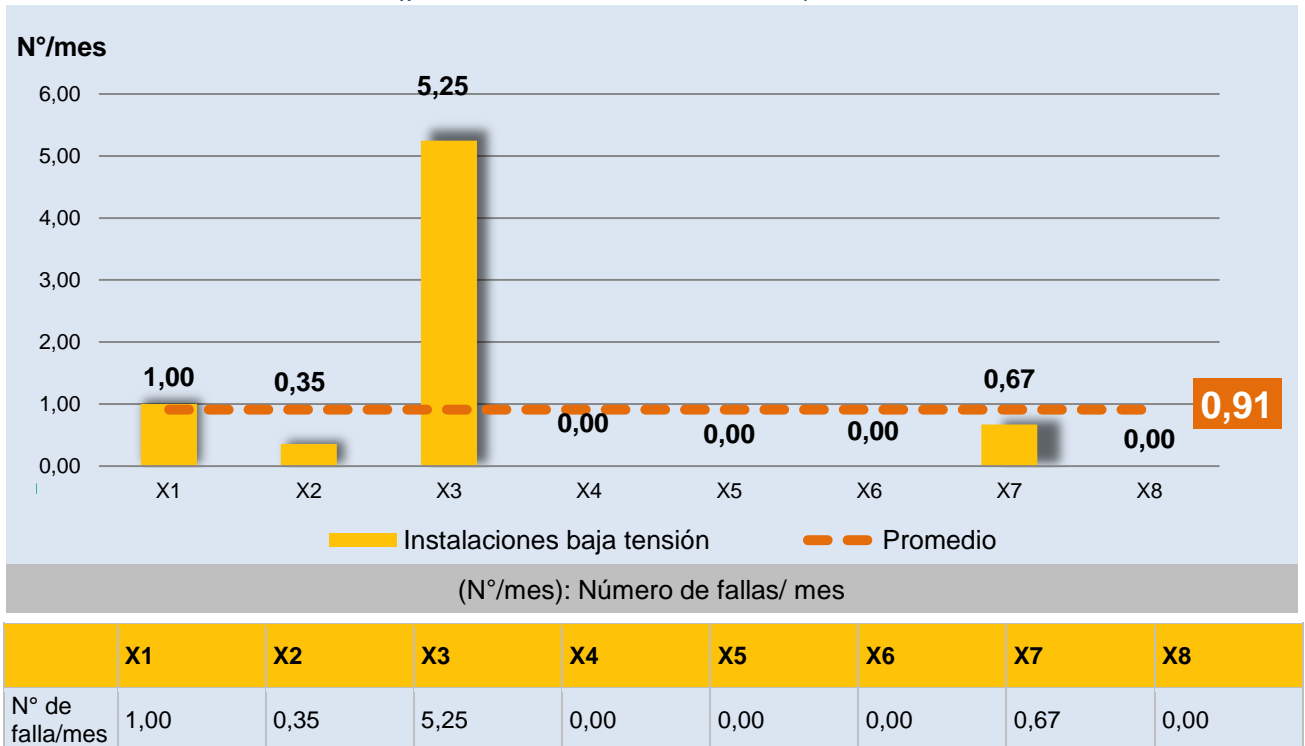


Figura 15: tasa de falla Instalaciones baja tensión



	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8
Nº de falla/mes	1,00	0,35	5,25	0,00	0,00	0,00	0,67	0,00

Tabla 5: Detalle de fallas de las instalaciones de baja tensión

Falla	Compañía	Descripción de la Falla	Causa de la Falla	Impacto principal de la falla	Medida Correctiva Falla	Tiempo estimado de reparación de la falla	Capacidad técnica-humana para solucionar la Falla
<b>Falla de Fusible</b>							
Falla de Fusible	X1	Falla en fusibles					
Falla de Fusible	X2	Fusibles quemados	Desconocida	Pérdida de producción menor	Se cambia fusible	5 minutos	Técnicos locales
Falla de Fusible	X3	Fallas entre fusibles y descargador	Irradiancia, fusible quemado. Alarma de sobretensión activada <sup>9</sup>	Baja leve en producción	Se cambia fusible	15 min	Técnico propio
Falla de Fusible	X7	Falla en fusible	Desconocida	Pérdida menor de generación			
<b>Conexiones / Conectores</b>							
Conexiones	X3	Falla de conectores	Desconocida				

## 5. Centro de Transformación

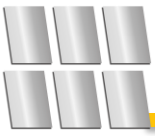
Es donde se transforma la energía eléctrica continua en energía eléctrica alterna, con equipos de electrónica de potencia llamados inversores, para luego elevar la tensión en un transformador y sea más eficiente su transporte. Para poder tener la posibilidad de desconectar un inversor/transformador, se incorporan celdas en media tensión, que son interruptores en los rangos de tensión de 23 a 33kV.

Las fallas de los centros de transformación se separaron en los tres componentes mayores: inversores, celdas de media tensión y transformador baja/media tensión.

Las fallas de los inversores las clasificamos en:

- 1. Lado Control:** Son las fallas que presentan los inversores en el lado de la inteligencia y que no tienen como causa, la falla de un componente de control. Fallas típicas del lado control, son fallas en la partida del inversor que para resolverla, solo se debe aplicar un reset de éste.
- 2. Lado Fuerza:** Son las fallas que presentan los inversores en el lado fuerza y que no tienen como causa, la falla de un componente de fuerza. Fallas típicas del lado fuerza son desconexión de la tierra y falla en la alimentación del inversor.

<sup>9</sup> Está en estudio con el fabricante de los fusibles, si éstos tienen un defecto de fabricación.



**3. Temperatura:** Son las fallas que presentan los inversores debido a una alta temperatura en su interior, Causas típicas de fallas por temperatura, son la saturación de los filtros de las cabinas y las fallas de los ventiladores de las cabinas.

**4. Mecánicas:** Son las fallas que tienen como causa problemas en las cabinas o puertas de los inversores, que al estar abiertas, hacen que el inversor se detenga.

**5. Elementos de Fuerza:** Son las fallas que tienen como causa, el mal funcionamiento de un elemento de fuerza, como lo son: contactores, interruptores, etc del lado fuerza del inversor.

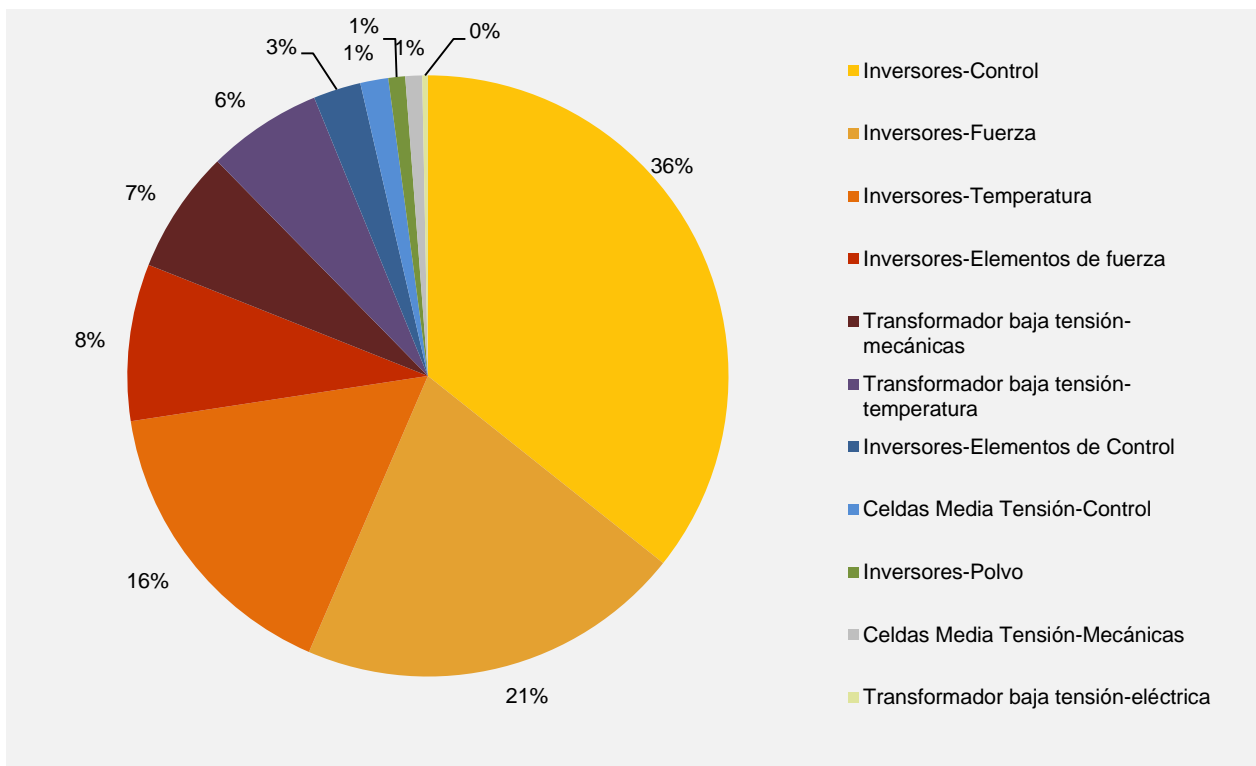
**6. Elementos de Control:** Son las fallas que tienen como causa el mal funcionamiento de un elemento de control, como lo son: placas de circuitos integrados, interfaces de comunicación, etc del lado control del inversor.

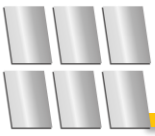
**7. Polvo:** Son las fallas que tienen como causa el polvo dentro de la cabina, las que hacen actuar los sistemas contra incendios, o dentro del inversor, las que hacen que este se detenga.

Las fallas en las celdas de media tensión, las separamos en los distintos componentes de las celdas, como: control, componentes eléctricos, temperatura, aislamiento SF6 y mecánicas.

Las fallas en los transformadores las separamos en los distintos partes del transformador, como: eléctricas, mecánicas y por temperatura.

Figura 16: Centro de Transformación





El centro de transformación es la sección de la planta fotovoltaica que ha presentado la mayor cantidad de fallas y las cuales se han detectado en todas las empresas participantes del estudio. Dentro de esta sección, el inversor de potencia es el elemento que se lleva el mayor peso, con un 85% del total de fallas. Estas se distribuyen principalmente entre: fallas de control con un 36% del total, de fuerza con un 21% y de temperatura con un 16%.

A diferencia de los casos anteriores las fallas en centros de transformación, son más trascendentes debido a que el universo de inversores en una planta es bastante menor al de paneles o seguidores. Se considera aproximadamente un inversor por MW instalado, por ende el impacto de estas fallas es mayor en términos de energía perdida.

Las fallas del lado control corresponden principalmente a fallas en el inicio de la operación diaria, como es el caso de la operación X4 en la Figura 18, en donde cada día un inversor no se inicia correctamente de manera automática. En este caso la reparación es inmediata y se soluciona reseteando el inversor. Si no se detecta a tiempo, se traduce en una baja importante en la producción.

Existen también fallas electrónicas, fallas en los sistemas de control, fallas en fusibles por sobrecarga que implican pérdidas de producción. Sus reparaciones pueden ir de minutos a horas, dependiendo de la gravedad del problema y son realizadas por el equipo técnico en planta.

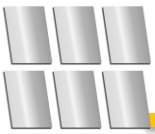
Las fallas del lado fuerza han sido provocadas por problemas en las fuentes de poder, fallas en tierra, IGBT quemados y fallas de corriente. En la mayoría de los casos las causas de los problemas son desconocidas, por ende se cree que son problemas propios de los equipos, ya sea por fallas de fábrica, firmware, programación y/o instalación de los dispositivos. Estas fallas son reparadas en menos de 4 horas y los equipos técnicos en planta tienen la capacidad para realizar el trabajo.

Las fallas por elemento de fuerza ocurren por problemas con fusibles, contactores o interruptores, los cuales deben ser cambiados rápidamente debido a que se traduce en la pérdida completa de producción del inversor. La reparación no tarda más de una hora y la tarea es realizada por el equipo técnico presente en planta.

En el caso de las fallas por temperatura, el sistema arroja una alarma que indica un alza en las temperaturas dentro del inversor por sobre la temperatura permitida. Dentro de las causas del exceso de temperatura, la de mayor frecuencia es por exceso de polvo en los ventiladores o en los sensores internos de los inversores, lo que provoca la detención del funcionamiento del inversor.

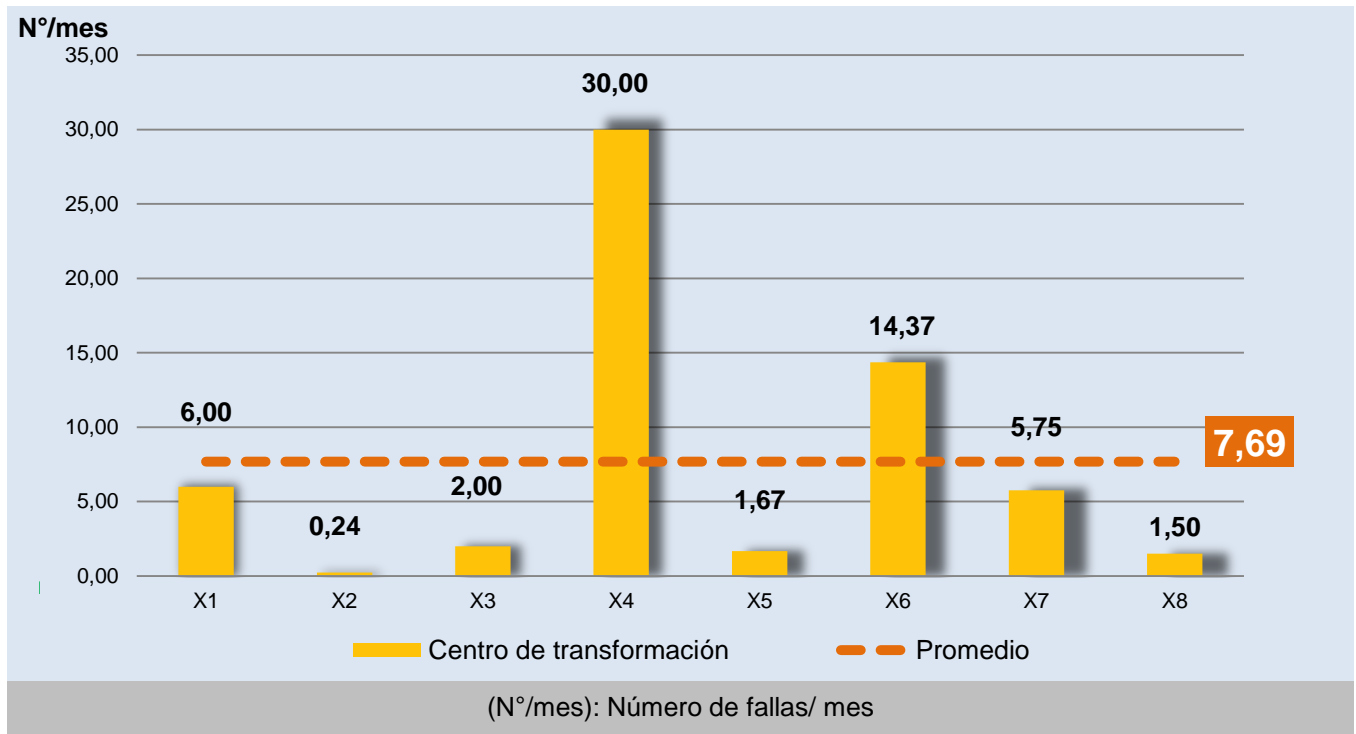
Las celdas de media tensión presentan fallas de control y mecánicas. Adicionalmente se han detectado fallas en equipos auxiliares, como fusibles quemados y fallas en las UPS, lo que impacta directamente en una pérdida de generación.

En el caso de los transformadores de baja tensión/media tensión, se han descubierto fallas eléctricas, de temperatura y mecánicas. En el caso de las eléctricas el principal problema son los terminales que vienen con fallas desde la etapa de construcción. Otra de las fallas presentes se debe a una activación de las



alarmas por exceso de temperatura, según los encuestados se desconoce la raíz del problema. En el caso de las mecánicas se presentan fallas por filtraciones de aceite y problemas de *bushing*.<sup>10</sup>

Figura 17: Tasa de falla Centro de Transformación



	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8
N° de falla/mes	6,00	0,24	2,00	30,00	1,67	14,37	5,75	1,50

<sup>10</sup> Bushing: Acople que permite pasar un conductor o terminal a través de una carcasa aterrizada, como en transformadores.



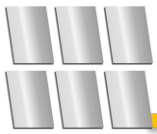


Tabla 6: Detalle de fallas de los centros de transformación

Falla	Compañía	Descripción de la Falla	Causa de la Falla	Impacto principal de la falla	Medida Correctiva Falla	Tiempo estimado de reparación	Capacidad técnica- humana para solucionar la Falla
<b>Inversor de Potencia</b>							
Lado Control	X4	Se presenta una falla diaria	Todos los días un inversor parte mal, se genera mala comunicación en la puesta en marcha.	Baja en producción	Se resetea inversor	3 minutos	Lo hace el equipo que está en terreno
Lado Control	X1	Falla de fusible	Se quemaron por sobrecarga, 125 amperes falla	Pérdida de producción	Se cambia	1,5 horas	Personal propio
Lado Control	X5	Fallas electrónicas	Desconocida	Pérdida de generación de inversor			
Lado Control	X6	Problemas en control	Desconocida	Pérdida de generación	Problemas en control		
Lado Control	X7	Fallas en sistema de control inversor	Desconocida	Pérdida de generación			
Lado Control	X8	Falla en elemento de control	Desconocida	Pérdida de energía			
Lado Fuerza	X1	Fuente de poder	Por desconexión, falla a tierra	Pérdida de producción	Se cambia	1,5 horas	Técnicos propios
Lado Fuerza	X2	IGBT se quemaron	desconocida	Baja en producción	Se cambia el modulo	4 horas	Técnicos propios
Lado Fuerza	X6	Falla en tierra	Desconocida	Pérdida de generación			
Lado Fuerza	X7	Fallas por Corriente	Desconocida	Pérdida de generación			
Lado Fuerza	X8	Falla en elemento de fuerza	Desconocida	Pérdida de energía			
Temperatura	X6	Falla por temperatura	Desconocida	Pérdida de generación			
Temperatura	X7	Fallas por temperatura	Desconocida	Pérdida de generación			
Temperatura	X8	Exceso de temperatura	Desconocida	Pérdida de energía			
Elementos de fuerza	X3	Fusibles y contactores. Falla se da generalmente al inicio del turno.	Q4 y Q aux	Se detiene inversor completo, baja de 1 MW			
Elementos de fuerza	X7	Fallas en interruptores	Desconocida	Pérdida de generación			

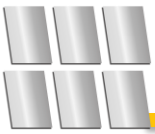
Tabla 6 (continuación): Detalle de fallas de los centros de transformación

Falla	Compañía	Descripción de la Falla	Causa de la Falla	Impacto principal de la falla	Medida Correctiva Falla	Tiempo estimado de reparación	Capacidad técnica- humana para solucionar la Falla
Elementos de Control	X6	Falla en comunicación	Desconocida	Pérdida de generación			
Elementos de Control	X7	Fallas por elementos de control	Desconocida	Pérdida de generación			
Elementos de Control	X8	Fallas en elementos de control	Desconocida	Perdida de energía			
Polvo	X5	Instalación/reem plazo de ventiladores	Desconocida	Pérdida de generación de inversor			
Polvo	X8	Por exceso de polvo se detiene inversor	Desconocida	Pérdida de energía			
<b>Celdas de Media Tensión</b>							
Control	X1	Falla de fusibles	Se queman	Perdida de producción		Minutos	Técnicos propios
Control	X7	Fallas en UPS <sup>11</sup>	Desconocida	Pérdida de generación			
Mecánicas	X7	Fallas en TAP	Desconocida	Pérdida de generación			
<b>Transformador baja tensión / media tensión</b>							
Eléctricas	X1	Falla en mufas	Problemas de construcción	Pérdida de producción	Se repara	1 noche	Repara contratista
Temperatura	X6	Falla por temperatura	Desconocida	Pérdida de generación			
Temperatura	X8	Fallas por exceso de temperatura	Desconocida	Pérdida de energía			
Mecánicas	X1	Filtraciones de aceite, falla de trafos, fallas de bushing	Problema de diseño, la tapa es plástica.	Pérdida de producción	Se repara	1 noche, bajar nivel cambiar, subir nivel, presión	Repara contratista

## 6. Instalaciones de media tensión (red interna de transmisión de la planta FV)

Corresponden a las instalaciones de la red interna de transmisión de la planta fotovoltaica. Las fallas que pueden afectar estas instalaciones son por mal funcionamiento de cable (aislamiento, mecánicas, roedores, entre otras) o en el conexionado (mufas, terminales).

<sup>11</sup> UPS: Uninterrupted Power Source o fuente ininterrumpida de energía (respaldo de baterías)



La instalación de media tensión es de las secciones de la planta que presenta una menor cantidad de fallas. Los problemas se centran en su mayoría en el conexionado, específicamente en las mufas o uniones de los cables, las que de acuerdo a los encuestados, se debe a que las uniones quedaron defectuosas de la etapa de construcción.

En una de las plantas se dio el caso de cables mordidos por roedores pero que no afectaron la producción.

Figura 18: Instalaciones Media Tensión

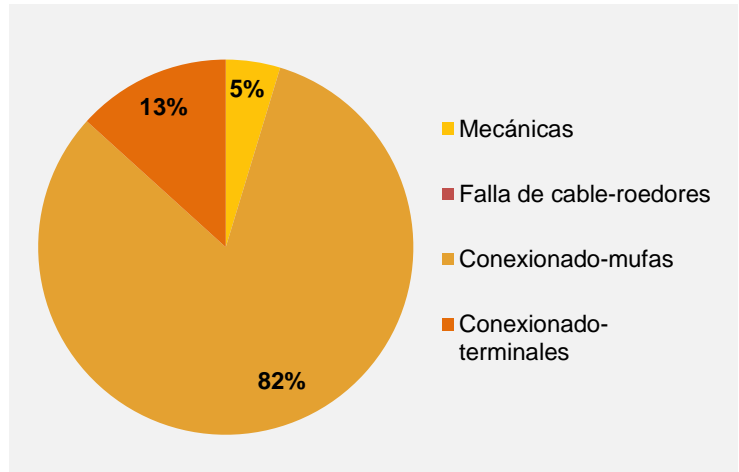
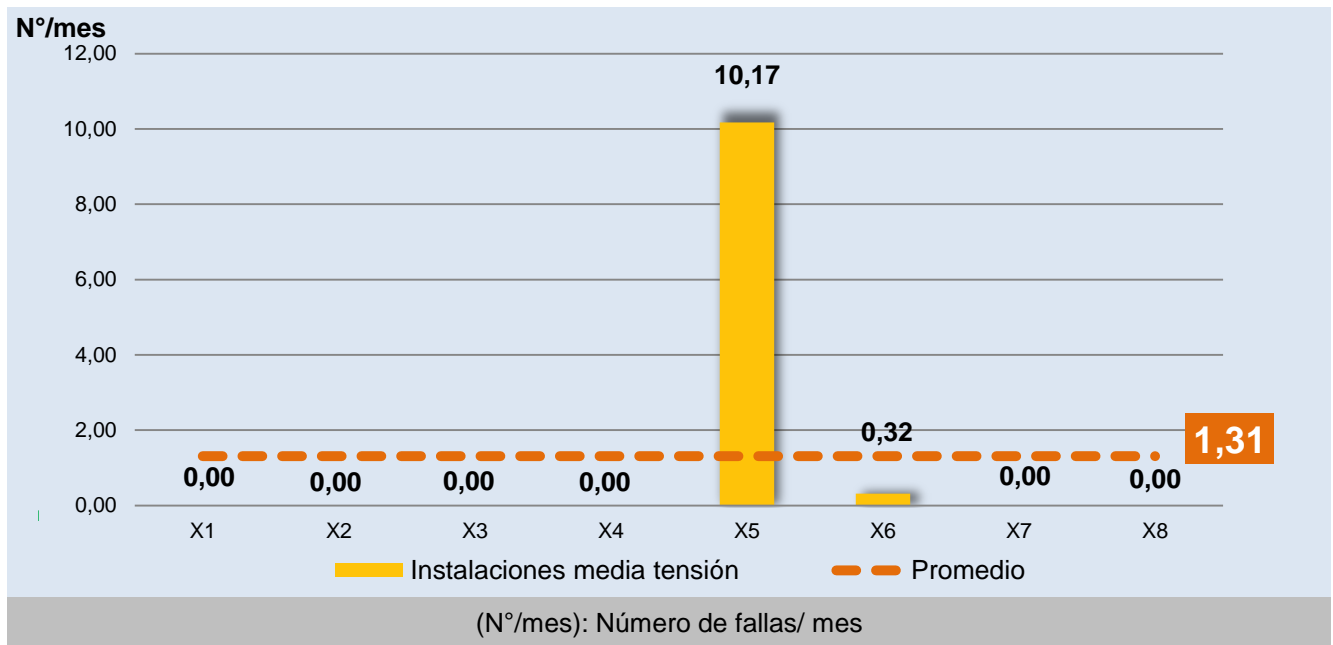


Figura 19: Tasa de falla Instalación Media Tensión



	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8
N° de falla/mes	0,00	0,00	0,00	0,00	10,17	0,32	0,00	0,00

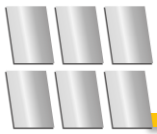


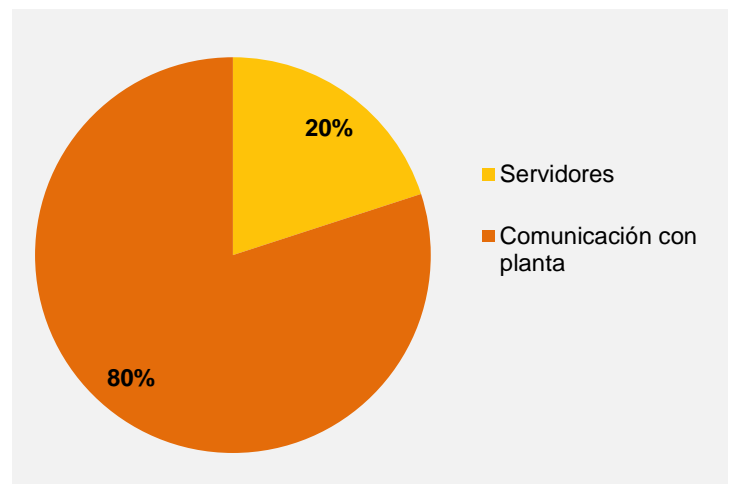
Tabla 7: Detalle de fallas de las instalaciones de media tensión

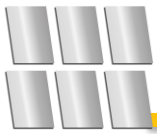
Falla	Compañía	Descripción de la Falla	Causa de la Falla	Impacto principal de la falla	Medida Correctiva Falla	Tiempo estimado de reparación de la falla	Capacidad técnica- humana para solucionar la Falla
<b>Fallas de Cable</b>							
Mecánicas	X5	Falla en mufa	Mala unión	Pérdida de generación de inversor			
Mecánicas	X6	Falla en mufa	Desconocida	Pérdida de generación			
Roedores	X1	Se han detectado cables mordidos por ratones pero sin falla del cable, no hubo corte de conexión.	Roedor	No se perdió producción, se cambió cable	Se cambió cable		Personal propio
<b>Conexionado</b>							
Mufas	X5	Falla en mufa (unión)	Mala unión	Pérdida de generación de inversor			
Terminales	X5	Falla en blindobarra (terminal e unión)	Desconocida	Pérdida de generación de inversor			

## 7. SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition)

Es un Sistema que permite la supervisión y control local de todas las operaciones relacionadas con el control, medición y distribución de la energía eléctrica realizadas dentro de la planta fotovoltaica. Las posibles fallas se presentan en la implementación, los servidores, en la comunicación con la planta y en la comunicación con el operador.

Figura 20: Scada





El SCADA en general no presenta mayores problemas ni fallas. Lo que si ocurre es un problema de la comunicación con las plantas debido al software remoto que utilizan algunas de ellas para poder conectarse con sus oficinas centrales.

Figura 21: Tasa de falla SCADA

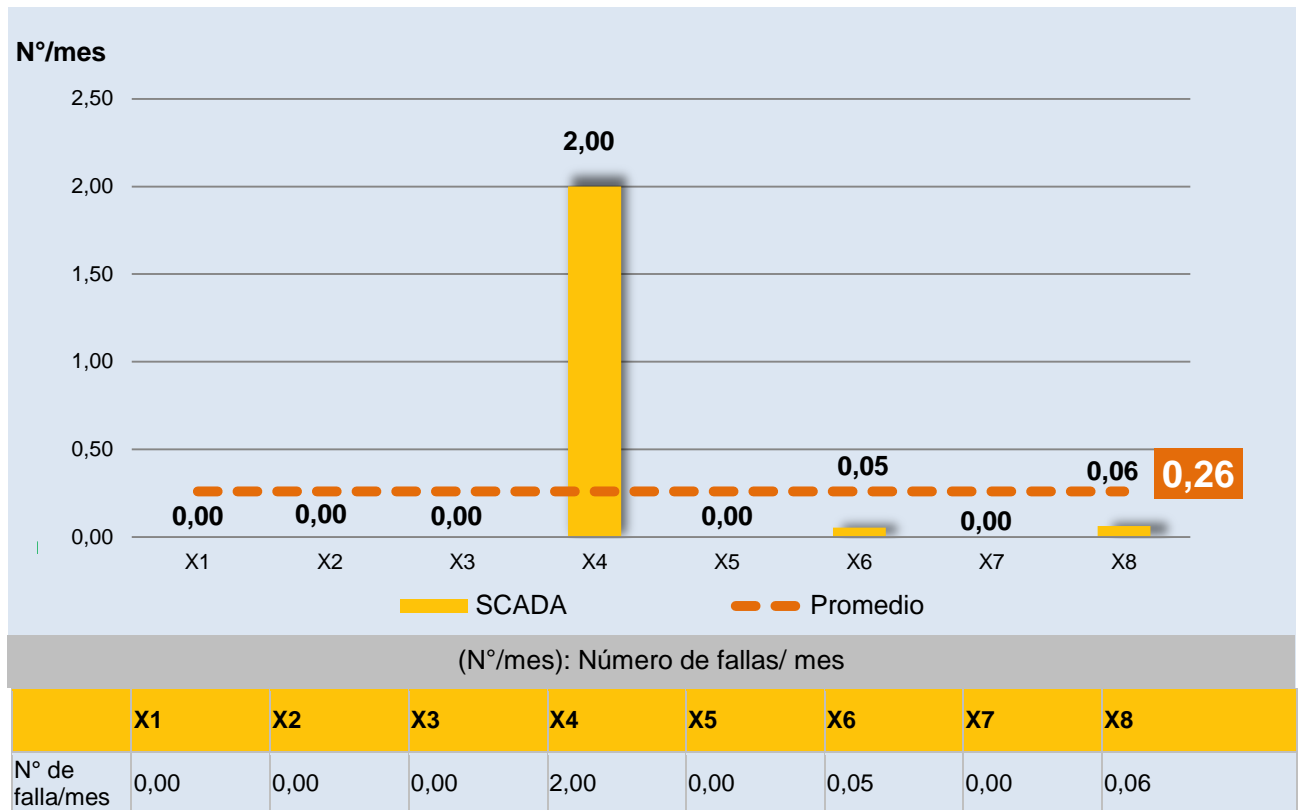
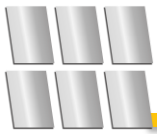


Tabla 8: Detalle de fallas del SCADA

Falla	Compañía	Descripción de la Falla	Causa de la Falla	Impacto principal de la falla	Medida Correctiva Falla	Tiempo estimado de reparación de la falla	Capacidad técnica- humana para solucionar la Falla
Servidores	X6	Falla en PPC <sup>12</sup>	Desconocida	Pérdida de generación			
Servidores	X8	Falla en PPC	Desconocida	Pérdida de energía			
Comunicación con planta	X4	Se presenta un problema de conexión remota de software con Santiago.	Múltiples usuarios. Desconexión del computador.	Se tiene que viajar a la planta a solucionar	Se debe resetear el sistema en la planta.	1 hora	Técnicos propios de la planta o encargados en Santiago.

<sup>12</sup> PPC: Power Plant Control o sistema automático de control de la Planta



## 8. Comunicaciones

Se refiere a las comunicaciones de las plantas generadoras con el Coordinador Eléctrico Nacional. Las fallas las podemos encontrar en el enlace principal, enlace redundante, onda portadora y hardware.

En el caso de las comunicaciones, las fallas detectadas que afectan el enlace principal corresponden a problemas externos a la planta. La causa puede ser por temas de vandalismo o directamente problemas del proveedor de servicios, estos últimos son quienes deben responder rápidamente para dar una solución.

Figura 22: Comunicaciones

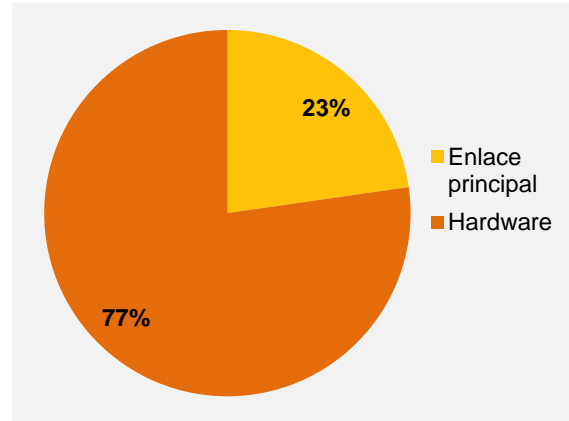
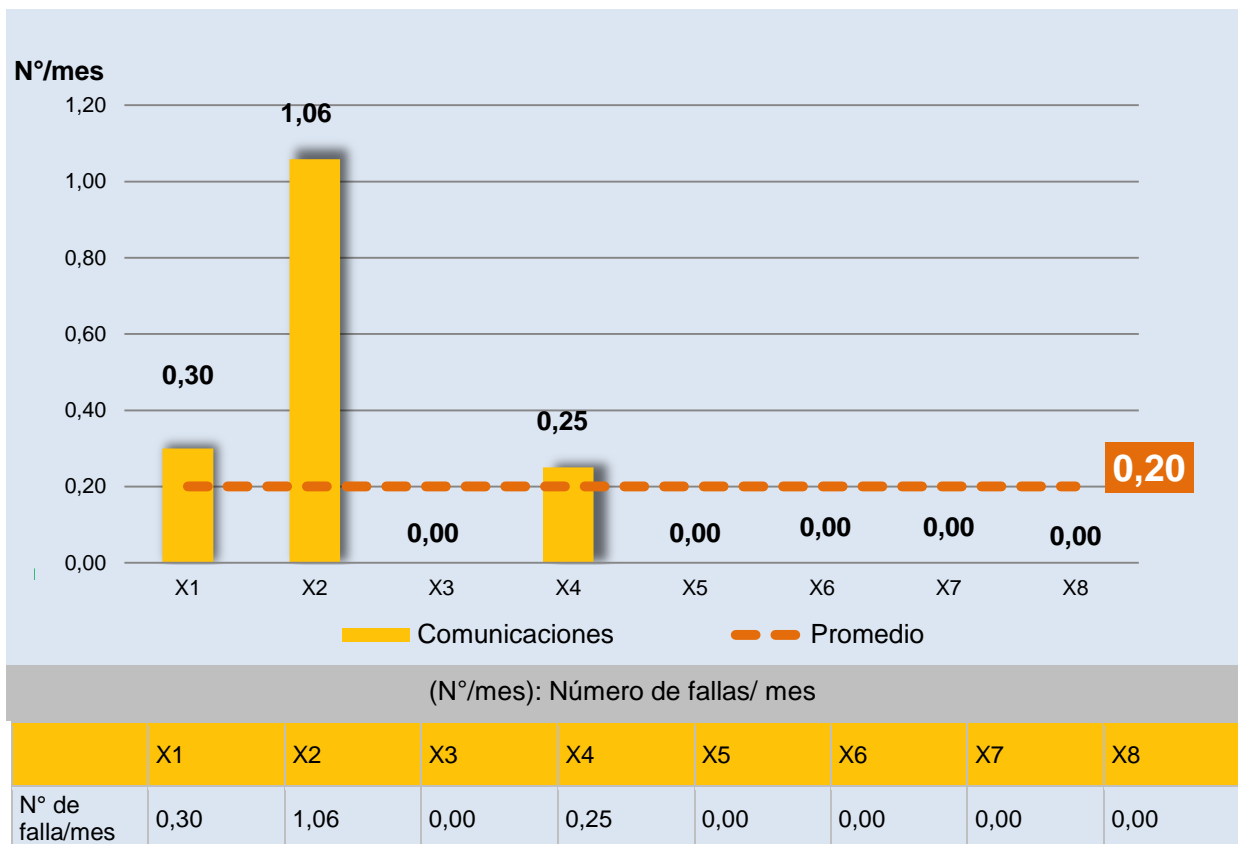


Figura 23: Tasa de falla Comunicaciones



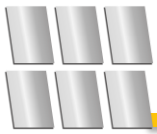


Tabla 9: Detalle de fallas de comunicación

Falla	Compañía	Descripción de la Falla	Causa de la Falla	Impacto principal de la falla	Medida Correctiva Falla	Tiempo estimado de reparación de la falla	Capacidad técnica- humana para solucionar la Falla
Enlace Principal	X4	Se cortó la línea una vez, se quedaron sin conexión	Problema externo de proveedor de servicios. Sin respaldo satelital. No saben porque fallo enlace principal	Planta quedó en cero ya que se cortó toda la comunicación	Proveedor de servicios tuvo que reparar el problema	Horas	Equipo externo del proveedor
Enlace Principal	X1	Hubo desconexión externa de la fibra óptica.	Vandalismo	Desconexión con el CDEC	Se reparó	1 día	
Enlace Principal	X2	Sin internet en la planta, fallas mpls <sup>13</sup>	Falla del proveedor		Reposición del servicio.	1 día	Proveedor repuso servicio.
Hardware	X2	Algunos firmware de los switch no se han actualizado y se quedan pegados	Firmware no actualizado	2 veces los han bajado al mínimo	Actualización firmware	Horas	Técnicos, con procedimiento internos

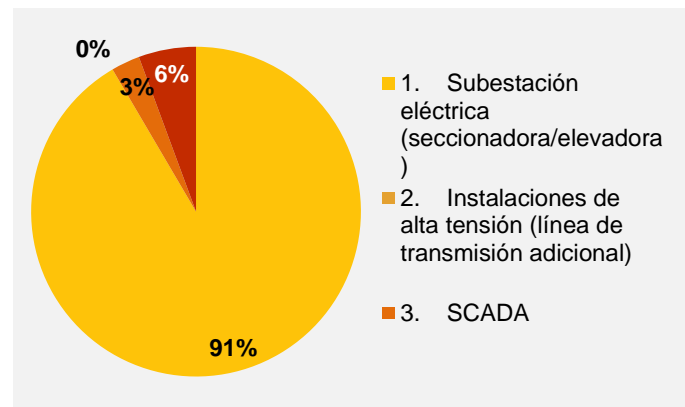
### 9.3 Subestación Elevadora y Línea de Transmisión

Una Subestación Elevadora es una instalación que eleva el nivel de tensión generada por la Planta Fotovoltaica de media a alta tensión, antes de entregar la energía a las líneas de distribución. El nivel de tensión se eleva a través de transformadores.

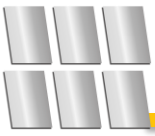
Se consideró como Línea de Transmisión el conjunto de estructuras y cables que unen la Subestación Elevadora con las Líneas principales del Sistema de Distribución de energía.

Se observa en el siguiente gráfico que las fallas se centran en un 91% en la subestación eléctrica. La cantidad de fallas en la subestación son bastante menores que las presentes en la planta fotovoltaica.

Figura 24: Distribución por tipo de falla Subestación Elevadora



<sup>13</sup> MPLS: Multiprotocol Label Switching o red principal de comunicaciones de un portador de datos.



## 1. Subestación Eléctrica (seccionadora/elevadora)

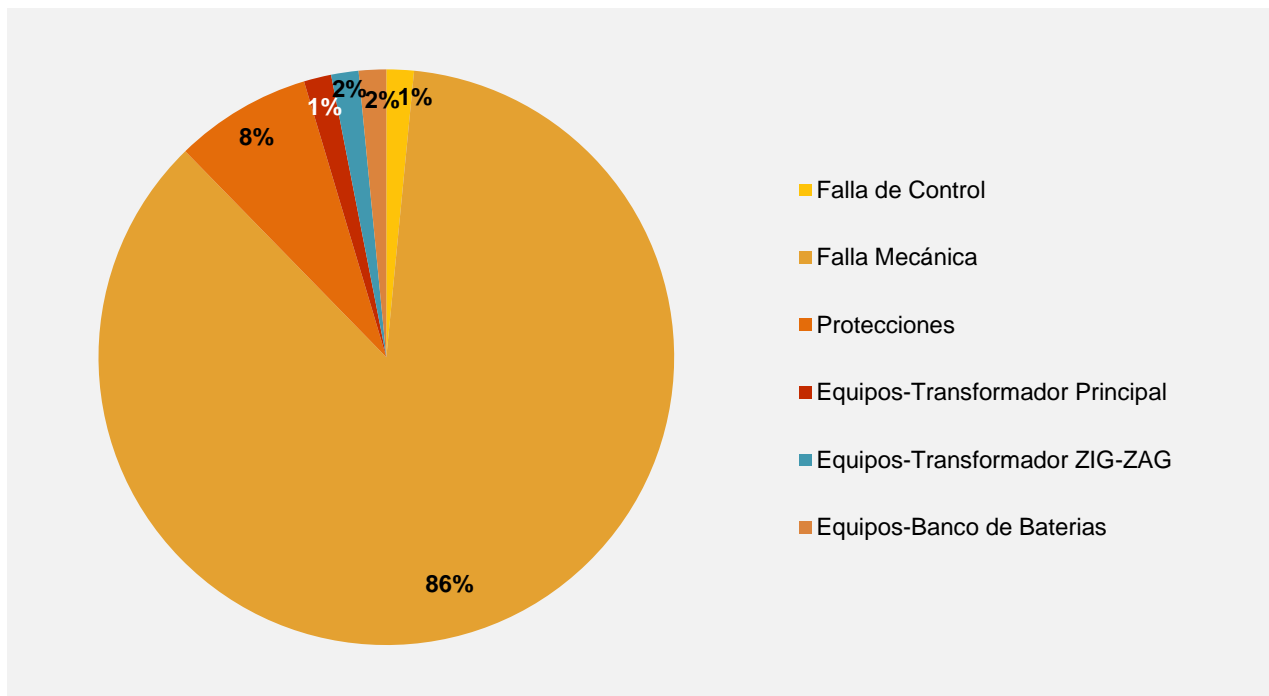
La Subestación Eléctrica es la instalación destinada a elevar los niveles de tensión interiores de la planta fotovoltaica y adecuarlos para la transmisión y distribución de la energía eléctrica. Su equipo principal es el transformador elevador.

Las Subestaciones pueden presentar fallas en sus componentes de control (SCADA) y comunicaciones. Además pueden presentar fallas eléctricas, fallas mecánicas, fallas en las protecciones, fallas por falta de lavado de aisladores y fallas en sus distintos equipos. De estos, dividimos la Subestación en transformador principal, transformador ZIG-ZAG, medidor energía, Transformadores de Corriente, Transformadores de Potencia, interruptores, seccionadores, transformador SSAA y banco de baterías.

Las mayoría fallas en la subestación eléctrica son las fallas mecánicas, donde principalmente los problemas con las mufas (uniones) y las celdas MT, son los más frecuentes.

Se detectaron también problemas en los Tap-off y en los transformadores, donde en estos últimos, se presentaron filtraciones de aceite.

Figura 25: Distribución por tipo de falla Subestación Eléctrica





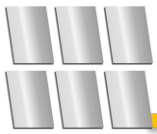


Figura 26: Tasa de falla Subestación Eléctrica

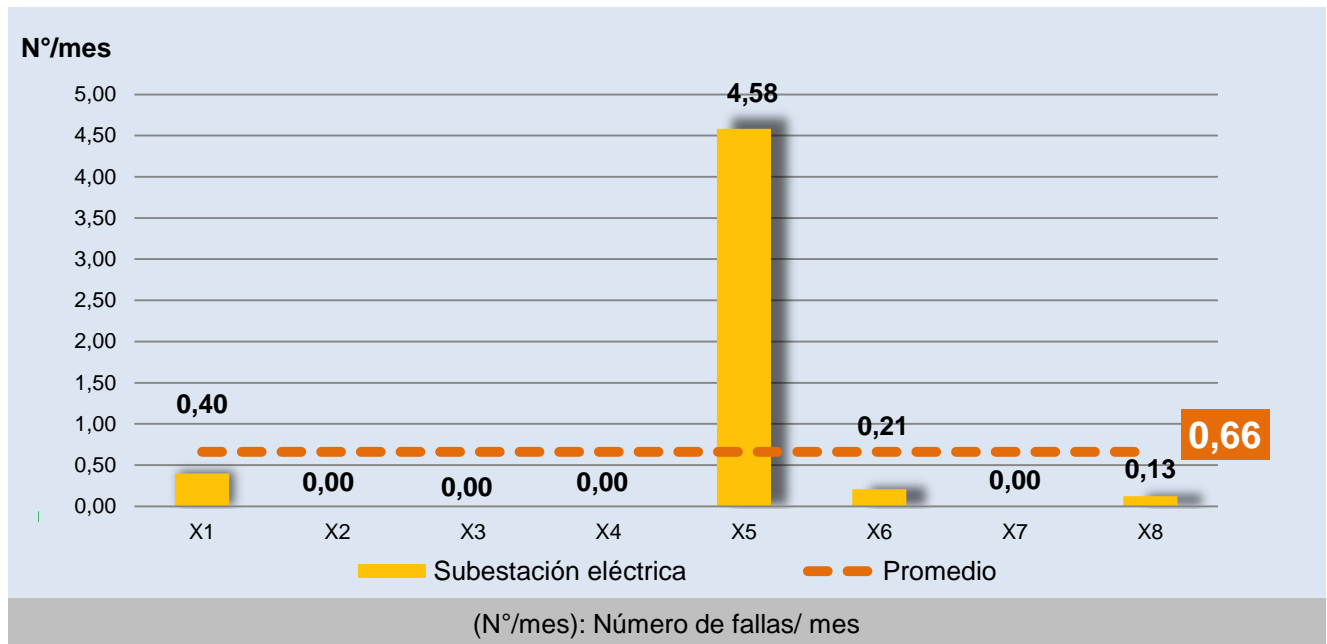
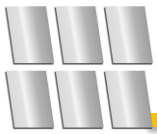


Tabla 10: Detalle de fallas de la Subestación Eléctrica

Falla	Compañía	Descripción de la Falla	Causa de la Falla	Impacto principal de la falla	Medida Correctiva Falla	Tiempo estimado de reparación de la falla	Capacidad técnica-humana para solucionar la Falla
Control - Comunicación	X1	Una falla por microonda, no crítica porque era parte del sistema secundario	No se sabe, pero es posible que por diseño	No hubo pérdida de producción	Se reparó equipo		
Mecánica	X5	Falla en mufa (unión)	Mala unión	Pérdida de generación de inversor			
Mecánica	X6	Falla en celda MT	Desconocida	Pérdida de generación			
Protecciones	X6	Falla en protección Tapoff	Desconocida	Pérdida de generación			
Protecciones	X8	Falla en protección Tapoff	Desconocida	Pérdida de generación			
Transformador Principal	X1	Filtración de aceite	Construcción	No hay	Se cambió o-ring, que estaba en garantía, se cambiaron también los sellos	2 días	Apoyo externo, cumplimiento garantía.
Transformador ZIG-ZAG	X1	Filtración de aceite	Construcción	No hay		1 día	Apoyo externo, cumplimiento garantía



## 2. Instalaciones de alta tensión (línea de transmisión adicional)

Se consideran en la instalación de alta tensión la línea de transmisión, que en caso de existir, es necesaria para conectar la Planta a la red. Dentro de las fallas posibles en la línea de transmisión, se consideraron fallas eléctricas, mecánicas, por comunicaciones y por falta de lavado de aisladores.

Las instalaciones de alta tensión no han presentado ninguna falla en la muestra obtenida de las empresas participantes del estudio.

## 3. SCADA

Es un sistema que permite la supervisión y control local de todas las operaciones relacionadas con el control, medición y distribución de la energía eléctrica realizadas dentro de las subestaciones. También garantiza el acceso remoto para el telemando de la subestación. Las posibles fallas se presentan en la implementación, los servidores, en la comunicación con la planta y en la comunicación con el operador.

La falla presentada en el SCADA de la subestación es básicamente por un problema del servidor que se detiene su funcionamiento. La solución implica resetear el servidor, proceso que tarda unos minutos y no requiere de una mayor intervención.

Falla	Compañía	Descripción de la Falla	Causa de la Falla	Impacto principal de la falla	Medida Correctiva Falla	Tiempo estimado de reparación de la falla	Capacidad técnica- humana para solucionar la Falla
Servidores	X4	Los servidores se pegan	Problema de comunicación externa	Pérdida de comunicación	Se resetea servidor	Minutos	Equipo propio

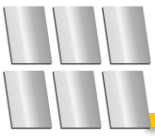
## 4. Comunicaciones

Se refiere las comunicaciones de las plantas generadoras con el Coordinador Eléctrico Nacional (CEN). Las fallas las podemos encontrar en el enlace principal, enlace redundante, onda portadora y hardware.

Las fallas de comunicación se centran en las ocurridas en el enlace principal, sin embargo no son fallas comunes y en su mayoría han sido ocasionadas por terceros. Estas corresponden al 6% de las fallas presentes en las subestaciones elevadoras, como se muestra en la Figura 25.

Tabla 11: Detalle de fallas de comunicación

Falla	Compañía	Descripción de la Falla	Causa de la Falla	Impacto principal de la falla	Medida Correctiva Falla	Tiempo estimado de reparación de la falla	Capacidad técnica- humana para solucionar la Falla
Enlace Principal	X4	Se corta la comunicación principal	Falla el software remoto	Se pierde comunicación	Se resetea computador	20 minutos	Equipo propio en planta
Enlace Principal	X1	Desconexión externa de la fibra óptica	Vandalismo	Desconexión con el CEN	Se repara fibra	1 día	Técnicos de proveedores de servicio



## 10. Propuesta de medidas preventivas y de mitigación para distintos tipos de fallas

Tomando en consideración los resultados del estudio en cuanto a números de fallas en cada una de los componentes de las plantas, es posible apreciar que su orden de importancia es el siguiente:

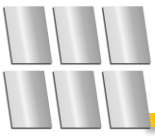
1. Centro de Transformación.
2. Paneles FV.
3. Instalaciones en Media Tensión.
4. Instalaciones en Baja Tensión.
5. Seguidores.

De estas fallas mencionadas, según los encuestados, la mayor cantidad de fallas presentes en los Paneles FV, Instalaciones en Media Tensión, Instalaciones en Baja Tensión, SCADA, Comunicaciones y Estructuras Soportantes de Paneles, se deben principalmente a la herencia de la etapa de construcción y comisionamiento. Asimismo, las fallas en los Paneles FV e Instalaciones en Baja Tensión tienen una baja contribución a las pérdidas de generación, a lo que adicionalmente, si se considera que los recursos que se deben destinar a encontrarlas es mayor respecto a otras fallas de mayor impacto en la generación, se cree que por ahora el actual criterio de mantenimiento ante la falla es el adecuado, hasta que las otras fallas se tengan controladas y solucionadas.

Una vez logrado esto, el método a utilizar para hacer frente a estas fallas de bajo impacto en la generación, y poder solucionarlas tempranamente de manera eficaz y eficiente en el uso de recursos, es a través de algoritmos automáticos de análisis del comportamiento de estos componentes, comparándolos entre ellos en una misma Planta, donde el algoritmo indica a las personas de mantenimiento cuales son los que tienen mayor probabilidad de tener una falla. Esto es conocido en la Industria Solar como Performance Engineering, donde el objetivo de este tipo de análisis es llegar al mantenimiento predictivo en las plantas solares.

Este análisis realizado por las áreas de Performance Engineering tiene especial importancia en las plantas del tipo Utility, como en las que se realizó la encuesta, y en particular en las áreas de Baja Tensión, porque el número de puntos a analizar es tremendamente grande. Esto lo hacen a través de algoritmos de comparación de la data del SCADA diariamente, con lo que son capaces de encontrar un *string* dentro de los cientos o miles de *strings* de una Planta, que está con un rendimiento menor al resto de sus vecinos (mismas condiciones operacionales), para así identificarlo e indicarlo a las personas de mantenimiento de una Planta y sea incorporado dentro de los trabajos de mantenimiento a realizar.

Sólo en dos Plantas de las visitadas se comentó que tienen implementado Performance Engineering, lo que se ve reflejado en que tienen menos personal con respecto a la capacidad instalada.



De las fallas que se presentan en los Centros de Transformación, las más relevantes en orden de importancia son:

1. Problemas en el lado Control.
2. Problemas en el lado Fuerza.
3. Exceso de Temperatura.
4. Elementos de Fuerza.
5. Elementos de Control.

De acuerdo a los datos revelados, tanto las fallas en Control, Fuerza, en Elementos de Fuerza y en Elementos de Control, obedecen principalmente a problemas inherentes a los mismos equipos, es decir, a fallas del fabricante, ya sea por firmware, programación de los inversores, componentes o elementos con fallas de fabricación y/o instalación, y a problemas de la red externa a las plantas, esto es, problemas de tensión o de frecuencia en la red, y no a problemas de la operación común de la plantas o del ambiente en el que están inmersas.

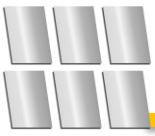
Para los problemas que tienen como origen las fallas del fabricante, de acuerdo a relatos de los entrevistados, la manera de erradicar estas fallas es realizar un trabajo de análisis de causa raíz en conjunto con los fabricantes, para que ellos posteriormente puedan hacer los ajustes necesarios para que estas no vuelvan a ocurrir. Esto se evidenció en una de las plantas en la que se realizó la encuesta, ya que en la etapa de comisionamiento de esta planta, los inversores presentaron similares problemas y se solucionaron antes de entrar en Operación Comercial mediante un trabajo detallado en conjunto con el fabricante de los equipos.

Para el caso de las fallas por exceso de Temperatura, según se evidenció en las encuestas, esta se presenta principalmente en los inversores que están dentro de casetas, debido a la saturación de los filtros de ventilación o fallas en los ventiladores que se utilizan para hacer circular el aire dentro de las cabinas.

En el caso de las plantas con inversores a intemperie, se evidenció que éstos no presentan estas fallas por exceso de Temperatura debido a que están especialmente diseñados para que no les entre el polvo o sus sistemas de refrigeración no se ven afectados por él.

De acuerdo a lo mencionado por los entrevistados de la plantas con inversores para intemperie, ellos limpian sus inversores por protocolo 1 vez al año, no encontrando en esa limpieza polvo dentro de los equipos, lo que podría eventualmente, justificar una ampliación al plazo de limpieza de 1 vez por año.

Al centrarse en la falla por exceso de Temperatura en los inversores dentro de cabina, los entrevistados nos confirmaron que no obstante que cumplen los periodos de limpieza de filtros según el programa de mantenimiento preventivo, y que algunos de los SCADA tienen alarmas para dar aviso de las fallas de los ventiladores, igualmente los inversores presentan problemas por Temperatura, cuya principal causa es la



saturación por polvo de los filtros de aire de las cabinas. Más aun, según nos relatan los encuestados, este problema se da aleatoriamente en las distintas cabinas, por lo que aumentar la frecuencia de limpiado o cambio no necesariamente soluciona el problema.

Lo anterior nos lleva a sugerir la implementación de un mantenimiento basado en la condición de los inversores dentro de las cabinas, además de un monitoreo de su rendimiento mediante algoritmos inteligentes, para evitar las fallas por exceso de Temperatura. Este tipo de análisis es lo que se realiza fuera de Chile en los Centros Avanzados de Monitoreo de Centrales Fotovoltaicas (Performance Engineering).

En el caso de mantenimiento basado en la condición, se monitorean por ejemplo, la temperatura exterior y la temperatura interior de la cabina, las que son analizadas mediante tendencias y límites máximos, para gatillar órdenes automáticas de trabajo de limpieza de filtros a los técnicos de terreno. Con éste tipo de análisis indirecto, es posible focalizar los recursos en las actividades que tienen mayor probabilidad de ocurrencia con un mayor grado de severidad (en la pérdida de generación), logrando así una mayor efectividad en la tareas a realizadas.

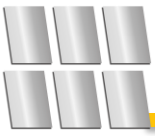
En relación a las fallas que se presentan en las Instalaciones en Media Tensión, se pudo evidenciar de los datos recabados en las encuestas, que la principal falla que presentan en uniones defectuosas o mufas, y en los terminales, todos lo que fueron causados durante la etapa de construcción y no tienen origen alguno en la operación habitual de una Planta Fotovoltaica. Por esta razón, la forma de evitar estas fallas durante la operación de las plantas, es la correcta y estricta implementación de un control de calidad sobre los procesos de unión de cables en terreno durante la construcción de las plantas.

En el caso de las fallas que presentan los seguidores, estas se agrupan por orden decreciente en cantidad en:

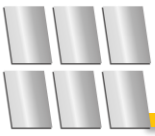
1. Fallas Mecánicas.
2. Fallas de Control.
3. Fallas de Eléctricas.

La causa de las Fallas Mecánicas se debe a que el protector del seguidor presentó una rotura, entrando polvo al sistema, lo que provoca que se traben. Este tipo de problema se presenta exclusivamente en los seguidores multifila, por lo que la recomendación en este caso, es mantener el criterio de mantenimiento correctivo considerando el tener repuestos de protector, ya que la tasa de falla es baja y la probabilidad de falla también es baja.

Para el caso de las Fallas de Control, estas se presentan cuando las plantas son desconectadas y vuelven a conectar a la red. Considerando que este evento es muy poco habitual y que las pérdidas de generación son menores ante la falla de un seguidor, el criterio de hacerle seguimiento al funcionamiento de los seguidores mediante los SCADA, es la adecuada.



En relación a las Fallas Eléctricas, de acuerdo a los resultados de la encuesta, estas se han presentado en los motores de los seguidores principalmente a causa de los equipos que alimentan los motores y en un caso por problemas internos de un motor. En ambos casos, y por la antigüedad de las plantas, por el gran número de seguidores instalados (cerca de los 100.000 seguidores), este tipo de fallas se catalogan dentro de lo que se llama “mortalidad infantil”. Considerando esto, y de acuerdo a los encuestados, el mantener los programas de mantenimiento preventivo, que es muy mínimo, y mantener los seguidores a la falla, es el criterio adecuado.



## 11. Identificación, definición y propuesta metodología para realizar un análisis periódico de indicadores de operación y mantención de plantas solares fotovoltaicas

Un reporte de indicadores realizado de manera periódica, es un instrumento de apoyo para las empresas u organizaciones que buscan evaluar variados aspectos de los procesos mediante el análisis de indicadores de gestión, operación y mantención, y compararlos con estándares de “Mejores Prácticas”.

Es importante que la industria de energía solar haga el esfuerzo de unirse y trabajar en conjunto en obtener un estudio que les permita crear una base de datos con información relevante para la gestión estratégica de los negocios, compartir prácticas y oportunidades de mejora en los procesos, con el objetivo de plantearse y cumplir metas más desafiantes.

Para la realización de un estudio de Benchmarking es fundamental que sea gestionado y coordinado por una empresa mediadora para resguardar las políticas de antitrust y confidencialidad de la información.

A continuación se presenta las etapas principales para la elaboración de un estudio de este tipo.

### 11.1 Alcance y Periodicidad:

El estudio contempla la participación de plantas fotovoltaicas de Chile, con más de 3 meses de funcionamiento.

El realizarlo de manera periódica y permanente en el tiempo, comenzando desde ahora, también permitirá ir analizando el envejecimiento e las plantas, lo que es muy importante no sólo a nivel nacional, sino mundial, ya que las plantas más antiguas tienen alrededor de 5 años.

Se propone un estudio que considere indicadores de gestión, operación y mantención, realizándose en forma semestral y según un calendario detallado que será enviado a todos los participantes.

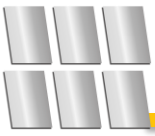
### 11.2 Metodología

Para contribuir a la mejora continua de los procesos de gestión, operación y mantención de las plantas solares, es posible proponer la realización de un estudio esporádico según la siguiente Metodología:

#### 11.2.1 Identificación de Categorías e Indicadores

##### 11.2.1.1 Definición de Categorías

Para tener un enfoque global de proceso se sugiere subdividir los indicadores en grupos e incluir en cada uno de ellos los indicadores que se señalan a continuación:



### -Indicadores de Gestión

- Ausentismo del personal operativo en planta
- Razón Dotación Externa/ Dotación Propia
- Razón Capacidad Instalada /Dotación Total Personal Operativo
- Razón Capacidad Energía /Dotación Total Personal Operativo
- Consumo de Energía/ Energía Generada
- Costo O&M/ Energía Generada

### -Indicadores de Operación (Generación y Almacenamiento)

- Disponibilidad= Energía Disponible/Energía teórica\*100
- Rendimiento: (PR): (Energía real generada / Energía teórica generada)\*100
- Pérdida de energía: Porcentaje de energía generada que pudo ser generada, pero por restricciones del sistema, no pudo ser entregada.

### -Indicadores de Mantenimiento:

- Distribución por Tipo de Falla por Elemento (%)
- Indisponibilidad: (Energía no generada por mantenimiento programado / Energía teórica)\*100
- Cumplimiento del Programa=100 X Energía Eléctrica Entregada / Energía Programada por el predespacho de Generación (%).
- (Cantidad de Horas-Hombre de mantenimiento realizadas / Cantidad de Horas-Hombre de mantenimiento programadas)\*100

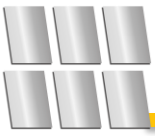
#### 11.2.1.2 Definición y Construcción de Manual de Indicadores

El reporte debe contener indicadores claves del proceso que cumplan ciertos criterios que aseguren su utilidad para alcanzar los objetivos requeridos.

Los criterios son los siguientes:

- **Homologado:** debe existir una definición clara conocida por todos los integrantes del estudio, que permita que el indicador sea comparable, dentro de la empresa o a nivel de industria.





- **Validado:** revisión de los requisitos previamente establecidos, por personal capacitado y autorizado.
- **Cuantificable:** el indicador debe ser numéricamente medible.
- **Oportuno:** debe reflejar la información real en el tiempo requerido.
- **Trazable:** fuente de información conocida e identificable.
- **Identificable:** fácil reconocimiento de la ubicación del indicador dentro del proceso.
- **Relevante:** el indicador debe aportar a la mejora del proceso.
- **Bajo Costo:** La recopilación de información debe tener un costo razonable.
- **Entendible:** Deben ser sencillos, conceptualmente claros, y directos. Deben representar lo mismo para todos los niveles dentro de la organización.

Para cumplir con los criterios mencionados anteriormente es necesario que cada indicador cuente con una ficha, que contenga la definición y sus principales características. Se recomienda que la estructura de esta ficha esté basada en la **Norma ISO 22.400-1:2014**.

En el Anexo se encuentra un ejemplo de ficha de indicador.

## 11.2.2 Levantamiento de Información

### 11.2.2.1 Fuentes de Información

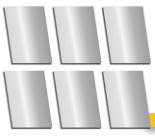
En el proceso de creación y seguimiento de indicadores de gestión, es necesario contar con fuentes de información confiables, que permitan obtener los datos de manera rápida y en tiempo real.

Es relevante que todo el personal involucrado en el proceso de obtención de datos esté informado sobre las fuentes de información que deben consultar a la hora de extraer la data. Además, se debe registrar la trazabilidad del dato obtenido, asegurando así su veracidad.

### 11.2.2.2 Recopilación de Información

Para el proceso de recopilación de información, se propone trabajar en conjunto en la creación y validación de un cuestionario (formato Excel) que permita levantar la información requerida de manera simple, asegurando el rápido procesamiento de la data.

Una vez completados los cuestionarios con la información requerida, es necesario realizar la validación de la data, de manera tal de asegurar la obtención de buenos resultados. Para este proceso se plantea la realización periódica de reuniones de trabajo en conjunto, para asegurar la coherencia y lógica de la información.



### **11.2.3 Construcción de base de datos y procesamiento de información.**

Es necesario revisar distintos factores a la hora de construir la base de datos. En primer lugar es de suma importancia realizar una revisión general de la data, por ejemplo: que todos los números presenten la métrica correspondiente, revisar errores de lógica y datos atípicos.

En segundo lugar se debe efectuar una revisión de las ecuaciones de cálculo de los indicadores y sus variables respectiva, asegurando que estas sean las mismas presentadas en los manuales de indicadores.

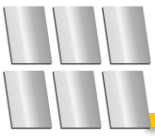
### **11.2.4 Preparación del Informe de Resultados**

Una vez obtenidos los indicadores, se procede a la construcción del reporte de resultados, donde se representa la información obtenida de manera gráfica y en tablas.

### **11.2.5 Proceso de Mejora Continua**

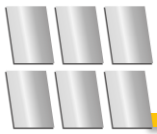
De manera de asegurar la mejora continua del proceso, es necesario tener una retroalimentación por parte de las empresas participantes, revisando:

- Debilidades del Proceso
- Recomendaciones del Proceso
- Revisión constante de Manual de Indicadores



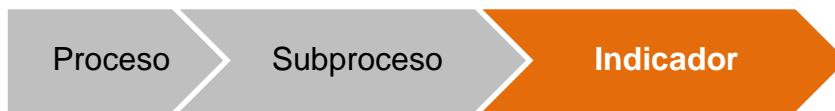
## 12. Bibliografía, fuentes

- Cifuentes, R.L. (21 de 01 de 2016). *Guía de Conexión de Proyectos ERNC Edición Bilingüe*. Obtenido de CIFES: <http://cifes.gob.cl/>
- CNE (Comisión Nacional de Energía). *Anuario Estadístico de Energía 2005-2015*. Chile:CNE
- GTM Research. *Solar Research Publications*. Obtenido de <https://www.greentechmedia.com>
- ISO (International Organization for Standardization). *Automation systems and integration - Key performance indicators (KPIs) for manufacturing operations management, Part 1*. 2014.
- Lazard. *Lazard's Levelized Cost of Energy Analysis - Version 10*. Obtenido de <https://www.lazard.com/media/438038/levelized-cost-of-energy-v100.pdf>
- UGP (Unidad de Gestión de Proyectos). Ministerio de Energía de Chile. *Proyectos en Construcción e Ingresados a SEIA*. Obtenido de <http://www.energia.gob.cl/publicaciones>



## 13. Anexo

1.1.1 Nombre del Indicador	[ID: XX.01.01]
----------------------------	----------------



**Proceso:** Nombre del proceso al que pertenece el indicador

### Contenido

<b>Alcance</b>	Límite de batería correspondiente al indicar.
<b>Descripción</b>	Definición del indicador.
<b>Fórmula</b>	<i>Indicador = Formula matematica de cálculo</i>
<b>Variables</b>	Definición de las variables incluidas en el indicador.
<b>Unidad de medida</b>	Unidad de medida del indicador
<b>Rango</b>	De existir información histórica, el rango define valores mínimos y máximos en que se puede mover el indicar.
<b>Tendencia</b>	Dependiendo de la naturaleza del indicador, la tendencia define su incidencia positiva al proceso.

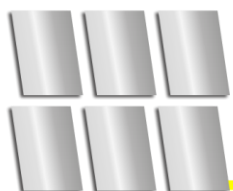
### Contexto

<b>Categoría</b>	Operación <input type="checkbox"/>	Mantenimiento <input type="checkbox"/>	Gestión <input type="checkbox"/>	Costos <input type="checkbox"/>
<b>Notas</b>	Cualquier información adicional.			



PROGRAMA  
**ENERGÍA SOLAR**

COMITÉCORFO



## Estudio Benchmarking de Plantas Solares Fotovoltaicas en Chile

Programa Energía Solar

Desarrollado por

