

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

Análisis estáticos de una planta fotovoltaica en Arabia Saudí

Autor: José Manuel Rodrigo del Solar

Tutor: Miguel Ángel González Cagigal

Dpto. de Ingeniería Eléctrica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2024



Proyecto Fin de Carrera
Ingeniería de Tecnologías Industriales

Análisis estáticos de una planta fotovoltaica en Arabia Saudí

Autor:

José Manuel Rodrigo del Solar

Tutor:

Miguel Ángel González Cagigal

Profesor Ayudante Doctor

Dpto. de Ingeniería Eléctrica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2024

Proyecto Fin de Carrera: Análisis estáticos de una planta fotovoltaica en Arabia Saudí

Autor: José Manuel Rodrigo del Solar

Tutor: Miguel Ángel González Cagigal

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2024

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis amigos

A mis maestros

Agradecimientos

Con todo mi profundo aprecio y gratitud, deseo expresar mi sincero agradecimiento a aquellos que han sido pilares fundamentales en mi trayectoria académica y en la realización de este trabajo.

En primer lugar, a mi familia, por ser el apoyo incondicional en cada paso que doy. Su amor, paciencia y comprensión han sido la fuerza que me ha impulsado a seguir adelante incluso en los momentos más desafiantes.

A mis profesores, quienes no solo me han impartido conocimientos valiosos, sino que también me han enseñado a pensar críticamente y a explorar el mundo con curiosidad y entusiasmo. Su sabiduría y dedicación han sido esenciales en mi formación.

Mis amigos merecen un agradecimiento especial, por estar siempre allí, motivándome con momentos risas y momentos de disfrute a lo largo de este proceso. Su presencia ha hecho estos años académicos mucho más placenteros

Un reconocimiento especial al tutor Miguel Ángel González Cagigal, por su asesoría y orientación constante en este trabajo. Su paciencia, conocimiento y consejos han sido fundamentales para la culminación exitosa de este trabajo.

Finalmente, a todas las personas que de una u otra forma han dejado una huella en mi vida durante mi tiempo en la universidad. Cada uno de ustedes ha contribuido a mi crecimiento personal y profesional, y por ello les estoy eternamente agradecido.

José Manuel Rodrigo del Solar

Sevilla, 2024

Resumen

En este trabajo se van a realizar dos estudios eléctricos estáticos a una planta fotovoltaica en Arabia Saudí con el programa DIGSILENT Power Factory 2023, un estudio de cortocircuito y un estudio de flujo de carga cumpliendo el código de red. Para ello, se comienza haciendo una breve introducción sobre el auge de las energías renovables en los países asiáticos y los elementos de una planta fotovoltaica. Como la planta es en Arabia Saudí, también se explica el código de red del país.

Una vez introducido todo lo necesario, se muestra cómo se modela la planta previa a cualquier estudio en el programa. Cuando ya está dimensionada, se realizarán los estudios eléctricos comentados anteriormente aportando diferentes soluciones o alternativas para cumplir los requisitos impuestos. Finalmente, terminamos con unas conclusiones rápidas sobre lo trabajado en el documento.

Abstract

In this work, two static electrical studies will be carried out on a photovoltaic plant in Saudi Arabia with the DIgSILENT Power Factory 2023 program, a short circuit study and a load flow study complying with the network code. To do this, it begins with a brief introduction about the rise of renewable energies in Asian countries and the elements of a photovoltaic plant. Since the plant is in Saudi Arabia, the country's network code is also explained.

Once everything necessary has been entered, it is shown how the plant is modeled prior to any study in the program. When it is already sized, the electrical studies mentioned above will be carried out, providing different solutions or alternatives to meet the tax requirements. Finally, we finish with some quick conclusions about what we worked on in the document.

Índice

| | |
|---|--------------|
| Agradecimientos | ix |
| Resumen | xi |
| Abstract | xiii |
| Índice | xiv |
| Índice de Tablas | xvi |
| Índice de Figuras | xviii |
| Notación | xxii |
| 1 Introducción | 1 |
| 1.1 <i>Situación actual de la fotovoltaica</i> | 1 |
| 1.2 <i>Motivación del proyecto</i> | 3 |
| 1.3 <i>Propósitos y objetivos de estudio</i> | 3 |
| 2 Tecnología fotovoltaica | 5 |
| 2.1 <i>Efecto fotovoltaico</i> | 6 |
| 2.2 <i>Modelo eléctrico</i> | 9 |
| 2.3 <i>Baterías</i> | 13 |
| 3 Código de red de arabia saudí | 17 |
| 4 Datos de entrada necesarios para el estudio y modelado en DigSILENT power factory 2023 | 23 |
| 4.1 <i>Inversor</i> | 24 |
| 4.2 <i>Transformador de media tensión</i> | 27 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4.3 | <i>Mediciones de los cables de media tensión</i> | 29 |
| 4.4 | <i>Transformador de alta tensión</i> | 38 |
| 4.5 | <i>Línea de alta tensión</i> | 40 |
| 4.6 | <i>Potencia de cortocircuito</i> | 41 |
| 5 | Casos de estudio | 45 |
| 5.1 | <i>Normativa aplicable</i> | 45 |
| 5.2 | <i>Estudio de cortocircuito</i> | 47 |
| 5.2.1 | Cortocircuito | 48 |
| 5.2.2 | Transformador desconectado | 49 |
| 5.3 | <i>Estudio de flujos de carga</i> | 49 |
| 5.3.1 | Inductivo | 51 |
| 5.3.2 | Capacitivo | 52 |
| 5.3.3 | Capacitivo con compensación | 52 |
| 5.3.4 | Capacitivo con compensación (Qmax) | 53 |
| 6 | Conclusiones | 57 |
| | Referencias | 61 |
| | Anexos | 63 |
| | Anexo 1: Diagrama unifilar planta fotovoltaica | 65 |
| | Anexo 2: Cortocircuito trifásico | 67 |
| | Anexo 3: cortocircuito trifásico con trafo desconectado | 69 |
| | Anexo 4: Caso inductivo | 71 |
| | Anexo 5: Caso capacitivo | 73 |
| | Anexo 6: Caso capacitivo con compensación | 75 |
| | Anexo 7: Caso capacitivo máximo con compensación | 77 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1- Datos inversor sungrow SG1 100UD-20 | 24 |
| Tabla 2- Datos transformador media tensión | 27 |
| Tabla 3-Datos transformador de la subestación | 38 |
| Tabla 4-Reparto de los loops entre los transformadores de alta tensión | 43 |
| Tabla 5-Requirimientos potencia activa y reactiva en el POI | 49 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Ilustración 1-Evolución precio energía solar vs otras fuentes de electricidad [2] | 2 |
| Ilustración 2- Potencia FV instalada fotovoltaica desde el 2000 hasta 2022 [2] | 2 |
| Ilustración 3- Esquema instalación fotovoltaica [3] | 5 |
| Ilustración 4- Tipos de radiaciones captadas por un módulo fotovoltaico [4] | 6 |
| Ilustración 5- Efecto fotovoltaico [5] | 6 |
| Ilustración 6- Estructura fija [6] | 7 |
| Ilustración 7-Estructura con seguidor [7] | 8 |
| Ilustración 8-Pérdidas IAM según el ángulo de incidencia | 8 |
| Ilustración 9- Modelo diodo simple de un módulo fotovoltaico [5] | 9 |
| Ilustración 10- Curvas IV y PV de un módulo fotovoltaico [10] | 10 |
| Ilustración 11- Curva eficiencia inversor Sungrow a diferentes tensiones [14] | 12 |
| Ilustración 12- Modelo de un transformador [8] | 12 |
| Ilustración 13-Acoplamiento DC BESS [9] | 14 |
| Ilustración 14-Acoplamiento AC BESS [9] | 14 |
| Ilustración 15- Curva de pato [1] | 15 |

| | |
|--|----|
| Ilustración 16- Operación de la instalación eléctrica según la frecuencia [15] | 17 |
| Ilustración 17- Control potencia- frecuencia [15] | 18 |
| Ilustración 18- Huecos de tensión [15] | 18 |
| Ilustración 19- Diagrama PQ [15] | 19 |
| Ilustración 20- Variaciones de tensión [15] | 20 |
| Ilustración 21- Armónicos de tensión [15] | 20 |
| Ilustración 22- Armónicos de intensidad [15] | 20 |
| Ilustración 23- Tensión frecuencia para BESS [15] | 21 |
| Ilustración 24- Potencia - frecuencia para BESS c | 21 |
| Ilustración 25- Ubicación planta fotovoltaica | 23 |
| Ilustración 26- Diseño frecuencia planta fotovoltaica en DIgSILENT | 24 |
| Ilustración 27- Curva PQ inversor Sungrow 1100UD-20 [14] | 25 |
| Ilustración 28- Intensidad cortocircuito inversor Sungrow 1100UD-20 [14] | 25 |
| Ilustración 29-Modelo DIgSILENT inversor Sungrow 1100UD-20 | 25 |
| Ilustración 30Modelo DIgSILENT inversorSungrow 1100UD-20 | 26 |
| Ilustración 31Modelo DIgSILENT inversor Sungrow 1100UD-20 | 26 |
| Ilustración 32 Modelo DIgSILENT inversor Sungrow 1100UD-20 | 27 |
| Ilustración 33- ModeloDIgSILENT transformador media tensión | 28 |
| Ilustración 34-Modelo DIgSILENT transformador media tensión | 29 |
| Ilustración 35- Cable 1 tramo de un loop | 29 |
| Ilustración 36-- Cable 2 tramo de un loop | 30 |
| Ilustración 37- Cable 3 tramo de un loop | 30 |
| Ilustración 38- Cable 4 tramo de un loop | 30 |
| Ilustración 39-Catálogo Hentong [13] | 31 |
| Ilustración 40-Catálogo Hentong [13] | 32 |
| Ilustración 41-Mediciones de los tramos en metros | 33 |
| Ilustración 42-Librería cables DIgSILENT | 34 |
| Ilustración 43-Modelo cable tramo 1 DIgSILENT | 34 |
| Ilustración 44Modelo cable tramo 2 DIgSILENT | 35 |
| Ilustración 45Modelo cable tramo 3 DIgSILENT | 36 |
| Ilustración 46-Modelo cable tramo 4 DIgSILENT | 38 |
| Ilustración 47-Modelo DIgSILENT transformador de la subestación | 39 |
| Ilustración 48-Modelo DIgSILENT transformador de la subestación | 39 |
| Ilustración 49-Datos línea alta tensión | 40 |
| Ilustración 50-Modelo DIgSILENT línea alta tensión | 41 |
| Ilustración 51-Dato potencia cortocircuito | 42 |
| Ilustración 52-Modelo DIgSILENT potencia cortocircuito | 42 |
| Ilustración 53- Corriente de cortocircuito de una falla alejada del generador con componente constante c.a. (representación esquemática) | 46 |

| | |
|--|----|
| Ilustración 54- Corriente de cortocircuito de una falla de un cuasi-generador con componente de decaimiento c.a. | 46 |
| Ilustración 55- Explicación de cada intensidad | 46 |
| Ilustración 56- Diagrama PQ | 47 |
| Ilustración 57- Condiciones DIgSILENT a la hora de realizar un cortocircuito | 48 |
| Ilustración 58-Resultado cortocircuito trifásico | 48 |
| Ilustración 59-Resultado cortocircuito con transformador desconectado | 49 |
| Ilustración 60-Modelo potencia frecuencia y estación de control en DIgSILENT | 50 |
| Ilustración 61-Condiciones flujo de carga en DIgSILENT | 51 |
| Ilustración 62-Resultado caso inductivo | 51 |
| Ilustración 63-Resultado caso capacitivo | 52 |
| Ilustración 64-Resultado caso capacitivo con compensación | 52 |
| Ilustración 65-Resultado caso máximo capacitivo con compensación | 53 |
| Ilustración 66- Curva PQ planta fotovoltaica | 53 |
| Ilustración 67-Script DIgSILENT para sacar la curva PQ | 54 |

Notación

POI

Point of interconnection

1 INTRODUCCIÓN

En este trabajo se iniciará hablando de la situación actual de la energía fotovoltaica para continuar posteriormente con la motivación y los objetivos del proyecto.

1.1 Situación actual de la fotovoltaica

La energía fotovoltaica nace a principios del siglo XIX, pero no es hasta mitad del siglo XIX cuando se desarrollan las primeras células solares eficientes para aplicaciones espaciales. Esta energía renovable comienza a tomar fuerza a inicios del siglo XIX debido a diversos factores como la necesidad de producir energía limpia, y la reducción de costos.

La energía solar fotovoltaica busca producir energía eléctrica a través de la radiación solar, una fuente renovable y de impacto ambiental mínimo o nulo en comparación con la forma tradicional de generación de energía eléctrica donde se quemaban combustibles fósiles. Se considera a la energía solar fotovoltaica una energía limpia ya que no produce gases de efecto invernadero ni contaminantes, lo que hace que sea una fuente de generación sostenible a largo plazo.

Además, la energía renovable juega un papel crucial en la lucha contra el cambio climático ayudando a reducir la dependencia de los combustibles fósiles y mitigar los impactos ambientales.

La necesidad de reducir la dependencia de combustibles fósiles y contribuir al cambio climático ayudó a que las energías renovables tuvieran mucha mayor importancia en el sector eléctrico. Esto se tradujo en mayores investigaciones, inversiones y estudios proporcionando continuas mejoras en los elementos que componen una instalación fotovoltaica, ya sea de mayor o menor escala.

Lógicamente, también supuso una bajada exponencial de los precios animando a la sociedad a formar parte del cambio climático. La reducción de precios ha sido abismal y viene ligada a una mejora de la eficiencia energética de las instalaciones lo que genera un atractivo para muchas empresas e incluso para pequeñas instalaciones para el autoconsumo.

La ilustración 1 muestra la evolución del coste por megavatio hora generado de la energía solar fotovoltaica comparada con otras fuentes de generación como la nuclear o eólica. Se puede ver claramente la tendencia descendente del precio de la energía solar fotovoltaica.

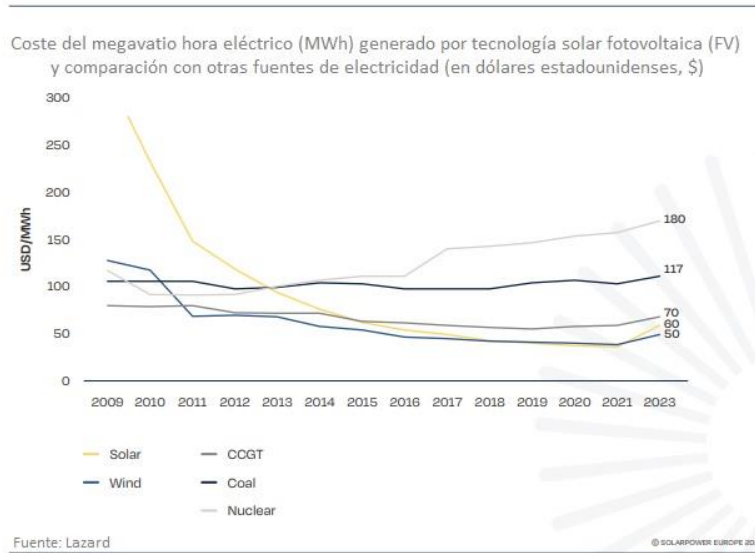


Ilustración 1-Evolución precio energía solar vs otras fuentes de electricidad [2]

Todo lo relacionado con energía renovable genera mucho interés, por lo que muchos países han implementado políticas de incentivos y subsidios para promover la adopción de la energía solar fotovoltaica, como créditos fiscales y subvenciones para la instalación de sistemas solares. A continuación, se muestra una gráfica de cómo ha evolucionado la energía fotovoltaica en los continentes.

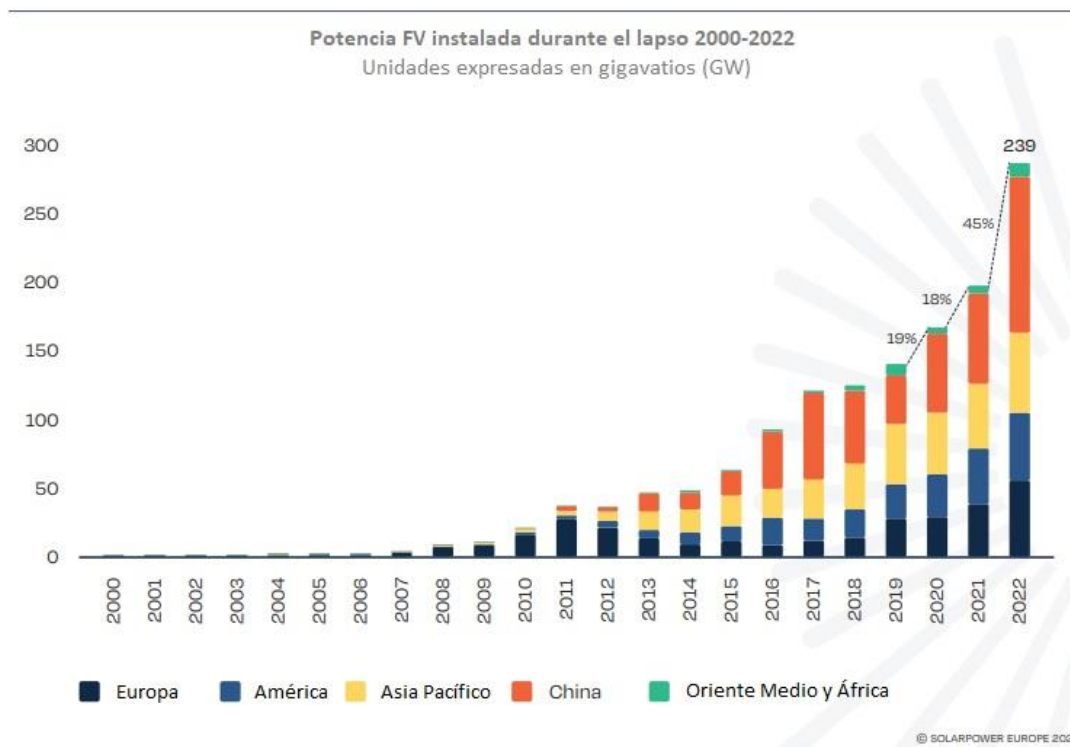


Ilustración 2- Potencia FV instalada fotovoltaica desde el 2000 hasta 2022 [2]

En la ilustración 2 se puede observar un gran crecimiento en 2023 tanto de China como de Oriente Medio y África, estando Europa, América y Asia Pacífico más involucradas anteriormente.

Los países de Oriente Medio están tomando una gran importancia a nivel mundial, y están apostando fuerte por la energía renovable. Estos países como Qatar, Arabia Saudita, Omán o Bahrein están siendo referentes mundiales desarrollándose en todos los aspectos a pasos agigantados.

Centrándonos en Arabia Saudí, nuestro lugar del proyecto, este país está llevando a cabo diferentes proyectos de desarrollo de energías renovables. El Fondo de Inversión Pública (PIF) se ha comprometido a desarrollar el

70 % de la energía generada a través de renovables estipulada en la Vision 2030, quedando el otro 30 % restante en manos de la Oficina de Desarrollo de Proyectos de Energías Renovables (REPDO) a través de diversas rondas de licitaciones. El objetivo es generar 27,3 GW producidos mediante energías renovables en 2024 y alcanzar los 58,7 GW para 2030.

En este proyecto, vamos a realizarle un análisis y estudios estáticos eléctricos a una instalación fotovoltaica en Arabia Saudita, uno de estos países de Oriente Medio que está apostando fuerte por una transición energética.

1.2 Motivación del proyecto

La energía renovable está en completo auge, y creciendo a pasos agigantados en los últimos años, llevándola a ser un líder de generación eléctrica en multitudes de países. Además, como se ha visto en el primer punto de este capítulo, cada vez hay más países involucrados en la transición energética. La necesidad de la transición energética une a la sociedad con un mismo objetivo, finalizar una etapa y abrir otra. La posibilidad de formar parte de una transición hacia un mundo más verde, más sostenible, con menos dependencia de combustibles fósiles, y otras muchas razones motivan a cualquiera.

La ilusión y ganas son palpables en el ambiente, con millones de estudios, investigaciones y horas en el laboratorio con el fin de aumentar, conocer y mejorar todo lo relativo a la energía renovable.

Todo esto comentado anteriormente, motiva a los jóvenes (a unirse y formar parte de este mundo, la energía renovable, un mundo que, aunque para muchos es nuevo, otros muchos lo afrontan como un reto hacia un mundo más limpio).

1.3 Propósitos y objetivos de estudio

Como ha sido comentado y recalado en el punto anterior, la energía renovable está en continuo crecimiento debido a la necesidad de generar energía eléctrica de forma limpia. Dentro del sector de la energía renovable, podríamos afirmar que la energía solar y eólica están ganando importancia en los últimos años e incluso llegar a superar la generación convencional.

Debido a las constantes inversiones realizadas en energía renovable, se está avanzando a pasos agigantados en el conocimiento de instalaciones eólicas o fotovoltaicas. Un ejemplo puede ser que los elementos generadores (aerogenerador o módulo) son de mayor potencia nominal. A modo de curiosidad, EDP ha sustituido una planta eólica donde tenía 10 aerogeneradores por solo uno de la misma potencia nominal.

Aunque todo esto comentado es correcto, también es cierto que debido a su juventud está poco regulada. Muchos países están en proceso de crear una serie de normas para futuras plantas fotovoltaicas y eólicas. Un ejemplo de ello puede ser Egipto, el cual tiene un apartado dentro del código de red donde hace referencia única y exclusivamente a la energía eólica. Se prevee que los inversores formen parte en las actualizaciones de los nuevos códigos de red debido a la potencia reactiva que pueden aportar.

Por ello, en este trabajo se pretende realizarle estudios eléctricos a una planta fotovoltaica ya dimensionada, teniendo en cuenta la normativa del código de red de Arabia Saudí, ubicación de nuestra planta fotovoltaica. Los estudios se realizarán teniendo en cuenta también las normativas IEC correspondientes a cada estudio.

Los estudios serán realizados en el software DIGSilent Power Factory 2023. Para cada caso se analizará, un estudio de:

- Cortocircuito en media tensión.
- Cumplimiento de curva PQ de código de red para los casos más restrictivos, tanto en el lado inductivo como capacitivo.

Aunque la planta está dimensionada, algún elemento como el transformador de alta tensión, el cual tiene un rol clave en ambos estudios, puede estar sujeto a modificaciones con el fin de modelar bien nuestra planta fotovoltaica.

El objetivo de este proyecto será analizar si la planta está bien dimensionada o no, tras realizarle los estudios eléctricos mencionados anteriormente. En caso de no estarlo, se propondrán soluciones para cumplir con las

restricciones que veremos posteriormente.

2 TECNOLOGÍA FOTOVOLTAICA

La energía solar pertenece al sector de las energías renovables y tiene un rol importante en la transición energética. El objetivo de la energía solar es generar electricidad a partir de radiación electromagnética. Otra opción, pero muy poco común sería obtener energía térmica a partir de la radiación electromagnética comentada anteriormente. En este proyecto, abordaremos la energía solar con el fin de generar electricidad, más conocido como una planta o instalación fotovoltaica.

Podemos diferenciar dos tipos principales de plantas fotovoltaicas:

- Autoconsumo: para pequeñas unidades de consumo (casas o aparatos eléctricos)
- Gran escala: grandes producciones de energía para la población.

Durante esta sección, se explicará la transformación de irradiancia a energía gracias a la célula fotovoltaica y los elementos principales de una planta fotovoltaica de gran escala (módulos, inversores, transformador de baja tensión a media tensión, cables media tensión y transformador de media tensión a alta tensión) con las pérdidas asociadas en cada elemento. También se explicará cuando es interesante incluir baterías en grandes instalaciones fotovoltaicas. Todo esto comentado anteriormente se puede observar en la ilustración 3.

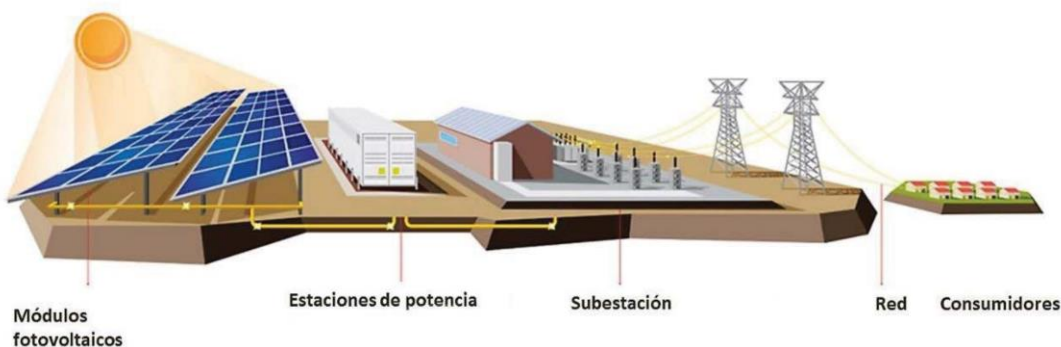


Ilustración 3- Esquema instalación fotovoltaica [3]

2.1 Efecto fotovoltaico

Antes de comenzar a explicar el efecto fotovoltaico, es conveniente tener claro los diferentes tipos de radiación que es capaz de captar el módulo, las cuales dependen de algunos factores como la posición y altura del sol, cómo está colocado el módulo o el albedo. Los tres tipos de radiación serían:

- Radiación directa: recibida directamente por el sol.
- Radiación difusa: recibida por los rayos dispersos de la atmósfera.
- Radiación reflejada: recibida por la radiación reflejada por cualquier superficie. Aquí entra en juego el albedo.



Ilustración 4- Tipos de radiaciones captadas por un módulo fotovoltaico [4]

La suma de las tres radiaciones, que se muestran en la ilustración 4, sería la radiación total captada por el módulo.

Lo que ocurre cuando un semiconductor dopado se expone a radiación electromagnética es que fotón incidente golpea a un electrón y lo arranca, creando un hueco en el átomo. Normalmente, el electrón encuentra rápidamente otro hueco para volver a ocuparlo, y la energía aportada por el fotón, por tanto, se disipa en forma de calor. El principio de una célula fotovoltaica es obligar a los electrones y a los huecos a avanzar hacia el lado contrario del material en lugar de simplemente recombinarse en él: así, se producirá una diferencia de potencial, y, por lo tanto, tensión entre dos partes del material, al igual que ocurre en una pila. Esto se puede ver más gráficamente en la ilustración 5.

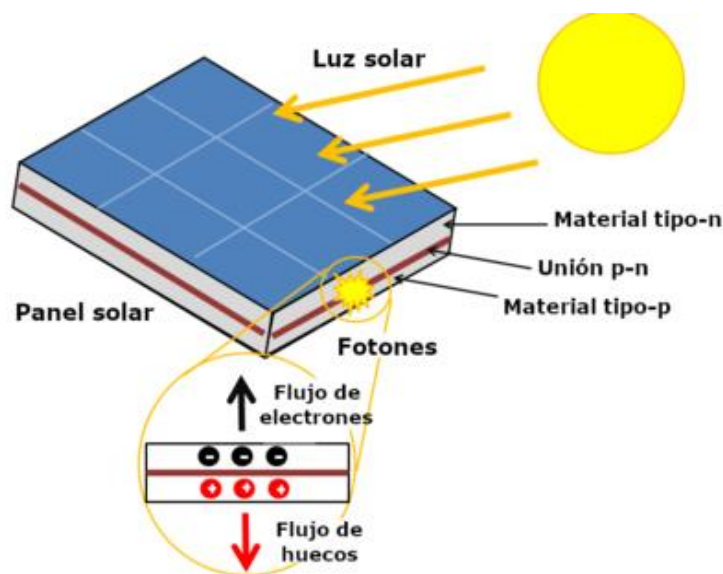


Ilustración 5- Efecto fotovoltaico [5]

Para ello, se crea un campo eléctrico permanente, a través de una unión pn, entre dos capas dopadas respectivamente, p y n. En las células de silicio, que son las más ampliamente usadas, se encuentran, por tanto:

- La capa superior de la celda, que está compuesta de silicio dopado de tipo n. En esta capa, hay un número de electrones libres mayor que en una capa de silicio puro, de ahí el nombre del dopaje n, negativo, al doparse, por ejemplo, con fósforo. El material permanece eléctricamente neutro, ya que tanto los átomos de silicio como los del material dopante son neutros: sin embargo, la red cristalina tiene de manera global una mayor presencia de electrones que en una red de silicio puro.
- La capa inferior de la celda, que está compuesta de silicio dopado de tipo p. Esta capa tiene por lo tanto una cantidad media de electrones libres menor que una capa de silicio puro. Los electrones están ligados a la red cristalina que, en consecuencia, es eléctricamente neutra, pero presenta huecos, positivos (p), al estar dopada con boro, por ejemplo. La conducción eléctrica está asegurada por estos portadores de carga, que se desplazarán por todo el material.

En el momento de la creación de la unión pn, los electrones libres de la capa n entran instantáneamente en la capa p y se recombinan con los huecos en la región p. Existirá así durante toda la vida de la unión, una carga positiva en la región n a lo largo de la unión (porque faltan electrones) y una carga negativa en la región en p a lo largo de la unión (porque los huecos han desaparecido).

Cuanta más radiación solar reciba la célula, mayor será la energía eléctrica que se generará, ya que mayor será el número de electrones conductores que se creen.

Lógicamente esa transformación de radiación a energía no es perfecta y existen pérdidas que merman una mayor producción de energía. Estas pérdidas se tienen en cuenta a la hora de abordar un proyecto fotovoltaico ya que reducen nuestra producción anual y pueden afectar negativamente a situaciones contractuales.

1. Pérdidas por sombreado cercano

Para comprender mejor las pérdidas por sombra cercana es fundamental considerar la estructura fotovoltaica. Evidentemente, las pérdidas cerca de las sombras serán diferentes dependiendo de si la planta fotovoltaica está funcionando con seguidor o si está fija.

En una estructura fija, como la ilustración 6, las pérdidas aparecen cuando hay sombra entre los paneles u obstrucciones cercanas, como edificios, árboles u otros elementos que proyectan sombras sobre los paneles durante el día. En ese punto, las células sombreadas producen menos energía en comparación con las células no sombreadas, lo que lleva a una distribución desigual de la generación de energía en todo el conjunto de paneles solares.



Ilustración 6- Estructura fija [6]

En estructura con seguidor, como la ilustración 7, uno de los objetivos es evitar el sombreado entre módulos aplicando un ángulo de corrección a la inclinación de los módulos. Con este tipo de estructura, las pérdidas por sombreado cercano se corresponden con una disminución de la radiación difusa y reflejada cuando el ángulo de corrección es aplicado. Obviamente, el impacto del sombreado es considerablemente menor en comparación con las estructuras fijas.

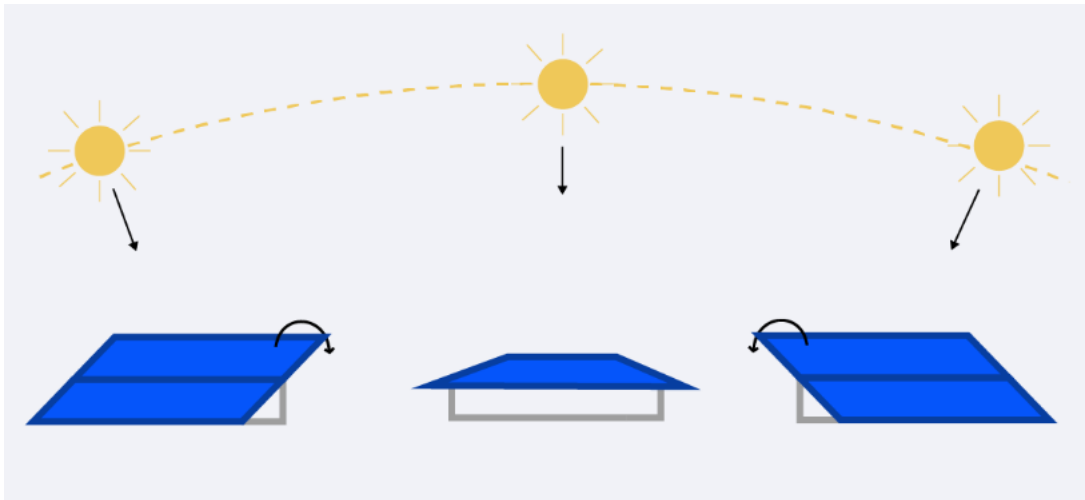


Ilustración 7-Estructura con seguidor [7]

2. Pérdidas por sombreado lejano

Este tipo de pérdidas son muy bajas y en algunos casos no se tienen en cuenta. Las pérdidas por sombreado lejano son pérdidas debidas al sombreado producido por el horizonte, por eso son despreciadas o tienen poca importancia.

3. IAM losses

Las pérdidas por IAM (Incident Angle Modifier) están referidas a la manera en la que la radiación solar incide en el módulo, y cómo este ángulo de incidencia afecta a la eficiencia de captación de energía.

Para que aparezcan las pérdidas IAM, la diferencia entre el ángulo real de incidencia, y la normal al módulo deben ser significativa. Esto ocurre a primeras y últimas horas del día, donde la elevación del sol es pequeña. También entre otras características climáticas.

Existen modelos para calcular las pérdidas IAM como el Fresnel, AR coating o el método ASHRAE. Incluso, algunos fabricantes de módulos te proporcionan un factor a aplicar según el ángulo de incidencia sobre el módulo.

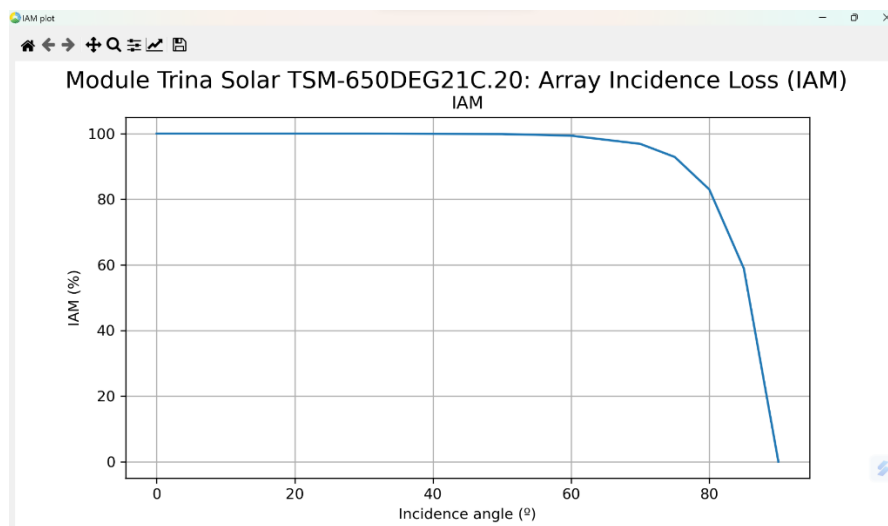


Ilustración 8-Pérdidas IAM según el ángulo de incidencia

A modo de ejemplo, en la ilustración 8, para el módulo 650W de Trina Solar, las pérdidas IAM solo afectan a partir de un ángulo de incidencia de 60° respecto a la normal. Lógicamente a medida que el rayo se vuelve más tangente al módulo, se refleja más radiación y obtenemos pérdidas mayores. Como se ha comentado antes, esto solo afecta principalmente a las primeras y últimas horas del día.

4. Pérdidas por suciedad

Este tipo de pérdidas aparecen debido a la suciedad del módulo. Las pérdidas de suciedad son completamente diferentes en verano comparadas con el invierno, donde llueve, por lo que los módulos se limpian. También depende de la ubicación del proyecto. Las pérdidas por suciedad no son las mismas en Arabia Saudita que en Amazonas.

5. Reflejo de un módulo a otro

Es el único punto que supone una ganancia de radiación al módulo. Esta ganancia es provocada por la radiación reflejada por los módulos que inciden sobre los módulos de la fila anterior o posterior según la hora del día. Sin embargo, esta ganancia es muy pequeña y en algunos casos también es despreciable.

2.2 Modelo eléctrico

Una vez que ya sabemos cómo se transforma la radiación en energía gracias al efecto fotovoltaico, es hora de conocer uno a uno los elementos que forman parte de una instalación fotovoltaica, y las pérdidas asociadas en cada elemento.

1. Módulo fotovoltaico

El módulo fotovoltaico es el responsable de transformar la radiación solar en energía gracias al efecto fotovoltaico ya comentado.

Los fabricantes de módulo proporcionan características de cada módulo en un archivo .PAN. Estas características juegan un papel clave a la hora de determinar cuanta irradiancia es capaz de captar y transformar en energía el módulo fotovoltaico. Algunas de estas características son:

- Largo
- Ancho
- Grosor
- Número de células en serie
- Factor de bifacialidad (en caso de serlo)
- Potencia pico (W_p)
- Intensidad de cortocircuito
- Tensión a circuito abierto
- Intensidad de máxima potencia
- Tensión de máxima potencia
- Otros

Es importante saber también que existe un modelo eléctrico de un módulo fotovoltaico conocido como el modelo de un diodo simple. En este modelo comienzan a tomar importancia características eléctricas del módulo como la intensidad de cortocircuito. Este modelo es aceptado y usado por softwares fotovoltaicos como PVsyst o NREL. PVsyst es el único software bancario que estima la energía producida por una planta fotovoltaica durante su vida útil. El modelo del diodo simple, en la ilustración 9, es el siguiente:

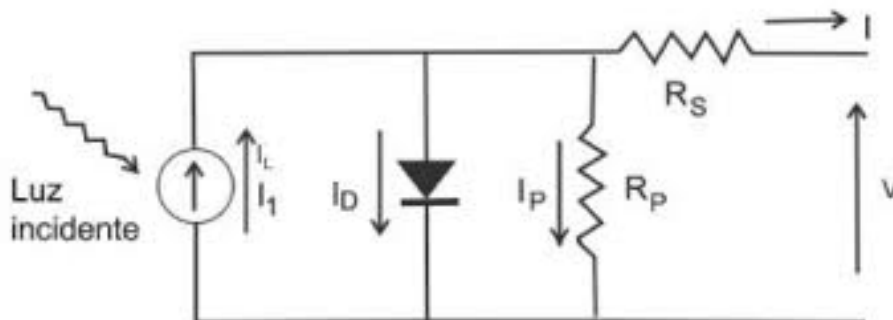


Ilustración 9- Modelo diodo simple de un módulo fotovoltaico [5]

Tras aplicar las leyes de Kirchoff, su comportamiento quedaría definido por la siguiente ecuación:

$$I = I_L - I_0 * \left(\exp\left(\frac{V + I * R_S}{m * V_T}\right) - 1 \right) - \frac{V + I * R_S}{R_P}$$

Donde:

- $I, V \rightarrow$ Intensidad y tensión de salida de la célula fotovoltaica
- $I_D \rightarrow$ Intensidad que circula por el diodo
- $m \rightarrow$ factor de idealidad del diodo, normalmente valores entre 1 y 2
- $V_T \rightarrow$ Tensión térmica:
- $V_T = \frac{k * T}{e}$
- $k \rightarrow$ constante de Boltzmann ($1,38 * 10^{-23}$ J/K)
- $T \rightarrow$ temperatura del diodo en grados Kelvin
- $e \rightarrow$ carga del electrón ($1,6 * 10^{-19}$ C)
- $R_S \rightarrow$ Resistencia en serie del modelo de la célula fotovoltaica
- $R_P \rightarrow$ Resistencia en paralelo del modelo de la célula fotovoltaica

Teniendo en cuenta las siguientes simplificaciones:

- $R_P \gg V + I * R_S$, ya que R_P puede ser de 900Ω frente a los $0,2 \Omega$ de R_S .
- $I_{SC} \approx I_L$, la Intensidad de cortocircuito es igual a la intensidad de iluminación.
- $\exp\left(\frac{V + I * R_S}{m * V_T}\right) \gg 1$, el valor de la exponencial es mucho mayor que 1

Se llega a la ecuación definitiva usada por la herramienta para el desarrollo del modelo de la célula fotovoltaica:

$$I = I_{SC} * \left(1 - \exp\left(\frac{V - V_{OC} + I * R_S}{m * V_T}\right) \right)$$

Tras analizar la fórmula de la célula fotovoltaica, y agrupar para NCS (número de células en serie en el módulo), despejamos V en función de I (a partir de los valores del .PAN y del modelo del diodo simple):

$$V = \ln\left(\frac{I - I_{SC}}{-I_{O,REF}} + 1\right) * \frac{N_{CS} * m * k * T_c}{e} - 1 * R_S$$

Donde $I_{O,REF}$ sería la corriente de inversa de saturación del diodo.

Con estas expresiones, se pueden obtener las gráficas IV y PV de un módulo fotovoltaico en condiciones STC (25°C de T_c , 1000 W/m^2 y masa de aire 1,5) como se muestra en la ilustración 10

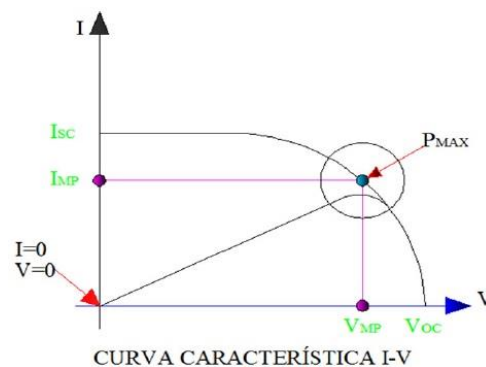


Ilustración 10- Curvas IV y PV de un módulo fotovoltaico [10]

Por último, un factor importantísimo en la configuración de una planta sería establecer el número máximo de paneles que se pueden poner en serie, el cual depende de la tensión a circuito abierto del módulo. Se puede calcular con la siguiente expresión:

$$N^{\circ}max_{paneles\ serie} = \frac{1500}{V_{oc}}$$

Como ocurre con la transformación de irradiancia a energía, en el módulo también existen unas pérdidas ya eléctricas que reducen la producción anual:

- Aumento de la calidad del modelo: nuevamente es una ganancia, y se debe a que los fabricantes venden módulos con un máximo de 5 Wp adicionales por encima de la placa de identificación.
- LID (degradación inducida por la luz): son pérdidas relacionadas con la degradación del módulo.
- Corriente de desajuste: se refiere a diferencias en la corriente generada por paneles solares conectados en serie debido a variaciones en la irradiancia solar, sombreado parcial o desgaste desigual. Este efecto puede reducir la eficiencia general del sistema fotovoltaico ya que el panel con menor corriente limita la corriente total producida por el string.
- Desajuste de tensión: es un fenómeno similar al desajuste de corriente. En ese caso, esto ocurre en la salida de voltaje del string.
- Pérdidas CC: pérdidas por cableado de corriente continua en baja tensión. Utilizando inversores strings, estas pérdidas son muy bajas. En los inversores centrales las pérdidas de CC son mayores debido a que el cable es más largo.

2. Inversor

Los inversores fotovoltaicos son componentes claves en una instalación fotovoltaica. Su función principal es convertir la corriente continua (CC) generada por los paneles solares en corriente alterna (CA).

Las características principales de los inversores se leen en un archivo OND facilitado por el fabricante. En estos archivos aparecen los datos más importantes del inversor como:

- Potencia nominal del inversor
- Tensión arranque del inversor
- Tensión mínima para máxima potencia
- Tensión máxima para máxima potencia
- Tensión máxima del inversor
- Tensión de salida del inversor (AC)
- Máxima intensidad de salida del inversor (AC)
- Eficiencias

A modo de curiosidad, para instalaciones fotovoltaicas de grandes escalas, contamos con dos fabricantes a destacar como Huawei y Sungrow.

Las pérdidas asociadas en el inversor en una planta fotovoltaica de gran escala serían las siguientes:

- Eficiencia del inversor. Suele estar entre el 98 y el 99 por ciento.
- Clipping: una de las mayores pérdidas de los inversores. Aparece cuando la potencia producida por los módulos es mayor que la potencia de los inversores. En este caso, la potencia de salida será la potencia de los inversores.
- Rango MPPT: el inversor tiene un rango de funcionamiento según el voltaje. Si los módulos no alcanzan el valor mínimo de voltaje, el inversor no arranca. Además, la eficiencia del inversor depende de la tensión o potencia de la cadena. La ilustración 11 muestra una curva de eficiencia de un inversor Sungrow a diferentes tensiones.

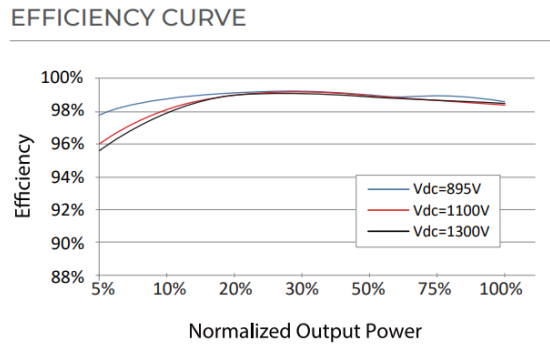


Ilustración 11- Curva eficiencia inversor Sungrow a diferentes tensiones [14]

- Otras pérdidas se deben al comportamiento del inversor y no tienen un gran impacto en las pérdidas del inversor.

No podemos olvidar los servicios auxiliares para alimentar cualquier carga de la unidad de conversión de energía (como monitorización, iluminación, CCTV, refrigeración, etc) que provoca pérdidas de energía aunque realmente no están ligadas a los inversores.

3. Transformador de media tensión

A la salida del inversor, en baja tensión de corriente alterna, encontramos un cableado muy corto hasta el transformador de media tensión debido a su cercanía. Llegados a este punto, la misión es elevar la tensión hasta media tensión para disminuir las pérdidas de potencia activa.

Además, podemos ver el modelo eléctrico de un transformador en la ilustración 12:

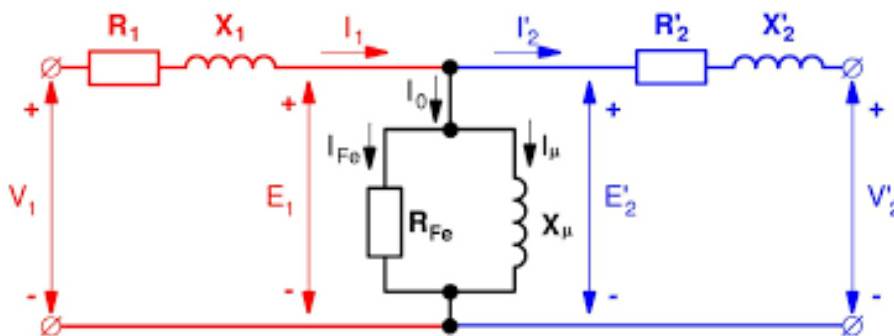


Ilustración 12- Modelo de un transformador [8]

Siendo:

- V_1 la tensión en el devanado primario con sus impedancias correspondientes (R_1, X_1)
- I_1 la intensidad en el devanado primario con sus impedancias correspondientes (R_1, X_1)
- I_0 la intensidad de vacío del transformador.
- V_2 la tensión en el devanado secundario (carga) con sus impedancias correspondientes (R_2, X_2)
- I_2 la intensidad en el devanado secundario (carga) con sus impedancias correspondientes (R_2, X_2)

Los datos más relevantes del transformador serían:

- Potencia nominal a una temperatura
- Tensión de baja tensión
- Tensión de alta tensión
- Grupo vectorial
- Aceite o seco
- Impedancia de cortocircuito

La impedancia de cortocircuito vendrá dada como un %Xcc. El transformador tiene un carácter inductivo lo cual afectará al cumplimiento del código de red, sobre todo para el cumplimiento de potencia reactiva capacitiva.

4. Cables media tensión

Los cables de media tensión tienen la función principal de transmitir la potencia hasta la subestación transformadora donde se encontrará el transformador de alta tensión.

Los cables de media tensión puede tener un carácter inductivo o capacitivo, lo cual nos beneficia a la hora del cumplimiento del código de red. He de mencionar también que las características más importantes de los cables de media tensión serían:

- Cómo está colocado el cable (unipolar o tripolar, enterrado bajo tubo u otras opciones)
- Material
- Sección
- R,X,C
- Longitud

Cabe recordar que un cable de media tensión debe cumplir el criterio térmico, de cortocircuito y el criterio de caída de tensión.

5. Transformador de alta tensión

El transformador de alta tensión, también conocido como el transformador principal, es el encargado de elevar de media a alta tensión con la función de disminuir las pérdidas en el transporte de energía.

Este transformador se modela de la misma manera que el de media tensión y los datos relevantes son los mismos que en el de media tensión.

El apodo de transformador principal viene de su gran importancia a la hora de realizar estudios eléctricos de una planta fotovoltaica. La impedancia de cortocircuito afectará directamente al cortocircuito y al cumplimiento del código de red en la curva PQ. A mayor porcentaje de impedancia de cortocircuito, más potencia reactiva será consumida por el transformador.

Durante este trabajo se verá cómo afecta la elección de distintos transformadores a plantas fotovoltaicas.

6. Línea de alta tensión

El ultimo elemento será la línea de alta tensión, como se ha comentado antes, transformador eleva el voltaje para disminuir las pérdidas en potencia activa.

Destacar que una vez llegados a este punto, estamos a escasos kilómetros del POI donde tendremos que cumplir el código de red en el diagrama PQ, entre otros.

Las líneas de alta tensión pueden ser al aire libre o subterráneas, lo cual es fundamental para determinar su comportamiento inductivo o capacitivo.

2.3 Baterías

Las baterías, o también llamada BESS están empezando a integrarse en proyectos fotovoltaicos con la intención de almacenar energía. Cuando a un proyecto fotovoltaico se le integran baterías o aerogeneradores, estos proyectos son conocidos como proyectos híbridos.

BESS tiene dos opciones posibles para conectarse, en el lado CC o CA. Dependiendo de la situación de la planta fotovoltaica, es interesante conectar el BESS en modo DC acoplado (acoplamiento) o AC acoplado (acoplamiento).

Es interesante integrar BESS en DC cuando hay clipping debido a que la energía disponible por los módulos es mayor que las corrientes máximas que pueden producir los inversores. La energía restante que el inversor no puede convertir a CA se almacenará en baterías. La ilustración 13 muestra el acoplamiento DC BESS:

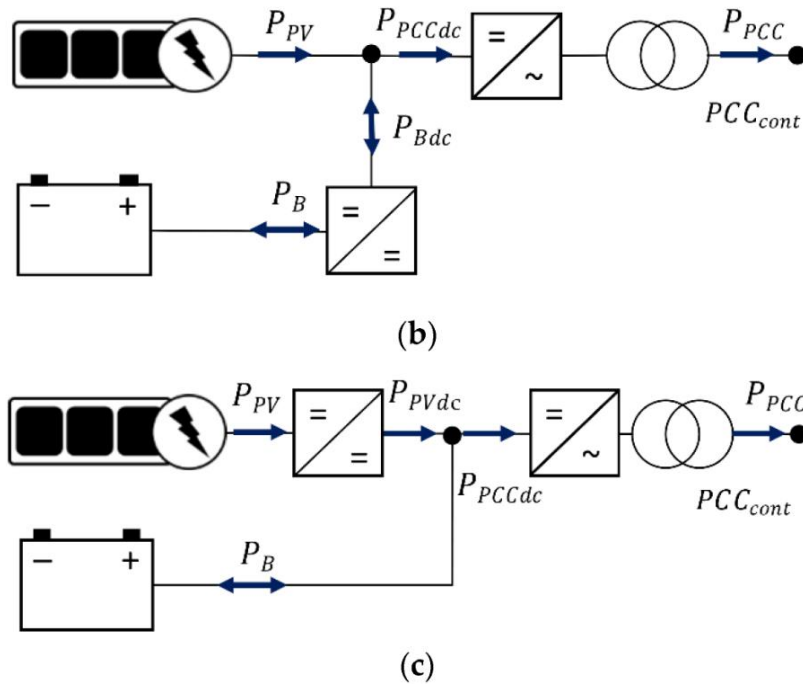


Ilustración 13-Acoplamiento DC BESS [9]

Es interesante integrar BESS en CA cuando aparece una restricción debido a que la red impone una potencia de salida concreta, llamado curtailment. La energía restante que no se puede inyectar, se almacenaría en baterías. La ilustración 14 muestra el acoplamiento AC BESS:

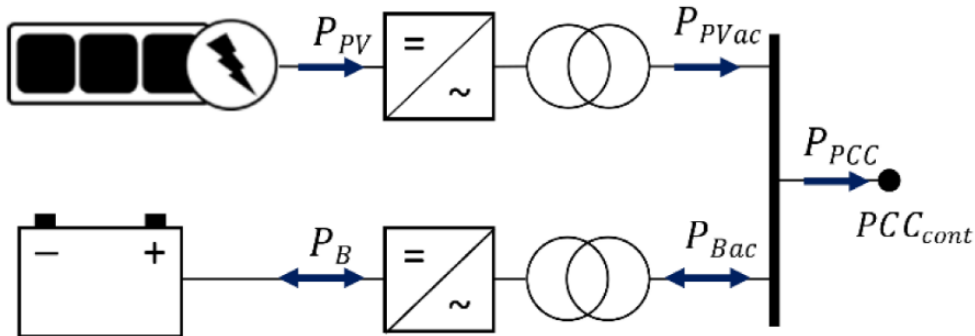


Ilustración 14-Acoplamiento AC BESS [9]

Es fundamental tener en cuenta algunas características de la batería como la capacidad, la eficiencia o la profundidad de descarga. También es importante seleccionar una estrategia para cargar y descargar la batería, en ese caso los precios ponderales de la electricidad juegan un papel importante.

Últimamente, se están integrando baterías en proyectos fotovoltaicos debido a los precios tan bajos de la luz a horas centrales del día. Para estos casos, resulta interesante almacenar energía para posteriormente venderla por la noche a precios más elevados. A continuación, se muestran en la ilustración 15, los precios de la energía en España y Portugal. Esta curva es conocida como la curva de pato.

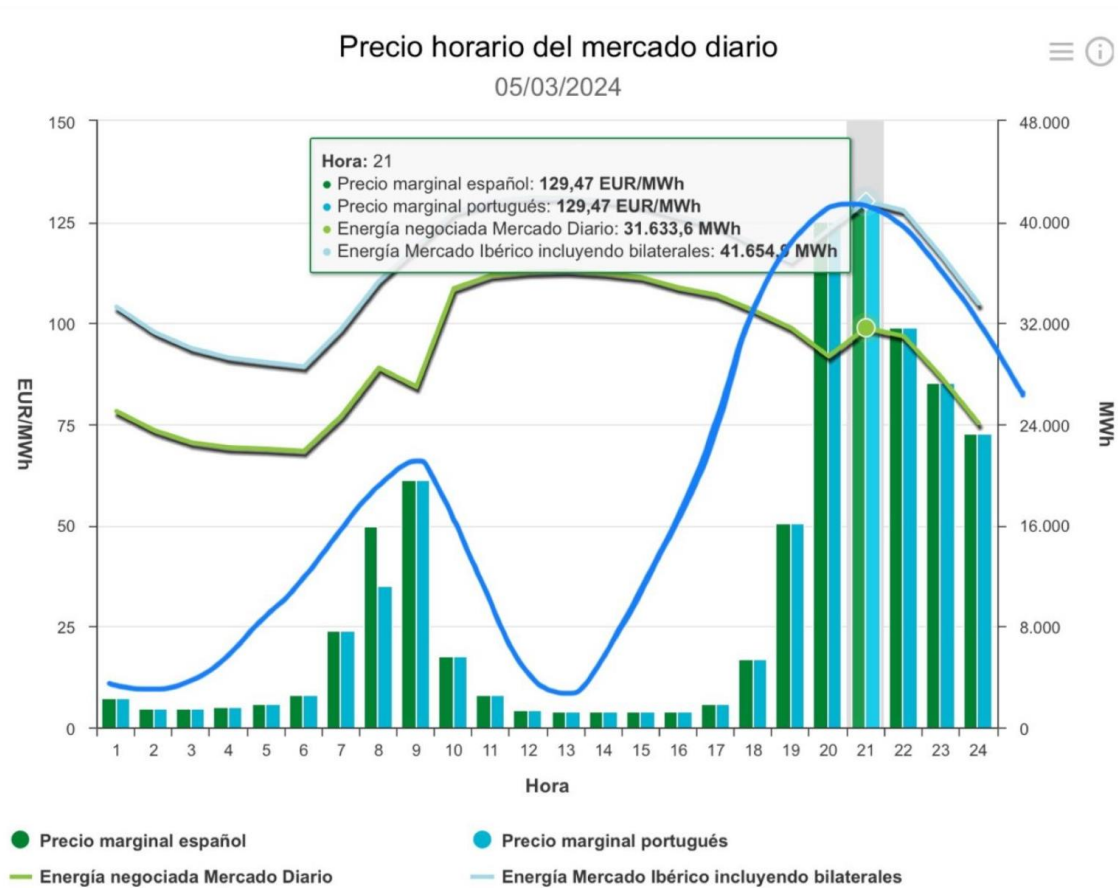


Ilustración 15- Curva de pato [1]

3 CÓDIGO DE RED DE ARABIA SAUDÍ

El código de red es una norma o estándar que regula el diseño, la instalación y el mantenimiento de sistemas eléctricos. Estas normas establecen los requisitos de seguridad, eficiencia y fiabilidad que deben cumplir las instalaciones eléctricas para garantizar la protección del sistema eléctrico.

El cumplimiento del código de red es fundamental para garantizar la seguridad de las instalaciones eléctricas. Establece los requisitos mínimos que debe cumplir una instalación ante situaciones de riesgo como un cortocircuito o una caída de frecuencia nominal. Obviamente, también establece requisitos de calidad de energía, en los armónicos, por ejemplo.

En muchos países, estas normas son establecidas por organizadores o entidades gubernamentales responsables de la seguridad y regulación de la industria eléctrica. Los códigos de red están siendo actualizados y están integrando nuevas secciones para la energía renovable. Se prevén nuevas actualizaciones en los códigos de red de muchos países gracias al rápido crecimiento de la energía renovable.

En nuestro caso, el código de red de Arabia Saudí está regulado por la Saudi Electricity company. La última versión es de julio de 2022. Además, también cuenta con un anexo específico para la energía renovable llamado Technical requirements for connections new generation to transmission system. A continuación, se detallarán algunos de los puntos más relevantes e importantes del código de red de Arabia Saudí:

- Regulación potencia frecuencia

La ilustración 16 de abajo muestra el tiempo mínimo de operación de la instalación eléctrica requerido para situaciones de subfrecuencia y sobrefrecuencia. Como se puede observar, la planta debe mantenerse operativa entre rangos de potencia de [58.8Hz,60.5Hz].

| Below Nominal Frequency (Hz) | Above Nominal Frequency (Hz) | Operation Requirement |
|-------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------|
| 58.8 – 60.0 | 60.0 – 60.5 | Continuous |
| 57.5 – 58.7 | 60.6 – 61.5 | for a period of 30 minutes |
| 57.0 – 57.4 | 61.6 – 62.5 | for a period of 30 seconds |

Ilustración 16- Operación de la instalación eléctrica según la frecuencia [15]

- Control de potencia frecuencia

Cada módulo de los parques eléctricos debe ser capaz de regular su potencia activa en los rangos [57Hz, 59.5Hz] de frecuencia para situaciones de subfrecuencia y [60Hz, 62,5Hz] para situaciones de sobrefrecuencia.

Cualquier disminución de la salida de la potencia activa que ocurra en el rango de frecuencia [57Hz, 59.5Hz] no debe ser más que una disminución proporcional en la frecuencia, siempre y cuando no sea superior a 4%/Hz. Esto se puede ver en la ilustración 17

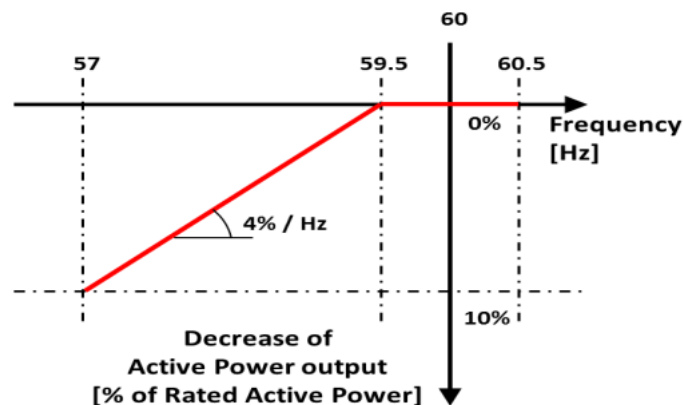


Figure 2.2 Maximum Output Power Reduction Diagram

Ilustración 17- Control potencia- frecuencia [15]

- Huecos de tensión

En este punto, se abordarán los huecos de tensión provocados por cortocircuitos que producen una caída de tensión. Se hace una distinción entre SGU (Synchronous generation unit) y PPM (Power Park Module). En la ilustración 17 se observa como de rápido hay que recuperar la tensión ante una situación de falta. Además, no se puede sobrepasar nunca la tensión 1.1 p.u., y hay que recuperar una tensión de 0.8 p.u. de una manera muy rápida para ambos casos.

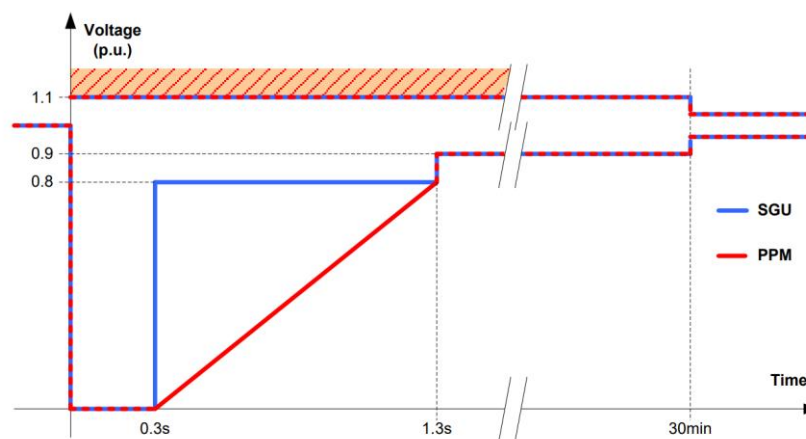


Ilustración 18- Huecos de tensión [15]

- Estudios de cortocircuito

Se realizarán cálculos de cortocircuitos de acuerdo con la norma IEC 60909 para generación máxima y baja, así como en condiciones de carga máxima y mínima.

Se considerarán como instantáneas hasta 10 números de localizaciones de fallos para cada fase trifásica, fase bifásica, fase bifásica a tierra y fase monofásica a tierra

Los resultados se proporcionarán en representación gráfica y tabular de la relación de cortocircuito.

- Estudios de riesgo de arco eléctrico

Se realizarán cálculos de análisis de riesgo de arco eléctrico para determinar la distancia de riesgo de arco eléctrico y la energía incidente a la que los empleados podrían estar expuestos durante su trabajo en o cerca de equipos eléctricos. Uno de los resultados del análisis del riesgo de arco eléctrico será determinar los requisitos de los equipos de protección individual (EPI) de los empleados.

Los cálculos de arco eléctrico deben realizarse de acuerdo con las normas IEEE-1584 2002 y NFPA 70E 2008.

Los estudios de arco eléctrico pretenden:

- La determinación de los distintos límites del arco eléctrico
- La determinación de los equipos de protección personal EPI y etiquetado de advertencia para cada límite
- Las recomendaciones para reducir la categoría de riesgos de energía incidente / relámpago de arco y para mejorar la salud y seguridad de las normas NFPA 70E.

- Curva PQ

Las curvas PQ, también conocidas como curvas de potencia reactiva (Q) frente a potencia activa (P), son gráficos utilizados en ingeniería eléctrica para representar la relación entre la potencia activa generada y la potencia reactiva generada o absorbida por ese mismo dispositivo.

Básicamente, el código de red exige que puedas proporcionar potencia reactiva, ya sea inductiva o capacitiva, dependiendo de la potencia activa que esté dando tu planta en cada momento. En este caso, también hace una distinción entre SGU (Synchronous generation unit) y PPM (Power Park Module). Esto se muestra en la ilustración 19

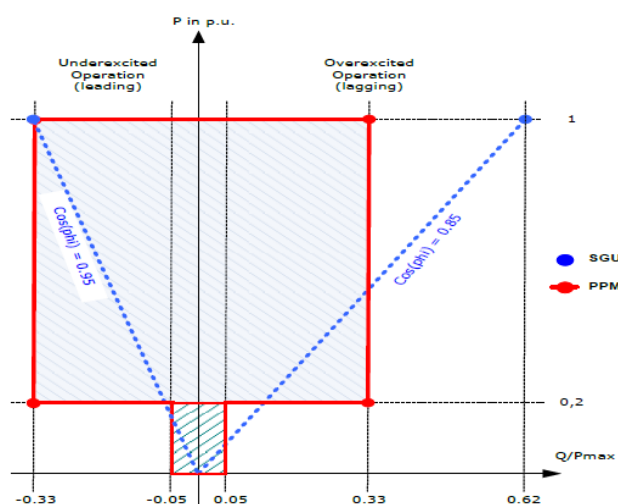


Ilustración 19- Diagrama PQ [15]

- Variaciones de tensión

La ilustración 20 muestra los rangos de variación de tensión permitidos en las instalaciones eléctricas. Como se puede ver, un rango normal de funcionamiento sería tensiones de 0.95-1.05 p.u. La situación anómala debe durar un máximo de 30 minutos para variaciones de tensión de un +-10%,

| Nominal Voltage (kV) | Normal Range | 30-Minute Range |
|----------------------|--------------|-----------------|
| 110 kV | ± 5 % | ±10 % |
| 115 kV | ± 5 % | ±10 % |
| 132 kV | ± 5 % | ±10 % |
| 230 kV | ± 5 % | ±10 % |
| 380 kV | ± 5 % | ±10 % |

Ilustración 20- Variaciones de tensión [15]

- Armónicos

Los armónicos son componentes de frecuencia múltiple de una onda fundamental que se produce cuando una señal eléctrica se distorsiona o se deforma de su forma de onda sinusoidal ideal.

En este caso, no aparecen directamente en el código de Arabia Saudí, pero este mismo hace referencia a que deben cumplir con la norma IEE 519-2022. La norma IEE 519-2022 establece los requisitos de armónicos tanto para tensión como para intensidad según la tensión del punto de conexión. Esto se muestra en la ilustración 21

Table 1 (IEEE 519-2022, pg.17) voltage distortion limits

| Bus voltage V at PCC | Individual harmonic (%) | Total harmonic distortion THD (%) |
|----------------------|-------------------------|-----------------------------------|
| $V \leq 1.0$ kV | 5.0 | 8.0 |
| 1 kV < V ≤ 69 kV | 3.0 | 5.0 |
| 69 kV < V ≤ 161 kV | 1.5 | 2.5 |
| 161 kV < V | 1.0 | 1.5* |

Ilustración 21- Armónicos de tensión [15]

Table 2 (IEEE 519-2022, pg. 19) current distortion limits for systems rated 120 V through 69 kV

| ISC/IL | Harmonic limits a,b $2 \leq h < 11$ | Harmonic limits a,b $35 \leq h \leq 50$ |
|----------|-------------------------------------|---|
| 20<50 | 7.0 | 0.5 |
| 50<100 | 10.0 | 0.7 |
| 100<1000 | 12.0 | 1.0 |
| >1000 | 15.0 | 1.4 |

Ilustración 22- Armónicos de intensidad [15]

- Recuperación de potencia activa tras una falta

Esta parte del código de red nos dice que todos los PMM (Power Park Module) deben resincronizarse en un tiempo menor de 4 segundos después de la falta, y la potencia activa debe ser superior al 90% de la situación prefalta.

- Instalaciones híbridas

Para instalaciones híbridas, el código de red de Arabia Saudí establece rangos de funcionamiento de tensión/

frecuencia y potencia/ frecuencia para baterías. Gracias a la integración de proyectos renovables e híbridos, los códigos de red comienzan a regularizar elementos que forman parte de ellas como las baterías. Esto se muestran en las ilustraciones 23 y 24.

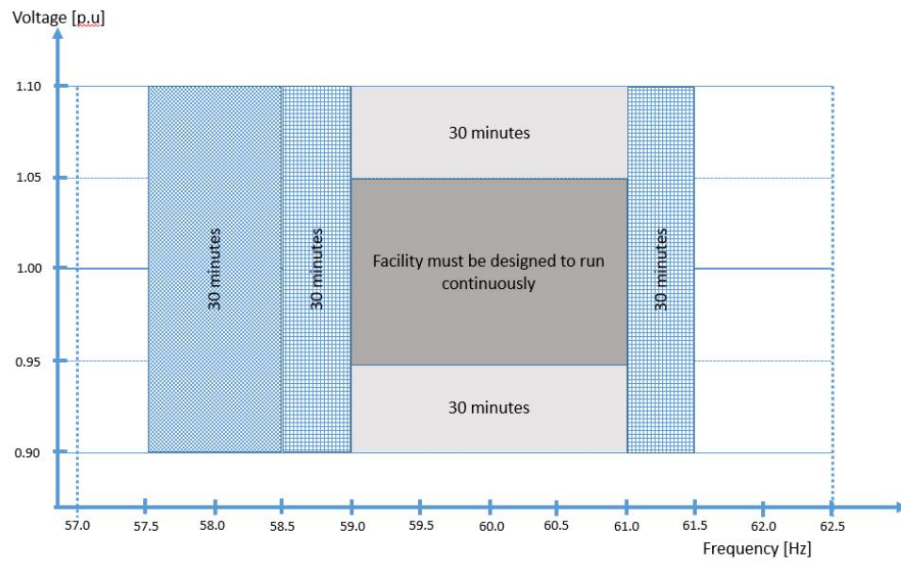


Ilustración 23- Tensión frecuencia para BESS [15]

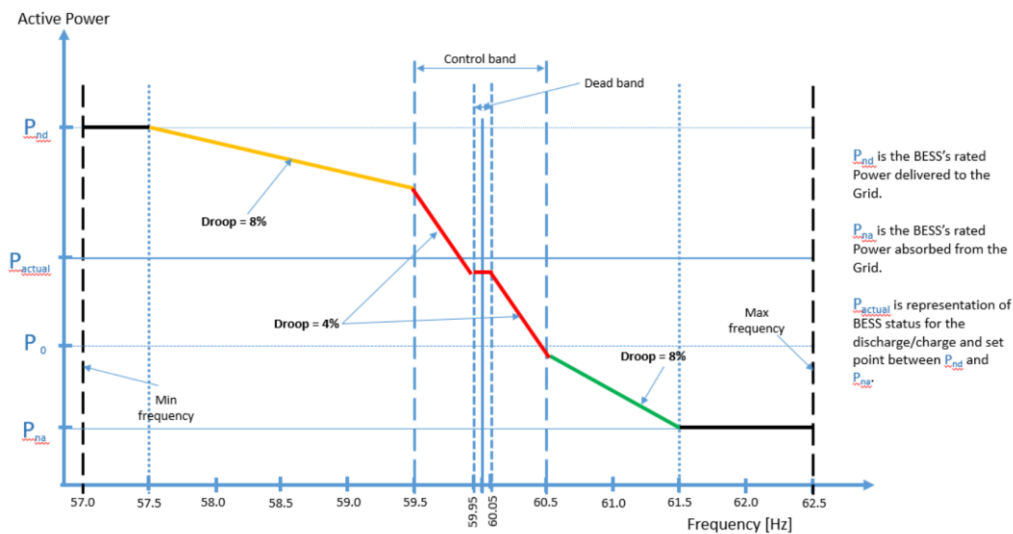


Ilustración 24- Potencia - frecuencia para BESS c

Como se ha comentado anteriormente, se prevén en las siguientes actualizaciones del código de red, nuevas regulaciones que afecten mayoritariamente a la energía renovable, regulando por ejemplo los inversores de una planta fotovoltaica.

4 DATOS DE ENTRADA NECESARIOS PARA EL ESTUDIO Y MODELADO EN DIGSILENT POWER FACTORY 2023

En este apartado se procede a describir la planta fotovoltaica a la cual se le van a realizar los estudios eléctricos. La planta fotovoltaica se encuentra en Arabia Saudí, más concretamente a unos 130 km de Buraidah, una ciudad situada en el centro de Arabia Saudí que cuenta con unos 700.000 habitantes aproximadamente. A continuación, en la ilustración 25, se muestra en el mapa la ubicación de la planta fotovoltaica.

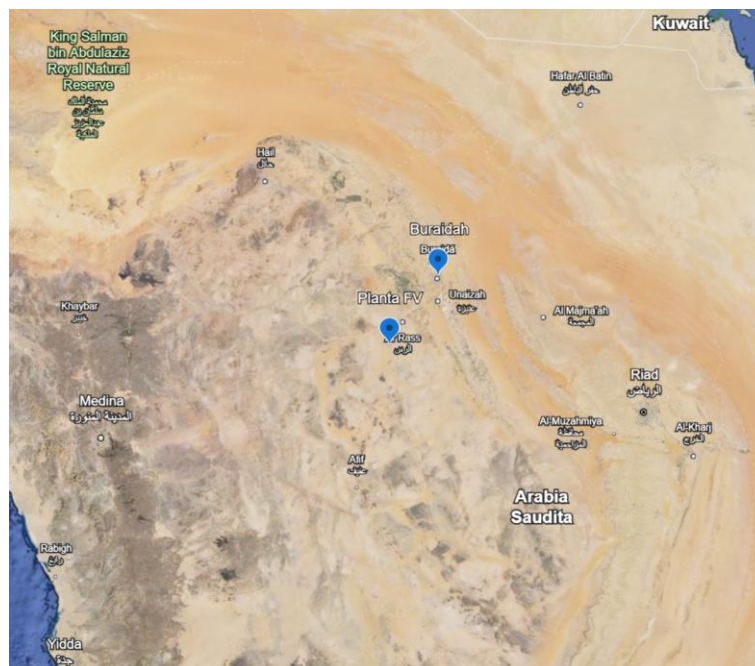


Ilustración 25- Ubicación planta fotovoltaica

Además, en este capítulo se mostrarán todos los datos utilizados para construir el modelo DIgSILENT a partir del POI, líneas de alta tensión, subestaciones, cables de media tensión e inversores con el objetivo de obtener los resultados de los estudios de dimensionamiento y cortocircuito de PQ.

Remarcar que la frecuencia en Arabia Saudí es de 60 Hz. Será el primer dato a introducir para modelar nuestra planta fotovoltaica como se muestra en la ilustración 26.

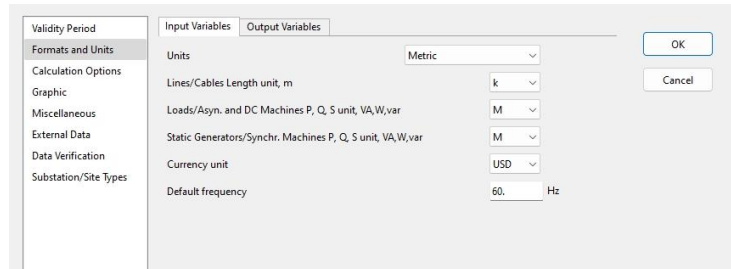


Ilustración 26- Diseño frecuencia planta fotovoltaica en DIgSILENT

Un dato muy importante y no comentado anteriormente es la temperatura de diseño a la cual se le realizarán los estudios eléctricos, en este caso serán 50°C. Es crucial estudiar las características climáticas más desfavorables de la ubicación del proyecto ya que la eficiencia de los equipos se puede ver afectada ante una modificación en la temperatura u otra condición.

4.1 Inversor

El inversor escogido para este proyecto será de Sungrow, concretamente el modelo SG1100UD-20. A continuación, se muestran en la tabla 1 las principales características del inversor.

| INVERSOR | |
|---------------------|---------------|
| FABRICANTE | SUNGROW |
| MODELO | SG 1100 UD-20 |
| TIPO | CENTRAL |
| POTENCIA 23°C | 1320 kVa |
| POTENCIA 51°C | 1100 kVa |
| Nº INVERSORES / CT | 6 |
| Nº TOTAL INVERSORES | 1512 |

Tabla 1- Datos inversor sungrow SG1100UD-20

Buscando más información sobre este inversor en la página de Sungrow, podemos encontrar la curva PQ del inversor a diferentes potencias y tensiones según la nominal. Esto se muestra en la ilustración 27-

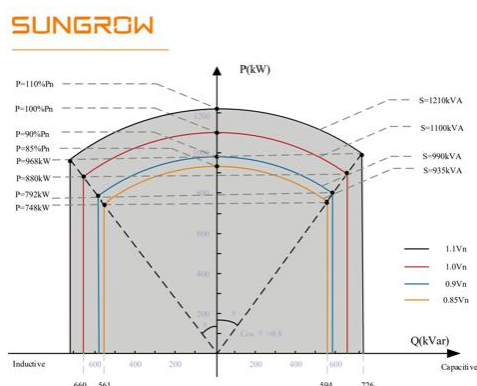


Ilustración 27- Curva PQ inversor Sungrow 1100UD-20 [14]

También será necesario introducir en DIgSILENT Power Factory la intensidad de cortocircuito en régimen permanente y la intensidad inicial simétrica de cortocircuito para modelar nuestro inversor. Estos datos son facilitados por Sungrow, aunque su cálculo es bastante sencillo. Esto se muestra en la ilustración 28



| Model of the inverter | Peak Short Circuit Current I_p (A) | Initial symmetrical short-circuit current I_k'' (A) | Steady-State Short Circuit Current (A) |
|-----------------------|--------------------------------------|---|--|
| SG1100UD | <2400A | 1344 | 1160 |
| SG1100UD-20 | <2400A | 1283 | 1010 |
| SG1100UD-US | <2400A | / | 1034 |

Ilustración 28- Intensidad cortocircuito inversor Sungrow 1100UD-20 [14]

A continuación, comenzamos a modelar el inversor en DIgSILENT e introducimos su potencia máxima de operación (1,1MW). Esto se muestra en la ilustración 29

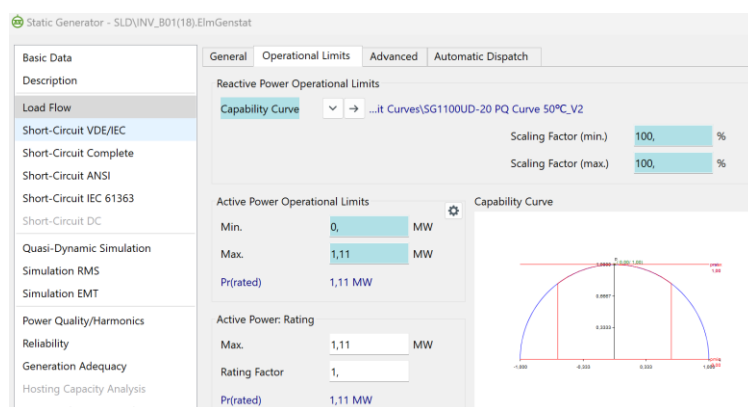


Ilustración 29-Modelo DIgSILENT inversor Sungrow 1100UD-20

Para el diseño de la planta modelamos un inversor, aunque en realidad serán 3 inversores en paralelo. Esto se hace para simplificar el modelo y se ve reflejado en la ilustración 30.

General Zero Sequence/Neutral Conductor

Name INV_B05(3)

Terminal SLD\LV_B14_1(7)\Cub_2 LV_B14_1(7)

Zone →

Area →

Out of Service

Technology 3PH

Plant Category Photovoltaic Subcategory

Number of parallel units 3

Ratings

Rated Apparent Power 1,11 MVA

Rated Power Factor 1

Model →

OK Cancel Figure Jump to ...

Ilustración 30 Modelo DIgSILENT inductor Sungrow 1100UD-20

En la ilustración 31, también se puede observar como la curva PQ del inductor está a la temperatura de diseño de la planta fotovoltaica (50°C). La curva sería la siguiente:

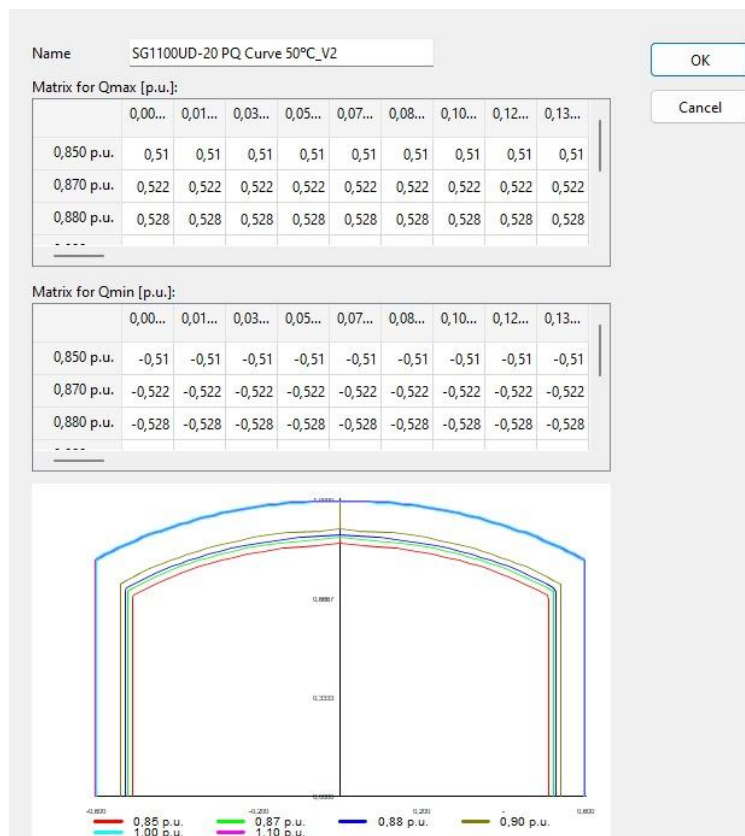


Ilustración 31 Modelo DIgSILENT inductor Sungrow 1100UD-20

Por último, faltaría introducir la corriente inicial de cortocircuito. Esto tendrá importancia cuando realicemos el estudio de cortocircuito para el aporte de cada inductor. También aparece la corriente de

cortocircuito en régimen permanente. En la ilustración 32, se muestra que el inversor ha sido modelado correctamente en DIgSILENT Power Factory 2023.

2016 1990/2001

No Short-Circuit Contribution

Static Converter-Fed Drive

Power station unit type: Full size converter

Externally modelled unit transformer

Unit transformer →

Hint: "Unit Transformer" flag belongs to the transformer setting

Initial symmetrical short-circuit current contribution

| | | |
|--|-------|----|
| Three-phase faults, I _k "3PF | 1,283 | kA |
| Two-phase faults, I _k "2PF | 1,283 | kA |
| Single-phase faults, I _k "1PF | 1,283 | kA |

Steady-state short-circuit current contribution

| | | |
|-----------------|------|----|
| Maximum current | 1,01 | kA |
| Minimum current | 1,01 | kA |

Negative sequence short-circuit impedance

| | | |
|----------------|--------|------|
| Resistance, r2 | 99999, | p.u. |
| Reactance, x2 | 99999, | p.u. |

OK

Cancel

Figure

Jump to ...

Ilustración 32 Modelo DIgSILENT inversor Sungrow 1100UD-20

Cabe remarcar que el inversor y transformador de media tensión no se encuentran en un mismo contenedor.

4.2 Transformador de media tensión

Una vez modelado los inversores, el siguiente paso sería los transformadores de media tensión. El transformador de media tensión también pertenece a Sungrow.

El transformador a modelar es de 3 devanados. A continuación, como hemos hecho con los inversores, se mostrará en la tabla 2 las principales características del transformador de media tensión.

Tabla 2- Datos transformador media tensión

| TRANSFORMADOR MEDIA TENSIÓN | |
|------------------------------------|--------------|
| FABRICANTE | SUNGROW |
| MODELO | SG6600 UD-MV |
| TIPO | ACEITE |
| POTENCIA (50°C) | 6600 kVa |

| | |
|-----------------------------|-------------------------|
| RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN | 0,66/33 kV |
| GRUPO VECTORIAL | Dy11y11 |
| IMPEDANCIA DE CORTOCIRCUITO | 8% |
| CAMBIOS TAP | 0, $\pm 2 \times 2,5\%$ |
| FRECUENCIA | 60 Hz |
| EFICIENCIA | 99% |
| MÉTODO ENFRIAMIENTO | ONAN |
| PROTECCIÓN | IP68 (TRANSFORMADOR) |

Al ser un transformador de 3 devanados de 6600 kVa, vamos a suponer que le llegan 3300 kVa por cada lado de baja tensión.

Un dato importante para la configuración de la planta es conocer el número de power stations de la planta fotovoltaica. En este caso, hay un total de 252 power stations.

Comenzando ya con el modelado del transformador de media tensión, podemos ver como se han ido introduciendo los datos facilitados por el fabricante. No obstante, se han realizado algunas suposiciones necesarias para continuar con el dimensionado de la planta. Para este proyecto, debido a la falta de información, suponemos un ratio común X/R como puede ser aproximadamente 6,25-6,4. Por último, la impedancia de cortocircuito en el lado de alta ha sido escogida rigiéndonos a la normativa IEC60076 e IEC60296. Todo esto se muestra en la ilustración 33.

The screenshot shows the configuration window for a 3-Winding Transformer. The fields are as follows:

- Name:** 6.6 MVA_33/0.66/0.66kV_Dy11y11
- Technology:** Three Phase Transformer
- Rated Power:**
 - HV-Side: 6.6 MVA
 - MV-Side: 3.3 MVA
 - LV-Side: 3.3 MVA
- Rated Voltage:**
 - HV-Side: 33. kV
 - MV-Side: 0.66 kV
 - LV-Side: 0.66 kV
- Vector Group:**
 - HV-Side: D
 - MV-Side: Y
 - LV-Side: Y
 - Phase Shift (all): 11. *30deg
- Impedance Ratios:**
 - Positive Sequence Impedance:**
 - X/R Ratio: 6.268021
 - Short-Circuit Voltage uk:
 - HV-MV: 8. %
 - MV-LV: 13.8 %
 - LV-HV: 8. %
 - Zero Sequence Impedance:**
 - X0/R0 Ratio: 8.403765
 - Short-Circuit Voltage uk0:
 - HV-MV: 8. %
 - MV-LV: 13.8 %
 - LV-HV: 8. %

Ilustración 33- ModeloDIgSILENT transformador media tensión

Por último, otro dato con menos importancia pero que también hemos supuesto, ha sido las pérdidas

en vacío del transformador. En este caso también hemos escogido un valor común, como puede ser de 12kW. En la ilustración 34 se muestra esta última suposición.

Ilustración 34-Modelo DlgSILENT transformador media tensión

En la ilustración 34 se observa cómo se ha introducido el tap del transformado de media tensión (0, $\pm 2 \times 2,5\%$) según las características del transformador.

4.3 Mediciones de los cables de media tensión

Para llegar hasta los transformadores de la subestación elevadora, será necesario un cableado de media tensión. El proyecto cuenta con 8 transformadores de 3 devanados de alta tensión, y a cada transformador le llegan 10 loops (5 por lado).

Existen loops de 3 y 4 tramos según la potencia que pase por ellos. En los loops de 3, el último tramo transportará la potencia a la salida de 3 transformadores aproximadamente (quitando las pérdidas por cada línea), y en los loops de 4, el último tramo transportará la potencia a la salida de 4 transformadores aproximadamente (quitando las pérdidas por cada línea).

Lógicamente, tendrán diferentes secciones según la potencia que transporten. No podemos olvidar, que otro dato importante para modelar los cables será la longitud de cada uno de ellos.

El proyecto cuenta con un total de 80 loops (68 loops de 3 tramos y 12 loops de 4 tramos). Las características de cada cable serán las siguientes:

- Primer cable (ilustración 35) : AL XLPE 3C*240mm² 19/36kV Huatong, 1 terna

| - Consider Link box every 1000m | | |
|--------------------------------------|--------------|----------------------|
| Cable-1 | | |
| No. of Runs | No. of Cores | Cross-section |
| 1 | Multi Core | 240 sqmm |
| Total CAD Length | | 27.098 mtr |
| Length per Drum | | 500 mtr |
| Joint Length | | 6,0 mtr |
| Waste at every Roll / Drum | | 368 mtr |
| Total Length | | 30.661 mtr |
| Extra overall Buffer | | 0% |
| Final Length | | 31.029 mtr |
| Final / CAD Ratio | | 1,145 |
| Number of Mid Joints (for Each Core) | | 51 |
| BoQ Length (Multi Core x 1R) | | 31.029 mtr |
| Link Box every | | 1.000 mtr |
| Number of link boxes | | Only for Single Core |

Ilustración 35- Cable 1 tramo de un loop

- Segundo cable (ilustración 36): AL XLPE 3C*400mm² 19/36kV Huatong, 1 terna

| Cable-2 | | |
|--------------------------------------|--------------|----------------------|
| No. of Runs | No. of Cores | Cross-section |
| 1 | Multi Core | 400 sqmm |
| Total CAD Length | | 27.218 mtr |
| Length per Drum | | 500 mtr |
| Joint Length | | 6,0 mtr |
| Waste at every Roll / Drum | | 369 mtr |
| Total Length | | 30.788 mtr |
| Extra overall Buffer | | 0% |
| Final Length | | 31.157 mtr |
| Final / CAD Ratio | | 1,145 |
| Number of Mid Joints (for Each Core) | | 51 |
| BoQ Length (Multi Core x 1R) | | 31.157 mtr |
| Link Box every | | 1.000 mtr |
| Number of link boxes | | Only for Single Core |

Ilustración 36-- Cable 2 tramo de un loop

- Tercer cable (ilustración 37): AL XLPE 3C*630mm² 19/36kV Huatong, 1 terna

| Cable-3 | | |
|--------------------------------------|--------------|---------------|
| No. of Runs | No. of Cores | Cross-section |
| 1 | Single Core | 630 sqmm |
| Total CAD Length | | 180.936 mtr |
| Length per Drum | | 1.000 mtr |
| Joint Length | | 6,0 mtr |
| Waste at every Roll / Drum | | 1.214 mtr |
| Total Length | | 202.351 mtr |
| Extra overall Buffer | | 2% |
| Final Length | | 207.636 mtr |
| Final / CAD Ratio | | 1,148 |
| Number of Mid Joints (for Each Core) | | 498 |
| BoQ Length (Single Core x 1R) | | 622.909 mtr |
| Link Box every | | 1.000 mtr |
| Number of link boxes | | 166 |

Ilustración 37- Cable 3 tramo de un loop

- Cuarto cable (ilustración 38): AL XLPE 3C*240mm² 19/36kV Huatong, 2 ternas

| Cable-4 | | |
|--------------------------------------|--------------|----------------------|
| No. of Runs | No. of Cores | Cross-section |
| 2 | Multi Core | 400 sqmm |
| Total CAD Length | | 20.765 mtr |
| Length per Drum | | 500 mtr |
| Joint Length | | 6,0 mtr |
| Waste at every Roll / Drum | | 280 mtr |
| Total Length | | 23.346 mtr |
| Extra overall Buffer | | |
| Final Length | | 23.626 mtr |
| Final / CAD Ratio | | 1,138 |
| Number of Mid Joints (for Each Core) | | 246 |
| BoQ Length (Multi Core x 2R) | | 47.251 mtr |
| Link Box every | | |
| Number of link boxes | | Only for Single Core |
| Notes:- | | |

Ilustración 38- Cable 4 tramo de un loop

Ya conocidas las secciones de los cables, lo siguiente será determinar su R,X,C. Para determinar la resistencia, impedancia y capacitancia de cada cable nos apoyaremos en el catálogo de Hentong. En la ilustración 39 y 40 , se muestra un ejemplo para determinar la R,X,C para el cable de 240 mm². La ampacidad será determinada según la disposición del cableado.



- Aluminium conductor
- Semi-conductive conductor screen
- XLPE insulation
- Semi-conductive insulation screen
- Metallic screen
- Binder tape
- Filler
- PVC sheath

Standard: IEC 60502.2

AL/XLPE/SCR/PVC

Three core XLPE insulated cables with aluminium conductor

- Rated voltage: 18/30(36)kV or 19/33(36)kV
- Test voltage: 63kV/5 mins
- Max. Short-circuit temperature: 250°C
- Operating conductor temperature: 90°C
- Min. temperature for laying and manipulation with cables: -5°C
- Temperature range for operating: from -35 to +90°C
- Colour of insulation: See "Recommended Multi Core Identification" Table
- Colour of sheath: Black
- Min. bending radius: 15 OD
- Packing: Cable Drum

Optional

The cable design based on AS/NZS, SANS, NBR, ICEA, BS, EN, AIEC etc. is also available. Tree retardant, Flame retardant, Low smoke & Halogen free, Cold resistant, UV resistant, Oil resistant, Anti-rodent, Anti-termites, water proof is also available. Manner of metallic screen can be designed as copper tape, or copper wires, or a combination of wires and tapes.

Application

Cables are designed for fixed installation into distribution network or possibly damp environments. If it is necessary to lay the cable in the ground, it has to be provided with a protection tube made of plastics, and has to be laid in bed of sand. The cables are resistant to UV radiation and to flame propagation according to IEC 60332.

Rated Voltage: 18/30(36)kV or 19/33(36)kV

| No. Cores & Cross section area | Approx. diameter of conductor | Nominal thickness of insulation | Max. overall of cable | Approx. weight of cable | Max. D.C resistance of Conductor at 20°C | Max. A.C resistance of Conductor at 90°C (Trefoil) | Fault current carrying of conductor (1s) | Fault current carrying of screen* (1s) | Conductor to screen capacitance | Inductance | Max. allowable pulling force of conductor |
|--------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|-----------------------|-------------------------|--|--|--|--|---------------------------------|------------|---|
| | mm | mm | mm | kg/km | Ω/km | Ω/km | kA | kA | μF/km | | |
| 3x50 | 8.1 | 8.0 | 68.7 | 3595.6 | 0.641 | 0.822 | 4.7 | 1.78 | 0.142 | 0.432 | 5.9 |
| 3x70 | 9.8 | 8.0 | 72.8 | 4080.1 | 0.443 | 0.568 | 6.6 | 1.78 | 0.158 | 0.406 | 8.2 |
| 3x95 | 11.4 | 8.0 | 76.8 | 4623.7 | 0.320 | 0.411 | 9.0 | 1.78 | 0.173 | 0.386 | 11.1 |
| 3x120 | 12.9 | 8.0 | 80.3 | 5115.9 | 0.253 | 0.325 | 11.3 | 1.78 | 0.186 | 0.371 | 14.0 |
| 3x150 | 14.4 | 8.0 | 84.0 | 5639.0 | 0.206 | 0.265 | 14.2 | 1.78 | 0.200 | 0.358 | 17.6 |
| 3x185 | 16.0 | 8.0 | 87.8 | 6259.5 | 0.164 | 0.211 | 17.5 | 1.78 | 0.214 | 0.346 | 21.6 |
| 3x240 | 18.4 | 8.0 | 93.5 | 7199.3 | 0.125 | 0.161 | 22.7 | 1.78 | 0.236 | 0.332 | 28.1 |
| 3x300 | 20.6 | 8.0 | 98.8 | 8174.0 | 0.100 | 0.130 | 28.3 | 1.78 | 0.256 | 0.320 | 35.1 |
| 3x400 | 23.4 | 8.0 | 105.6 | 9496.3 | 0.0778 | 0.102 | 37.8 | 2.23 | 0.280 | 0.308 | 46.8 |

Note *: The value is calculated base on copper tape.

Ilustración 39-Catálogo Hentong [13]

18/30(36) or 19/33(36)kV Single Core

| Screened, Sheathed | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------|--------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|-----------|-----|------|-----|------|-----|----------------------|-----|------|-----|------|-----|
| Nominal conductor area | In air | | | | | | | | | | | | In Ground | | | | | | In underground ducts | | | | | |
| | *D/2 | | *D/2 | | *D/2 | | *D/2 | | *D/2 | | *D/2 | | *D/2 | | *D/2 | | *D/2 | | *D/2 | | *D/2 | | *D/2 | |
| mm ² | CU | AL | CU | AL | CU | AL | CU | AL | CU | AL | CU | AL | CU | AL | CU | AL | CU | AL | CU | AL | CU | AL | CU | AL |
| 50 | 224 | 175 | 250 | 197 | 210 | 163 | 221 | 172 | 160 | 125 | 208 | 162 | 209 | 164 | 205 | 159 | 187 | 147 | 186 | 148 | 185 | 145 | 174 | 135 |
| 70 | 276 | 217 | 306 | 243 | 259 | 202 | 273 | 213 | 202 | 158 | 251 | 198 | 249 | 199 | 249 | 194 | 223 | 178 | 219 | 178 | 223 | 175 | 216 | 169 |
| 95 | 333 | 262 | 369 | 292 | 315 | 245 | 332 | 258 | 242 | 189 | 297 | 234 | 292 | 234 | 297 | 232 | 265 | 209 | 258 | 207 | 267 | 208 | 258 | 201 |
| 120 | 381 | 299 | 420 | 332 | 361 | 281 | 381 | 296 | 276 | 215 | 335 | 264 | 327 | 262 | 336 | 262 | 296 | 237 | 287 | 233 | 300 | 237 | 292 | 228 |
| 150 | 429 | 337 | 469 | 374 | 407 | 317 | 430 | 335 | 308 | 241 | 372 | 294 | 359 | 290 | 375 | 293 | 327 | 263 | 313 | 257 | 333 | 264 | 325 | 254 |
| 185 | 485 | 383 | 527 | 422 | 463 | 362 | 490 | 382 | 348 | 272 | 414 | 330 | 397 | 323 | 421 | 330 | 362 | 293 | 343 | 285 | 372 | 296 | 366 | 287 |
| 240 | 563 | 448 | 605 | 491 | 542 | 425 | 574 | 450 | 402 | 316 | 471 | 378 | 444 | 366 | 485 | 382 | 408 | 334 | 382 | 321 | 425 | 340 | 420 | 331 |
| 300 | 634 | 508 | 674 | 551 | 616 | 484 | 653 | 513 | 452 | 357 | 521 | 421 | 485 | 404 | 542 | 428 | 446 | 370 | 413 | 352 | 471 | 381 | 469 | 371 |
| 400 | 719 | 584 | 756 | 628 | 706 | 561 | 750 | 595 | 533 | 425 | 579 | 475 | 531 | 449 | 610 | 487 | 492 | 414 | 449 | 389 | 526 | 430 | 547 | 437 |

18/30(36) or 19 /33(36)kV Three Core

| Ind. Screened, Sheathed | | | | | | | | | |
|-------------------------|--------|-----|------|-----|------|-----------|-----|------|-----|
| Nominal conductor area | In air | | | | | In Ground | | | |
| | *D/2 | | *D/2 | | *D/2 | *D/2 | | *D/2 | |
| mm ² | AL | CU | AL | CU | AL | CU | AL | CU | AL |
| 50 | 157 | 215 | 167 | 161 | 125 | 201 | 157 | 173 | 135 |
| 70 | 194 | 265 | 206 | 196 | 153 | 245 | 191 | 210 | 164 |
| 95 | 234 | 320 | 249 | 234 | 183 | 291 | 228 | 250 | 195 |
| 120 | 267 | 366 | 285 | 265 | 207 | 329 | 258 | 282 | 221 |
| 150 | 300 | 411 | 321 | 295 | 232 | 366 | 287 | 313 | 246 |
| 185 | 340 | 465 | 365 | 332 | 261 | 410 | 323 | 350 | 276 |
| 240 | 396 | 540 | 426 | 395 | 313 | 468 | 371 | 412 | 327 |
| 300 | 448 | 608 | 482 | 441 | 352 | 520 | 415 | 457 | 366 |
| 400 | 513 | 689 | 553 | 493 | 399 | 579 | 469 | 509 | 412 |

Ilustración 40-Catálogo Hentong [13]

Una vez determinada la sección de los cables con su R,X,C y ampacidad, lo siguiente será obtener las mediciones de cada loop. La ilustración 41 muestra la longitud en metros de cada cable según su sección.

En la ilustración 42 se muestra cómo se ha modelado el cableado de media tensión para cada sección. La librería de los cables sería la siguiente:





| | | |
|---|---------------------------------------|---------------------------------------|
|  | 33kV AI XLPE 3Cx240mm ² | Equipment Type Library |
|  | 33kV AI XLPE 3Cx400mm ² | Equipment Type Library |
|  | AI XLPE 19/33 3x1 630 mm ² | Cables AL XLPE PVC 19/33 (36) Huatong |
|  | AI XLPE 19/33 3x1x400 mm ² | Cables AL XLPE PVC 19/33 (36) Huatong |

Ilustración 42-Librería cables DIgSILENT

Las características de cada cable serán introducidas en el mismo orden que descritas anteriormente:

- Primer cable (ilustración 43): AL XLPE 3C*240mm² 19/36kV Huatong, 1 terna

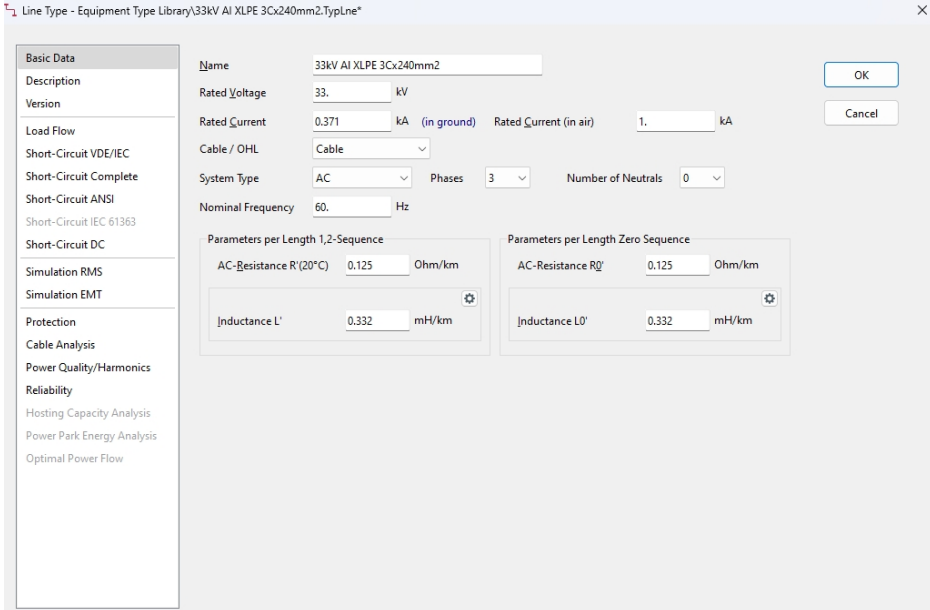
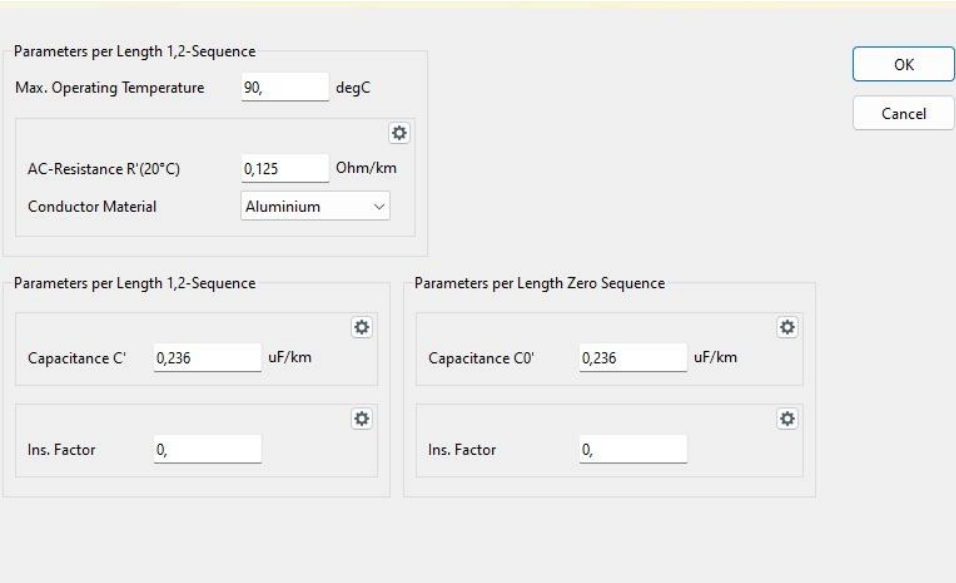



Ilustración 43-Modelo cable tramo 1 DIgSILENT

- Segundo cable (ilustración 44): AL XLPE 3C*400mm² 19/36kV Huatong, 1 terna

The image shows a software window titled "Line Type - Equipment Type Library\33kV Al XLPE 3Cx400mm2.TypLne*". The interface is divided into a left sidebar with various analysis categories and a main configuration area.

Basic Data:

- Name: 33kV Al XLPE 3Cx400mm2
- Rated Voltage: 33. kV
- Rated Current: 0.469 kA (in ground) / 1. kA (in air)
- Cable / OHL: Cable
- System Type: AC, Phases: 3, Number of Neutrals: 0
- Nominal Frequency: 60. Hz

Parameters per Length 1,2-Sequence:

- AC-Resistance R'(20°C): 0.0778 Ohm/km
- Inductance L': 0.308 mH/km

Parameters per Length Zero Sequence:

- AC-Resistance R0': 0.0778 Ohm/km
- Inductance L0': 0.308 mH/km

Additional Parameters (shown in a separate dialog box):

- Max. Operating Temperature: 90. degC
- AC-Resistance R'(20°C): 0,0778 Ohm/km
- Conductor Material: Aluminium
- Capacitance C': 0,28 uF/km
- Ins. Factor: 0,

Ilustración 44 Modelo cable tramo 2 DIgSILENT

- Tercer cable (ilustración 45): AL XLPE 3C*630mm² 19/36kV Huatong, 1 terna

Line Type - ...PE PVC 19/33 (36) Huatong\AI XLPE 19/33 3x1 630 mm2.TypLne*

| | | | | | | |
|----------------------------|------------------------------------|---------------------------|---|-------------------|--------|--------|
| Basic Data | Name | AI XLPE 19/33 3x1 630 mm2 | | OK | | |
| Description | Rated Voltage | 33. | kV | Cancel | | |
| Version | Rated Current | 0.615 | kA (in ground) Rated Current (in air) 1. kA | | | |
| Load Flow | Cable / OHL | Cable | | | | |
| Short-Circuit VDE/IEC | System Type | AC | Phases 3 Number of Neutrals 0 | | | |
| Short-Circuit Complete | Nominal Frequency | 60. Hz | | | | |
| Short-Circuit ANSI | Parameters per Length 1,2-Sequence | | Parameters per Length Zero Sequence | | | |
| Short-Circuit IEC 61363 | AC-Resistance R'(20°C) | 0.0469 | Ohm/km | AC-Resistance R0' | 0.0469 | Ohm/km |
| Short-Circuit DC | Inductance L' | 0.311 | mH/km | Inductance L0' | 0.311 | mH/km |
| Simulation RMS | | | | | | |
| Simulation EMT | | | | | | |
| Protection | | | | | | |
| Cable Analysis | | | | | | |
| Power Quality/Harmonics | | | | | | |
| Reliability | | | | | | |
| Hosting Capacity Analysis | | | | | | |
| Power Park Energy Analysis | | | | | | |
| Optimal Power Flow | | | | | | |

| | | |
|-------------------------------------|--------|--------|
| Parameters per Length 1,2-Sequence | | OK |
| Max. Operating Temperature | 90. | degC |
| AC-Resistance R'(20°C) | 0,0319 | Ohm/km |
| Conductor Material | Copper | |
| Parameters per Length 1,2-Sequence | | Cancel |
| Capacitance C' | 0,187 | uF/km |
| Ins. Factor | 0, | |
| Parameters per Length Zero Sequence | | |
| Capacitance C0' | 0,187 | uF/km |
| Ins. Factor | 0, | |

Ilustración 45 Modelo cable tramo 3 DIgSILENT

- Cuarto cable (ilustración 46): AL XLPE 3C*240mm2 19/36kV Huatong, 2 ternas

Line Type - ...PE PVC 19/33 (36) Huatong\AI XLPE 19/33 3x1x400 mm2,TypLne*

| | | | | |
|----------------------------|------------------------------------|---------------------------|---|-------------------|
| Basic Data | Name | AI XLPE 19/33 3x1x400 mm2 | | OK |
| Description | Rated Voltage | 33. | kV | Cancel |
| Version | Rated Current | 0.475 | kA (in ground) Rated Current (in air) 0.42 kA | |
| Load Flow | Cable / OHL | Cable | | |
| Short-Circuit VDE/IEC | System Type | AC | Phases 3 Number of Neutrals 0 | |
| Short-Circuit Complete | Nominal Frequency | 60. | Hz | |
| Short-Circuit ANSI | Parameters per Length 1,2-Sequence | | Parameters per Length Zero Sequence | |
| Short-Circuit IEC 61363 | AC-Resistance R'(20°C) | 0.0778 | Ohm/km | AC-Resistance R0' |
| Short-Circuit DC | Inductance L' | 0.332 | mH/km | Inductance L0' |
| Simulation RMS | | | | |
| Simulation EMT | | | | |
| Protection | | | | |
| Cable Analysis | | | | |
| Power Quality/Harmonics | | | | |
| Reliability | | | | |
| Hosting Capacity Analysis | | | | |
| Power Park Energy Analysis | | | | |
| Optimal Power Flow | | | | |

Parameters per Length 1,2-Sequence

Max. Operating Temperature 90, degC

AC-Resistance R'(20°C) 0,0778 Ohm/km

Conductor Material Aluminium

Parameters per Length 1,2-Sequence

Capacitance C' 0,28 uF/km

Ins. Factor 0,

Parameters per Length Zero Sequence

Capacitance C0' 0,236 uF/km

Ins. Factor 0,

Ilustración 46-Modelo cable tramo 4 DIgSILENT

4.4 Transformador de alta tensión

Uno de los últimos pasos será elevar la tensión gracias al transformador de la subestación elevadora. La impedancia del transformador jugará un importante en el cumplimiento del código de red, y sobre todo en el cortocircuito.

Al igual que hemos hecho con el transformador de media tensión, se hará una breve descripción de las características principales de este mismo en la tabla 3

Tabla 3-Datos transformador de la subestación

| TRANSFORMADOR ALTA TENSIÓN | |
|-----------------------------------|-------------------------------|
| Potencia | 210 Mva |
| Relación transformación | 33/132 |
| Grupo vectorial | Ynd11d11 |
| Impedancia de cortocircuito | 13% (base 105 Mva) |
| Tap | +10% a -15% en pasos de 1,25% |
| Método enfriamiento | ONAN |

Al ser un transformador de 3 devanados de 210MVA, vamos a suponer que le llegan 105MVA por cada lado de media tensión.

De nuevo, no tenemos los datos suficientes para el modelado del transformador de alta tensión y será necesario realizar algunas suposiciones. La primera de ellas será suponer el ratio X/R de cada lado del transformador, estos datos supuestos son comunes en un transformador de alta tensión. En la ilustración 47, se muestra el modelo del transformador de la subestación

Name: 210MVA_132/33kV_Transformers

Technology: Three Phase Transformer

Rated Power:

| | | |
|---------|-----|-----|
| HV-Side | 210 | MVA |
| MV-Side | 105 | MVA |
| LV-Side | 105 | MVA |

Rated Voltage:

| | | |
|---------|-----|----|
| HV-Side | 132 | kV |
| MV-Side | 33 | kV |
| LV-Side | 33 | kV |

Vector Group:

| | | | | |
|---------|----|-------------|----|--------|
| HV-Side | YN | Phase Shift | 0 | *30deg |
| MV-Side | D | Phase Shift | 11 | *30deg |
| LV-Side | D | Phase Shift | 11 | *30deg |

Name: YN0d11d11

Hint: The short-circuit voltages refer to the corresponding min. rated Powers
e.g. uk(HV-MV) is referred to the minimum of Sr(HV) and Sr(MV)

Positive Sequence Impedance:

| | |
|--------------------------|-----------------|
| Short-Circuit Voltage uk | X/R Ratio |
| HV-MV: 13, % | HV-MV: 73,77701 |
| MV-LV: 22, % | MV-LV: 59,22233 |
| LV-HV: 13, % | LV-HV: 73,77701 |

Zero Sequence Impedance:

| | |
|---------------------------|-----------------|
| Short-Circuit Voltage uk0 | X0/R0 Ratio |
| HV-MV: 10,65 % | HV-MV: 32,26369 |
| MV-LV: 18,85 % | MV-LV: 28,54881 |
| LV-HV: 10,65 % | LV-HV: 32,26369 |

Ilustración 47-Modelo DIGSILENT transformador de la subestación

Por último, al modelar el tap del transformador también debemos suponer unas pérdidas en vacío de unos 130 kW. La ilustración 48 muestra lo comentado anteriormente.

Tap HV-Side:

| | | |
|----------------------|------|-----|
| Add. Voltage per Tap | 1,25 | % |
| Phase of du | 0 | deg |
| Neutral Position | 0 | |
| Min. Position | -15 | |
| Max. Position | 10 | |

Tap MV-Side:

| | | |
|----------------------|---|---|
| Add. Voltage per Tap | 0 | % |
|----------------------|---|---|

Magnetising Impedance:

| | | |
|-----------------|------------|----|
| Position | Star Point | |
| No Load Current | 0,1 | % |
| No Load Losses | 130 | kW |

Zero Sequence Magnetising Impedance:

| | | |
|-----------------|------------|---|
| Position | Star Point | |
| No Load Current | 0 | % |
| Mag. R/X | 0 | |

Ilustración 48-Modelo DIGSILENT transformador de la subestación

4.5 Línea de alta tensión

Para finalizar, el último elemento a modelar sería la línea de alta tensión a 132 kV. Como hemos comentado, al haber 8 transformadores, habrá 8 líneas de alta tensión hasta el punto de conexión.

La longitud de cada línea hasta el punto de conexión será de 7km.

La ilustración 49 muestra las características de la línea de alta tensión. El conductor elegido será ACAR, tendrá dos circuitos en paralelo y sus características más importantes son:

- Sección
- Resistencia
- Ampacidad

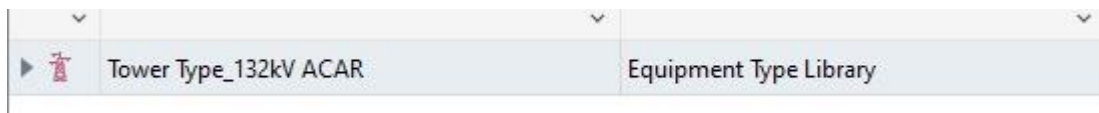
Table 1 : Ratings and Characteristics of ACAR and ACSR/AW Bare Overhead Line Conductors

| Code Word | | ACAR | ACSR/AW "DRAKE" | ACSR/AW "ORIOLE" | ACSR/AW "MERLIN" | ACSR/AW "PENGUIN" | ACSR/AW "QUAL" |
|---|--|--------------|--------------------|---------------------|---------------------|----------------------|-------------------|
| Conductor Size | kcml | 1080.6 | 795 | 336.4 | 336.4 | 211.6 | 133.1 |
| | Nominal Aluminum Area (mm ²) | 548 | 402.8 | 170.4 | 170.4 | 107.2 | 67.4 |
| | Actual Cross-Section (mm ²) | 547.55 | 468 | 210.3 | 179.7 | 125.1 | 78.55 |
| Stranding (Nos./mm) | Aluminum | 18/ 4.341 | 26/ 4.44 | 30/ 2.69 | 18/ 3.47 | 6/ 4.77 | 6/ 3.78 |
| | Aluminum Alloy or Aluminum-Clad Steel | 19/ 4.341 | 7/ 3.45 | 7/ 2.69 | 1/ 3.47 | 1/ 4.77 | 1/ 3.78 |
| Nominal Overall Diameter(mm) | | 30.38 | 28.13 | 18.83 | 17.36 | 14.31 | 11.35 |
| Rated Strength (UTS) (kN) | | 121 | 135.66 | 74 | 38 | 34.2 | 22.82 |
| Calculated DC Resistance at 20°C (Ω / km) Maximum | | 0.0577 | 0.0693 | 0.1606 | 0.1688 | 0.258 | 0.409 |
| Nominal Conductor Mass (kg/km) | | 1506 | 1550 | 736.8 | 532.2 | 411.9 | 258.9 |
| *Ampacity(A) | | 810 | 820 | 480 | 460 | 350 | 260 |

* -Conductor Ampacity is a typical value and is based on conductor temperature 85°C (ACAR) and 93°C (ACSR/AW), ambient temperature 50 °C, 0.61 m/sec wind, 1100 Watts/m2 sun, 0.5 coefficients of emissivity and absorption.

Ilustración 49-Datos línea alta tensión

Para modelar la línea de alta tensión ha sido necesario crear en DIgSILENT un elemento llamado torre. La ilustración 50 muestran el modelado de la línea de alta tensión según las características comentadas anteriormente.



Name:

Rated Voltage: kV

Rated Current: kA

Number of Subconductors:

Conductor Model

Solid Conductor

Tubular Conductor

(Sub-)Conductor

DC-Resistance (20°C): Ohm/km

GMR (Equivalent Radius): mm

Outer Diameter: mm

OK

Cancel

Basic Data | Overhead Line Configuration | Compensation | Advanced

Name:

Type:

Terminal i:

Terminal j:

Zone:

Area:

Out of Service

Number of parallel Lines:

Parameters

Thermal Rating:

Meteo. Station:

Length of Line: km

Derating Factor:

Resulting Values

| | |
|----------------------------|---------------|
| Nominal Current (act.) | 1,62 kA |
| Pos. Seq. Impedance, Z1 | 1,476361 Ohm |
| Pos. Seq. Impedance, Angle | 82,10191 deg |
| Pos. Seq. Resistance, R1 | 0,202869 Ohm |
| Pos. Seq. Reactance, X1 | 1,462356 Ohm |
| Zero Seq. Resistance, R0 | 1,179885 Ohm |
| Zero Seq. Reactance, X0 | 7,57329 Ohm |
| Earth-Fault Current, Ice | 3,34591 A |
| Earth Factor, Magnitude | 1,397252 |
| Earth Factor, Angle | -1,185482 deg |

Ilustración 50-Modelo DIGSILENT línea alta tensión

4.6 Potencia de cortocircuito

El último dato por modelar será el cortocircuito inyectado por la red saudita. La información que se nos proporciona es la siguiente:

- Para cada bus (con su nombre asociado), nos dicen la máxima intensidad de cortocircuito para faltas trifásicas y monofásicas, con su ratio X/R trifásico y monofásico.

Esta información la obtenemos para el máximo y mínimo cortocircuito. Esto se muestra en la ilustración 51.

Maximum fault levels for Al-Khushaybi Solar PV Power Plant:

| Bus Number | Bus Name | Circuit Breaker Rating sym (kA) | I _{sym} 3ph (kA) | I _{sym} 1ph (kA) | 3Ph X/R | 1Ph X/R |
|------------|----------------------------|---------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------|---------|
| 19074 | AL-KHUSHAIYBI 380 kV GIS | 63.00 | 21.02 | 17.34 | 18.36 | 11.14 |
| 11974 | AL-KHUSHAIYBI 132 kV GIS-1 | 40.00 | 23.33 | 22.43 | 29.62 | 18.63 |
| 12974 | AL-KHUSHAIYBI 132 kV GIS-2 | 40.00 | 17.85 | 17.78 | 32.56 | 21.56 |

Minimum fault levels for Al-Khushaybi Solar PV Power Plant:

| Bus Number | Bus Name | Circuit Breaker Rating sym (kA) | I _{sym} 3ph (kA) | I _{sym} 1ph (kA) | 3Ph X/R | 1Ph X/R |
|------------|----------------------------|---------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------|---------|
| 19074 | AL-KHUSHAIYBI 380 kV GIS | 63.00 | 15.86 | 13.97 | 19.59 | 11.46 |
| 11974 | AL-KHUSHAIYBI 132 kV GIS-1 | 40.00 | 19.66 | 18.19 | 29.58 | 19.40 |
| 12974 | AL-KHUSHAIYBI 132 kV GIS-2 | 40.00 | 15.30 | 14.40 | 32.34 | 22.48 |

Maximum and minimum short circuit are based on the following assumptions:

- Maximum case is assumed on a Pre-fault voltage of 1.1 p.u.
- Minimum case is assumed on a Pre-fault voltage of 1. p.u
- These values may change with the rapidly change in the network topology and integration of new generating capacities to the network. Hence for the calculation purpose, Bidder shall assume the allowable breaker capabilities as indicated as in the above table.

These Maximum and minimum short circuits results are based only on Grid side contribution at the Connection Point , without contribution of renewable power plants.

Ilustración 51-Dato potencia cortocircuito

A la hora de modelarlo en DIgSILENT , solo nos interesa la máxima intensidad de cortocircuito para falta trifásica con su ratio X/R asociado. Nuestro bus a modelar será el 11974. El modelo en DIgSILENT ,como se muestra en la ilustración 52, queda de la siguiente forma:

External Grid - SLD\External Grid.ElmXnet

| Basic Data | Max. Values |
|--------------------------|--|
| Description | Short-Circuit Power Sk''max 5333,955 MVA |
| Load Flow | Short-Circuit Current Ik''max 23,33 kA |
| Short-Circuit VDE/IEC | X/R Ratio (max.) 29,62 |
| Short-Circuit Complete | Impedance Ratio |
| Short-Circuit ANSI | Z2/Z1 max. 1, |
| Short-Circuit IEC 61363 | X0/X1 max. 0,194 |
| Short-Circuit DC | R0/X0 max. 0,0187 |
| Quasi-Dynamic Simulation | |

Ilustración 52-Modelo DIgSILENT potencia cortocircuito

Al introducir estos datos en DIGSILENT, ya está la planta completamente modelada y lista para realizarles los estudios eléctricos. Para terminar con el capítulo, se muestra cómo queda la planta fotovoltaica previo a cualquier estudio eléctrico en el anexo 1.

En este anexo aparece un diagrama unifilar de la planta fotovoltaica con todo lo descrito anteriormente. Además, se puede observar cómo hay transformadores de alta tensión que van a estar más cargados que otros. Esto es debido a que hay loops de 3 tramos, y de 4 tramos. El reparto para cada transformador se muestra en la tabla 4:

Tabla 4-Reparto de los loops entre los transformadores de alta tensión

| | Nº loops de 3 tramos | Nº loops de 4 tramos |
|-----------------|----------------------|----------------------|
| Transformador 1 | 7 | 3 |
| Transformador 2 | 7 | 3 |
| Transformador 3 | 10 | 0 |
| Transformador 4 | 10 | 0 |
| Transformador 5 | 10 | 0 |
| Transformador 6 | 10 | 0 |
| Transformador 7 | 7 | 3 |
| Transformador 8 | 7 | 3 |

5 CASOS DE ESTUDIO

Una vez que la planta ya está completamente dimensionada y modelada, el siguiente paso será explicar la normativa que vamos a aplicar a la hora de realizar nuestros estudios eléctricos. Posteriormente, se realizarán el estudio de cortocircuito y flujo de carga mostrando los resultados obtenidos.

5.1 Normativa aplicable

Una vez que tenemos la planta diseñada y preparada para realizarle los estudios eléctricos, es conveniente explicar la normativa que vamos a seguir para cada estudio. Recordar que realizaremos un estudio de cortocircuito, y posteriormente un estudio de flujo de carga.

Comenzando con el estudio de cortocircuito, la norma a aplicar será la IEC 60909. En nuestro caso, solo vamos a realizarle el estudio de cortocircuito máximo, correspondiendo con el cortocircuito trifásico.

Según la IEC 60909, para el máximo cortocircuito trifásico se tiene en cuenta:

- Tensión factor c: 1.1 tensión p.u. para todas las barras colectoras.
- Temperatura mínima de funcionamiento para las resistencias de los cables: 20 °C.
- El mayor número esperado de máquinas rotativas conectadas.

El cálculo de la corriente de cortocircuito pico se ha realizado según el método c (frecuencia equivalente f_c) indicado en el apartado 4.3.1.2 de la norma IEC 60909-0.

Como resultado de los cálculos, se definen los siguientes parámetros según la norma IEC 60909:

- $I''k$: corriente de cortocircuito simétrica inicial
- i_p : corriente máxima de cortocircuito, calculada según el método C de la corriente simétrica de cortocircuito inicial IEC 60909:

$$i_p = (1,02 + 0,98 * e^{-3*RX}) * \sqrt{2} * I''k$$

- $i_{d.c}$: componente CC de la corriente de cortocircuito:

$$i_{dc} = \sqrt{2} * I''_k * e^{-2 * \pi * t * RX}$$

- A: valor inicial de la componente id.c.
 - $A = \sqrt{2} * I''_k$
- Ib: corriente simétrica de corte en cortocircuito

$$I_b = \mu t_{min} * I''_k$$

- tmin: el tiempo más corto entre el comienzo de la corriente de cortocircuito y el primer contacto de separación de un polo del dispositivo de conmutación
- Ik: corriente de cortocircuito permanente

La ilustración 53, 54 y 55 muestran la forma de onda de una corriente de cortocircuito:

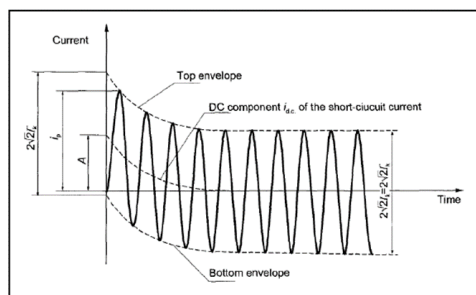


Ilustración 53- Corriente de cortocircuito de una falla alejada del generador con componente constante c.a. (representación esquemática)

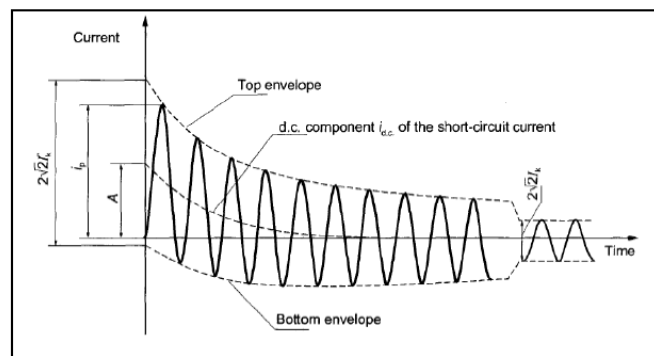


Ilustración 54- Corriente de cortocircuito de una falla de un cuasi-generador con componente de decaimiento c.a.

| Component | Explanation |
|------------|---|
| I''_k | Initial or subtransient symmetrical short-circuit current |
| I'_k | Transient short-circuit current |
| I_k | Steady-state short-circuit current |
| i_p | Peak short-circuit current |
| $i_{d.c.}$ | Decaying Direct Current (DC) component |
| A | Initial value of the DC component |

Ilustración 55- Explicación de cada intensidad

En cambio, para el estudio de flujo de carga, volvemos a la curva PQ del código de red de Arabia Saudí. Básicamente, el código de red exige que puedas proporcionar potencia reactiva, ya sea inductiva o capacitiva, dependiendo de la potencia activa que esté dando tu planta en cada momento.

En este caso, también hace una distinción entre SGU (Synchronous generation unit) y PPM (Power Park Module).

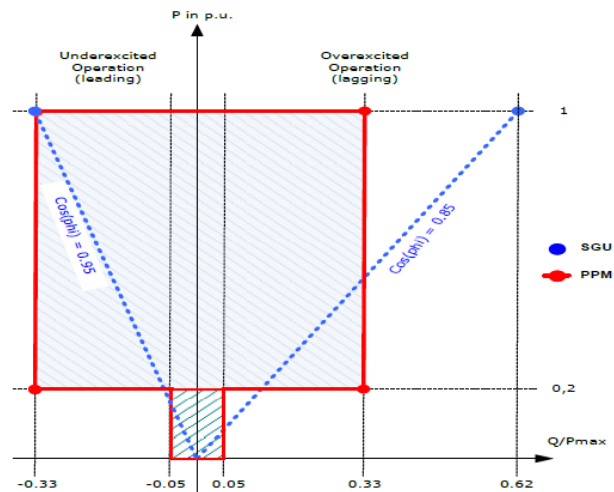


Ilustración 56- Diagrama PQ

Como se puede observar en la ilustración 56, para parques de energía renovable, exigen una $Q = \pm 0,33P$ (inductiva o capacitiva) hasta una potencia activa de $0,2P_{POI}$. Para potencias menores de $0,2P_{POI}$, exigen una $Q = \pm 0,05P$ (inductiva o capacitiva)

5.2 Estudio de cortocircuito

En el punto anterior se ha explicado que para el estudio de cortocircuito se aplicará la norma IEC-60909. Para el cálculo de máximo cortocircuito, todos los inversores aportan el valor de corriente aportado por el fabricante, en nuestro caso Sungrow.

Los valores de corriente de cortocircuito calculados se utilizan para:

- Comprobar los valores de cortocircuito en los embarrados, buses y transformadores.
- Comprobar la resistencia de los componentes del sistema a las tensiones mecánicas y térmicas.
- Entrada al estudio de coordinación de protecciones.

Para nuestro estudio, nos encontramos una restricción la cual es que en el embarrado de media tensión no debemos superar los 25 kA. Esto viene especificado en el diagrama unifilar del proyecto.

Por tanto, tendremos que comprobar que esta restricción se cumple para el máximo cortocircuito trifásico y para el caso con el transformador desconectado. En caso de que no se cumpla, será necesario modelar de nuevo el transformador de la subestación aumentando la impedancia de cortocircuito.

También sabemos que la máxima intensidad para un cortocircuito trifásico se encuentra en el último tramo que tenga menor longitud. Para nuestro proyecto será el tramo de 300m.

Se realizarán los cortocircuitos trifásicos en DIGSILENT Power Factory 2023 en las condiciones que se muestran en la ilustración 57:

Ilustración 57- Condiciones DIGSILENT a la hora de realizar un cortocircuito

5.2.1 Cortocircuito

Tras realizar la simulación, los resultados obtenidos son mostrados en la ilustración 58:

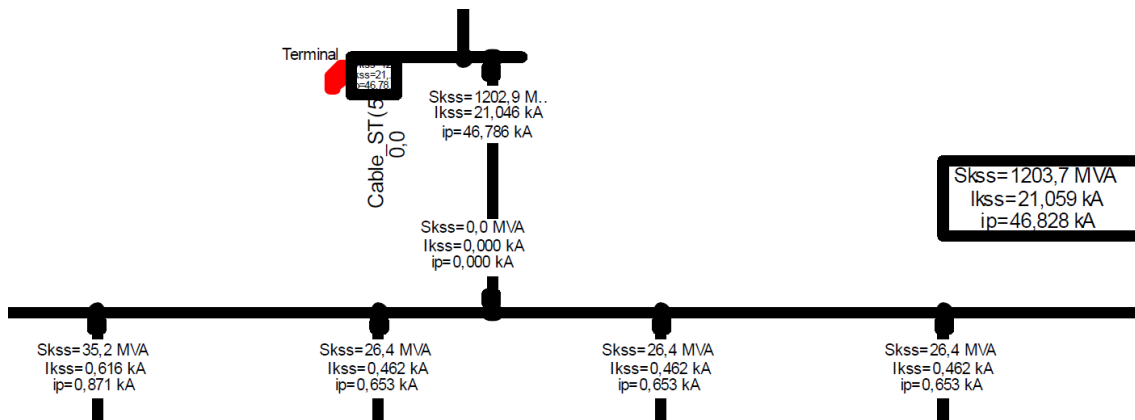


Ilustración 58-Resultado cortocircuito trifásico

Como podemos comprobar, el resultado es aceptable ya que en el tramo más desfavorable (menor longitud) no superamos los 25 kA restringidos. Por tanto, no será necesario remodelar los transformadores de la subestación. El siguiente paso será analizar el máximo cortocircuito con un transformador desconectado.

Para observar resultados más detallados, se puede acudir al anexo 2.

5.2.2 Transformador desconectado

Tras realizar la simulación, los resultados obtenidos son mostrados en la ilustración 59:

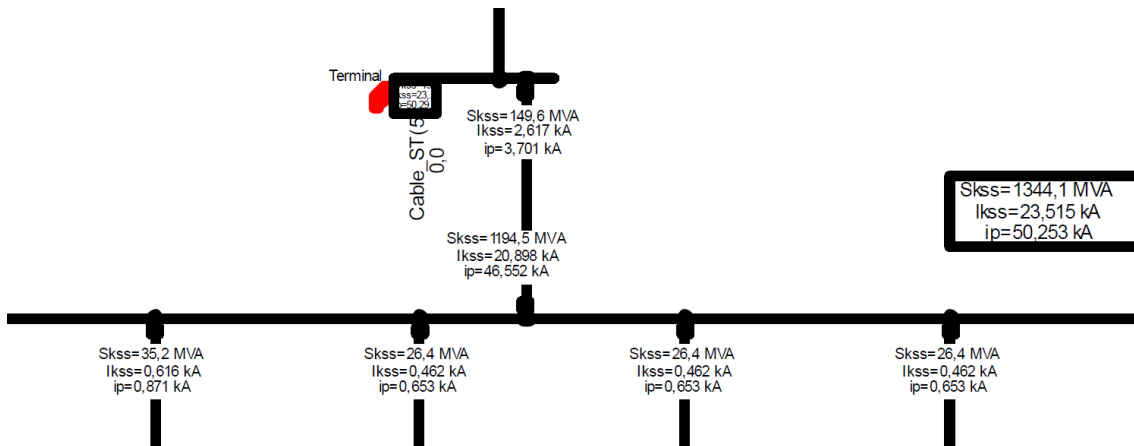


Ilustración 59-Resultado cortocircuito con transformador desconectado

Como podemos comprobar, el resultado es aceptable ya que en el tramo más desfavorable (menor longitud) no superamos los 25 kA restringidos. Por tanto, no será necesario remodelar los transformadores de la subestación.

Para observar resultados más detallados, se puede acudir al anexo 3.

5.3 Estudio de flujos de carga

Como hemos visto en el punto 5.1, la normativa a aplicar será el SAGC (Saudi Arabian Grid Code), concretamente la curva P-Q ilustrada anteriormente.

La planta fotovoltaica será la encargada de controlar la producción o consumo de energía reactiva para el factor de potencia del SAGC ($\cos(\phi)=0,95$). En caso de que no haya potencia reactiva suficiente para abastecer el cumplimiento del SAGC, tendremos que tener en cuenta elementos de compensación de potencia reactiva como SVG o bancos de condensadores.

Añadir también que se analizarán los flujos de carga teniendo en cuenta siempre la situación más desfavorable. Esta situación se da cuando la tensión en el punto de interconexión es de **0,95 p.u.**

Las condiciones a cumplir aparecen en la tabla 5 y serán las siguientes:

Tabla 5-Requirimientos potencia activa y reactiva en el POI

| Caso | P_POI (MW) | Q (Mvar) |
|------------|------------|----------|
| Inductivo | 1500 | -495 |
| Capacitivo | 1500 | 495 |

Para modelar estos casos en DIGSILENT será necesario acudir al control potencia- frecuencia y a la estación de control. El control potencia frecuencia de los inversores nos hará llegar hasta los 1500 MW requeridos en el POI, y la estación de control con los inversores nos controlará la potencia reactiva requerida para el cumplimiento del código de red.

En la ilustración 60 se muestra cómo se modelan el control potencia-frecuencia y la estación de control en DIGSILENT:

Control Mode: Power-Frequency Control

Busbar for Frequency Measurement: [v] [→]

Active Power Exchange

Exchange for: Boundary [v] [→] PIF4

Power Setpoint: 1500. MW

Frequency Bias: 0. MW/Hz

Active Power Distribution

According to Rated Power

Individual Active Power

According to Dispatched Active Power

According to Merit Order

| | Machines ElmSym,ElmGensta... | Active Power Percentage % |
|---|---------------------------------|------------------------------|
| 1 | ✓ INV_B01 | 0.1984127 |
| 2 | ✓ INV_B01(1) | 0.1984127 |
| 3 | ✓ INV_B01(10) | 0.1984127 |
| 4 | ✓ INV_B01(11) | 0.1984127 |
| 5 | ✓ INV_B01(13) | 0.1984127 |
| 6 | ✓ INV_B01(15) | 0.1984127 |
| 7 | ✓ INV_B01(17) | 0.1984127 |

Name: Station Control

Out of Service

| | Machines ElmSym,ElmGenstat,ElmPvsys,ElmSvs,ElmAsm,ElmVsc*,ElmX... | Connected |
|---|--|-------------------------------------|
| 1 | ✓ INV_B01 | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 2 | ✓ INV_B01(1) | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 3 | ✓ INV_B01(10) | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 4 | ✓ INV_B01(11) | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 5 | ✓ INV_B01(13) | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 6 | ✓ INV_B01(15) | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 7 | ✓ INV_B01(17) | <input checked="" type="checkbox"/> |

General | Distribution

Control Mode: Reactive Power Control | Q-Control: Const. Q

Control Q at: [v] [→] PIF4

Q Setpoint: 495. Mvar | Orientation: +Q

OK | Cancel | Info

Ilustración 60-Modelo potencia frecuencia y estación de control en DIGSILENT

Las condiciones a la cual se realizará este estudio en DlgSILENT Power Factory 2023 se muestran en la ilustración 61:

Ilustración 61-Condicionas flujo de carga en DlgSILENT

Como se puede ver en la imagen anterior, para el cálculo del flujo de carga tendremos en cuenta el paso de los transformadores y los límites de potencia activa y reactiva. Además, el flujo de carga se realiza a la temperatura de operación de los cables.

5.3.1 Inductivo

Antes de realizar la simulación, me gustaría mencionar que una planta fotovoltaica, por norma general, suele ser inductiva. Por tanto, no genera mucho problema a la hora del cumplimiento del código de red.

Los resultados obtenidos aparecen en la ilustración 62:

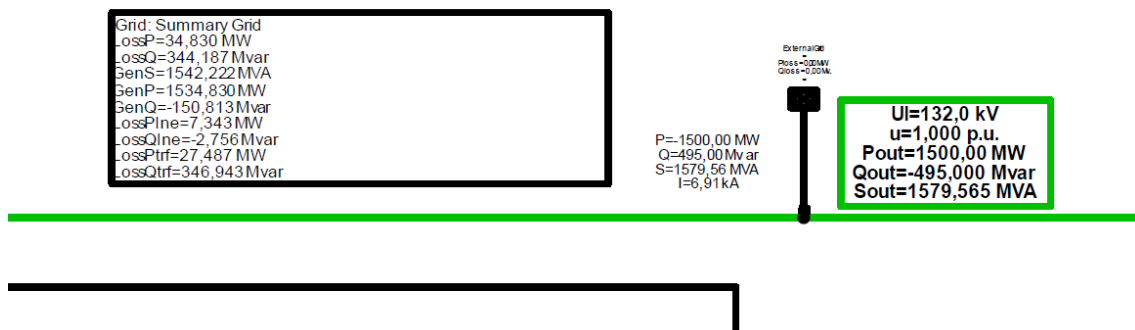


Ilustración 62-Resultado caso inductivo

Para ver cuanto están generando los inversores y la carga de los transformadores, debemos acudir al Anexo 4.

5.3.2 Capacitivo

En cambio, una planta fotovoltaica suele tener más problemas para el cumplimiento del código de red en el lado capacitivo debido a su naturaleza inductiva.

Los resultados aparecen en la ilustración 63:

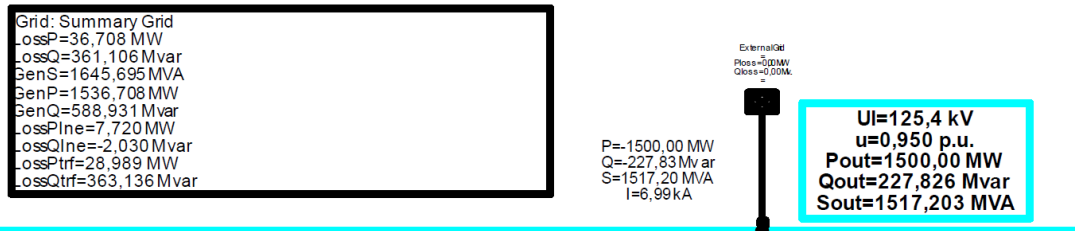


Ilustración 63-Resultado caso capacitivo

Como era de esperar, y más en una planta tan grande, no llegamos a la potencia reactiva capacitiva que nos exige el código de red, 495 Mvar. Por tanto, como ha sido comentado anteriormente, será necesario añadir elementos de compensación. Se puede observar cómo aproximadamente nos falta unos 270 Mvar.

Para ver cuanto están generando los inversores y la carga de los transformadores, debemos acudir al Anexo 5.

5.3.3 Capacitivo con compensación

En el caso anterior se ha demostrado la naturaleza inductiva de una planta fotovoltaica, y más de gran escala. Esto también se podría solucionar aumentando el número de inversores, pero nosotros vamos a añadir elementos de compensación de potencia reactiva, más concretamente 22 Mvar en cada embarrado de media tensión, lo que suma un total de 352 Mvar de bancos de condensadores.

Los resultados aparecen en la ilustración 64:

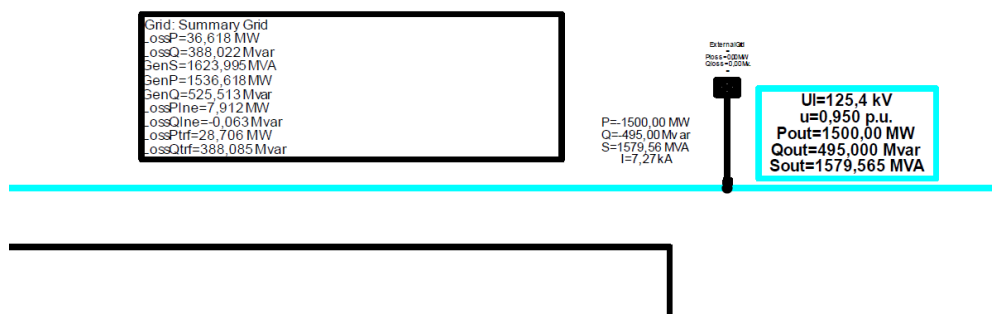


Ilustración 64-Resultado caso capacitivo con compensación

Lógicamente, al añadir 352 Mvar de bancos de condensadores ya cumplimos con la restricción impuesta por el código de red de Arabia Saudí.

Para ver cuanto están generando los inversores y la carga de los transformadores, debemos acudir al Anexo 6.

5.3.4 Capacitivo con compensación (Qmax)

Por último, aunque ya sabemos que cumplimos la restricción impuesta por el código de red de Arabia Saudí gracias a los elementos de compensación de potencia reactiva añadidos, es importante también saber que margen de seguridad tenemos ante algún posible fallo o situación anómala.

Los resultados aparecen en la ilustración 65:

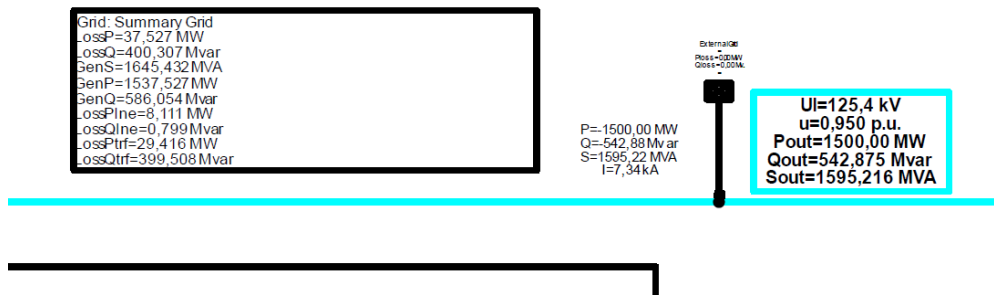


Ilustración 65-Resultado caso máximo capacitivo con compensación

Gracias a este caso de estudio, ya sabemos que la máxima potencia reactiva capacitiva es de aproximadamente 542 Mvar. Por tanto, tenemos un margen de seguridad de un 9,5% respecto a la potencia reactiva capacitiva demandada (495 Mvar).

Para ver cuanto están generando los inversores y la carga de los transformadores, debemos acudir al Anexo 7.

Para terminar, se muestra la curva P-Q de la planta fotovoltaica estudiada respecto a la restricción de dimensionamiento del código de red de Arabia Saudí gracias al script de DIgSILENT Power Factory. En la aparecen en la ilustración 66 se puede observar los márgenes capacitivos e inductivos de dicha planta estudiada.

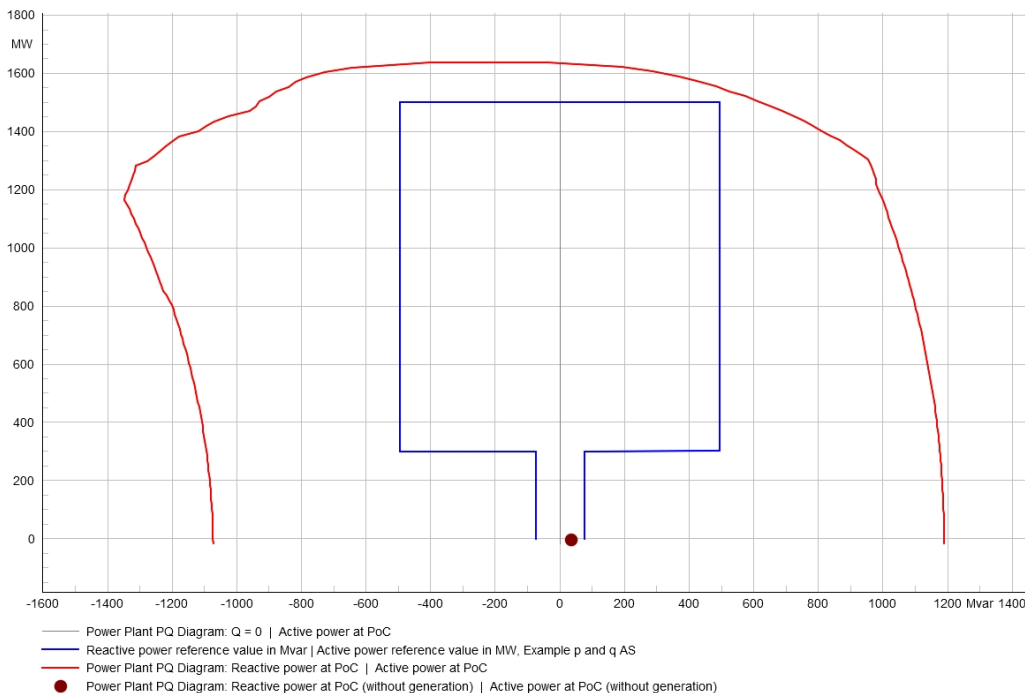


Ilustración 66- Curva PQ planta fotovoltaica

Dicha curva, se obtiene a través del script proporcionado por DIGSILENT, el cual recorre cientos de flujos de carga (para una mayor o menor exactitud, se define el número de flujos de carga que recorrerá el script) y verificando cuál es la capacidad máxima que podría entregar la planta fotovoltaica tanto de potencia activa como de reactiva. A continuación, se muestra en la ilustración 67 el script usado para este estudio:

Name: Power Plant PQ Diagram

General Selection: →

Input parameters:

| | Type | Name | Value | Unit | Description |
|---|--------|------------|-------|-------|--|
| 1 | double | Pn | 1500 | MW | Reference active power |
| 2 | int | iOpRange | 0 | 0/1/2 | Operating range: 0 = generation, 1 = consumption (storage) |
| 3 | double | pstart | 0 | p.u. | Start value for active power sweep |
| 4 | int | steps | 100 | | Number of calculation points (pstart to pend) |
| 5 | int | ExcludeP | 0 | 0/1 | Exclude generators from NoP_scaling set from power sca |
| 6 | double | u_max_prot | 1.15 | p.u. | Max. allowed pos. seq. voltage at LV terminals (for warnin |
| 7 | double | u_min_prot | 0.85 | p.u. | Min. allowed pos. seq. voltage at LV terminals (for warnin |
| 8 | int | iParkCtrl | 0 | 0/1 | 1 = Park controller active; 0 = local setpoints |
| 9 | int | ShntCtrl | 1 | 0/1 | 1 = Switch shunt on and off automatically |

External Objects:

| | Name | object | |
|---|-------------|--------------------|---|
| 1 | Park | PIF4(1) | Feeder / Boundary at PoC (orientation into power plant) |
| 2 | ParkCtrl | Station Control | Park Controller (ElmStactrl) |
| 3 | Shunt | ShuntSet | Additional shunt (capacitor bank or reactor or set) |
| 4 | Requirement | Example p and q AS | Table(s) with reference PQ curve(s) (multiple selection possible) |
| 5 | NoP_scaling | | Generators to exclude from P-scaling (single generator or set) |

Ilustración 67-Script DIGSILENT para sacar la curva PQ

Como se puede ver en la ilustración 67, para este caso se ha usado el script con 100 pasos (o lo que es lo mismo 100 flujos de cargas), y en dicho script, además, también se deben definir la potencia activa máxima a entregar en el POI o los requisitos del Código de Red correspondiente, así como los límites de subtensión y sobretensión que pueden aguantar los inversores fotovoltaicos. También aparecen en la imagen superior el punto de conexión definido (PIF4(1)), el código de red de Arabia Saudí y los elementos de compensación (condensadores).

6 CONCLUSIONES

En este documento el objetivo era realizarle estudios eléctricos estáticos a una planta fotovoltaica de gran escala. En mi caso, hemos escogido una de las más grandes del mundo que se están construyendo en Arabia Saudí gracias a PIF (fondos de inversión pública).

Estos estudios eléctricos han sido realizados en un potente programa como DIGSILENT Power Factory 2023 con el cual nos hemos ido familiarizando poco a poco en situaciones como:

- Cómo introducir datos de un inversor
- Cómo introducir datos de un transformador
- Cómo introducir datos de líneas de media y alta tensión
- Cómo introducir los controles de potencia activa y reactiva

Con todo lo aprendido, el objetivo final era realizar un estudio de cortocircuito con los requerimientos impuestos por el cliente (no se debe superar los 25kA en el embarrado de media tensión) y un estudio de flujo de carga cumpliendo el código de red de Arabia Saudí.

Estos estudios estáticos son fundamentales para el desarrollo de una planta fotovoltaica, y sirven para diseñar los equipos fundamentales de la planta fotovoltaica. Normalmente, el elemento a diseñar por el usuario suele ser el transformador principal de la subestación ya que los cables, power stations e inversores están acotados y limitados. No existe una gran variedad de opciones para plantas de gran tamaño.

Por tanto, el único elemento a diseñar una vez que están decididos los otros elementos es el transformador de alta tensión. Este afecta directamente al dimensionamiento y al cortocircuito. Un ejemplo es el siguiente:

Cuando tenemos una intensidad de cortocircuito muy elevada y queremos bajarla, lo primero que debemos realizar es subir las impedancias de cortocircuito del transformador hasta llegar a una intensidad de cortocircuito deseada. Ese incremento de impedancia de cortocircuito afecta directamente a la planta fotovoltaica, convirtiéndola en una planta más inductiva aún. Por tanto, como

consecuencia de ese incremento, es necesario más compensación de potencia reactiva para cumplir el código de red del país.

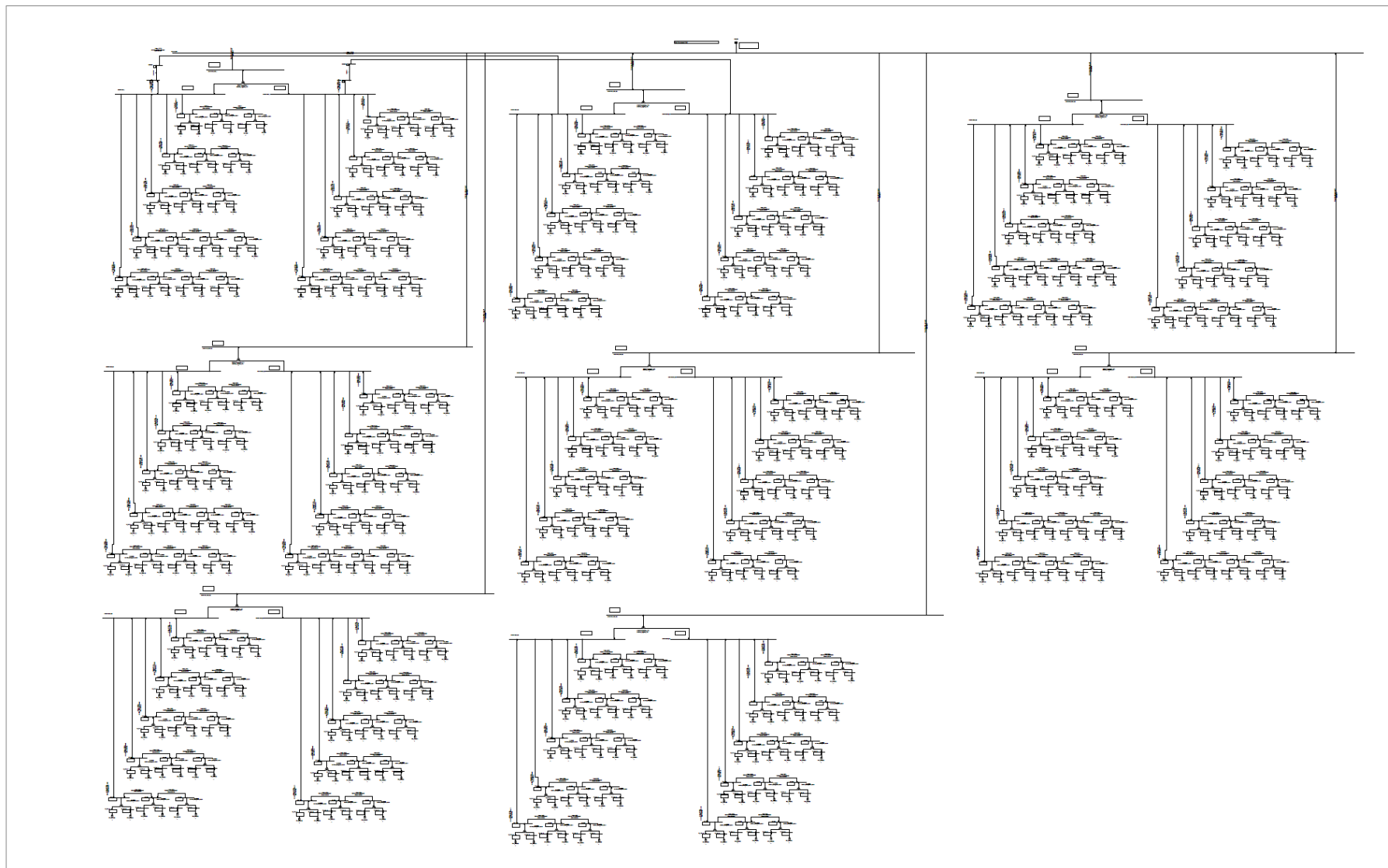
Para finalizar, en este trabajo se ha podido ver la importancia que tiene el realizar unos buenos estudios eléctricos, y el cómo afectan a una planta fotovoltaica. También se ha trabajado con un código de red de Arabia Saudí que es poco conocido, pero como hemos visto, se planea que puede ser un país líder en el sector de generación renovable. Por último, también hemos aprendido a utilizar un programa potente, eficaz y con miles de usos como DIgSILENT. A pesar de todo, no podemos olvidar, que también serían necesarios realizar otros estudios eléctricos como los armónicos o el estudio de arco eléctrico que pueden afectar al diseño de nuestra planta.

REFERENCIAS

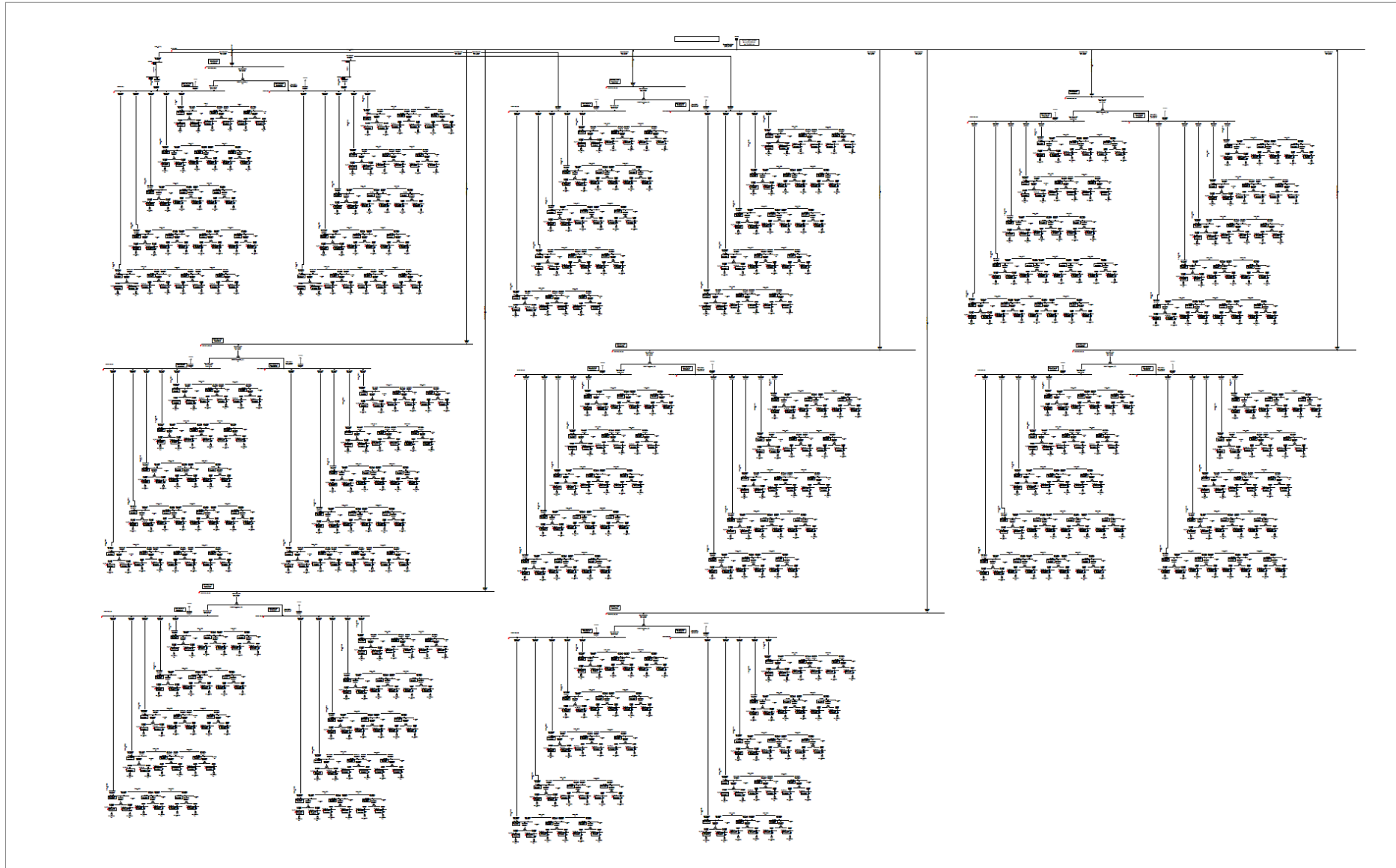
- [1] J. C. Galdos, «Linkedin,» [En línea].
- [2] A. F. Barrero, «Renewable energy magazine,» [En línea]. Available: Estos son los diez gráficos que muestran el boom que la energía solar está experimentando en todo el mundo (energias-renovables.com).
- [3] A. M. Pinto, «Estado del arte de estrategias de plantas fotovoltaicas de gran escala,» Valparaíso.
- [4] J. A. Alonso, «Radiación, geometría, recorrido óptico, irradiancia,» Marzo 2023.
- [5] E. d. l. energía, «Energú education, célula fotovoltaica,» [En línea]. Available: https://energyeducation.ca/Enciclopedia_de_Energia/index.php/C%C3%A9lula_fotovoltaica.
- [6] «Aplimetal,» [En línea]. Available: <https://aplimetal.es/estructura-serie-mia/>.
- [7] Endesa, «Endesa, seguidores solares,» [En línea]. Available: <https://www.endesa.com/es/lacara-e/energias-renovables/seguidores-solares>.
- [8] M. A. R. Pozueta, «Transformadores,» Universidad de Cantabria.
- [9] N. Chile, «Sistemas de Almacenamiento de energía en plantas fotovoltaicas en Chile».
- [10] G. Elektra, «Grupo Elektra,» [En línea]. Available: <https://www.grupoelektra.es/es/blog/nota-tecnica-curva-caracteristica-v>.
- [11] S. d. a. d. e. s. FV, «Prosumidores».
- [12] A. E. C. Algarín, «Estudios Eléctricos Estáticos de una Planta Fotovoltaica,» Sevilla, 2021.
- [13] C. Hentong, «Medium Voltage Solar cable».
- [14] Sungrow, «SG1100UD-20 Datasheet».
- [15] S. A. Electricity, «Saudi Arabian Grid code,» 2022.

ANEXOS

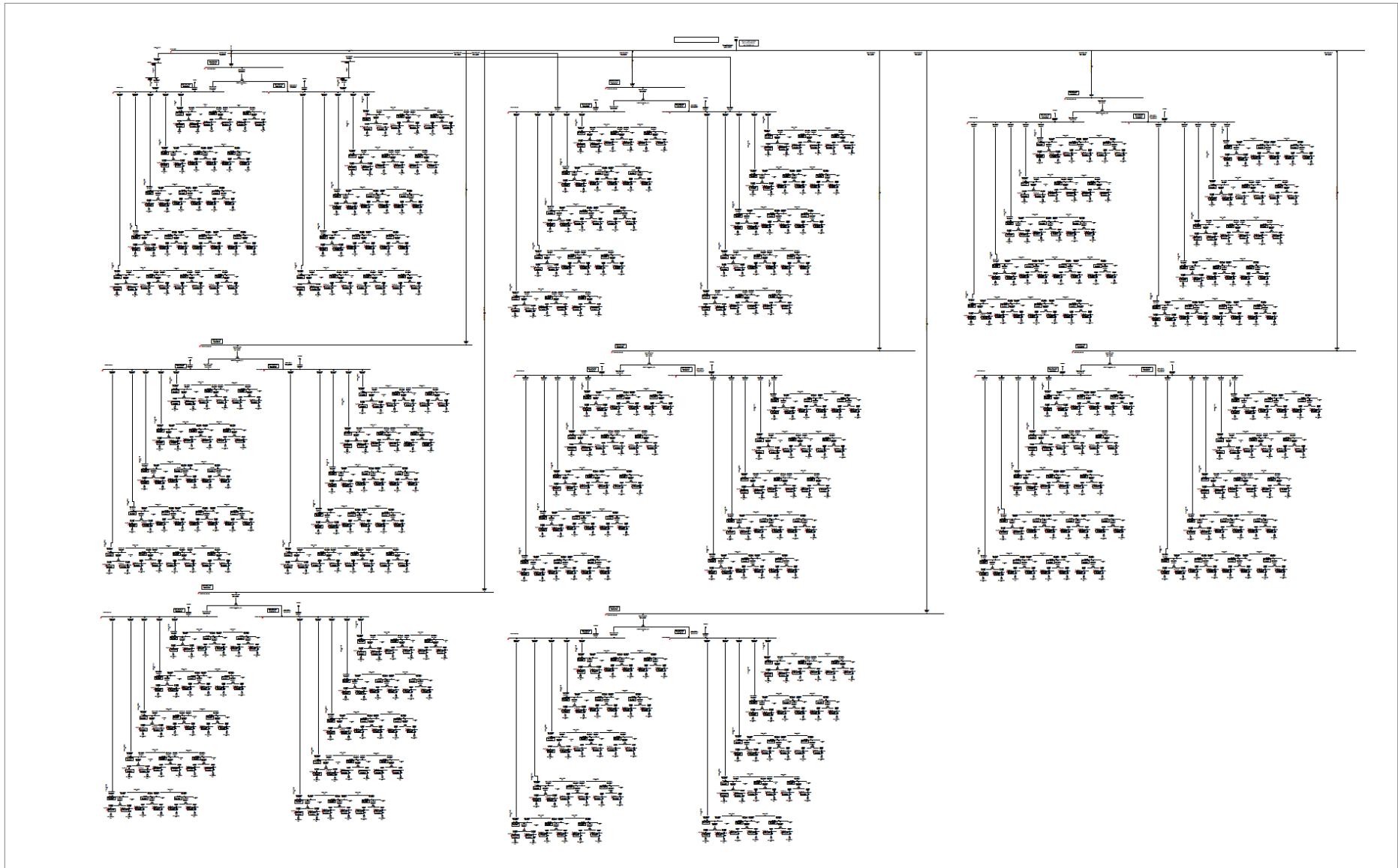
ANEXO 1: DIAGRAMA UNIFILAR PLANTA FOTOVOLTAICA



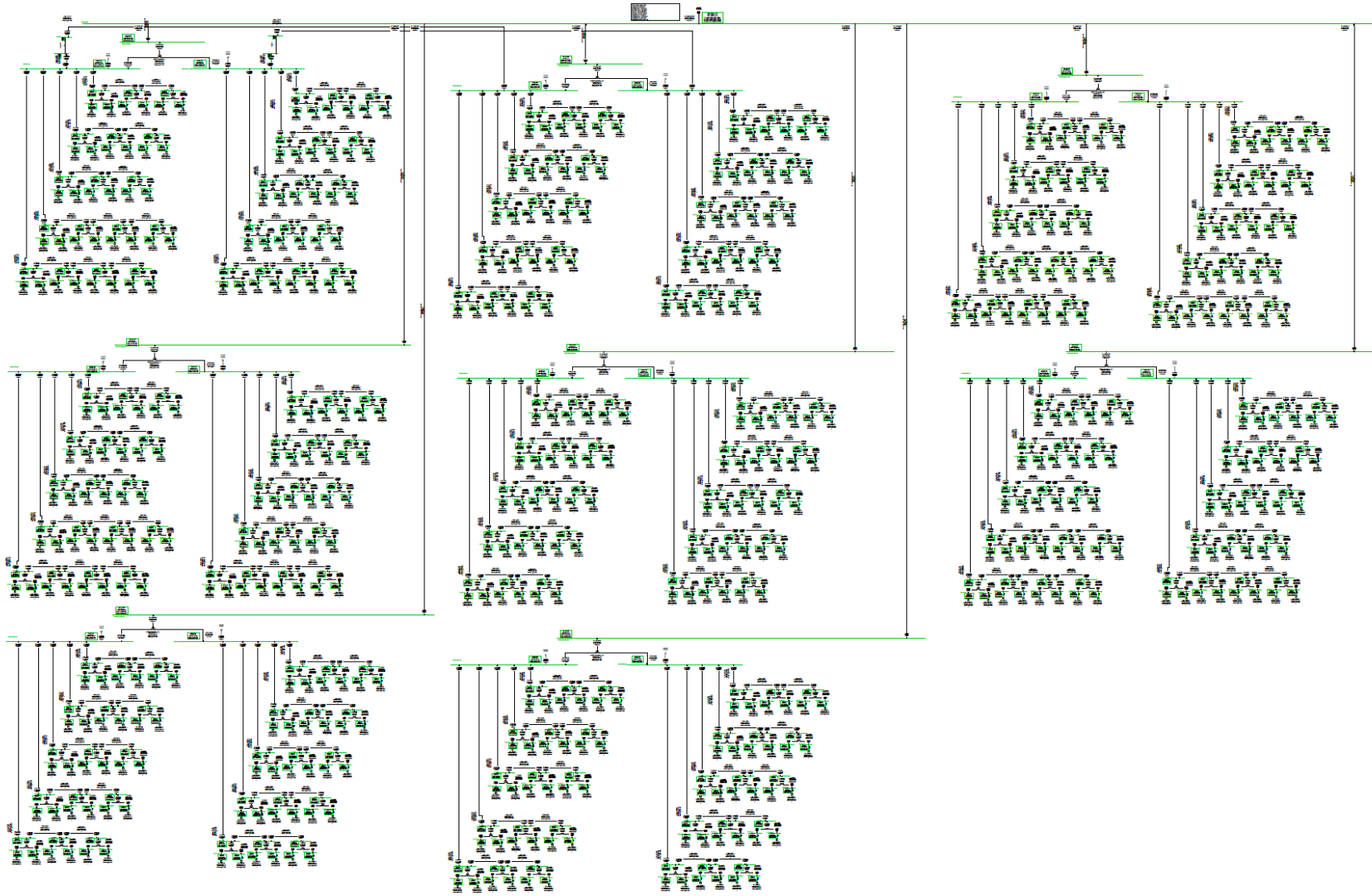
ANEXO 2: CORTOCIRCUITO TRIFÁSICO



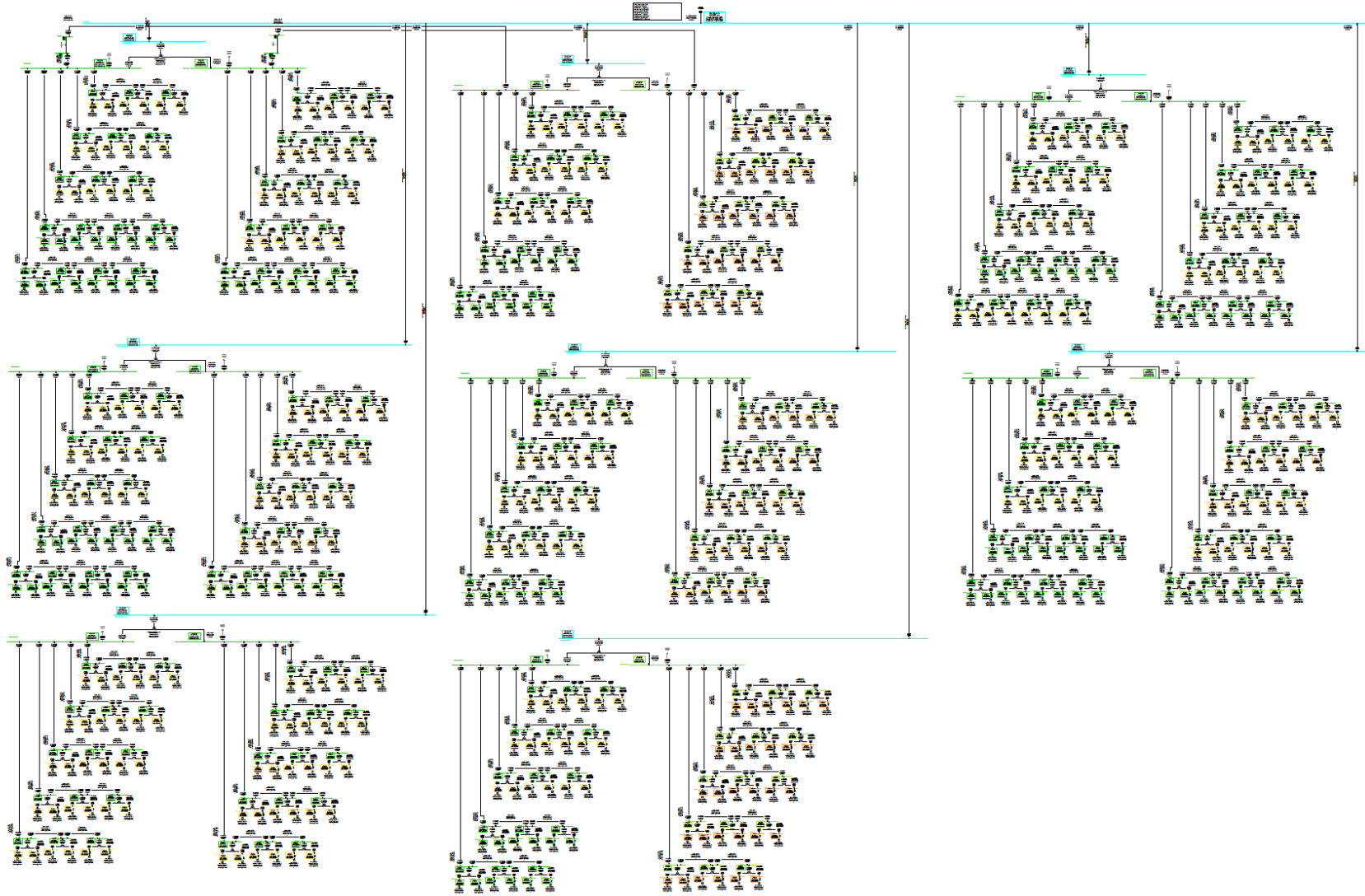
ANEXO 3: CORTOCIRCUITO TRIFÁSICO CON TRAFO DESCONECTADO



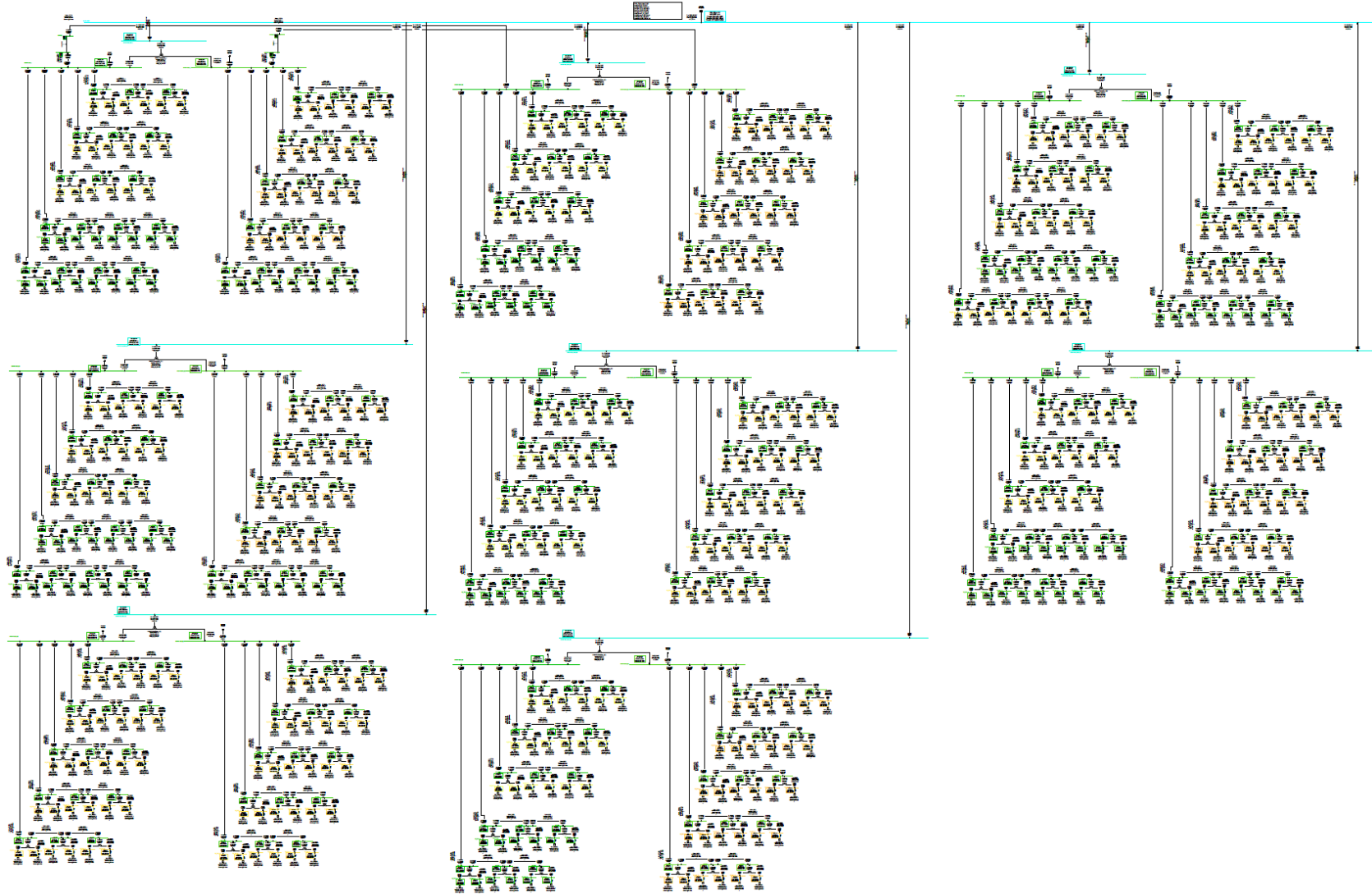
ANEXO 4: CASO INDUCTIVO



ANEXO 5: CASO CAPACITIVO



ANEXO 6: CASO CAPACITIVO CON COMPENSACIÓN



ANEXO 7: CASO CAPACITIVO MÁXIMO CON COMPENSACIÓN

