



Lecciones aprendidas del diseño de parques solares fotovoltaicos: Un enfoque de las características técnicas

Lessons Learned from Design of Photovoltaic Solar Parks: An Approach on Technical Characteristics

Juan David Marín-Jiménez^{1*}, Parménides Justo González-Cruz²

¹ Universidad Nacional de Colombia – Sede Manizales, Colombia

² IPG S.A., empresa privada, Panamá

*Autor de correspondencia: jdmarinj@unal.edu.co

RESUMEN– El diseño de parques solares fotovoltaicos presenta una incertidumbre técnica en la búsqueda de una solución óptima (beneficio/costo) para implementar en un determinado proyecto. Los beneficios en la selección de un sistema de inversores centralizados o distribuidos varían según la disposición tecnológica de cada país. Adicionalmente, los recientes desarrollos tecnológicos pueden presentar incompatibilidad con tecnologías tradicionales, es decir, la elección de una tecnología de inversores exigiría utilizar toda la gama de productos de determinada compañía. Por lo tanto, seleccionar unas características para el diseño (tecnología en inversores centralizados o distribuidos, capacidad de cada panel solar de 330 Wp o 390 Wp) debe considerar una solución integral que incluya entre otros los impactos: técnicos (confiabilidad, pérdidas eléctricas, regulación, nivel de tensión, etc); económicos (precio de equipos, costos nivelados - LCOE, venta de energía, contratos de compra de energía, mantenimiento); logísticos (tiempos de importación, transporte de equipos, necesidad de infraestructura de telecomunicaciones y eléctrica, precio de importación de equipos, precio de tecnologías seleccionadas); regulatorios (requerimientos técnicos de cada país). En el presente paper se presentan las lecciones aprendidas durante la realización del diseño de un Parque Solar de 20 MW ubicado en Panamá.

Palabras clave– *Diseño, Parques Solares Fotovoltaicos, Sistemas Solares.*

ABSTRACT– Design of photovoltaic solar farms presents a technical uncertainty in the search for an optimal solution (profitability/cost) to implement in a given project. The benefits in the selection of a system of centralized or distributed investors vary according to the technological disposition of each country. Additionally, recent technological developments may present incompatibility with traditional technologies, that is, the choice of an inverter technology would require the use of the full range of products of a certain company. Therefore, selecting characteristics for the design (technology in centralized or distributed inverters, capacity of each 330 Wp or 390 Wp solar panel) must consider an integral solution that includes, among others, the impacts: technical (reliability, electrical losses, regulation, voltage level, etc); economic (equipment prices, leveled costs - LCOE, energy purchase contracts, maintenance); logistics (import times, transport of equipment, telecommunications and electrical infrastructure need, equipment import price, price of selected technologies); regulatory (technical requirements of each country). This paper presents the lessons learned during the design of a 20 MW Solar Park located in Panama.

Keywords– *Design, Photovoltaic Solar Parks, Solar Systems.*

1. Introducción

La sostenibilidad en la construcción de nuevos proyectos en los sistemas eléctricos de potencia se presenta como un eje integral (técnico, social, político y ambiental) que se ha establecido al rededor del mundo durante los últimos años. Muchos países se han involucrado en la creación de políticas y leyes que permitan un desarrollo sostenible en la diversificación de la matriz energética de cada país. Dichas políticas están, en gran parte, formuladas con los objetivos establecidos en el Protocolo de Kioto y el Acuerdo de Paris. En

Panamá, se ha aprobado en todas sus partes, los objetivos establecidos en el acuerdo de Paris mediante la Ley 40/2016. Como resultado, en los últimos años se ha observado un aumento en la instalación de sistemas solares fotovoltaicos de gran escala. El aumento en la instalación de sistemas solares ocasiona una reducción en los costos debido a avances tecnológicos, economías de escala en la fabricación e innovaciones financieras, todo ellos han permitido que el mercado solar fotovoltaico se fortalezca internacionalmente. La reducción en los costos de las tecnologías de energía renovable son explicados internacionalmente como curvas de aprendizaje

Citación: J. Marín y P. González, “Lecciones aprendidas del diseño de parques solares fotovoltaicos: Un enfoque de las características técnicas”, *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 16, no. 2, pp. (no_modificar), 2020.

Tipo de artículo: Original. **Recibido:** 4 de junio de 2019. **Recibido con correcciones:** 1 de julio de 2019. **Aceptado:** 29 julio de 2019.

DOI.

Copyright: 2020 J. Marín y P. González. This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

tecnológico [1]. Por lo tanto, es fundamental realizar una evaluación integral de las alternativas existentes en el mercado que permita una selección estratégica de las características técnicas durante el diseño y ejecución de un proyecto. En este sentido, en el presente artículo se presenta una descripción de las lecciones aprendidas durante el diseño de un parque solar fotovoltaico en Panamá, bajo iniciativa Privada.

En la figura 1 se presentan las principales etapas para el desarrollo de un proyecto solar fotovoltaico a gran escala, también llamado parque solar fotovoltaico [2]. Según la capacidad del parque solar fotovoltaico es posible que algunas actividades puedan ser omitidas o presentar un mayor grado de detalle. El proceso de prefactibilidad, factibilidad y diseño debe considerar los aspectos regulatorios, permisos, licencias, equipos comerciales y un balance óptimo en términos de costos y beneficios para cada sitio en específico. Adicionalmente, los diseños deben considerar la versatilidad del mercado de cada país, es decir, no todos los países tienen el acceso tecnológico y comercial de las nuevas tecnologías. En el presente artículo se desarrolla la etapa del estudio de prefactibilidad (evaluación de las opciones técnicas, aproximación costo/beneficio y la evaluación del mercado). La efectividad de las características técnicas evaluadas en el proyecto considera las tecnologías de punta vigentes en Panamá y se comparan entre las diferentes opciones evaluadas. En la Sección 2 se presenta la selección de características técnicas para el Parque Solar de 20 MW, en la Sección 3 se presentan las condiciones técnicas y comerciales de la Regulación de Panamá para la conexión de grandes sistemas solares fotovoltaicos. Finalmente, en la Sección 4 se presentan las conclusiones.

2. Selección de características técnicas de los parques solares fotovoltaicos

La selección de características técnicas para el diseño de parques solares fotovoltaicos presenta una incertidumbre ocasionada por las múltiples alternativas tecnológicas que se presentan en el mercado mundial. A continuación, se identifican las principales características técnicas que deben ser evaluadas por los diseñadores para una selección adecuada de una solución de diseño para un parque solar fotovoltaico.

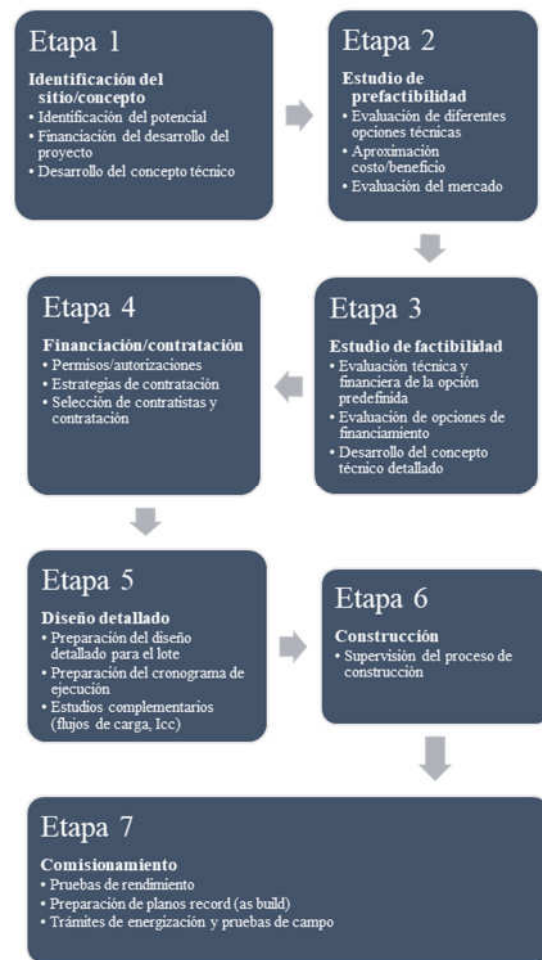


Figura 1. Etapas de desarrollo de un proyecto solar fotovoltaico a gran escala. Basado de [2].

Nivel de tensión

En los últimos dos años se ha presentado una tendencia del uso del nivel de tensión en corriente continua de 1500 VDC. El uso de dicho nivel de tensión fue motivado por los principales fabricantes de paneles e inversores quienes impulsan la nueva generación de equipos, los cuales presentan los beneficios de reducir las pérdidas de energía, ahorros de costos (reducción del cableado DC) y una mayor disponibilidad del servicio. En general, los principales beneficios de tener un sistema solar fotovoltaico a 1500 VDC son:

- Menos cajas - DC Box (concentración de series). En particular, 30% menos de cajas para una misma potencia.
- Menos cableado en DC. Al haber menos DC box, la potencia de las series va mas

concentradas, es decir más módulos en una misma cadena.

- Se pueden instalar inversores de mayor potencia (en el mercado los inversores con mayor potencia operan a 1500 VDC).
- Menor cantidad de cableado de baja tensión, dado que se presenta una menor cantidad de unidades para interconectar.

Sin embargo, el nivel de tensión de 1500 VDC ocasiona una limitación tecnológica debido a que aún no se presenta una oferta del mercado, lo que ocasiona un mayor costo en la adquisición de tecnologías. En la tabla 1 se presenta la comparación de los costos asociados a cada componente de un sistema de 1000 VDC con uno de 1500 VDC.

Tabla 1. Cambios de costos para sistemas de 1500 VDC comparados con sistemas de 1000 VDC

Componente	Cantidad de unidades	Costo unitario	Costo del sistema
Módulos/Paneles	— Igual	▲ aumenta entre el 1 y 2%	▲ aumenta +\$0.02/Wdc
Cables DC	▼ reducción del 40%	— Igual	▼ disminuye -\$0.03/Wdc
DC box	▼ reducción del 30%	▲ aumenta entre el 10 y 20%	▼ disminuye -\$0.005/Wdc
Inversores	▼ reducción del 40%	▲ aumenta entre el 80 y 100% (según la capacidad del inversor)	▼ disminuye -\$0.01/Wdc
Subsistema AC	▲ aumenta entre el 10%	▼ reducción entre 10-15%	▲ aumenta +\$0.005/Wdc
Mano de obra	— Igual		▼ disminuye -\$0.03/Wdc

El acceso tecnológico se presenta como un desafío que varía según las regiones de estudio. Es decir, algunas regiones no tienen la disponibilidad comercial de adquirir los productos de punta, de modo que la importación de una tecnología en particular presenta unos mayores costos en la importación de los productos. Sin embargo, según la capacidad de proyecto, algunos comercializadores tienen la posibilidad de ofrecer los productos a un precio del mercado

Key lessons learned:

- Técnicamente el nivel de tensión de 1500 VDC presenta un mejor desempeño técnico con respecto a pérdidas de energía. Sin embargo, no existe una cantidad suficientes de comercializadores que generen una disminución del precio.
- Con el nivel de tensión de 1500 VDC se reducen los calibres de los cables en DC, la cantidad de DC box y la cantidad de inversores, lo que ocasiona una reducción del costo del sistema.

Paneles Solares

Los paneles solares son fabricados por numerosas empresas alrededor del mundo. Algunas empresas tienen rigurosos procedimientos de calidad en la fabricación basados en estándares internacionales como el IEC 61730-1:2016 [3]. Sin embargo, otras empresas no cuentan con procedimientos estándares en la fabricación de módulos solares.

Para la selección de los paneles solares es recomendable estudiar la disponibilidad del mercado en cuanto a potencia disponible (280W, 320W, 370W, etc), estándares de fabricación de los paneles, tecnología de fabricación (monocristalino, policristalino), tiempos de importación (en caso de ser necesario) y finalmente el precio. Todas las características mencionadas deben ser consideradas durante la selección del módulo solar a utilizar en cada Planta solar.

Key lessons learned:

- Garantías y pérdidas de eficiencia. Los fabricantes de los paneles solares presentan en general garantías de 25 años. En las fichas técnicas se presenta las curvas de pérdida de eficiencia durante los 25 años. Por lo tanto, se recomienda comparar los valores de los tiempos de garantía con respecto a la eficiencia de cada panel con opción para ser adquirido.
- Certificaciones de los paneles. Se asume que entre mayor cantidad de certificaciones presenta un panel solar, mayor es la calidad del panel. Sin embargo, es necesario identificar las certificaciones y pruebas de mayor relevancia en el mercado. Requerimientos de seguridad y estándar en la construcción IEC 61730-1:2016 [4]. Pruebas de desempeño y calificación de energía IEC 61730-3:2018 [5]. Pruebas de confiabilidad y durabilidad de los paneles IEC TS 63049:2017 [6].

Inversores

En la actualidad, la selección del nivel de tensión se relaciona con el tipo de tecnología utilizada para los inversores (centralizados o distribuidos). En el mercado, los inversores centralizados operan a un nivel de tensión de 1500 VDC y los inversores distribuidos operan a un nivel de tensión de 1000 VDC (e inferior). En los últimos dos años, algunos fabricantes han desarrollado inversores distribuidos con niveles de tensión de 1500 V. En la Tabla II se presenta la comparación del cumplimiento de la regulación de Panamá con respecto a los requisitos técnicos de cuatro principales fabricantes de inversores.

Tabla 2. Compatibilidad de principales inversores comerciales con la regulación panameña

	SG125 HV String Inverter	Conext™ CL125 String Inverter	SMA Sunny Central 2500-EV	Fronius Eco 27.0-3-S1
Control de tensión	✓	✓	✓	✓
Factor de potencia (+/- 1)	✓	✓	✓	✓
Control de frecuencia/Respuesta de frecuencia	✓	✓	✓	-
Control de potencia activa	✓	✓	✓	-
Control de potencia reactiva	✓	✓	✓	✓
Operación de tensión 90% < V < 110%)	✓	✓	✓	✓

Los requisitos técnicos del Regulador de Panamá para plantas solares que inyecten más de 2500 kWp son cumplidos por 3 de los 4 fabricantes evaluados. Luego de ser verificado el cumplimiento de los requisitos técnicos del Regulador, es necesario analizar los demás parámetros de eficiencia, disponibilidad, confiabilidad, reemplazo, garantías y costos.

Key lessons learned:

- Garantías y soporte técnico. Los fabricantes de los inversores solares deben garantizar en general 5 años por defecto en equipos. Adicionalmente, se recomienda exigirle al proveedor un soporte técnico con respuesta menor a 24 horas (según la ubicación del proyecto).
- Certificaciones de los inversores. Se recomienda que los conjuntos de inversores a instalar tengan las certificaciones: pruebas recomendadas de anti-isla, variación de potencia activa y reactiva entre otras - UL 1741 [7], IEEE 1547 [8], IEEE 1547.2 [9].

Soporte de los paneles

El tipo de estructura, para soportar los paneles solares, es un elemento esencial para el máximo aprovechamiento de la radiación solar. Existen en el mercado diversos tipos de soportes. Esto pueden ser: Fijos y móviles (sin o con seguidor solar), en cada caso se ofrecen diversos modelos a diferentes precios. Debido a la ubicación, hemos encontrado poca diferencia, en cuanto a producción, entre soportes móviles contra fijos (Aprox. 2%), pero si diferencias importantes en cuanto a precios (Aprox. 20%), por lo que hemos adoptado soportes fijos. El costo de las estructuras esta entre el 20% y 25% del costo de los paneles o el 60% a 65% del costo de los Inversores, por lo que su buena elección es fundamental. Una forma de elegir es: (1) Calcular el ángulo óptimo de inclinación del panel (para Panamá esta aprox. entre 10° a 15°), (2) el tipo de terreno (sube, semi-duro o duro_rocoso) y la (3) velocidad del viento en la zona. Para nuestro caso hemos elegido el soporte fijo de 2 patas, para instalación por hincado sin cimentaciones o bloque de concreto. Otro tema importante que tuvimos que valorar fue la altura de crecimiento de la vegetación y su velocidad de crecimiento. Siendo la zona de abundante vegetación, elegimos la altura mínima, de la parte más baja del soporte, en 80cm.

Zona de emplazamiento.

El lugar donde será construido la planta solar es también de suma importancia. Esto son principalmente: El acceso a la zona, la distancia de conexión de la planta solar al sistema eléctrico (Punto de conexión), y la topografía de la zona. Este último es vital. En primer momento se calculó poner todos los paneles a un mismo nivel (Cota +12.00), el resultado fue que se necesitaba un movimiento de tierra, en costo, casi comparable en precio

de los paneles solares. Lo que hacía un proyecto no viable. Se subió a la cota (+13.00), relleno de las zonas bajas, se mejoró el costo final debido al menor movimiento de tierra. Pero finalmente, bajo análisis de costo beneficio, se tomó la decisión de hacer en dos terrazas (dos niveles). Así mismo; se dispuso la instalación de los paneles en forma ondulante o de acuerdo a la variación de la topografía del terreno en cada nivel, con cortes y rellenos mínimos. Bajo esta forma se redujo drásticamente el costo de movimiento

3. Regulación de Panamá y opciones comerciales para el proyecto

Código de redes fotovoltaico

La Autoridad Nacional de los Servicios Públicos bajo Resolución AN No. 12003-Elec establece las condiciones de conexión que son de obligatorio cumplimiento para todos los proyectos de los Sistemas de Centrales Solares y Centrales Solares con Tecnología Fotovoltaica, conectados a la red pública de distribución de energía eléctrica después del medidor, previstos de tal forma que se garantice la seguridad y estabilidad del Sistema Interconectado Nacional SIN, antes de su entrada en operación.

Para el caso de un proyecto de generación con una capacidad de instalación en su etapa inicial de 5 MWp AC se consideran los requerimientos de conexión Tipo 1. En particular dicho tipo aplica a las Centrales que en su Punto de Conexión inyecten más de 2,500 kW. A continuación, se describen las principales características solicitadas para conectar una planta de generación solar al SIN.

Condiciones Normales de Operación

- Las Centrales, deberán ser diseñados para que puedan operar dentro del rango de +/- 10% del voltaje nominal del Punto de Conexión (El rango continuo requerido de operación del voltaje es: $90\% < V < 110\%$).
- La frecuencia nominal del SIN es de 60 Hz, y las Centrales, deberán ser diseñados para que sean capaces de operar en los tiempos mínimos estipulados dentro de los rangos de frecuencia que se establecen en la tabla B.1, antes de que actúen las protecciones por Alta o Baja frecuencia.

Tabla 3. Rango de frecuencias normalizadas

Rango de frecuencia	Tempo mínimo en operación
Mayor de 61.8 Hz	Disparo instantáneo
De 61.6 Hz a 61.7 Hz	30 segundos
De 60.6 Hz a 61.5 Hz	3 minutos
De 59.5 Hz a 60.5 Hz	Operación continua
De 58.5 Hz a 59.4 Hz	3 minutos
De 57.9 Hz a 58.4 Hz	30 segundos
De 57.4 Hz a 57.8 Hz	7.5 segundos
De 57.2 Hz a 57.3 Hz	45 ciclos
Menor de 57.1	Disparo instantáneo

- En los casos de variaciones súbitas de frecuencia en el SIN, las Centrales se deberán desconectar del SIN, si la frecuencia es mayor de 62.0 Hz por más de 4 segundos, y si la frecuencia es menor de 57.0 Hz por más de 200 ms.

Condiciones de Operación con Disturbios o Fallas.

- Las Centrales, deberán ser diseñados para soportar saltos repentinos de fase hasta de 40° en el Punto de Conexión, sin desconectarse ni reducir su potencia activa disponible.
- Con base en los estudios de flujo de carga y estudios de estabilidad, se ha identificado el rango de voltaje de operación requerido para operación ante disturbios o fallas y condiciones de emergencia.
- El rango continuo requerido de operación del voltaje es: $90\% < v < 110\%$
- Durante los estados post-falla del sistema, el voltaje puede permanecer dentro del rango de +/- 10% por una cantidad de tiempo considerable.
- Capacidad de "Fault Ride Through" (FRT).

Para garantizar que las Centrales no se disparen o se desconecten durante e inmediatamente después de ocurrida una falla en el SIN, por altos o bajos voltajes, se deben especificar las características para el Bajo Voltaje LVRT (Low Voltaje Ride-Through) y para el Alto Voltaje HVRT (High Voltaje Ride-Through).

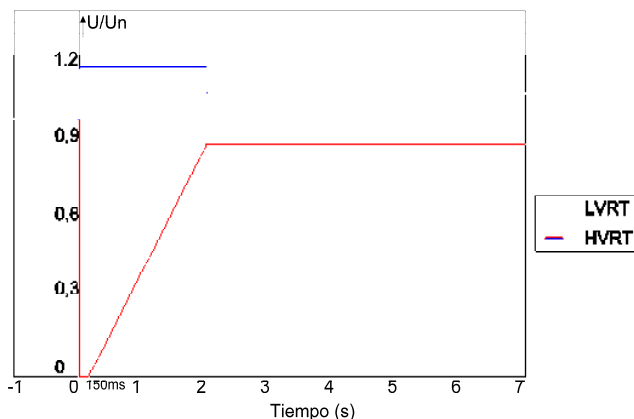


Figura 2. Requerimientos de Alto Voltaje (LVRT) y Bajo Voltaje (HVRT) para conexiones de generación en Panamá.

- Soporte de Corriente Reactiva durante Fallas en el SIN.

Las Centrales deberán tener la capacidad de proporcionar una alta corriente reactiva durante fallas en el SIN de tal manera de soportar la tensión en el Punto de Conexión.

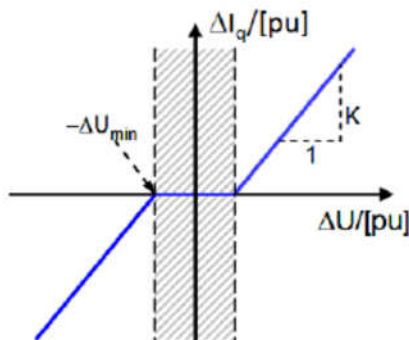


Figura 3. Cálculo de la Corriente reactiva de Falla.

Respuesta de frecuencia

Los requerimientos estipulados por esta sección aplican para la Conexión Tipo-1 solamente. En los casos de desviaciones en la frecuencia del SIN, las Centrales, deberán ser diseñados para ser capaces de suministrar una respuesta potencia - frecuencia en orden de estabilizar la frecuencia del SIN. La precisión del medidor para la frecuencia del SIN deberá ser de por lo menos +/- 10mHz.

Las Centrales, deberán ser diseñadas para ser capaces de suministrar una rápida respuesta de potencia-

frecuencia. Los requerimientos de potencia ante condiciones de sobrefrecuencia, deberá ser presentada por La Licenciataria al CND para su aprobación.

Finalmente, los requisitos técnicos exigidos en cada país varían según la actualización de estándares internacionales como la IEEE 1547, UL1741 e IEC 61850. Durante el proceso de diseño de parques solares fotovoltaicos se debe considerar la normatividad vigente exigida por el operador de red y las actualizaciones periódicas realizadas en estándares internacionales.

4. Conclusiones

En el presente artículo se han descrito las principales lecciones aprendidas durante el diseño de un parque solar fotovoltaico en Panamá.

Como conclusión podemos indicar que para proyectos de esta magnitud (20MW) los parámetros generales son: Costo US\$ 1.0 millón/MW, área requerida 0.05kW/m2. Así mismo; las múltiples alternativas tecnológicas que se presentan en el mercado permiten mejorar el desempeño integral del sistema. La evaluación de los beneficios técnicos de cada uno de los componentes del sistema y sus diferentes opciones de adquisición comercial se debe realizar considerando la totalidad del proyecto, es decir, se debe garantizar la interoperabilidad entre los diferentes elementos del sistema y los equipos del operador de red.

Los principales factores a evaluar durante el diseño de un parque solar fotovoltaico son: impactos técnicos (confiabilidad, pérdidas eléctricas, regulación, nivel de tensión, horas de brillo solar etc); económicos (precio de equipos, costos nivelados – LCOE, venta de energía, contratos de compra de energía, mantenimiento); logísticos (tiempos de importación, transporte de equipos, necesidad de infraestructura de telecomunicaciones y eléctrica, precio de importación de equipos, precio de tecnologías seleccionadas), regulatorios (requerimientos técnicos de cada país); geográficos y topográficos.

Es importante resaltar que, en base al protocolo de Kioto y los acuerdos de Paris, la necesidad de incrementar la construcción de Plantas solares es cada vez mayor, además con la entrada de la industria de automóvil eléctrico, esta será aún mayor.

Finalmente, es recomendable establecer los responsables del comisionamiento (commissioning) desde el origen del diseño de los parques solares fotovoltaicos que permita una intermediación y acuerdos multilaterales entre los inversionistas, gestores del proyecto y el equipo diseñador. Por lo tanto, los beneficios globales evaluados durante el diseño del proyecto y la adaptación tecnológica seleccionada por medio de un acuerdo mutuo, permite garantizar un éxito durante la implementación y puesta en marcha de un parque solar fotovoltaico.

5. Referencias bibliográficas

- [1] A. Masini, P. F.-T. F. and S. Change, and undefined 2003, "Forecasting the diffusion of photovoltaic systems in southern Europe: A learning curve approach," *Elsevier*.
- [2] A. Miller and B. Lumby, "This document was written for the International Finance Corporation (IFC) by."
- [3] S. Kurtz *et al.*, "Qualification Testing Versus Quantitative Reliability Testing of PV-Gaining Confidence in a Rapidly Changing Technology," 2017.
- [4] European Committee for electrotechnical Standardization, *Standard IEC 61730-1:2016: Photovoltaic (PV) module safety qualification - part 1: requirements for construction, International Electrotechnical Commission, (IEC)*. 2016, p. 106.
- [5] European Committee for electrotechnical Standardization, *Standard IEC 61730-2:2016 Photovoltaic (PV) module safety qualification - Part 2: Requirements for testing*. <https://webstore.iec.ch/publication/25680>, 2016, p. 114.
- [6] International Electrotechnical Commission, *IEC TS 63049:2017 Terrestrial photovoltaic (PV) systems - Guidelines for effective quality assurance in PV systems installation, operation and maintenance*. <https://webstore.iec.ch/publication/28444>, 2017, p. 29.
- [7] UL, *UL 1741 - Standard for Inverters, Converters, Controllers and Interconnection System Equipment for Use With Distributed Energy Resources*. 2018.
- [8] IEEE Std 1547, "IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources With Electric Power Systems," *IEEE Std 1547-2003*, pp. 0 1-16, 2003.
- [9] IEEE Std 1547.2, "IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems," *IEEE Std 1547.2-2008*, pp. 1–54, 2008.