

	PLANTA SOLAR FOTOVOLTAICA	FECHA: 30 - 07 - 2021
	HOTEL ESTELAR 201,15 kWp	Rev. No: 0



# ESTUDIO DE CONEXIÓN SIMPLIFICADO

## PLANTA SOLAR FOTOVOLTAICA 201,15 kWp HOTEL ESTELAR CALI

Presenta: RGS CONSULTORES S.A.S.

Fecha: 30 de julio de 2021

Revisión	Elaborado por:	Revisado por:	Aprobado por:	Fecha
0	AFHS	JARA	JARA	30/07/2021

	PLANTA SOLAR FOTOVOLTAICA	FECHA: 30 - 07 - 2021
	HOTEL ESTELAR 201,15 kWp	Rev. No: 0

# Contenido

RESUMEN .....	6
1. ALCANCE .....	6
2. OBJETIVOS .....	7
3. INFORMACIÓN.....	7
3.1. INFORMACIÓN GENERAL DEL PROYECTO.....	7
3.2. INFORMACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	9
3.2.1. Planta de generación.....	9
3.2.2. Solar FV.....	9
3.2.3. Transformadores .....	10
3.2.4. Sistema Anti-Isla.....	10
4. PROYECCIÓN DE ENERGÍA GENERADA Y CONSUMIDA (KWH-MES) ....	10
4.1. DATOS TÉCNICOS GENERALES .....	10
4.1.1. Proyección de la energía generada por el sistema a entregar a la red del OR por mes (kWh-mes).....	11
4.1.2. Proyección de la energía generada por el sistema para consumo interno por mes (kWh-mes).....	11
4.1.3. Potencia disponible para entrega de excedentes (kW).....	11
5. PARÁMETROS TÉCNICOS CIRCUITO CARRERA 4.....	11
6. ESTUDIOS TECNICOS .....	11
6.1. ANÁLISIS DE CORTO CIRCUITO.....	11
6.1.1. Cortocircuitos triásicos.....	12
6.1.2. Cortocircuitos monofásicos.....	12
6.2. FLUJOS DE CARGA.....	13
6.2.1. Cargabilidad .....	13
6.2.2. Nivel de tensión .....	14
6.3. FLUJO DE CARGA EN CONTINGENCIAS N-1.....	14
6.4. RESULTADOS PÉRDIDAS.....	16
7. CALIDAD DE ENERGÍA.....	16
8. ANÁLISIS DE CONTENIDO DE ARMÓNICOS.....	16
8.1.1. Resultados de flujo armónico.....	18

	PLANTA SOLAR FOTOVOLTAICA	FECHA: 30 - 07 - 2021
	HOTEL ESTELAR 201,15 kWp	Rev. No: 0

8.1.2. Impedancia armónica .....	19
9. PROTECCIONES DEL SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO .....	20
9.1. INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO DE LOS INVERSORES .....	20
9.2. PROTECCIONES INTEGRADAS EN LOS INVERSORES .....	20
10. CONCLUSIONES .....	21
11. REFERENCIAS .....	22
12. ANEXOS .....	23

	PLANTA SOLAR FOTOVOLTAICA	FECHA: 30 - 07 - 2021
	HOTEL ESTELAR 201,15 kWp	Rev. No: 0

# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1 Voltaje de conexión y potencia instalada .....	9
Tabla 3-2 Especificaciones técnicas sistema solar fotovoltaico 1 .....	9
Tabla 3-3 Especificaciones técnicas sistema solar fotovoltaico 2 .....	9
Tabla 3-4 Especificaciones técnicas transformador 1 .....	10
Tabla 3-5 Especificaciones técnicas transformador 2 .....	10
Tabla 3-6 Especificaciones técnicas del sistema Anti-Isla .....	10
Tabla 4-1 Proyección de energía generada (kWh-mes).....	11
Tabla 4-2 Proyección de energía generada para consumo (kWh-mes) .....	11
Tabla 4-3 Potencia disponible para entrega de excedentes (kW-mes) .....	11
Tabla 6-1 Cortocircuito trifásico caso base y con proyecto .....	12
Tabla 6-2 Cortocircuito monofásico caso base y con proyecto .....	12
Tabla 6-3 Cargabilidad de líneas caso base y con proyecto a las 12 pm.....	14
Tabla 6-4 Cargabilidad de transformadores del proyecto a las 12 pm .....	14
Tabla 6-5 Tensión en nodos caso base y con proyecto a las 12 pm.....	14
Tabla 6-6 Contingencias N-1 evaluadas .....	15
Tabla 6-7 Resumen resultados contingencias.....	15
Tabla 6-8 Pérdidas en el circuito Carrera 4 con y sin proyecto .....	16
Tabla 8-1 Límites de distorsión armónica IEEE 519-2014.....	17
Tabla 8-2 Inyección de corriente armónica para el inversor utilizado en el modelo .....	17
Tabla 9-1 Corriente nominal e interruptores para los inversores del sistema solar de 123,75 kWp .....	20
Tabla 9-2 Corriente nominal e interruptores para los inversores del sistema solar de 77,40 kWp .....	20
Tabla 9-3 Corriente nominal e interruptor para el tablero del sistema solar de 123,75 kWp .....	20
Tabla 9-4 Corriente nominal e interruptor para el tablero del sistema solar de 77,40 kWp .....	20
Tabla 9-5 Ajustes de protecciones integradas en el inversor .....	21

	PLANTA SOLAR FOTOVOLTAICA	FECHA: 30 - 07 - 2021
	HOTEL ESTELAR 201,15 kWp	Rev. No: 0

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3-1 Ubicación del proyecto en la ciudad de Cali, Departamento del Valle del Cauca. Fuente: Google Earth.....	8
Figura 3-2 Diagrama unifilar del circuito Carrera 4.....	8
Figura 8-1 Porcentaje de corrientes armónicas inyectadas por el inversor utilizado en el modelo.....	17
Figura 8-2 Porcentaje de THD.....	18
Figura 8-3 Distorsión armónica individual .....	18
Figura 8-4 Impedancia en frecuencia .....	19

	PLANTA SOLAR FOTOVOLTAICA	FECHA: 30 - 07 - 2021
	HOTEL ESTELAR 201,15 kWp	Rev. No: 0

## RESUMEN

Para el año 2021, la empresa HOTEL ESTELAR CALI, planea la instalación y puesta en servicio de un proyecto de generación solar fotovoltaico de 201,15 kWp en sus instalaciones.

La potencia instalada de generación es de 201,15 kWp, constituida por cuatro (4) inversores de 30 kW y uno (1) de 36 kW, con una tensión de salida de 208 V.

El proyecto se conecta a la red eléctrica de EMCALI a través de dos transformadores, uno de 1250 kVA 13,2/0,208 kV y el otro de 325 kVA 13,2/0,208 kV, en el circuito Carrera 4.

Los resultados más relevantes del estudio son:

- Las corrientes de cortocircuito no presentan un aumento significativo debido a la tecnología de generación usada que limita la inyección de corriente, presentando un aumento máximo de 0,008 kA.
- Se encontró una corriente de cortocircuito de hasta 62,88 kA en el tablero colector del sistema solar de 123,75 kWp, esto en lado de baja del transformador 1250 kVA 13,2/0,208 kV, así mismo, la corriente de cortocircuito en el tablero colector del sistema solar 77,40 kWp corresponde a 14,42 kA en el lado de baja del transformador 325 kV 13,2/0,208 kV, estos valores deberán tenerse en cuenta a la hora elegir las protecciones para los equipos.
- Para la alternativa de conexión del nuevo proyecto de generación no se presentaron violaciones a los parámetros de operación normal de la red tanto en operación normal como en contingencia N-1.
- La entrada en operación del proyecto genera una disminución en las pérdidas del SDL debido a que la generación solar fotovoltaica reduce la importación de energía desde el STR del operador de red.
- El proyecto de generación solar fotovoltaica cumple con los criterios de calidad de energía establecidos en el estándar IEEE 1547.
- La implementación del proyecto de generación solar fotovoltaico afecta en un máximo de 0,005% el THD en la zona de influencia y provoca un aumento de la impedancia a medida que aumenta la frecuencia, principalmente en el punto de conexión en donde se alcanza un valor de hasta 33  $\Omega$ .

## 1. ALCANCE

Con miras a la realización del proyecto HOTEL ESTELAR CALI 201,15 kWp y como parte de los requerimientos exigidos para su construcción, se presenta el estudio de conexión simplificado del proyecto de acuerdo con los requisitos establecidos en la

	PLANTA SOLAR FOTOVOLTAICA	FECHA: 30 - 07 - 2021
	HOTEL ESTELAR 201,15 kWp	Rev. No: 0

resolución CREG 030 del 2018. Para ello, se partió de los requerimientos exigidos por el operador de red (OR).

El alcance general del presente informe denominado “estudio de conexión simplificado” es la realización de simulaciones, cálculos, estudios y análisis eléctricos en estado estable, primero para la alternativa base y seguidamente bajo la conexión del proyecto.

Las actividades contempladas para el desarrollo del estudio son las siguientes:

- Modelado del sistema eléctrico
- Análisis de cortocircuito
- Análisis del estado estable (Flujo de carga en condiciones normales y en contingencias N-1)
- Análisis de pérdidas
- Calidad de energía
- Análisis de contenido de armónicos
- Coordinación de protecciones

## 2. OBJETIVOS

El objetivo general del presente estudio es analizar la conexión para el desarrollo del proyecto de generación solar fotovoltaica de 201,15 kWp de capacidad en el circuito Carrera 4 de EMCALI. Para ello, se realizaron análisis técnicos que determinen los impactos de la nueva generación.

## 3. INFORMACIÓN

### 3.1. INFORMACIÓN GENERAL DEL PROYECTO

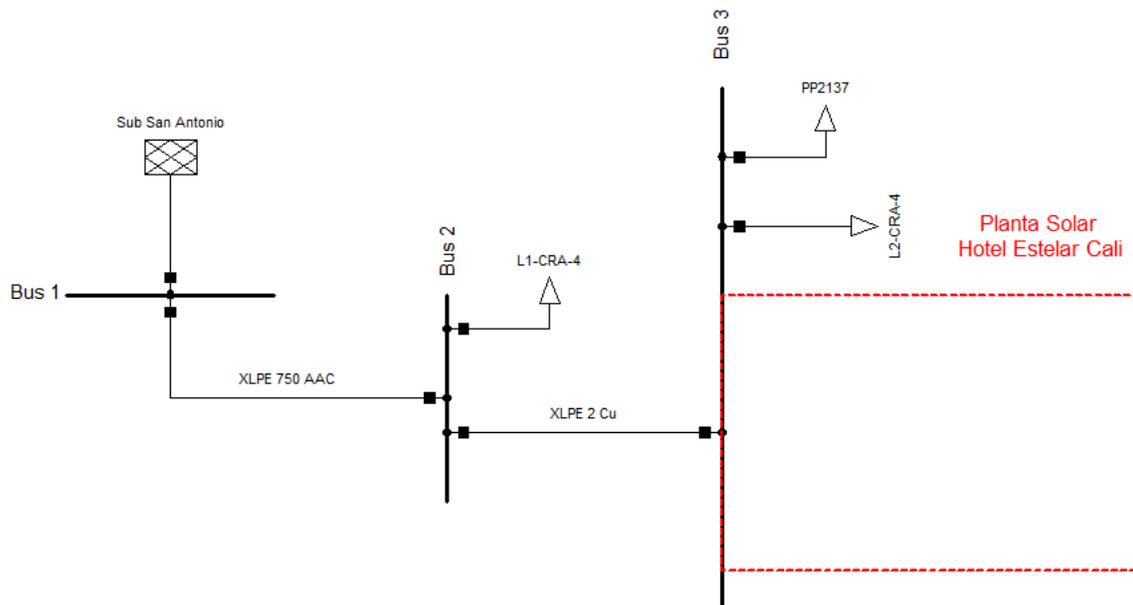
El proyecto comprende la construcción y puesta en funcionamiento de una planta fotovoltaica (haciendo uso del recurso solar para la generación de energía eléctrica) en el Hotel Estelar. La planta contará con una capacidad instalada de 201,15 kWp y se ubicará en la Av. Colombia # 2-72, Cali, Valle del Cauca, en las coordenadas 3°27'00,9"N - 76°32'21,8"W como se observa en la Figura 3-1. Se estima el 30 de octubre del año 2021 como fecha de entrada en operación

	PLANTA SOLAR FOTOVOLTAICA	FECHA: 30 - 07 - 2021
	HOTEL ESTELAR 201,15 kWp	Rev. No: 0



**Figura 3-1 Ubicación del proyecto en la ciudad de Cali, Departamento del Valle del Cauca.**  
Fuente: Google Earth

En la Figura 3-2 se puede observar el diagrama unifilar del circuito Carrera 4.



**Figura 3-2 Diagrama unifilar del circuito Carrera 4**

	PLANTA SOLAR FOTOVOLTAICA	FECHA: 30 - 07 - 2021
	HOTEL ESTELAR 201,15 kWp	Rev. No: 0

## 3.2. INFORMACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA

### 3.2.1. Planta de generación

En la Tabla 3-1 se muestra el voltaje de conexión de la planta fotovoltaica y la potencia instalada.

**Tabla 3-1 Voltaje de conexión y potencia instalada**

Voltaje de conexión (V)	208
Potencia instalada (kWac)	156
Potencia instalada (kWp)	201,15

### 3.2.2. Solar FV

En la Tabla 3-2 y Tabla 3-3 se detallan las especificaciones técnicas del proyecto de generación solar fotovoltaico.

**Tabla 3-2 Especificaciones técnicas sistema solar fotovoltaico 1**

<b>Sistema solar de 123,75 kWp</b>	
Cantidad de Paneles	275
Potencia por panel (Wp)	450
Serie	Trina TSM-DE17M(II)
Inversor AC – DC	Si
Serie inversor 1	CPS SCA36 KTL-T/SA
Serie inversor 2	CPS SCA30 KTL-T/SA
Cantidad de inversores 1	1
Cantidad de inversores 2	2
Numero de fases de salida del inversor	3
Voltaje de salida del inversor (V)	208

**Tabla 3-3 Especificaciones técnicas sistema solar fotovoltaico 2**

<b>Sistema solar de 77,40 kWp</b>	
Cantidad de Paneles	172
Potencia por panel (Wp)	450
Serie	Trina TSM-DE17M(II)
Inversor AC - DC	Si
Serie inversor	CPS SCA30 KTL-T/SA
Cantidad de inversores	2
Numero de fases de salida del inversor	3
Voltaje de salida del inversor (V)	208

	PLANTA SOLAR FOTOVOLTAICA	FECHA: 30 - 07 - 2021
	HOTEL ESTELAR 201,15 kWp	Rev. No: 0

### 3.2.3. Transformadores

En la tabla y tabla se muestran las especificaciones de los transformadores correspondientes al proyecto de generación solar fotovoltaico.

**Tabla 3-4 Especificaciones técnicas transformador 1**

Transformador 1	
Potencia nominal (kVA)	1,250
Grupo de conexión	DYN0
Impedancia (%)	5,75

**Tabla 3-5 Especificaciones técnicas transformador 2**

Transformador 2	
Potencia nominal (kVA)	0,325
Grupo de conexión	DYN0
Impedancia (%)	5,75

### 3.2.4. Sistema Anti-Isla

Los detalles del sistema Anti-Isla se presentan en la Tabla 3-6.

**Tabla 3-6 Especificaciones técnicas del sistema Anti-Isla**

<b>Equipo</b>	CPS SCA36 KTL-T/SA - CPS SCA30 KTL-T/SA
<b>Modo de operación</b>	ROCOF
<b>Rango de protección</b>	De acuerdo con el acuerdo 1322 del CNO 60 +/- 2 Hz

## 4. PROYECCIÓN DE ENERGÍA GENERADA Y CONSUMIDA (KWH-MES)

### 4.1. DATOS TÉCNICOS GENERALES

El procedimiento para el cálculo de la energía producida por el sistema toma en cuenta la potencia nominal en corriente directa, el ángulo de inclinación y acimut de la generación fotovoltaica, las pérdidas de este (pérdidas resistivas, las pérdidas por diferencia de temperatura de los módulos, de reflexión entre otras), la eficiencia del inversor, así como el coeficiente de reflexión de la tierra delante de los módulos. Se hizo uso de la aplicación PVWatts Calculator de NREL mediante la cual se estimó la energía a generar.

	PLANTA SOLAR FOTOVOLTAICA	FECHA: 30 - 07 - 2021
	HOTEL ESTELAR 201,15 kWp	Rev. No: 0

#### 4.1.1. Proyección de la energía generada por el sistema a entregar a la red del OR por mes (kWh-mes)

**Tabla 4-1 Proyección de energía generada (kWh-mes)**

Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 5	Mes 6	Mes 7	Mes 8	Mes 9	Mes 10	Mes 11	Mes 12
26979	22439	24105	22386	21048	20503	22556	24544	24856	25377	23231	25075

#### 4.1.2. Proyección de la energía generada por el sistema para consumo interno por mes (kWh-mes)

**Tabla 4-2 Proyección de energía generada para consumo (kWh-mes)**

Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 5	Mes 6	Mes 7	Mes 8	Mes 9	Mes 10	Mes 11	Mes 12
12498	12498	12498	12498	12498	12198	12240	12632	13082	12767	12068	12498

#### 4.1.3. Potencia disponible para entrega de excedentes (kW)

**Tabla 4-3 Potencia disponible para entrega de excedentes (kW-mes)**

Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 5	Mes 6	Mes 7	Mes 8	Mes 9	Mes 10	Mes 11	Mes 12
19,46	14,79	15,60	13,73	11,49	11,53	13,87	16,01	16,35	16,95	15,50	16,91

## 5. PARÁMETROS TÉCNICOS CIRCUITO CARRERA 4

Los parámetros eléctricos de las líneas en el SDL, equivalente de red y demanda en la carrera 4, fueron suministrados por el operador de red y se utilizaron para modelar el sistema de distribución de EMCALI. Estos parámetros serán presentados en el ANEXO F.

## 6. ESTUDIOS TECNICOS

### 6.1. ANÁLISIS DE CORTO CIRCUITO

Se simuló fallas monofásicas y trifásicas en los nodos cercanos al proyecto, con el fin de determinar las corrientes de cortocircuito debido a la conexión del generador solar fotovoltaico.

Las simulaciones se realizaron usando los métodos establecidos por la norma IEC 60909 primera edición del 2011-07 [4][5] y segunda edición del 2016-01 [7] que incluye los convertidores de las plantas solares fotovoltaicas.

Para los análisis se consideró el aporte de cortocircuito definido por el equivalente de red suministrado por el operador de red EMCALI. Para los inversores del generador fotovoltaico proyectado, se supuso que la corriente de cortocircuito

	PLANTA SOLAR FOTOVOLTAICA	FECHA: 30 - 07 - 2021
	HOTEL ESTELAR 201,15 kWp	Rev. No: 0

simétrica es igual a **1,25** veces la corriente nominal del inversor.

Como resultados de este análisis se obtuvieron las corrientes de interrupción simétrica de cortocircuito ( $I_k$ ). Esta corriente se define como el valor r.m.s. de la componente simétrica de la corriente de cortocircuito, para el instante de separación de los contactos del dispositivo de interrupción.

Es importante resaltar que se encontró una corriente de cortocircuito de hasta 62,88 kA en el tablero colector del sistema solar de 123,75 kWp, esto en lado de baja del transformador 1250 kVA 13,2/0,208 kV, así mismo, la corriente de cortocircuito en el tablero colector del sistema solar 77,40 kWp corresponde a 14,42 kA en el lado de baja del transformador 325 kV 13,2/0,208 kV, estos valores deberán tenerse en cuenta a la hora elegir las protecciones para los equipos.

### 6.1.1. Cortocircuitos trifásicos

En la Tabla 6-1 se presentan las corrientes de cortocircuito trifásico presentes en la zona de influencia del proyecto. Con la implementación del proyecto se observa un aumento de 0,008 kA en los tres nodos analizados. Los resultados se observan a detalle en el ANEXO C.

**Tabla 6-1 Cortocircuito trifásico caso base y con proyecto**

Bus	Cortocircuito Trifásico [kA]		Variación [kA]
	Caso Base	Con Proyecto	
1	16,120	16,128	0,008
2	12,060	12,068	0,008
3	10,204	10,212	0,008

### 6.1.2. Cortocircuitos monofásicos

En la Tabla 6-2 se presentan las corrientes de cortocircuito monofásico presentes en la zona de influencia del proyecto. Con la implementación del proyecto se observa un aumento de 0,002 kA en el bus 1 y de 0,001 kA en los nodos 2 y 3 (punto de conexión). Los resultados se observan a detalle en el ANEXO C.

**Tabla 6-2 Cortocircuito monofásico caso base y con proyecto**

Bus	Cortocircuito Monofásico [kA]		Variación [kA]
	Caso Base	Con Proyecto	
1	12,180	12,182	0,002
2	6,885	6,886	0,001
3	5,910	5,911	0,001

	PLANTA SOLAR FOTOVOLTAICA	FECHA: 30 - 07 - 2021
	HOTEL ESTELAR 201,15 kWp	Rev. No: 0

## 6.2. FLUJOS DE CARGA

El objetivo es determinar el desempeño del sistema ante la conexión de la nueva generación, es decir, en condiciones de estado estable la incorporación del nuevo proyecto causará dificultades operativas en el sistema, (sobrecargas y/o bajos o incluso altos voltajes), lo anterior garantizando un suministro acorde con las exigencias de calidad y balance, contenidas en la resolución CREG 025 de 1995 (Código de Redes) y demás regulación aplicable al tipo de generación. A través de este análisis se obtienen las tensiones en las barras del sistema, la distribución de los flujos de potencia activa, reactiva y las pérdidas.

Para evaluar la cargabilidad y los voltajes del sistema, se consideran los siguientes límites operativos:

- Las tensiones de estado permanente aceptables se encuentran entre 90% y 110% de la tensión nominal del barraje.
- La evaluación para determinar la cargabilidad de las líneas y transformadores se calculó con base en la corriente nominal, así se considera que todos los transformadores de potencia y conductores eléctricos se pueden cargar hasta el 100% de su capacidad nominal.

En este numeral se describe el comportamiento del sistema cercano a la ubicación del proyecto CON y SIN la incorporación del nuevo generador fotovoltaico en condición normal de operación. Los resultados gráficos se pueden observar en el ANEXO A.

### 6.2.1. Cargabilidad

A continuación se presentan los resultados de cargabilidad en las líneas y transformadores.

#### 6.2.1.1. Cargabilidad de líneas

Como se observa en la Tabla 6-3, se presenta un cargabilidad de hasta 61,221% en la línea XLPE 750 AAC que conecta los nodos 1 y 2, no obstante, este resultado se produce desde el caso base; con la implementación del proyecto la cargabilidad de la línea mencionada se reduce en un 1,557%. En lo que respecta a la línea XLPE 2 Cu que conecta los nodos 2 y 3, se observa una cargabilidad de hasta 11,928% en el caso base, mientras que, con la implementación de proyecto, la cargabilidad de esta línea se reduce en un 4,311%. Es importante mencionar que en ningún caso se violan los límites de cargabilidad del sistema de distribución de EMCALI.

	PLANTA SOLAR FOTOVOLTAICA	FECHA: 30 - 07 - 2021
	HOTEL ESTELAR 201,15 kWp	Rev. No: 0

**Tabla 6-3 Cargabilidad de líneas caso base y con proyecto a las 12 pm**

Línea	Cargabilidad [%]		Variación [%]
	Caso Base	Con Proyecto	
XLPE 2 Cu	11,928	7,617	4,311
XLPE 750 AAC	61,221	59,664	1,557

### 6.2.1.2. Cargabilidad de transformadores

El cliente Hotel Estelar Cali se encuentra conectado en baja tensión a través de un transformador de 1250 kVA 13,2/208 kV y el otro de 325 kVA 13,2/208 kV, los cuales se modelaron, obteniendo los valores de cargabilidad que se presentan en la Tabla 6-4. Se presenta un valor de cargabilidad máximo de 18,540 % (a las doce del día cuando el proyecto presenta una generación máxima), esto en el transformador 2, lo cual indica que estos transformadores son adecuados para la conexión del proyecto.

**Tabla 6-4 Cargabilidad de transformadores del proyecto a las 12 pm**

Transformador	Variación [%]
Tr 1	7,712
Tr 2	18,540

### 6.2.2. Nivel de tensión

Como se observa en la Tabla 6-5, la tensión en los tres nodos de la zona de influencia se mantiene dentro de los límites de operación normal. Cabe resaltar que no existe variación representativa con la implementación del proyecto.

**Tabla 6-5 Tensión en nodos caso base y con proyecto a las 12 pm**

Bus	Tensión [p.u.]		Variación [p.u.]
	Caso Base	Con Proyecto	
1	1,000	1,000	0,000
2	0,985	0,985	0,000
3	0,983	0,983	0,000

## 6.3. FLUJO DE CARGA EN CONTINGENCIAS N-1

Los flujos con contingencias buscan determinar los impactos negativos que pueda presentar la conexión del nuevo proyecto ante una falla en el sistema y pérdida de un elemento que pueda generar un aumento de la cargabilidad o una desviación de las tensiones por fuera de lo establecido en la normatividad vigente.

Debido a que el proyecto se conectará en una red radial la desconexión de cualquier circuito que alimente el nodo de conexión dejara fuera de servicio el proyecto debido

	PLANTA SOLAR FOTOVOLTAICA	FECHA: 30 - 07 - 2021
	HOTEL ESTELAR 201,15 kWp	Rev. No: 0

a la protección Anti-Isla, por tal motivo se evaluaron las siguientes contingencias que deslastran carga del circuito sin dejar la planta fuera de servicio:

**Tabla 6-6 Contingencias N-1 evaluadas**

Contingencias	
1	L1-CRA-4
2	L2-CRA-4
3	PP2137

En la Tabla 6-7 se presentan los resultados más críticos obtenidos del análisis de contingencias. En virtud de los análisis realizados, se describen los resultados técnicos más relevantes:

Sin proyecto:

- Bajo todas las contingencias, las tensiones se mantienen dentro de los límites de operación normal, con un valor mínimo de 0,996 [p.u.] en los nodos 2 y 3 (punto de conexión).
- En relación con la cargabilidad de líneas, no se observaron cargabilidades por encima del 100%, obteniendo una cargabilidad máxima de 60,854 % en la línea XLPE 750 AAC.

Con proyecto:

- En lo que respecta a las tensiones en las barras, se presentan resultados similares al caso sin proyecto, con tensiones mínimas de hasta 0,996 [p.u.].
- Al incorporar el generador fotovoltaico al circuito Carrera 4, se obtuvo que la generación de energía es consumida de forma local, lo que produce una disminución de la cargabilidad de las líneas ya que no se importa energía desde el STR.

**Tabla 6-7 Resumen resultados contingencias**

Contingencia	Elemento	Alternativa	Escenario	Elemento	Variable	Valor
1	Nodo 3	Caso Base	Med	Bus	Tensión [p.u.]	0,999
	XLPE 2 Cu	Caso Base	Med	Línea	Cargabilidad [%]	11,876
	Tr 2	Con Proyecto	Med	Transformador	Cargabilidad [%]	18,472
2	Nodo 3	Caso Base	Med	Bus	Tensión [p.u.]	0,996
	XLPE 750 AAC	Caso Base	Med	Línea	Cargabilidad [%]	57,517
	Tr 2	Con Proyecto	Med	Transformador	Cargabilidad [%]	18,529
3	Nodo 3	Caso Base	Med	Bus	Tensión [p.u.]	0,996
	XLPE 750 AAC	Caso Base	Med	Línea	Cargabilidad [%]	60,854

	PLANTA SOLAR FOTOVOLTAICA	FECHA: 30 - 07 - 2021
	HOTEL ESTELAR 201,15 kWp	Rev. No: 0

Contingencia	Elemento	Alternativa	Escenario	Elemento	Variable	Valor
	Tr 2	Con Proyecto	Med	Transformador	Cargabilidad [%]	18,538

En el ANEXO B se puede observar los resultados gráficos de contingencias N-1.

#### 6.4. RESULTADOS PÉRDIDAS

Se calcularon las pérdidas de potencia a través de los análisis de flujo de carga para el sistema en Condición Normal de Operación, tanto sin proyecto como con la alternativa de conexión evaluada. Se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

- El análisis se realizó para las 12:00 pm.
- Se evaluaron las pérdidas con el despacho al 100% de la capacidad del proyecto (201,15 kWp).

**Tabla 6-8 Pérdidas en el circuito Carrera 4 con y sin proyecto**

Hora	Generación [kWp]	Pérdidas [kW]		Variación [kW]
		Caso Base	Con Proyecto	
12	201,150	11,770	11,117	0,653

Como se puede observar en la Tabla 6-8, con la incorporación de la nueva generación al circuito Carrera 4, se produce una variación en las pérdidas, observándose una disminución de hasta 0,653 kW en condiciones de generación máxima, lo que representa un beneficio para el sistema.

### 7. CALIDAD DE ENERGÍA

El inversor utilizado en el proyecto cumple con los estándares de calidad de energía IEEE 1547 tal y como se muestra en los certificados suministrados al operador de red.

### 8. ANÁLISIS DE CONTENIDO DE ARMÓNICOS

Para la entrada en operación de plantas generadoras que cuentan con equipos de inyección de energía a través de electrónica de potencia como el caso de las plantas solares fotovoltaicas, se exige comprobar de forma teórica la afectación debido a los armónicos generados por estas dentro del estudio de conexión simplificado. En este capítulo se verifica que la conexión del parque solar genera un aumento menor a 5%, estando por debajo de los valores de distorsión armónica establecidos en el estándar IEEE 519 – 2014. En la Tabla 8-1 se presentan los límites de distorsión armónica para el sistema de potencia.

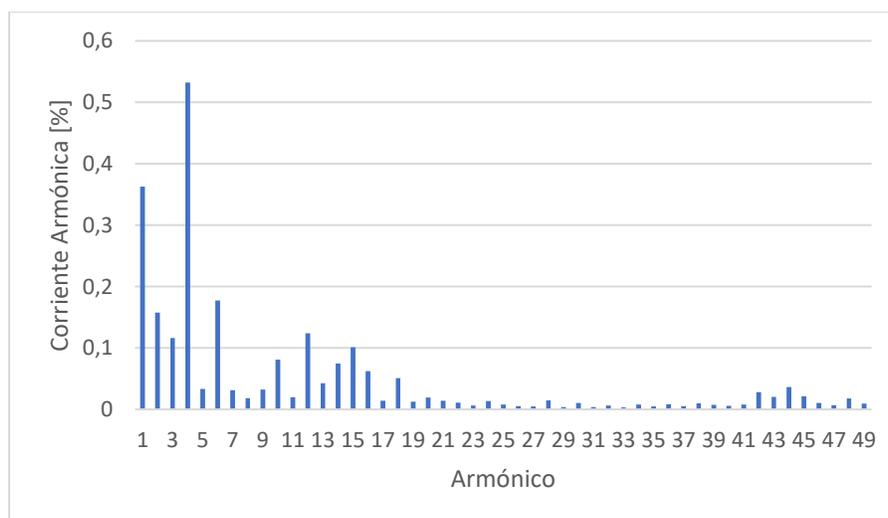
**Tabla 8-1 Limites de distorsión armónica IEEE 519-2014**

Tensión en la barra	Distorsión individual de tensión Dv [%]	Distorsión de tensión THDv [%]
$V \leq 1\text{kV}$	5,0	8,0
$1\text{kV} < V \leq 69\text{kV}$	3,0	5,0
$69\text{kV} \leq V \leq 161\text{kV}$	1,5	2,5
$V \geq 161$	1,0	1,5

Para determinar el nivel de inyección de armónicos en el sistema se modelaron las características técnicas de un inversor estándar con los datos del aporte armónico para los primeros 49 armónicos, esta información se observa en la Tabla 8-2, es importante mencionar que no se muestra el armónico cero correspondiente a la frecuencia fundamental

**Tabla 8-2 Inyección de corriente armónica para el inversor utilizado en el modelo**

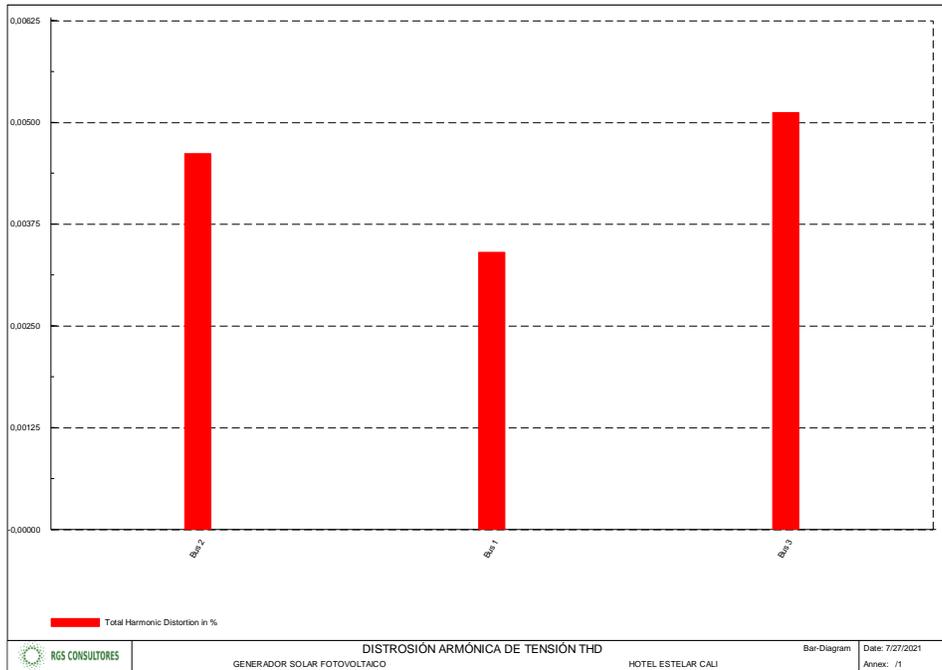
Armónico	Corriente Armónica por fase [%]								
1	0,3629	11	0,02	21	0,0143	31	0,0036	41	0,0078
2	0,1577	12	0,1238	22	0,011	32	0,0066	42	0,0282
3	0,1164	13	0,0425	23	0,0064	33	0,0034	43	0,0202
4	0,5319	14	0,0747	24	0,0138	34	0,0077	44	0,0362
5	0,0335	15	0,1014	25	0,0079	35	0,0049	45	0,0213
6	0,1774	16	0,0621	26	0,0052	36	0,0082	46	0,0103
7	0,031	17	0,0141	27	0,0049	37	0,0055	47	0,0069
8	0,0183	18	0,511	28	0,0145	38	0,0101	48	0,0178
9	0,323	19	0,0125	29	0,0038	39	0,0072	49	0,0093
10	0,0812	20	0,0192	30	0,0106	40	0,006		



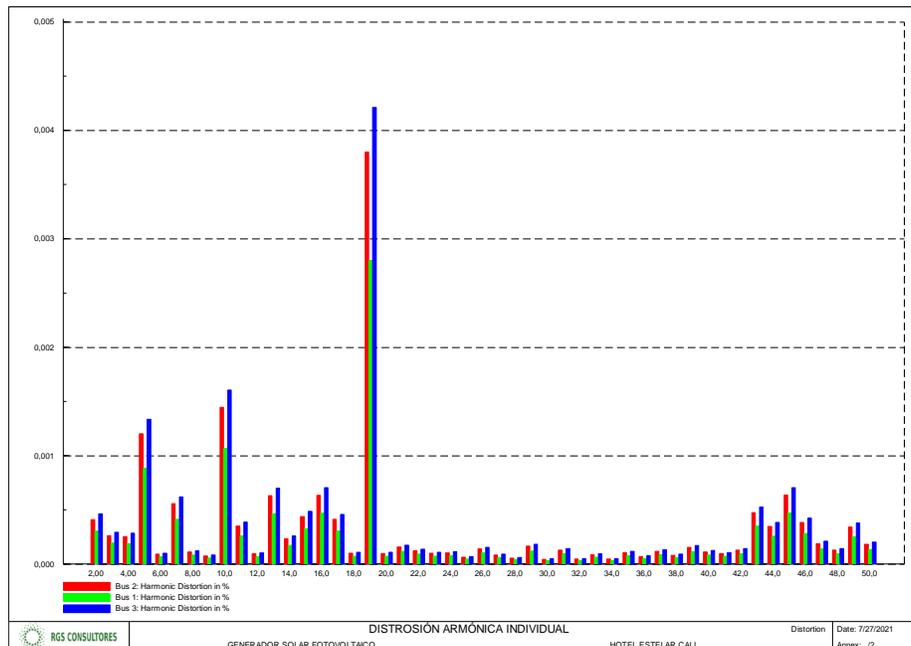
**Figura 8-1 Porcentaje de corrientes armónicas inyectadas por el inversor utilizado en el modelo**

### 8.1.1. Resultados de flujo armónico

Desde la Figura 8-2 a la Figura 8-3 se muestran los resultados de flujo armónico para los nodos impactados directamente por el proyecto. Se observa que no superan los límites de THDv ni de Dv establecidos.



**Figura 8-2 Porcentaje de THD**



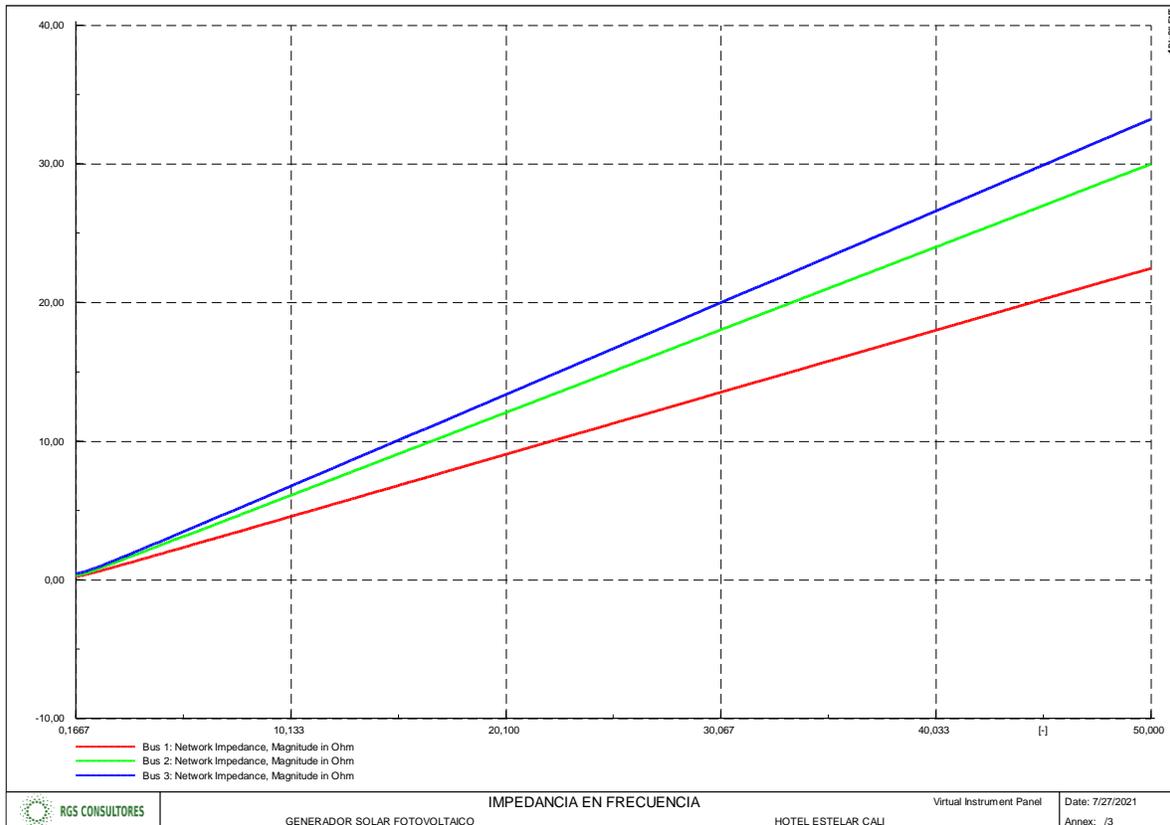
**Figura 8-3 Distorsión armónica individual**

	PLANTA SOLAR FOTOVOLTAICA	FECHA: 30 - 07 - 2021
	HOTEL ESTELAR 201,15 kWp	Rev. No: 0

Del análisis de armónicos se puede concluir que la implementación del proyecto de generación solar fotovoltaico afecta en un máximo de 0,005% el THD en la zona de influencia; se resalta que este escenario es el más pesimista y se espera valores reales menores por lo que se debe comparar con medidas en campo post-instalación del proyecto solar.

### 8.1.2. Impedancia armónica

El conocimiento de la impedancia armónica es de vital importancia para saber cómo actuarán los equipos conectados en el sistema ante variaciones en frecuencia. Para determinar la impedancia en frecuencia  $Z(\omega)$  se simula considerando un rango de frecuencias de 10 a 3000 Hz con el objetivo de hacer un barrido de frecuencia de los primeros 50 armónicos los cuales se presentan como el eje X de los resultados de impedancia en frecuencia que se muestra en la Figura 8-4.



**Figura 8-4 Impedancia en frecuencia**

El análisis para respuesta en frecuencia del sistema bajo la implementación de la generación solar fotovoltaica no presenta puntos de resonancia en serie o paralelo para los armónicos múltiples y característicos en los nodos revisados. Se observa un aumento de la impedancia a medida que aumenta la frecuencia, principalmente en el punto de conexión en donde se alcanza un valor de hasta 33  $\Omega$ .

	PLANTA SOLAR FOTOVOLTAICA	FECHA: 30 - 07 - 2021
	HOTEL ESTELAR 201,15 kWp	Rev. No: 0

## 9. PROTECCIONES DEL SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO

### 9.1. INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO DE LOS INVERSORES

En las Tabla 9-1 y

Tabla 9-2 se observan las corrientes nominales de cada uno de los inversores y su respectivo interruptor termomagnético tripolar.

**Tabla 9-1 Corriente nominal e interruptores para los inversores del sistema solar de 123,75 kWp**

Sistema solar de 123,75 kWp			
Inversor	Corriente nominal [A]	Corriente continua [A]	Interrupción [kA]
1	83	125	65
2	83	125	65
3	100	125	65

**Tabla 9-2 Corriente nominal e interruptores para los inversores del sistema solar de 77,40 kWp**

Sistema solar de 77,40 kWp			
Inversor	Corriente nominal [A]	Corriente continua [A]	Interrupción [kA]
1	83	125	22
2	83	125	22

Adicionalmente se cuenta con protecciones termomagnéticas tripolares para los tableros fotovoltaicos, las cuales se describen a continuación.

**Tabla 9-3 Corriente nominal e interruptor para el tablero del sistema solar de 123,75 kWp**

Tablero Sistema solar de 123,75 kWp		
Corriente nominal [A]	Capacidad interruptor [A]	Interrupción [kA]
266	350	65

**Tabla 9-4 Corriente nominal e interruptor para el tablero del sistema solar de 77,40 kWp**

Tablero Sistema solar de 77,40 kWp		
Corriente nominal [A]	Capacidad interruptor [A]	Interrupción [kA]
167	225	22

En el ANEXO D se encuentran disponibles las curvas de protección y la coordinación de estas.

### 9.2. PROTECCIONES INTEGRADAS EN LOS INVERSORES

Conforme a los lineamientos del acuerdo CNO 1322 “*Requisitos de Protecciones para la conexión de Sistemas de Generación en el SIN*” se requieren tres protecciones integradas en el control del inversor. Los ajustes de estas protecciones

	PLANTA SOLAR FOTOVOLTAICA	FECHA: 30 - 07 - 2021
	HOTEL ESTELAR 201,15 kWp	Rev. No: 0

se presentan en la Tabla 9-5, las cuales fueron tomadas del acuerdo anteriormente mencionado.

**Tabla 9-5 Ajustes de protecciones integradas en el inversor**

Tabla acuerdo CNO 1322 de 2020			
Nivel de Tensión		Nivel 1	
Rango de Potencia [kW]		<1MW	
Requerimiento de Protección	Equipo Usado	Valor Umbral	Tiempo Desconexión [s]
Baja frecuencia (ANSI 81U)	Rele integrado en la PCB	57	0.2 s
Sobre frecuencia (ANSI 810)	Rele integrado en la PCB	63	0.2 s
Anti-isla IEEE 1547	Integrado en el inversor		

La protección de potencia adelante (32), no aplica para el esquema de conexión del proyecto de generación fotovoltaico, ya que esta función aplica solo para autogeneradores que no declaran entregar excedentes a la red; la función debe estar en capacidad de limitar la potencia entregada de la red o desconectar al autogenerador del sistema según las condiciones pactadas con el OR.

## 10. CONCLUSIONES

- El análisis de cortocircuito muestra que se presenta un aumento máximo de 0,008 kA en la corriente de cortocircuito en el sistema, lo cual no genera la necesidad de cambios en las protecciones existentes en el sistema.
- Del análisis de cortocircuito se encontró una corriente de cortocircuito de hasta 62,88 kA en el tablero colector del sistema solar de 123,75 kWp, esto en lado de baja del transformador 1250 kVA 13,2/0,208 kV, así mismo, la corriente de cortocircuito en el tablero colector del sistema solar 77,40 kWp corresponde a 14,42 kA en el lado de baja del transformador 325 kV 13,2/0,208 kV, estos valores deberán tenerse en cuenta a la hora elegir las protecciones para los equipos.
- Del análisis de flujo de carga se puede observar que ante la entrada en servicio de la generación solar fotovoltaica, todos los elementos del sistema eléctrico del área de influencia y de alimentación (propiedad del OR) se encuentran dentro de los límites de operación.
- El análisis de pérdidas muestra que la entrada en operación del proyecto genera una disminución en las pérdidas del SDL debido a que la generación solar fotovoltaica reduce la importación de energía desde el STR del operador de red.
- El análisis de armónicos permite observar que el proyecto de generación solar fotovoltaico afecta en un máximo de 0,005% el THD en la zona de influencia y provoca un aumento de la impedancia a medida que aumenta la frecuencia, principalmente en el punto de conexión en donde se alcanza un valor de

	PLANTA SOLAR FOTOVOLTAICA	FECHA: 30 - 07 - 2021
	HOTEL ESTELAR 201,15 kWp	Rev. No: 0

hasta 33  $\Omega$ , además se valida que el proyecto cumple con los criterios de calidad de energía establecidos en el estándar IEEE 1547.

## 11. REFERENCIAS

- [1] A. Vargas, O. R. Saavedra, M. E. Samper, S. Rivera and R. Rodriguez, "Latin American Energy Markets: Investment Opportunities in Nonconventional Renewables," in IEEE Power and Energy Magazine, vol. 14, no. 5, pp. 38-47, Sept.-Oct. 2016. doi: 10.1109/MPE.2016.2573862
- [2] W. Ñustes, S. Rivera, "COLOMBIA: TERRITORIO DE INVERSIÓN EN FUENTES NO CONVENCIONALES DE ENERGÍA RENOVABLE PARA LA GENERACIÓN ELÉCTRICA", En Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo, Volumen 17, Número 1, Enero-Junio 2017
- [3] Resolución CREG 025 de 1995 "Por la cual se establece el Código de Redes, como parte del Reglamento de Operación del Sistema Interconectado Nacional".
- [4] International Standard IEC 60909-0 "Short-circuit currents in three phases a.c. systems, Part 0: Calculation of currents". First edition 2001-07.
- [5] Technical Report TR IEC 60909-1 "Short-circuit currents in three phase a.c. systems, Part 1: Factors for the calculation of short-circuit currents according to IEC 60909-0". Second edition 2002-07.
- [6] Turcotte, D., & Katiraei, F. (2009, October). Fault contribution of grid-connected inverters. In Electrical Power & Energy Conference (EPEC), 2009 IEEE (pp. 1-5). IEEE.
- [7] IEEE, Std 519 2014, Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems.
- [8] Power electronics, Manual de descripción y uso del modelo en Power Factory del inversor Freesun HE (modificado por DigSILENT), P.4
- [9] Dugan, R. C., McGranaghan, M. F., Santoso, S., & Beaty, H. W. (2002). Electrical power systems quality. Second Edition. New York, NY: McGraw-Hill
- [10] Parra, E. (2004). Análisis de armónicos en sistemas de distribución (Vol. 14). Univ. Nacional de Colombia.

	PLANTA SOLAR FOTOVOLTAICA	FECHA: 30 - 07 - 2021
	HOTEL ESTELAR 201,15 kWp	Rev. No: 0

## 12. ANEXOS

Anexo	Estudio
A	Flujo de carga en operación normal
B	Contingencias N-1
C	Cortocircuitos
D	Coordinación de protecciones
E	Ficha técnica del inversor
F	Parámetros eléctricos equivalente (equivalente de red, líneas y cargas).
G	Ficha técnica del panel