

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



TESIS

**“SIMULACIÓN DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICA PARA USO
DE UNA RED INTERIOR PARA MEJORAR LA SOSTENIBILIDAD
ENERGÉTICA EN PLANTAS INDUSTRIALES, PERÚ 2022”**

**PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
ELECTRICISTA**

AUTORES:

Bach. CUEVAS HUAYTA, Jonathan Ricardo

Bach. CHILENO DIAZ, Elvis Joseph

Bach. VEGA FELIPE, Johan Alexis

ASESOR:

Dr. Ing. DAMAS FLORES, Marcelo Carlos

Callao, 2022

PERÚ

HOJA DE REFERENCIA DEL JURADO Y APROBACIÓN

PRESIDENTE : **Mg. Ing. Jessica Rosario Meza Zamata**
SECRETARIO : **Dr. Lic. Adán Almírcar Tejada Cabanillas**
VOCAL : **Mg. Ing. Ernesto Ramos Torres**

ASESOR : **Dr. Ing. Marcelo Carlos Damas Flores**

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
ACTA PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO PROFESIONAL POR LA MODALIDAD DE
TESIS SIN CICLO DE TESIS

A los 23 días del mes de mayo del 2022 siendo las 16:00 Horas se reunió el Jurado Examinador de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica conformado por los siguientes Docentes Ordinarios de la Universidad Nacional del Callao, (RESOLUCIÓN DECANAL N° 051-2022-DFIEE)

Mg. Ing. JESSICA ROSARIO MEZA ZAMATA	Presidente
Dr. Lic. ADÁN ALMÍRCAR TEJADA CABANILLAS	Secretario
Mg. Ing. ERNESTO RAMOS TORRES	Vocal

Con el fin de dar inicio a la exposición de Tesis de los señores Bachilleres **CHILENO DIAZ, ELVIS JOSEPH; CUEVAS HUAYTA, JONATHAN RICARDO y VEGA FELIPE, JOHAN ALEXIS**, quienes habiendo cumplido con los requisitos para obtener el Título Profesional de Ingeniería Eléctrica tal como lo señalan los Arts. N° 12 al 15 del Reglamento de Grados y Títulos, sustentará la Tesis Titulada **“SIMULACIÓN DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICA PARA USO DE UNA RED INTERIOR PARA MEJORAR LA SOSTENIBILIDAD ENERGÉTICA EN PLANTAS INDUSTRIALES, PERÚ 2022”**, con el quórum reglamentario de ley, se dio inicio a la exposición, considerando lo establecido en los Art. N° 14 y 17 del Reglamento de Grados y Títulos dado por Resolución N° 047-92-CU, en el Capítulo N° 06, corresponde al otorgamiento del Título Profesional con Tesis, efectuadas las deliberaciones pertinentes se acordó:

Dar por **APROBADO** Calificativo **BUENO** nota: **14** de los expositores Bachilleres CHILENO DIAZ, ELVIS JOSEPH; CUEVAS HUAYTA, JONATHAN RICARDO y VEGA FELIPE, JOHAN ALEXIS con lo cual se dio por concluida la sesión, siendo las 17:27 horas del día del mes y año en curso.

Es copia fiel del folio N° 191 Del Libro de Actas de Sustentación de Tesis de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica – UNAC.



.....
PRESIDENTE

Mg. Ing. JESSICA ROSARIO MEZA ZAMATA



.....
SECRETARIO

Dr. Lic. ADÁN ALMÍRCAR TEJADA CABANILLAS



.....
VOCAL

Mg. Ing. ERNESTO RAMOS TORRES

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mi forjador, al que ilumino mi camino en todo momento, mi padre celestial.

A mi asesor que durante la realización de mi proyecto, ha sido mi mano derecha y quien me ha ayudado en el complicado proceso.

INDICE

DEDICATORIA	4
RESUMEN	9
ABSTRACT	10
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.1. Realidad Problemática	1
1.2. Formulación del Problema.....	1
1.3. Objetivos	2
1.4. Justificación.....	3
1.5. Limitantes de la Investigación	4
II. MARCO TEORICO	6
2.1. Antecedentes: Internacionales y Nacionales	6
2.2. Bases Teóricas	11
2.3. Teorías relacionadas con el tema.....	34
2.4. Definición de Términos básicos.....	36
III. HIPOTESIS.....	38
3.1. Hipótesis	38
3.2. Definición Conceptual de Variables.....	38
IV. DISEÑO METODOLOGICO	40
4.1. Tipo y diseño de Investigación	40
4.2. Método de Investigación.....	41
4.3. Población y muestra.....	41
4.4. Lugar de Estudio	43
4.5. Técnicas e Instrumentos para la Recolección de la Información, Validez y Confiabilidad	43
4.6. Análisis y procesamiento de Datos.....	45
4.7. Aspectos Éticos.....	46

V. RESULTADOS	47
VI. RESULTADOS DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO SIMULADO CON DIGSILENT	85
VII. ANALISIS DE LOS RESULTADOS	102
CONCLUSIONES	117
RECOMENDACIONES	119
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	120

INDICE DE TABLAS

TABLA N°1. Operacionalización de las Variables.....	39
TABLA N°2. Cuadro de máxima demanda.....	50
TABLA N°3. HSP (Horas Solares Pico)- mes crítico.....	53
TABLA N°4. Cálculo del número de módulos del sistema fotovoltaico	54
TABLA N°5. Características del generador fotovoltaico	55
TABLA N°6. Características del panel fotovoltaico Sunmodule SW160	57
TABLA N°7. Periodo	60
TABLA N°8. periodo.....	60
TABLA N°9. Características del inversor Fronius CL-60	62
TABLA N°10. Intensidad máxima admisible en amperios para cable NPT (STO) 0,6/1 kV 64	
TABLA N°11. Características eléctricas del conductor NYY unipolar 0,6/1kv	65
TABLA N°12. Calculo.....	66
TABLA N°13. calculo	67
TABLA N°14. parámetros	68
TABLA N°15. parámetros	69
TABLA N°16. Conductores de puesta a tierra	70
TABLA N°17. Presupuesto	80
TABLA N°18. Antes y después.....	83
TABLA N°19. Voltajes nodales del sistema (pu).....	87
TABLA N°20. Corrientes de corto circuito (KA).....	90
TABLA N°21. Resultados	96
TABLA N°22. resultados.....	97
TABLA N°23. resultados.....	99
TABLA N°24. resultados.....	100
TABLA N°25. resultados.....	101
TABLA N°26. Voltajes nodales del sistema (pu).....	104

TABLA N°27.	Corrientes de corto circuito (KA).....	106
TABLA N°28.	resultados y parámetros	112
TABLA N°29.	resultados y parámetros	113
TABLA N°30.	resultados y parámetros	114
TABLA N°31.	Resultados y parámetros	115
TABLA N°32.	resultados y parámetros	116

INDICE DE FIGURAS

FIGURA N°1.	El sol	11
FIGURA N°2.	Constante solar	12
FIGURA N°3.	Movimiento tierra	13
FIGURA N°4.	La esfera celeste	14
FIGURA N°5.	La esfera celeste – eclíptica.....	14
FIGURA N°6.	La distancia Sol – Tierra.....	15
FIGURA N°7.	Calentamiento de la Tierra	16
FIGURA N°8.	Radiación solar	17
FIGURA N°9.	Semiconductor tipo N	21
FIGURA N°10.	Semiconductor tipo P	22
FIGURA N°11.	Unión P-N	23
FIGURA N°12.	Barrera de potencial	24
FIGURA N°13.	Efecto fotovoltaico	24
FIGURA N°14.	Bandas de energía	25
FIGURA N°15.	Diferencia de potencial.....	26
FIGURA N°16.	La célula solar	26
FIGURA N°17.	Funcionamiento de la célula solar.....	27
FIGURA N°18.	Circuito equivalente de dispositivo intrínseco.....	28
FIGURA N°19.	Curva corriente vs voltaje de un módulo fotovoltaico.....	29
FIGURA N°20.	Curva corriente vs voltaje de un módulo fotovoltaico.....	30
FIGURA N°21.	Esquema de configuración.....	31
FIGURA N°22.	irradiancia por día.....	32
FIGURA N°23.	Vista 3D planta Raciencia	48
FIGURA N°24.	Ubicación nave industrial Modelo	49
FIGURA N°25.	Medidas del panel fotovoltaico Sunmodule SW160	56
FIGURA N°26.	soporte	58
FIGURA N°27.	Características del panel fotovoltaico Sunmodule SW160.....	58
FIGURA N°28.	Instalación soportes.....	58

FIGURA N°29.	Soporte trapezoidal interface	59
FIGURA N°30.	Inversor trifásico Fronius CL-60	62
FIGURA N°31.	Fusible de corriente continua y símbolo normalizado	72
FIGURA N°32.	Protección contra sobretensión CLASE II y símbolo normalizado... ..	73
FIGURA N°33.	Interruptor multipolar de corriente continúa	74
FIGURA N°34.	Caja de conexión de grupo	75
FIGURA N°35.	Vigilante de aislamiento	76
FIGURA N°36.	Interruptor en continua	76
FIGURA N°37.	Interruptor termomagnético tripolar de caja moldeada.....	78
FIGURA N°38.	Interruptor termomagnético diferencial	80
FIGURA N°39.	Facturación del antes y después	84
FIGURA N°40.	Flujo de potencia de las instalaciones	86
FIGURA N°41.	Perfil de tensión.....	87
FIGURA N°42.	Barras consideradas para análisis de cortocircuito	90
FIGURA N°43.	Nodo considerado para análisis de transitorios.....	92
FIGURA N°44.	Comportamiento de la tensión y corriente de cortocircuito en todos los puntos con fotovoltaico (línea roja) y sin fotovoltaico (línea verde).....	93
FIGURA N°45.	Frecuencia en la barra 1.1, con fotovoltaico (línea roja) y sin fotovoltaico (línea verde)	94
FIGURA N°46.	Frecuencia en la barra general oficinas, comedor y servicios, con fotovoltaico (línea roja) y sin fotovoltaico (línea verde).....	94
FIGURA N°47.	Frecuencia en la barra de distribución, con fotovoltaico (línea roja) y sin fotovoltaico (línea verde).....	95
FIGURA N°48.	Flujo de potencia de las instalaciones	102
FIGURA N°49.	Perfil de tensión.....	103
FIGURA N°50.	Barras consideradas para análisis de cortocircuito	106
FIGURA N°51.	Nodo considerado para análisis de transitorios.....	108
FIGURA N°52.	Comportamiento de la tensión y corriente de cortocircuito en todos los puntos con fotovoltaico (línea roja) y sin fotovoltaico (línea verde).....	109
FIGURA N°53.	Frecuencia en la barra 1.1, con fotovoltaico (línea roja) y sin fotovoltaico (línea verde)	110
FIGURA N°54.	Frecuencia en la barra general oficinas, comedor y servicios, con fotovoltaico (línea roja) y sin fotovoltaico (línea verde).....	110
FIGURA N°55.	Frecuencia en la barra de distribución, con fotovoltaico (línea roja) y sin fotovoltaico (línea verde).....	111

RESUMEN

La energía eléctrica es un recurso denominado prioritario de interés general, ya que funge un papel básico y fundamental para el desarrollo de diversas actividades de primera necesidad que complementa las actividades elementales y de correcto funcionamiento de una sociedad (RAMÍREZ CORONA, y otros, 2014). Recientemente, además del enfoque de la política macroeconómica, la búsqueda de la seguridad energética urbana y regional se orienta al logro del autoabastecimiento energético por parte de organizaciones e instituciones privadas y públicas (Mejía-Rodríguez, y otros, 2015). La generación de energía eléctrica, es un proceso demasiado costoso, pero sobre todo es un proceso que agota cada vez más los recursos naturales con los que contamos, ahora la tendencia de las empresas generadoras de energía es buscar alternativas para la obtención del recurso de una manera mucho más limpia sin ser tan costosa (RAMOS LÓPEZ, y otros, 2014). Debido a la mayor demanda eléctrica del Perú, el cambio de la fuente energética es de importancia para el desarrollo del sector eléctrico (Huamonte Castro, 2019), dada la necesidad de incrementar significativamente la componente de energías renovables en la canasta energética para contrarrestar la excesiva dependencia de los combustibles fósiles y combatir el cambio climático (ALVARADO FAJARDO, 2014) se determinó que dadas las ventajas ambientales que trae el uso de la generación solar fotovoltaica es de esperarse que se masifique su uso en el mediano plazo, especialmente en cargas industriales, comerciales y residenciales de gran tamaño (Moncada Osorio, 2015), por esta razón se debe realizar estudios dinámicos de la generación fotovoltaica ante la posible incursión de industrias que quieran aplicar esta energía renovable (Fonseca Muñoz, 2017).

Por esa razón en el presente trabajo se describen los principios de energía fotovoltaica, la modelación de las centrales fotovoltaicas en digsilent power factory (Fonseca Muñoz, 2017), tomándose en cuenta las características de la planta industrial con una conexión sobre la red interior de la planta, ya que el destino de la energía generada por nuestro sistema fotovoltaico será el autoconsumo (Huamonte Castro, 2019).

ABSTRACT

Electrical energy is a resource called a priority of general interest, since it plays a basic and fundamental role for the development of various activities of first necessity that complements the elementary activities and correct functioning of a society (RAMÍREZ CORONA, and others, 2014).

Recently, in addition to the macroeconomic policy approach, the search for urban and regional energy security is oriented to the achievement of energy self-sufficiency by private and public organizations and institutions (Mejía-Rodríguez, et al., 2015). 14).

The generation of electrical energy is too expensive a process, but above all it is a process that increasingly depletes the natural resources we have, now the tendency of energy generating companies is to look for alternatives to obtain the resource in a much cleaner way without being so expensive (RAMOS LÓPEZ, and others, 2014).

Due to peru's higher electricity demand, the change of the energy source is of importance for the development of the electricity sector (Huamonte Castro, 2019), given the need to significantly increase the renewable energy component in the energy basket to counteract the excessive dependence on fossil fuels and combat climate change (ALVARADO FAJARDO, 2014) it was determined that given the environmental advantages brought by the use of photovoltaic solar generation, it is expected that its use will be massified in the medium term, especially in large industrial, commercial and residential loads (Moncada Osorio, 2015), for this reason dynamic studies of photovoltaic generation should be carried out in the face of the possible incursion of industries that want to apply this renewable energy (Fonseca Muñoz, 2017)

For this reason, this paper describes the principles of photovoltaic energy, the modeling of photovoltaic power plants in digsilent power factory (Fonseca Muñoz, 2017), taking into account the characteristics of the industrial plant with a connection on the interior network of the plant, since the destination of the energy generated by our photovoltaic system will be self-consumption (Huamonte Castro, 2019)

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Realidad Problemática

Debido a la mayor demanda eléctrica del Perú, el cambio de la fuente energética es de importancia para el desarrollo del sector eléctrico, previéndose la incorporación a mediano y largo plazo de fuentes de energía eléctrica no convencional (Huamonte Castro, 2019).

Entre las políticas que pueden articularse para asegurar la sostenibilidad del modelo energético, la política de fomento de las energías renovables se cuenta entre las principales (Cornejo Lalupú, 2013). En el Perú el Decreto Legislativo N°1002 declara de interés nacional y necesidad pública el desarrollo de nueva generación eléctrica mediante el uso de Recursos Energéticos Renovables (RER), dentro de las cuales, destaca la energía fotovoltaica (Valdiviezo Salas, 2014).

Estas instalaciones deben ser estudiadas eléctricamente mediante cálculos y software de simulación, ya que la generación e interconexión de sistemas fotovoltaicos puede traer consecuencias negativas para la operación del sistema de distribución (Huamonte Castro, 2019)

De lo acontecido es que nos preguntamos cómo, de qué manera la simulación de un sistema fotovoltaico podrá mejorar la sostenibilidad energética en industria, es por ello que formulamos el siguiente problema de investigación.

1.2. Formulación del Problema

1.2.1. Problema General

P.G.1 ¿De qué manera la simulación de un sistema fotovoltaico conectado a la red interior mejorará la sostenibilidad energética en plantas industriales?

1.2.2. Problemas Específicos

P.E.1. ¿Cómo el análisis de Reducción de la facturación eléctrica mejorará la sostenibilidad energética en plantas industriales?

P.E.2. ¿Es posible verificar mediante simulaciones dinámicas el correcto funcionamiento del modelo de los sistemas fotovoltaicos implementados en DIgSILENT y que mejore la sostenibilidad energética en plantas industriales?

P.E.3. ¿Cómo el establecer las ventajas y desventajas de la generación solar fotovoltaica mejorará la sostenibilidad energética en plantas industriales?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

O.G.1 Realizar la simulación de un sistema fotovoltaico conectado a la red interior para mejorar la sostenibilidad energética en plantas industriales.

1.3.2. Objetivos Específicos

O.E.1 Analizar la Reducción de la facturación eléctrica para mejorar la sostenibilidad energética en plantas industriales.

O.E.2 Verificar mediante simulaciones dinámicas el correcto funcionamiento del modelo de los sistemas fotovoltaicos implementados en DIgSILENT para mejorar la sostenibilidad energética en plantas industriales.

O.E.3 Establecer las ventajas y desventajas de la generación solar fotovoltaica para mejorar la sostenibilidad energética en plantas industriales.

1.4. Justificación

1.4.1. Justificación Teórica

Según **(Hernández, 2015)** Indica que “La justificación teórica se hace cuando el propósito del estudio es generar reflexión y debate académico sobre el conocimiento existente, confrontar una teoría, contrastar resultados, hacer epistemología del conocimiento existente o cuando se busca mostrar las soluciones de un modelo.

De lo expuesto por el autor, el presente trabajo de investigación tiene una justificación teórica pues plantea la reflexión de los métodos de modelación para emular respuestas aproximadas a las reales en el campo de la generación fotovoltaica relacionándolo con la sostenibilidad energética para poder mejorarlos, esto podrá servir de base o ser contrastado con estudios posteriores.

1.4.2. Justificación Práctica

Según **(Bernal, 2012)** Indica que “la justificación práctica, se debe de hacer cuando el desarrollo de la investigación ayuda a resolver un problema o por lo menos, propone estrategias que al aplicarse contribuirían a resolverlo.”

De lo expuesto por el autor, el presente trabajo de investigación tiene una justificación práctica pues en él se desarrolla una solución que contribuye en la mejora de la sostenibilidad energética basado en el modelado de sistemas fotovoltaicas.

1.4.3. Justificación Metodológica

Según **(Bernal, 2012)** “la justificación metodológica del estudio se da cuando el proyecto que se va a realizar propone un nuevo método o una nueva estrategia para generar conocimiento valido y confiable”

De lo expuesto por el autor, el presente trabajo de investigación tiene una justificación metodológica, pues en él se propone una solución completamente estructurada que se basa en estudios previos y que se

adapta de acuerdo a las necesidades actuales, lo que permite nuevos conocimientos en esta área.

1.5. Limitantes de la Investigación

1.5.1. Límites de la Investigación

Según (Ávila, 2001), "Una limitación de la investigación consiste en que se deja de estudiar un aspecto del problema debido por alguna razón. Con esto se quiere decir que toda limitación debe estar justificada por una buena razón. "

De lo expuesto por el autor, La falta de investigaciones a nivel nacional limita, en ocasiones, un análisis profundo de la situación actual del desarrollo de sistemas de energía fotovoltaica y el papel que juega en la sostenibilidad energética.

1.5.2. Delimitaciones de la Investigación

Según (Sabino, 1986), "La delimitación habrá de efectuarse en cuanto al tiempo y el espacio, para situar nuestro problema en un contexto definido y homogéneo. "

De lo expuesto por el autor, mis delimitaciones son las siguientes:

Delimitación Espacial

La delimitación espacial de mi proyecto de investigación es el espacio digital donde esta simulado el sistema fotovoltaico, que comprende todas las características necesarias para realizar las pruebas.

Delimitación Temporal

El presente trabajo de investigación se está realizando en el mes de febrero del

2022 y tendrá una duración de 1 año y 6 meses, lo cual será insuficiente para realizar una implementación del sistema fotovoltaico a gran escala que pueda sustituir por completo el suministro eléctrico convencional.

Delimitación Social

En el presente trabajo de investigación se está trabajando con la simulación de sistemas fotovoltaicos que mejora la sostenibilidad energética, optimizando el rendimiento de la red eléctrica y disminuyendo la emisión de huella de carbono beneficiando a la población que reside cerca de la planta industrial.

II. MARCO TEORICO

2.1. Antecedentes: Internacionales y Nacionales

ANTECEDENTES INTERNACIONALES

(DE LEÓN MORALES, 2008) en su trabajo de investigación titulado “GENERACIÓN ELÉCTRICA FOTOVOLTAICA EN LA FACULTAD DE INGENIERÍA USAC Y ESTUDIO DEL APROVECHAMIENTO” para la obtención de su maestría en ciencia y tecnología del medio ambiente, que tuvo como objetivo el diagnóstico de factibilidad para la iluminación del Edificio T – 6, Auditorium Francisco Vela, de la Facultad de Ingeniería, USAC, por medio de generación de energía fotovoltaica, en este trabajo se presenta antecedentes de la necesidad global de demanda energética, estudios previos relacionados con el tema y referencias de la ley relacionada con la generación de energía eléctrica alternativa. En este trabajo se recomendó desarrollar el Proyecto de Instalación del Sistema Fotovoltaico, con entidades no lucrativas, locales o internacionales, interesadas en donar montos totales o parciales para proyectos en beneficio del medio ambiente.

De lo expuesto por el autor, es importante reconocer que es importante el diagnóstico de factibilidad para la iluminación del Edificio T – 6, por medio de generación de energía fotovoltaica, este hecho me permite tomar referencia para el estudio de mi variable. “sostenibilidad energética”.

(PEÑAFIEL SARAGURO, y otros, 2012) en su trabajo de investigación titulado “ANÁLISIS, DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ENERGÍA AUXILIAR AUTOMATIZADO PARA COLECTORES SOLARES Y CALEFONES EN EL USO RACIONAL Y EFICIENTE DE ENERGÍA” para la obtención de su título de ingeniero mecánico, que tuvo como objetivo diseñar un sistema de energía auxiliar automatizado adecuado para los actuales colectores solares. Además, seleccionar los equipos y componentes más adecuados para el sistema de calentamiento de agua por colectores solares, en este trabajo se recomendó la intervención de

entes gubernamentales con proyectos y programas que logren su rápida utilización en los hogares, comercios e industrias, y de esta manera compensar la dificultad que ocasiona la competencia desleal de las subvenciones a los combustibles fósiles.

De lo expuesto por el autor, es importante reconocer que es importante diseñar un sistema de energía auxiliar automatizado que cumpla con las características necesarias para su implementación, este hecho me permite tomar referencia para el estudio de mi variable. “simulación”.

(TOLÓN MARTÍN, 2013) en su trabajo de investigación titulado “OPERACIÓN Y GESTIÓN DE MICRORREDES ENERGÉTICAS URBANAS EN UN ENTORNO DE SOSTENIBILIDAD ENERGÉTICA Y AMBIENTAL” para la obtención de su grado académico de maestro en ingeniería de energía, que tuvo como objetivo la revisión de las tecnologías asociadas a la generación energética distribuida, características técnicas, grado de madurez tecnológica y de mercado, utilizando una metodología que conceptualiza la operación y gestión energética de microrredes termoeléctricas bajo los principios de sostenibilidad energética, ambiental y económica, finalmente en este trabajo se recomendó considero la integración de almacenamiento distribuido en la configuración de la microrred para una mayor flexibilidad en la gestión energética.

De lo expuesto por el autor, es importante reconocer que es importante mejorar la operación y gestión energética bajo los principios de sostenibilidad energética, este hecho me permite tomar referencia para el estudio de mi variable. “sostenibilidad energética”.

(ALVARADO FAJARDO, 2014) en su trabajo de investigación titulado “ANÁLISIS, DISEÑO Y SIMULACIÓN DE SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO PARA SUMINISTRO ELÉCTRICO EN APOYO A PROGRAMA NUTRICIONAL EN LA ESCUELA RURAL EL CARDONAL, TIBANÁ (BOYACÁ) – COLOMBIA” para la obtención de su grado

académico de maestro en ingeniería con énfasis en energías alternativas, que tuvo como objetivo verificar mediante un modelo computarizado de sistema solar fotovoltaico la satisfacción de las necesidades eléctricas básicas de la Escuela Rural El Cardonal, Municipio Tibaná (Boyacá), para la conservación de alimentos en apoyo a plan nutricional para los estudiantes, utilizando una metodología que efectúa el dimensionamiento de cada uno de los elementos del sistema solar fotovoltaico y se delimita la carga eléctrica a ser abastecida, finalmente en este trabajo se recomendó tener en cuenta las pérdidas en cada uno de los elementos (paneles fotovoltaicos, regulador– inversor y baterías), para de esta manera generar una adecuada fiabilidad en la operación del sistema, además garantizando suficiencia energética.

De lo expuesto por el autor, es importante reconocer que es importante realizar un modelo computarizado de sistema solar fotovoltaico para verificar la satisfacción de las necesidades eléctricas básicas, este hecho me permite tomar referencia para el estudio de mi variable. “Simulación”.

ANTECEDENTES NACIONALES

(Cornejo Lalupú, 2013) en su trabajo de investigación titulado “SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO DE CONEXIÓN A RED EN EL CENTRO MATERNO INFANTIL DE LA UNIVERSIDAD DE PIURA” para la obtención de su título como ingeniero Mecánico – Eléctrico, que tuvo como objetivo conocer los parámetros que determinan el funcionamiento de los componentes en el sistema fotovoltaico de conexión a red para hacer una correcta selección de los mismos en el diseño y dimensionamiento para poder cubrir las necesidades del usuario, utilizando una metodología que primero describe la instalación del sistema, la elección de los equipos, luego estudia la rentabilidad de la instalación fotovoltaica y por último se describe el mantenimiento de las instalaciones fotovoltaicas conectadas a red. En este trabajo se recomendó que los conductores sean de cobre y tengan la sección adecuada para evitar caídas de tensión y

calentamientos, los conductores de la parte de corriente continua deberán tener la sección suficiente para que la caída de tensión sea inferior al 1,5% y los de la parte de corriente alterna para que la caída de tensión sea inferior al 2%.

De lo expuesto por el autor, es importante reconocer que es importante determinar el funcionamiento de los componentes en el sistema fotovoltaico de conexión a red para hacer una correcta selección de los mismos en el diseño y dimensionamiento, este hecho me permite tomar referencia para el estudio de mi variable. “simulación”.

(Felipe Huamán, 2020) en su trabajo de investigación titulado “Diseño de un sistema fotovoltaico on grid de autoconsumo e inyección 0 conectado a la red eléctrica del centro de salud Haquira, Apurímac 2020” para la obtención de su Título Profesional de Ingeniero Mecatrónico, que tuvo como objetivo determinar la cantidad de grupos de módulos solares y sus conexiones en serie y/o paralelo, de forma que los parámetros eléctricos resultantes de estas conexiones sean los adecuados y así lograr un buen funcionamiento del sistema fotovoltaico, utilizando una metodología que dará a conocer el problema, el objetivo del proyecto, alcances y limitaciones, luego se reúne la información y finalmente se mostrara el análisis, diseño, y selección para el funcionamiento del sistema. En este trabajo se recomendó no instalar módulos fotovoltaicos de distintas marcas o modelos.

De lo expuesto por el autor, es importante reconocer que es importante realizar un análisis previo de todas las características que son necesarias para el funcionamiento del sistema, este hecho me permite tomar referencia para el estudio de mi variable. “Simulación”.

(Valdiviezo Salas, 2014) en su trabajo de investigación titulado “DISEÑO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA EL SUMINISTRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA A 15 COMPUTADORAS PORTÁTILES EN LA PUCP” para la obtención de su Título Profesional de ingeniero mecánico,

que tuvo como objetivo fomentar el interés e investigación en energía renovable por parte de la comunidad con estudios superiores, mediante el diseño de un sistema fotovoltaico aislado para abastecer a 15 computadoras portátiles en la PUCP, utilizando una metodología basado en la norma IEC 60364-5-52 “Instalaciones eléctricas en edificios” Parte 5-52, “Selección y utilización de material eléctrico – canalizaciones. En este trabajo se recomendó que la implementación no debe ser una decisión netamente económica, sino que se tomen cuenta varios factores como la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y Fomentar el interés del uso e investigación de los recursos energéticos renovables (RER).

De lo expuesto por el autor, es importante reconocer que es importante realizar estudios para la implementación de sistemas fotovoltaicos para poder disminuir el impacto ambiental, este hecho me permite tomar referencia para el estudio de mi variable. “sostenibilidad energética”.

(RAMOS LÓPEZ, y otros, 2014) en su trabajo de investigación titulado “DISEÑO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO INTEGRADO A LA RED PARA EL AREA DE ESTACIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD TECNOLOGICA DE SALAMANCA” para la obtención de su grado académico de maestría en energías renovables, que tuvo como objetivo calcular el número de paneles, así como el tipo de panel más adecuado de acuerdo a las características de la zona, del mismo modo determinar, que tipo de inversor es el más conveniente para el sistema y realizar el estudio de cargas para el edificio de docencia dentro de las instalaciones de la Universidad Tecnológica de Salamanca, utilizando una metodología basado en un estudio completo de las cargas que se generan día con día en el edificio de docencia de la UTS revisando los equipos que estén en uso diario para determinar eficientemente las cargas. En este trabajo se recomendó verificar datos periódicamente para mantener el sistema fotovoltaico vigente a los cambios climáticos.

De lo expuesto por el autor, es importante reconocer que es importante el uso de energía fotovoltaica para maximizar la continuidad de servicio eléctrico, este hecho me permite tomarlo de referencia para el estudio de mi variable. “sostenibilidad energética”.

2.2. Bases Teóricas

TEORÍA DE LA CONVERSIÓN DE ENERGÍA SOLAR EN UN SISTEMA FOTOVOLTAICO

Radiación solar

El sol

El sol es una inmensa fuente de energía inagotable con un diámetro de 1.39×10^9 m situado a la distancia media de 1.5×10^{11} m respecto de la Tierra, esta distancia se llama unidad astronómica (UA).

FIGURA N°1. El sol



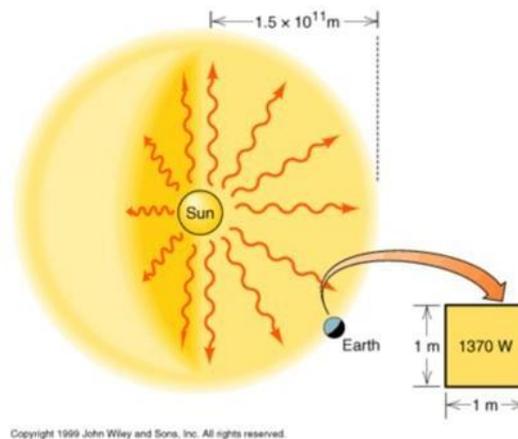
Partes del sol (Fuente: Universidad de Jaen)

Los datos más resaltantes del Sol son:

- ✓ El Sol = Estrella = Horno Nuclear.
- ✓ Su diámetro es 1'390,000 km.
- ✓ Su Masa es 300.000 veces la masa de la tierra.
- ✓ Su temperatura superficial es de 5.600°K
- ✓ Su vida estimada es de 5.000 millones de años.

- ✓ La distancia Tierra - Sol es de 150 millones de km.
- ✓ La luz solar tarda 8 minutos en llegar a la tierra.
- ✓ El Sol genera su energía mediante reacciones nucleares de fusión que se llevan a cabo en su núcleo.
- ✓ La generación de energía proviene de la pérdida de masa del Sol, que se convierte en energía de acuerdo con la famosa ecuación de Einstein, $E=mc^2$, donde "E" es la cantidad de energía liberada cuando desaparece la masa "m"; "c" es la velocidad de la luz.
- ✓ Su flujo radiante es de $3,8 \times 10^{26} \text{W}$ equivalente a una densidad de 62,5MW por cada metro cuadrado de superficie solar. De toda ella solo una pequeña parte, 1,37KW por metro cuadrado aproximadamente, llega a la superficie de la tierra como consecuencia de la distancia que los separa. La radiación que llega varía de forma aleatoria debido a muy diversos efectos que provoca sobre ella la atmósfera terrestre. Una gran parte es absorbida y dispersa por los propios agentes variables que allí se encuentran, tales como la polución y la nubosidad.

FIGURA N°2. Constante solar



Constante solar (Fuente: Universidad de Jaen)

Movimiento Tierra – Sol

La Tierra órbita alrededor del Sol con dos movimientos diferentes que lleva a cabo al mismo tiempo:

- ✓ Uno de rotación, alrededor de un eje que pasa por los polos llamado, eje polar y con una velocidad aproximada de una vuelta por día.
- ✓ Y otro de traslación, alrededor del Sol describiendo una órbita elíptica en la que este ocupa uno de los focos. El plano que contiene esta órbita se llama plano de la elíptica y tarda un año en recorrerlo por completo.

El eje polar o eje de rotación terrestre sobre el que gira la Tierra, mantiene una dirección aproximadamente constante y forma un ángulo de 23.45° con el plano de la elíptica, denominado oblicuidad de la elíptica. Debido a esta oblicuidad el ángulo formado por el plano ecuatorial de la Tierra con la eclíptica, es decir, la recta que une los centros de la Tierra y el Sol está cambiando permanentemente entre $+23.45^\circ$ y -23.45° . Este ángulo se conoce como declinación solar (d).

En un solo día se considera que la declinación solar solo puede variar como máximo en 0.5° , aunque para facilitar los cálculos se considera constante para cada día del año.

FIGURA N°3. Movimiento tierra

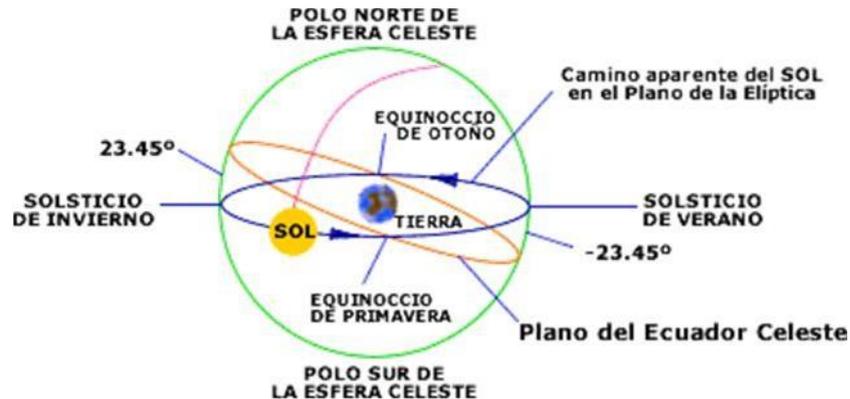


Movimiento Tierra Sol (Fuente: Universidad de Jaen)

La esfera celeste y el valor de la declinación

Una forma clásica de representación del cielo consiste en imaginar una esfera con la Tierra fija en su centro. Esta esfera se conoce con el nombre de esfera celeste y cada uno de sus puntos representa una dirección del cielo vista desde la Tierra. Su intersección con el plano del ecuador terrestre define el ecuador celeste. Los puntos de intersección con el eje polar terrestre se llaman polos celestes.

FIGURA N°4. La esfera celeste



(Fuente: Universidad de Jaen)

El movimiento de la Tierra alrededor del Sol puede describirse, utilizando esta forma de representación, como un movimiento del Sol alrededor de la Tierra; siendo el máximo el círculo cuando forma un ángulo de 23.45° con el ecuador celeste y que se denomina elíptica.

FIGURA N°5. La esfera celeste – eclíptica



(Fuente: Universidad de Jaen)

El Sol recorre este círculo una vez al año y la esfera celeste gira una vez al día alrededor de la Tierra que permanece fija. De esta forma, el Sol describe diariamente y alrededor de la Tierra, un círculo cuyo diámetro cambia de día a día y es máximo en los equinoccios y mínimo en los solsticios. Los sentidos de giro del Sol sobre la elíptica y de la esfera celeste alrededor de la Tierra son contrarios.

Existe una expresión que permite calcular el valor de la declinación solar (en grados) para cualquier día del año de una manera precisa. Esta expresión es la ecuación que mostramos a continuación:

$$\delta(^{\circ}) = 006918 - 0.399912 \cos \tau + 0.070257 \operatorname{sen} \tau - 0.006758 \cos 2\tau + 0.000907 \operatorname{sen} 2\tau - 0.002697 \cos 3\tau + 0.00148 \operatorname{sen} \tau \frac{180^{\circ}}{\pi} \dots (1)$$

En esta expresión, en radianes, se conoce como ángulo diario a:

$$\tau = 2\pi \frac{(dn - 1)}{365}$$

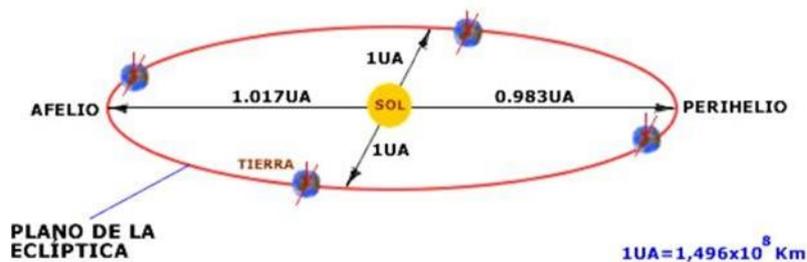
Distancia sol-tierra

La pequeña excentricidad de la elíptica (0.01673) hace que la distancia entre el Sol y la Tierra varíe de acuerdo con la ecuación que mostramos a continuación:

$$\varepsilon_0 = \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 = 1.0001110 + 0.0034221 \cos \tau + 0.001280 \operatorname{sen} \tau + 0.000719 \cos 2\tau + 0.000077 \operatorname{sen} 2\tau \dots (2)$$

$$\tau = 2\pi \frac{(dn - 1)}{365}$$

FIGURA N°6. La distancia Sol – Tierra



(Fuente: Universidad de Jaen)

Siendo:

r = distancia entre el sol y la tierra

$r_0 = 1.5 \times 10^8$ Km que es el valor medio de la distancia sol-tierra y suele denominarse unidad astronómica (UA).

Las expresiones (1) y (2) tienen en cuenta el hecho de que la velocidad angular de la Tierra en su camino sobre la elíptica es variable y se ajusta a la conocida ley de Kepler, según la cual, los planetas barren áreas iguales en tiempos iguales. Sin embargo, para la mayoría de las aplicaciones de la ingeniería, la aproximación de considerar que la Tierra gira alrededor del Sol con velocidad angular constante es muy cómoda y conduce a una exactitud suficiente.

En este caso, las ecuaciones (1) y (2) pueden sustituirse por unas más sencillas de manejar, que son:

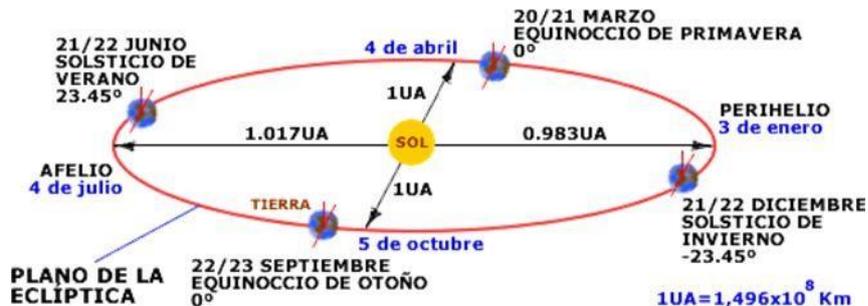
$$\delta(^{\circ}) = 23.45 \operatorname{sen} \left(\frac{360}{365} (dn + 284) \right)$$

$$\varepsilon_0 = 1 + 0.33 \operatorname{cos} \left(\frac{360}{365} \right)$$

Calentamiento de la tierra y duración del día y la noche

La oblicuidad de la elíptica permite explicar, por un lado, el distinto calentamiento de la Tierra en función de su posición en la órbita (las estaciones del año: Primavera, verano, otoño e invierno) y por otro, lado distinta duración del día y de la noche a lo largo del año.

FIGURA N°7. Calentamiento de la Tierra



(Fuente: Universidad de Jaen)

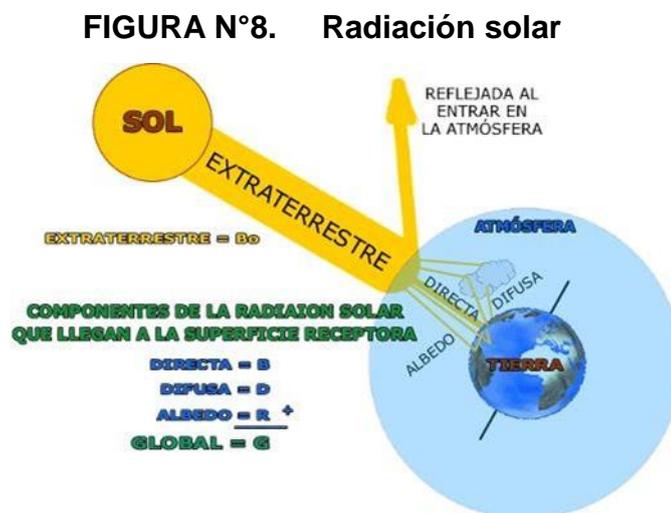
La declinación solar se anula en los equinoccios de primavera (22/23 de septiembre) y de otoño (20/21 de marzo). En estos días el Sol se encuentra en el ecuador, y la duración del día es igual a la de la noche en toda la Tierra, además, las posiciones de salida y de puesta del Sol coinciden con el Este y con el Oeste, respectivamente.

En el solsticio de invierno (21/22 de Junio) la declinación es de $+23.45^\circ$ y el Sol se encuentra en el Trópico de Cáncer lo que en el hemisferio Sur se traduce en el día más corto y la noche más larga.

En el solsticio de verano (21/22 de diciembre) la declinación es de -23.45° y el Sol se encuentra en el trópico de capricornio lo que se traduce en el hemisferio Sur en el día más largo y la noche más corta del año, en el hemisferio norte ocurriría lo contrario.

Naturaleza de la radiación solar

La radiación extra-terrestre que procedente directamente del Sol, es reflejada al entrar en la atmósfera por la presencia de las nubes, el vapor de agua, etc. Y dispersada por las moléculas de agua, el polvo en suspensión, etc.



(Fuente: Universidad de Jaen)

Por todo esto la radiación solar que llega a una superficie terrestre procede de tres componentes:

- ✓ Radiación directa (B): Formada por los rayos procedentes del Sol directamente, es decir, que no llegan a ser dispersados.
- ✓ Radiación difusa (D): Aquella procedente de toda la bóveda celeste excepto la que llega del Sol. Originada por los efectos de dispersión mencionados anteriormente.
- ✓ Radiación del albedo (R): Procedente del suelo, debida a la reflexión de parte de la radiación incidente sobre montañas, lagos, edificios, etc. Depende muy directamente de la naturaleza de estos elementos. Esta se obtiene del cociente entre la radiación reflejada y el incidente sobre una superficie. La suma de estas tres componentes da lugar a la radiación global:

$$G=B+D+R$$

La célula solar

Principios básicos de las células solares

Las células solares (en adelante C L), también denominadas células fotovoltaicas, se construyen con semiconductores, que como su nombre indica: ni son materiales conductores ni aislantes.

Los dos elementos semiconductores más importantes son el germanio, Ge, y el silicio, Sí. Ambos, a temperatura ambiente, tienen muy pocos electrones libres, que son los responsables de su pequeña conductividad.

En síntesis, la energía puede ser transferida a un electrón del material semiconductor, cuando el fotón choca con un átomo, con suficiente energía para dislocar un electrón de una posición fija en el material (banda de valencia), a una posición de movimiento libre en el material (banda de conducción).

El rendimiento de las células, como veremos, está limitado debido fundamentalmente a que:

- ✓ Hay fotones con energía menor que la correspondiente a la anchura de la banda prohibida del material (Si 1.1ev, GaAs 1.4).

- ✓ La energía transmitida a los electrones es mayor que la necesaria (ancho banda prohibida), y el exceso no pueda utilizarse y casi toda se disipa en forma de calor.
- ✓ Hay una resistencia interna de la célula.
- ✓ Exista reflexión superficial de la radiación incidente.
- ✓ Hay recombinación (no todos los pares e-h llegan a la zona donde la tensión intrínseca los separa).
- ✓ Hay imperfecciones en el cristal, etc.

Cuerpos conductores, semiconductores y aislantes

Los cuerpos conductores son aquellos cuyos átomos permiten fácilmente el paso de electrones a su través, un buen ejemplo de conductor es el Cobre (Cu) que dispone de un electrón inestable en su cuarta órbita con una gran tendencia a desprenderse.

Un semiconductor es una sustancia que se comporta como conductor o como aislante dependiendo de diversos factores, como por ejemplo el campo eléctrico o magnético, la presión, la radiación que le incide, o la temperatura del ambiente en el que se encuentre. El elemento semiconductor más usado es el Silicio, el segundo el Germanio, aunque idéntico comportamiento presentan las combinaciones de elementos de los grupos II y III con los de los grupos VI y V respectivamente (AsGa, PIn, AsGaAl, TeCd, SeCd y SCd). La característica común a todos ellos es que son tetravalentes, teniendo el silicio una configuración electrónica s^2p^2 .

Los cuerpos aislantes son los que no permiten el paso de la corriente eléctrica, por ejemplo: madera, plástico, etc.

Cuerpos semiconductores intrínsecos

Mientras que los cuerpos buenos conductores ofrecen escasa resistencia al paso de electrones, los aislantes la ofrecen elevadísima, y entre ambos extremos, se encuentran los semiconductores que presentan una resistencia intermedia.

Un ejemplo de elemento semiconductor es el Silicio (Si), la característica fundamental de los cuerpos semiconductores es la de poseer cuatro electrones en su órbita de valencia. Con esta estructura el átomo es inestable, pero para hacerse estable se le presenta un dilema: y es que le cuesta lo mismo desprenderse de cuatro electrones y quedarse sin una órbita, que absorber otros cuatro electrones para hacerse estable al pasar a tener ocho electrones. En estas especiales circunstancias, ciertos elementos como el Silicio y el Germanio (Ge) agrupan sus átomos de manera muy particular, formando una estructura reticular en la que cada átomo queda rodeado por otros cuatro iguales, propiciando la formación de los llamados enlaces covalentes. En estas circunstancias, la estructura de los cuerpos semiconductores, al estabilizarse, debería trabajar como buen aislante, pero no es así a causa de la temperatura. Cuanto mayor es la temperatura aumenta la agitación de los electrones y por consiguiente los enlaces covalentes rotos, dando lugar a electrones libres y huecos (falta de electrón).

Semiconductores extrínsecos

Como quiera que las corrientes que se producen en el seno de un semiconductor intrínseco a la temperatura ambiente son insignificantes, dado el bajo valor de portadores libres, para aumentarlos se les añaden otros cuerpos, que se denominan impurezas. De esta forma es como se obtienen los semiconductores extrínsecos tan importantes en la energía solar fotovoltaica.

Teoría de semiconductores

Semiconductores extrínsecos tipo N

En la figura se presenta la estructura cristalina del Silicio (Si) dopado con Antimonio (Sb) al introducirse un átomo de impurezas de este elemento, hecho por el que recibe el nombre de semiconductor extrínseco.

FIGURA N°9. Semiconductor tipo N



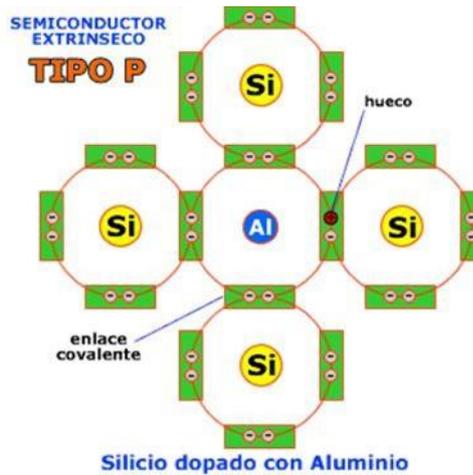
(Fuente: Universidad de Jaen)

Como se aprecia el átomo de Sb no solo cumple con los cuatro enlaces covalentes, sino que aún le sobra un electrón, que tiende a salirse de su órbita para que quede estable el átomo de Sb. Por cada átomo de impurezas añadido aparece un electrón libre en la estructura. Aunque se añadan impurezas en relación de uno a un millón, en la estructura del silicio además de los 1010 electrones y 1010 huecos libres que existen por cm^3 , a la temperatura ambiente, hay ahora que sumar una cantidad de electrones libres equivalente a la de átomos de impurezas. En estas condiciones el Si con impurezas de Sb alcanza 1016 electrones libres y 1010 huecos libres por cm^3 , siendo en consecuencia el número de portadores eléctricos negativos mucho mayor que el de los positivos, por lo que los primeros reciben la denominación de portadores mayoritarios y los segundos la de portadores minoritarios y por el mismo motivo, se le asigna a este tipo de semiconductores extrínsecos la clasificación de SEMICONDUCTOR EXTRÍNSECO TIPO N.

Semiconductores extrínsecos tipo P

En la figura se presenta la estructura cristalina del Silicio (Si) dopado con Aluminio (Al). Por cada átomo de impurezas trivalente que se añade al semiconductor intrínseco aparece en la estructura un hueco, o lo que es lo mismo, la falta de un electrón.

FIGURA N°10. Semiconductor tipo P



(Fuente: Universidad de Jaen)

Añadiendo un átomo de impurezas trivalente por cada millón de átomos de semiconductor existen: 10^{16} huecos libres y 10^{10} electrones libres por cm^3 , a la temperatura ambiente. Como en este semiconductor hay mayor número de cargas positivas o huecos, se les denomina a estos, portadores mayoritarios; mientras que los electrones libres, únicamente propiciados por los efectos de la agitación térmica son los portadores minoritarios. Por esta misma razón el semiconductor extrínseco así formado recibe el nombre de SEMICONDUCTOR EXTRINSECO TIPO P, siendo neutro el conjunto de la estructura, al igual que sucedía con el TIPO N.

Unión del semiconductor P con el N

Al colocar parte del semiconductor TIPO P junto a otra parte del semiconductor TIPO N, debido a la ley de difusión los electrones de la zona N, donde hay alta concentración de estos, tienden a dirigirse a la zona P, que a penas los tiene, sucediendo lo contrario con los huecos, que tratan de dirigirse de la zona P, donde hay alta concentración de huecos, a la zona N. Eso ocasiona su encuentro y neutralización en la zona de unión. Al encontrarse un electrón con un hueco desaparece el electrón libre, que pasa ocupar el lugar del hueco, y por lo tanto también desaparece este último, formándose en dicha zona de la unión una estructura estable y neutra.

FIGURA N°11. Unión P-N



(Fuente: Universidad de Jaen)

Como quiera que la zona N era en principio neutra y al colocarla junto a la zona P pierde electrones libres, hace que cada vez vaya siendo más positiva, mientras que la zona P, al perder huecos, se hace cada vez más negativa. Así aparece una diferencia de potencial entre las zonas N y P, separadas por la zona de unión que es neutra. La tensión que aparece entre las zonas, llamada barrera de potencial, se opone a la ley de difusión, puesto que el potencial positivo que se va creando en la zona N repele a los huecos que se acercan de P, y el potencial negativo de la zona P repele a los electrones de la zona N. Cuando ambas zonas han perdido cierta cantidad de portadores mayoritarios que se han recombinado, la barrera de potencial creada impide la continuación de la difusión y por tanto la igualación de las concentraciones de ambas zonas. La barrera de potencial es del orden de 0.2V cuando el semiconductor es de Ge y de unos 0.5V cuando es de Si.

FIGURA N°12. Barrera de potencial

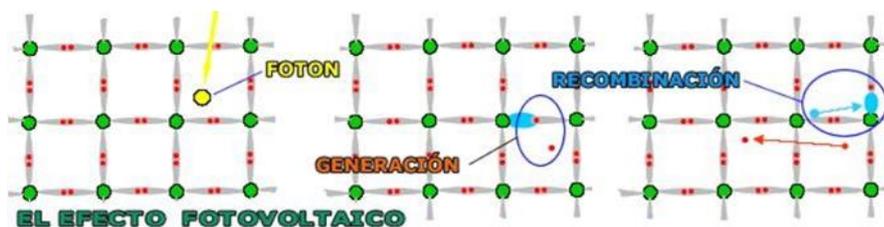


(Fuente: Universidad de Jaen)

El Efecto Fotovoltaico

Las aplicaciones de la energía solar fotovoltaica están basadas en el aprovechamiento del efecto fotovoltaico que tiene mucho que ver con lo explicado anteriormente. De forma muy resumida y desde el punto de vista eléctrico, el “efecto fotovoltaico” se produce al incidir la radiación solar (fotones) sobre los materiales que definimos al principio como semiconductores extrínsecos. La energía que reciben estos provenientes de los fotones, provoca un movimiento caótico de electrones en el interior del material.

FIGURA N°13. Efecto fotovoltaico

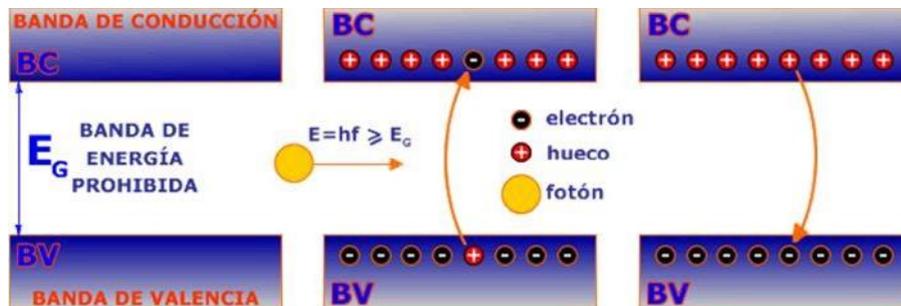


(Fuente: Universidad de Jaen)

Al unir dos regiones de un semiconductor al que artificialmente se había dotado de concentraciones diferentes de electrones, mediante los elementos que denominábamos dopantes, se provocaba un campo electrostático constante que reconducía el movimiento de electrones. Recordemos que este material formado por la unión de dos zonas de concentraciones diferentes de electrones la

denominábamos unión PN, pues la célula solar en definitiva es esto; una unión PN en la que la parte iluminada será la tipo N y la no iluminada será la tipo P.

FIGURA N°14. Bandas de energía



(Fuente: Universidad de Jaen)

De esta forma, cuando sobre la célula solar incide la radiación, aparece en ella una tensión análoga a la que se produce entre las bornes de una pila. Mediante la colocación de contactos metálicos en cada una de las caras puede “extraerse” la energía eléctrica, que se utilizará para alimentar una carga.

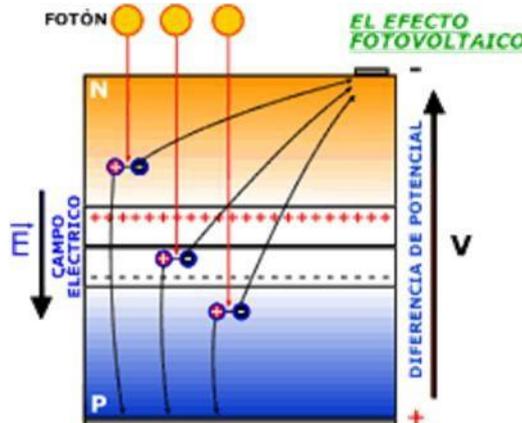
Para que se produzca el efecto fotovoltaico debe cumplirse que:

$$E_{FOTON} = \frac{hc}{\lambda} \geq E_g$$

Por otro lado, y dando una explicación desde un punto de vista cuántico, su funcionamiento se basa en la capacidad de transmitir la energía de los fotones de la radiación solar a los electrones de valencia de los materiales semiconductores, de manera que estos electrones rompen su enlace que anteriormente los tenía ligado a un átomo. Por cada enlace que se rompe queda un electrón y un hueco (falta de electrón en un enlace roto) para circular dentro del semiconductor. El movimiento de los electrones y huecos en sentidos opuestos (conseguido por la existencia de un campo eléctrico como veremos posteriormente) genera una corriente eléctrica en el semiconductor la cual puede circular por un circuito externo y liberar la energía cedida por los fotones para crear los pares electrón-hueco. El campo eléctrico necesario al que hacíamos referencia anteriormente, se consigue con la unión de dos semiconductores de

diferente dopado, como vimos al principio de esta sección: Un semiconductor tipo P (exceso de huecos) y otro tipo N (exceso de electrones). Que al unirlos crea el campo eléctrico E.

FIGURA N°15. Diferencia de potencial

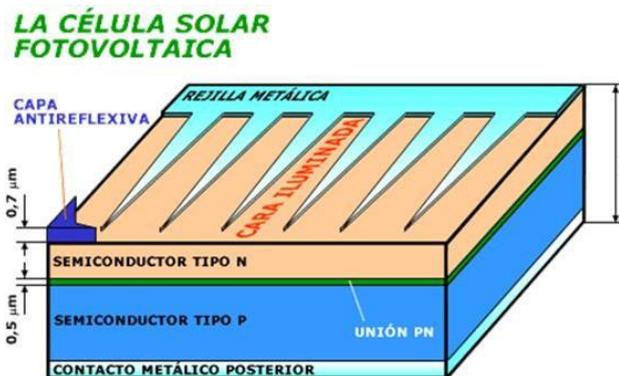


(Fuente: Universidad de Jaen)

La Célula Solar

Una célula solar es un dispositivo capaz de convertir la energía proveniente de la radiación solar en energía eléctrica. La gran mayoría de las células solares que actualmente están disponibles comercialmente son de Silicio mono o policristalino. El primer tipo se encuentra más generalizado y aunque su proceso de elaboración es más complicado, suele presentar mejores resultados en cuanto a su eficiencia.

FIGURA N°16. La célula solar



(Fuente: Universidad de Jaen)

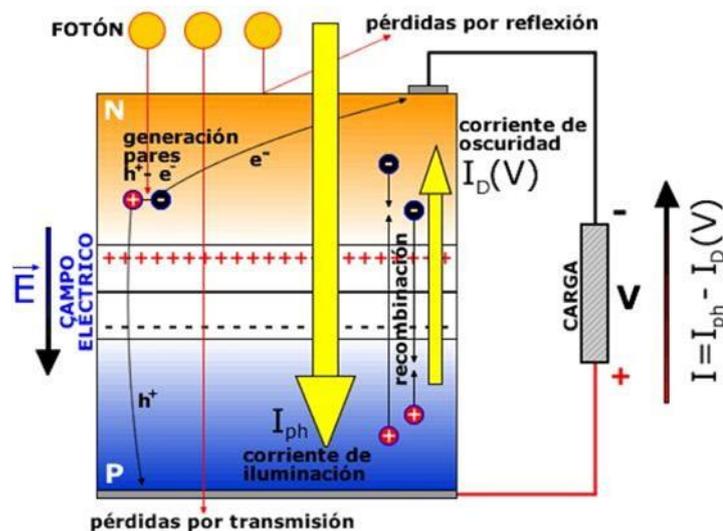
Por otra parte, la experimentación con materiales tales como el Telurio de Cadmio o el Diseleniuro de Indio-Cobre está llevando a las células fabricadas con estas sustancias a situaciones próximas ya a aplicaciones comerciales, contándose con las ventajas de poderse trabajar con tecnologías de láminas delgadas.

Principio de funcionamiento de la célula solar

Cuando conectamos una célula solar a una carga y la célula está iluminada, se produce una diferencia de potencial en extremos de la carga y circula una corriente por ella (efecto fotovoltaico).

La corriente entregada a una carga por una célula solar es el resultado neto de dos componentes internas de corriente que se oponen. Estas son:

FIGURA N°17. Funcionamiento de la célula solar



(Fuente: Universidad de Jaen)

Tensión de circuito abierto (V_{oc})

Que es el máximo valor de tensión en extremos de la célula y se da cuando esta no está conectada a ninguna carga.

Corriente de cortocircuito (Isc)

Definido como el máximo valor de corriente que circula por una célula fotovoltaica y se da cuando la célula está en cortocircuito.

La siguiente ecuación representa todos los pares de valores (I/V) en que puede trabajar una célula fotovoltaica.

$$I = I_L - I_0 \left[\exp \frac{e(V + IR_S)}{KT_c} - 1 \right] - \frac{V + IR_S}{R_p}$$

También se puede expresar con:

$$I = I_{SC} \left(1 - e^{-\frac{e(V_{oc}-V)}{mKT}} \right)$$

Punto de máxima potencia "PMP" (Pm):

Es el producto del valor de tensión máxima (VM) e intensidad máxima (IM) para los que la potencia entregada a una carga es máxima.

FIGURA N°18. Circuito equivalente de dispositivo intrínseco



Circuito equivalente (Fuente: Universidad de Jaen) e: es la carga del electrón e igual a 1.6021×10^{-19} C.

m: es un parámetro constructivo de la célula, normalmente igual a 1.

K: es la constante de Boltzman.

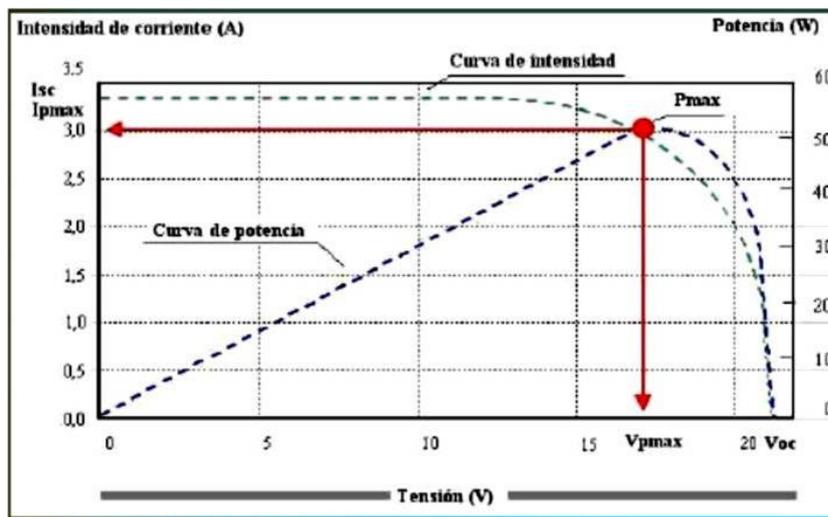
T: Temperatura en °K.

Los paneles fotovoltaicos

Los paneles o módulos fotovoltaicos son aquellos que convierten la radiación solar en energía eléctrica. Cada uno de estos paneles está compuesto por varias celdas fotovoltaicas. Una celda fotovoltaica está compuesta principalmente por materiales semiconductores como el silicio cristalino, el cual absorbe la luz solar y produce energía eléctrica a través de un proceso llamado el efecto fotovoltaico. Los paneles fotovoltaicos se conectan entre sí en matrices para producir grandes cantidades de energía eléctrica. La matriz se conecta entonces con los componentes del sistema, tales como inversores, baterías y reguladores. Un sistema fotovoltaico está conformado de varias matrices en paralelo. Cada matriz se compone de varios módulos fotovoltaicos conectados en serie.

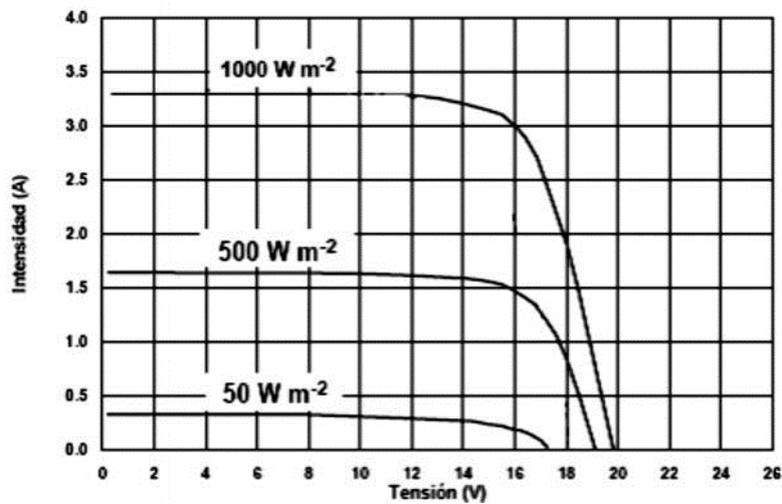
Actualmente la mayoría de los paneles fotovoltaicos son de silicio cristalino, se pueden encontrar el mono cristalino y los poli cristalinos. De estos dos paneles, el mono cristalino es el que tiene una mayor eficiencia en comparación al poli cristalino. Cuando se trabaja con módulos fotovoltaicos es importante entender que este está definido por ciertas características eléctricas, tales como la tensión máxima punto de potencia (V_{mpp}) y la corriente máxima punto de potencia (I_{mpp}), tensión de circuito abierto (V_{oc}) y la corriente de cortocircuito (I_{cc}).

FIGURA N°19. Curva corriente vs voltaje de un módulo fotovoltaico



(Fuente: Universidad de Jaen)

FIGURA N°20. Curva corriente vs voltaje de un módulo fotovoltaico



(Fuente: Universidad de Jaen)

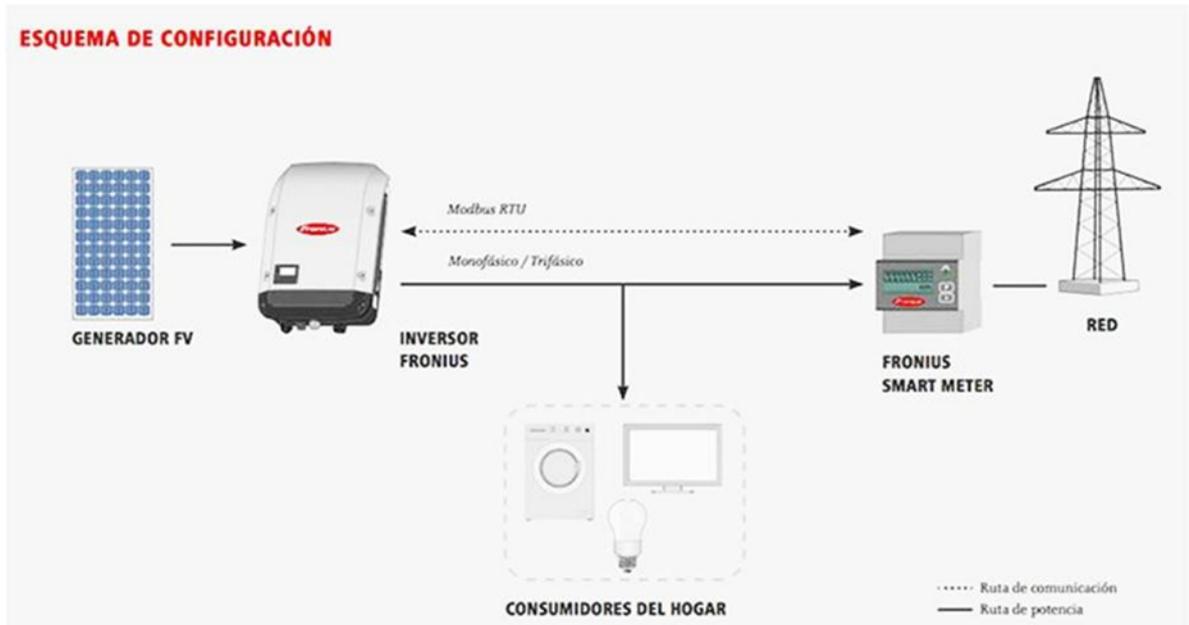
Inversores de conexión a la red

Los inversores de conexión a red son aquellos que permiten transformar la electricidad proveniente del generador solar (dependiendo del modelo y marca del inversor) en electricidad para el consumo en viviendas o para verter a la red eléctrica y obtener una rentabilidad por ello.

Dichos inversores necesitan estar sincronizados con la red eléctrica a la cual se vaya la electricidad, en sistemas aislados donde no hay red eléctrica convencional no podremos hacer uso de dichos inversores.

Este tipo de instalaciones solares permiten no tener baterías, lo que el precio de la instalación se reduce considerablemente, teniendo unos plazos de amortización mucho mejores que la misma instalación con baterías.

FIGURA N°21. Esquema de configuración



Funcionamiento de un inversor de conexión a la Red

Impacto de la generación solar fotovoltaica en las redes de distribución

Debido a que la masificación de la generación solar fotovoltaica puede causar algunos problemas en la operación del sistema de distribución, se hace necesario mencionar cuales serían estos problemas. Algunos de los problemas que se pueden presentar están relacionados con la estabilidad del sistema de distribución, como por ejemplo perturbaciones en las señales de tensión, corriente y frecuencia de la red. Es importante considerar que estas señales permanezcan dentro de unos límites aceptables después de ocurrido un fallo en el sistema de distribución, otro aspecto a considerar es si la presencia de los sistemas fotovoltaicos puedan afectar las protecciones del sistema, ya que existe la posibilidad que, ante la ocurrencia de una falla, esta no pueda ser despejada correctamente, es por ello que es necesario las simulaciones de perfil de tensión, cortocircuito y transitorios realizadas en DIgSILENT.

Cálculo de los valores

- Cálculo de la energía total diaria del sistema fotovoltaico

Se determina utilizando el valor de la energía diaria en (Kwh/día) se determina utilizando el cuadro de máxima demanda de la planta, se debe sumar las cargas de las oficinas administrativas, comedor, edificios de servicios y vigilancia, así como cargas proyectadas que más adelante se piensa instalar.

- Calculo de la carga diaria del sistema

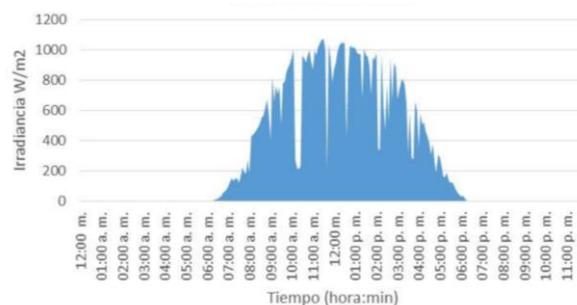
La carga diaria del sistema se calcula con la siguiente formula, donde se debe de conocer la tensión del panel fotovoltaico y la energía diaria consumida (Huamonte Castro, 2019).

$$\text{Carga diaria} = \frac{\text{Demanda total diaria}}{\text{Voltaje del modulo fotovoltaico}}$$

- Cálculo de las HSP del mes critico

Es importante para estimar la energía que podrían generar los paneles fotovoltaicos, para calcular el valor las HSP del mes crítico (Ministerio de Energía y Minas de Guatemala, 2020), es necesario hallar la irradiación solar en (kWh/m²) de varios meses del año, para determinar la irradiación solar en (kWh/m²) de cada mes, se debe calcular primero la irradiancia por día como se ve en la figura.

FIGURA N°22. irradiancia por día



- **Cálculo del número de módulos del sistema fotovoltaico**

Una vez hallados los valores de la carga diaria en (Ah) y el valor de las HSP para el mes crítico, se procede a realizar el cálculo del número de módulos que tendrá el sistema Fotovoltaico (Moncada Osorio, 2015).

Numero de módulos= [Corriente de carga del sistema (A) / Corriente SOC (A)]

Teniendo en cuenta la cantidad de paneles necesarios y la configuración de conexión de los mismos, se detecta una dificultad que debe ser contemplada en cuanto al espacio necesario para alojar dichos paneles (Carreño Pérez, 2016).

- **Calculo de la capacidad del sistema de generación solar fotovoltaica**

Como ya se conoce la cantidad y disposición de los módulos, se puede calcular la capacidad total del generador fotovoltaico.

Capacidad = (tensión máxima(V) x Módulos en serie) x (Corriente máxima(A) x módulos paralelos)

Una vez hallada la potencia activa, se calcula la potencia nominal aparente. Esta se determina con la siguiente ecuación

$$S = \frac{P_{nom}}{0.95}$$

Simulación en Digsilent

Haciendo uso del software DIgSILENT PowerFactory se implementa el sistema con los valores calculados, en dicha simulación se ejecutaron los estudios de flujo de potencia, corto circuito y transitorios.

- **Análisis del perfil de tensión**

En un sistema de eléctrico la tensión no puede sobrepasar un determinado límite, el cual está establecido en +5% y -5% de la tensión nominal.

- **Análisis de corrientes de cortocircuito**

Para realizar un estudio de cortocircuito se debe aplicar una falla trifásica en todas las barras del sistema eléctrico, con la intención de analizar el comportamiento de las corrientes de cortocircuito en cada uno de estos.

- **Análisis de estabilidad: Transitorios**

Se determina si existe alguna distorsión que pueda afectar la estabilidad del sistema de eléctrico en las instalaciones.

2.3. Teorías relacionadas con el tema

VARIABLE INDEPENDIENTE: SIMULACIÓN

Según (García Jacobo, y otros, 2020) “Es una técnica que nos permite imitar (o simular) en un ordenador el comportamiento de un sistema físico o teórico según ciertas condiciones particulares de operación”.

Según (Ocón Valdez, y otros, 2015) “La simulación digital es una tarea obligada para el diseño, planeación y estudio del comportamiento de la mayoría de los sistemas en la ingeniería moderna”.

De lo expuesto por los autores, en el presente trabajo de investigación se verificará como la simulación del sistema fotovoltaico puede suministrar energía a una red eléctrica sin afectar su estabilidad.

DIMENSIONES

D1: Estabilidad del sistema eléctrico

Según (Castro Bayas, y otros, 2016) “La estabilidad en el sistema eléctrico es un importante problema en la seguridad de la operación del sistema, la mayoría de colapsos causados por inestabilidad ilustra la importancia de este fenómeno”.

De lo expuesto por el autor, la dimensión estabilidad del sistema eléctrico en nuestro trabajo de investigación permitirá realizar el seguimiento y análisis de la seguridad de la operación del sistema, tales como el

determinar el desempeño del suministro de energía y sus condiciones de uso.

I1: Perfil de tensión

I2: Corrientes de cortocircuito

I3: Transitorios

(SE REPITE DE LA MISMA FORMA PARA LAS DEMAS DIMENSIONES)

VARIABLE DEPENDIENTE: SOSTENIBILIDAD ENERGÉTICA

Según (Mejía-Rodríguez, y otros, 2015) “La sostenibilidad energética se dirime en tres frentes la economía, la energía (o de la seguridad de suministro) y la ecología (o del medio ambiente-cambio climático)”

Según (Cherni, 2002) “La sostenibilidad energética es el aprendizaje acerca del desarrollo e incorporación de tecnologías para el adecuado aprovechamiento de las diversas fuentes.”.

De lo expuesto por los autores, en el presente trabajo de investigación la sostenibilidad energética se calcula tomando en cuenta el impacto en el medio ambiente y en el ahorro generado en los costos del consumo eléctrico.

DIMENSIONES

D1: Contaminación ambiental

Según (CARDENAS BARRIOS, 2017) (Anguiano Sánchez, 2019) “Se denomina contaminación ambiental a la alteración del estado natural de un medio (...), siendo el principal responsable el ser humano que, a través del desarrollo de la industria, avances tecnológicos y el crecimiento demográfico, ha ido impactando el medio ambiente produciendo alteraciones en los ecosistemas.”

De lo expuesto por el autor, la dimensión contaminación ambiental en nuestro trabajo de investigación permitirá evaluar el beneficio ambiental tomando en cuenta el uso de energía renovable.

I1: Huella de carbono

D2: Consumo de energía eléctrica

Según (Anguiano Sánchez, 2019) “El consumo de energía eléctrica se entiende por la potencia eléctrica que se utiliza en una instalación durante un periodo de tiempo determinado, (...) ya sea, al emplear el uso de motores, aire acondicionado, encendido de luminarias, entre otras cargas eléctricas”.

De lo expuesto por el autor, la dimensión consumo de energía eléctrica en nuestro trabajo de investigación permitirá evaluar el ahorro económico tomando como base el gasto en la facturación eléctrica.

I1: Facturación eléctrica

(SE REPITE DE LA MISMA FORMA PARA LAS DEMAS DIMENSIONES)

2.4. Definición de Términos básicos

Regulador de carga: Un regulador de carga es aquel que se sitúa entre el panel fotovoltaico y el sistema de almacenamiento de energía. El cual tiene el trabajo de proteger el sistema de almacenamiento de energía.

Eficiencia Energética: Relación entre el producto de energía de un proceso de conversión o de un sistema y su insumo de energía.

Efecto fotovoltaico: Este fenómeno ocurre cuando el material de la celda solar absorbe parte de los fotones del sol lo que libera electrones que se encuentran en el interior de la celda y se genera una corriente eléctrica.

Célula Fotovoltaica: Unidad básica del sistema fotovoltaico donde se produce la transformación de la luz solar en energía eléctrica.

Eficiencia: Cuando se habla de paneles solares la eficiencia representa el porcentaje de energía solar que es transformada en energía eléctrica por cada célula del panel.

Irradiancia: Densidad de potencia incidente en una superficie o la energía incidente en una superficie por unidad de tiempo y unidad de superficie, se mide en Kw/m².

Sistema Híbrido: Sistema fotovoltaico que incluye otras fuentes que generan electricidad, tales como generadores eólicos o grupos electrógenos.

Sistema Conectado a Red: Sistema fotovoltaico en el que actúa como una central generadora de electricidad, suministrando energía a la red.

Rendimiento: Es la relación que existe entre la energía que realmente transforma en energía útil y la que requiere un determinado equipo para su funcionamiento.

DigSILENT: Es una herramienta computarizada avanzada para el diseño asistido de ingeniería para el análisis de sistemas eléctricos de potencia comercial, industrial y a gran escala.

III. HIPOTESIS

3.1. Hipótesis

3.1.1. Hipótesis General

H.G. El Realizar la simulación de un sistema fotovoltaico conectado a la red interior mejora la sostenibilidad energética en plantas industriales.

H0. El Realizar la simulación de un sistema fotovoltaico conectado a la red interior NO mejora la sostenibilidad energética en plantas industriales.

3.1.2. Hipótesis Específica

H.E.1 Analizar la Reducción de la facturación eléctrica mejora la sostenibilidad energética en plantas industriales.

H.E.2 Verificar mediante simulaciones dinámicas el correcto funcionamiento del modelo de los sistemas fotovoltaicos implementados en DIgSILENT mejora la sostenibilidad energética en plantas industriales.

H.E.3 Establecer las ventajas y desventajas de la generación solar fotovoltaica mejora la sostenibilidad energética en plantas industriales.

3.2. Definición Conceptual de Variables

Variable 1: SOSTENIBILIDAD ENERGÉTICA

Se define como el suministro de energía a un costo accesible, asegurando el servicio y respetando el medio ambiente.

Variable 2: SIMULACIÓN

Es la representación digital de un sistema real para la evaluación y el análisis, mediante un sistema manipulable.

3.2.1. Operacionalización de Variables

TABLA N°1. Operacionalización de las Variables

Variable	Tipo de Variable	Operacionalización	Dimensiones	Indicadores
Sostenibilidad energética	Variable Dependiente	Se supervisa que el suministro de energía sea confiable, satisface las necesidades económicas, y ambientales.	Contaminación ambiental Consumo de energía eléctrica	Huella de carbono Facturación eléctrica
Simulación	Variable Independiente	Permite analizar la representación física del sistema de manera virtual para hallar los valores óptimos para un correcto funcionamiento.	Estabilidad del sistema eléctrico	Perfil de tensión Corrientes de cortocircuito Transitorios

Fuente: elaboración propia

IV. DISEÑO METODOLOGICO

4.1. Tipo y diseño de Investigación

TIPO DE INVESTIGACION: Investigación Aplicada

Según **(Lozada, 2014)** “al realizar una investigación aplicada el resultado de la investigación debe generar nuevo conocimiento y el resultado debe ser llevado al campo real para su uso.”

De lo expuesto por el autor, el presente trabajo de investigación es del tipo aplicado, pues se simula un sistema fotovoltaico que mejora la sostenibilidad energética, utilizando los conocimientos producidos por las investigaciones básicas con aplicación directa.

DISEÑO DE INVESTIGACION: Experimental

Según **(Hernández et al., 2014)** “una investigación es tipo experimental es cuando se llega a manipular intencional una acción para analizar sus posibles resultados. Es decir, se busca que la variable independiente influya en la variable dependiente de manera favorable”.

De lo expuesto por el autor, el presente trabajo de investigación tiene un diseño experimental, pues se puede verificar cambios en el resultado final al manipular la variable independiente de acuerdo a los parámetros establecidos por la investigación.

NIVEL DE INVESTIGACION: Explicativa

Según **(Arias, 2016)** “La investigación explicativa se encarga de buscar el porqué de los hechos mediante el establecimiento de relaciones causa-efecto. En este sentido, los estudios explicativos pueden ocuparse tanto de la determinación de las causas (investigación post facto), como de los efectos (investigación experimental), mediante la prueba de la hipótesis. Sus resultados y conclusiones constituyen el nivel más profundo de conocimientos”.

El nivel de la investigación es explicativo, pues se trata de identificar las causas que pueden influir en la sostenibilidad energética y como la simulación del sistema fotovoltaico nos permite generar una mejora en sostenibilidad.

4.2. Método de Investigación

Según **(Tamayo, 2017)** menciona que “La metodología utiliza la recolección y el análisis de datos para contestar preguntas de investigación y probar hipótesis establecidas previamente, y confía en la medición numérica, el conteo y frecuentemente el uso de estadística para establecer con exactitud patrones de comportamiento en una población.”

De lo expuesto por el autor, el presente trabajo de investigación utilizara un método de investigación hipotético - deductivo por que utilizara la recolección de datos con base en la medición numérica y el análisis estadístico de los parámetros que serán necesarios para el funcionamiento del sistema, ira de un conocimiento general a uno específico para establecer mejoras en la sostenibilidad energética los cuales pueden ser analizados estadísticamente para verificar el correcto suministro de electricidad, comprobando el resultado de mis hipótesis

4.3. Población y muestra

Población

Según **(Quesada, 1988)** mencionó que “se nombrara población a cualquier grupo finito o infinito de individuos o elementos variados, perfectamente identificables sin ambigüedad”.

Según **(Hernández, Fernández y Baptista, 2014)** “Una población es el conjunto de todos los casos que concuerdan con una serie de especificaciones”.

De lo expuesto por los autores, se tomó como población muestra a los trabajos de investigación que realizaron simulación y caracterización de los sistemas fotovoltaicos.

Muestra

Según **(Hernández, 2014)** menciona que “la muestra es un subgrupo de la población de interés sobre el cual se recolectarán datos, y que tiene que definirse y delimitarse de antemano con precisión, además de que debe ser representativo de la población”

(Castro, 2003) expresa que "si la población es menor a cincuenta (50) individuos, la población es igual a la muestra”.

De lo expuesto por los autores, la muestra a considerar, son los reportes de consumo energético y las características de las plantas industriales.

Muestreo

Según **(Bernal, 2010)** menciona que “El método de muestreo es utilizado para estimar el tamaño de una muestra depende del tipo de investigación que desea realizarse y, por tanto, de las hipótesis y del diseño de investigación que se hayan definido para desarrollar el estudio.”

Según **(Bernal, 2010)** menciona que “La muestra es un subgrupo de elementos de una población selectos para participar en un estudio, de igual forma se puede decir que la muestra es la selección de una población que la puede representar, esto debido a la imposibilidad de conocer los gustos y las necesidades de todos, de esta forma es posible conocer a proporción las respuestas a las cuestiones planteadas.”

De lo expuesto por los autores, El tipo de muestreo empleado es el muestreo no probabilístico por conveniencia, ya que las investigaciones revisadas fueron en base al conocimiento y criterio del investigador.

La **Fórmula** para calcular el tamaño de mi muestra es la siguiente:

$$n = \frac{N \times Z_a^2 \times p \times q}{d^2 \times (N - 1) + Z_a^2 \times p \times q}$$

Donde

N = tamaño de la población (N = 100)

Z = nivel de confianza (Z=95%)

P = probabilidad de éxito, o proporción esperada (p=50%)

Q = probabilidad de fracaso (q=50%)

D = precisión (error máximo admisible en términos de proporción) (d=5%)

$$n = \frac{100 \times 1.96^2 \times 0.5 \times 0.5}{0.05^2(100 - 1) + 1.96^2 \times 0.5 \times 0.5} = 79.509$$

El tamaño de mi muestra será de 79 personas.

4.4. Lugar de Estudio

El presente estudio se realizará en plantas industriales

4.5. Técnicas e Instrumentos para la Recolección de la Información, Validez y Confiabilidad

4.5.1. Técnicas

Según **(Arias, 2006)** “las técnicas de investigación son las distintas maneras, formas o procedimientos utilizados por el investigador para recopilar u obtener los datos o la información.”

Encuesta

Para **(Trespalcios, Vázquez y Bello,2015)** “las encuestas son técnicas de investigación descriptiva que precisan identificar a priori las preguntas a realizar, las personas seleccionadas en una muestra representativa de la población, especificar las respuestas y determinar el método empleado para recoger la información que se vaya obteniendo.”

Instrumentación

Según **(Sabino, 1996)** expone que “un instrumento de recolección de datos es, en principio, cualquier recurso de que pueda valerse el

investigador para acercarse a los fenómenos y extraer de ellos la información (.....).”

Para esta presente investigación, el instrumento que se utilizará será el cuestionario.

Encuesta

Según **(Sampieri, 2003)** “el método utilizado para la realización de una investigación es la encuesta, la cual consiste en un conjunto de preguntas a una o más variable respecto a una o más variables a medir.”

❖ Cuestionario Virtual

El instrumento de Recolección de datos es necesario que sea aprobado en base al cumplimiento de criterios específicos para que estos puedan ser utilizados.

Validez

Según **(Rusque M., 2003)** “la validez representa la posibilidad de que un método de investigación sea capaz de responder a las interrogantes formuladas. La validez designa la capacidad de obtener los mismos resultados de diferentes situaciones. La validez no se refiere directamente a los datos, sino a las técnicas de instrumentos de medida y observación, es decir, al grado en que las respuestas son independientes de las circunstancias accidentales de la investigación.”

De lo expuesto por el autor, la validez de un instrumento en nuestro trabajo de investigación realmente mide las variables que están en la matriz de Operacionalización y que tiene que ser evaluado por un jurado de expertos.

Confiabilidad

Para **(Martin, 2008)** un instrumento de medición es del todo confiable si conseguimos exactamente el mismo resultado cuando repetimos la

medición varias veces en condiciones equivalentes. Cuando más varíen los resultados, menos confiable es el instrumento de medición.

De lo expuesto por el autor, la confiabilidad de los instrumentos, que serán aplicados en la presente investigación titulada: "SIMULACIÓN DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICA PARA USO DE UNA RED INTERIOR PARA MEJORAR LA SOSTENIBILIDAD ENERGÉTICA EN PLANTAS INDUSTRIALES, PERÚ 2022" deberán ser desarrollados utilizando el alfa de cronbach y la r de Pearson como señal de conformidad respecto a los datos que hemos tomado y obtenido.

4.6. Análisis y procesamiento de Datos

4.6.1. Método de Análisis de Datos

Según **(Kinneer y Taylor, 2002)**, "El análisis de datos consiste en la realización de las operaciones a las que el investigador someterá los datos con la finalidad de alcanzar los objetivos del estudio. Todas estas operaciones no pueden definirse de antemano de manera rígida. La recolección de datos y ciertos análisis preliminares pueden revelar problemas y dificultades que desactualizarán la planificación inicial del análisis de los datos. Sin embargo, es importante planificar los principales aspectos del plan de análisis en función de la verificación de cada una de las hipótesis formuladas ya que estas definiciones condicionarán a su vez la fase de recolección de datos."

Según **(Arias, 2004)**, "en este punto se describen las distintas operaciones a las que serán sometidos los datos que se obtengan."

Inferencial: Estima parámetros (generaliza a la población) y prueba hipótesis. Comprende análisis paramétricos que comprende el coeficiente de correlación de Pearson, regresión lineal, prueba T, contraste de la diferencia de proporciones, análisis de varianza y análisis de covarianza. También el análisis no paramétrico que comprende el coeficiente de correlación de Spearman y Kendall, coeficiente de tabulación cuadrada,

coeficiente de correlación no lineal y coeficientes de correlación en los que las variables tienen distintos niveles de medición, finalmente el análisis multivariado.

Descriptiva: Tablas o gráficos como tabla de frecuencia, gráfico de barras, gráfico de tortas, histogramas, diagrama de Pareto, diagrama circular, diagrama de caja; o Medidas de resumen como medidas de dispersión, medidas de posición central, medidas de posición no central, media armónica, varianza, desviación típica, asimetría, curtosis, frecuencias, etc.

Según lo expuesto por el autor, para el presente trabajo de investigación se va utilizar principalmente la herramienta de Microsoft Excel y el programa estadístico SPSS.

4.7. Aspectos Éticos

El presente trabajo de investigación titulado: “SIMULACIÓN DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICA PARA USO DE UNA RED INTERIOR PARA MEJORAR LA SOSTENIBILIDAD ENERGÉTICA EN PLANTAS INDUSTRIALES, PERÚ 2022” ha tenido las siguientes consideraciones.

Académico: El contenido de la información es solo con fines académicos.

Objetivo: Los datos de esta investigación son analizados con criterios técnicos e imparcial.

Confiable: Porque la información proporcionada de la empresa Rennan SAC pertenece al área de atención al cliente y se reserva el derecho a la propiedad intelectual.

Veracidad: Por que los resultados obtenidos no serán manipulados o alterados.

Originalidad: Según las Normativas de la Universidad Nacional del Callao, se citaran las fuentes bibliográficas a fin de evitar el plagio.

V. RESULTADOS

DESCRIPCION DE LA GENERACION FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE MANTENIMIENTO MODELO

En este capítulo se describirá la instalación fotovoltaica desarrollada en la planta de mantenimiento Modelo, se desarrollara el emplazamiento de la instalación, también se describirá los paneles utilizados y el arreglo de dichos paneles (serie, paralelo), el ángulo de inclinación y la sujeción o estructura de soporte, se describirá el inversor utilizado, los conductores tanto en corriente continua como en alterna, las protecciones en continua y en alterna, puesta a tierra, ubicación de cajas de conexión, inversor y tablero general, etc.

Primeramente calculamos la energía consumida por la planta, después calculamos la carga diaria del sistema (Ah) y el valor HSP (horas solares pico) del mes crítico, con todo esto podemos hallar el número de paneles necesarios para dicha instalación, pero hay que tener en cuenta el espacio disponible en la nave industrial, para poder dimensionar el generador.

Características generales de la instalación fotovoltaica Modelo

Considerando que la instalación Modelo está ubicada en la variante de Uchumayo km 5 del distrito de Sachaca Provincia y Departamento de Arequipa, sobre un terreno con un área bruta de 9 833.62 m², se ha construido un conjunto de edificios de oficinas administrativa y de servicios complementarios, además una nave industrial de 4 000 m² de área (80 x 50 mts) para el mantenimiento de la flota móvil con almacenes y talleres, que es donde se instalan el generador fotovoltaico.

Los edificios que forman parte de la presente planta son: caseta de vigilancia de un piso, edificio de oficinas de tres pisos, comedor para el personal de un piso, edificio de Servicios de dos pisos, tiene además áreas de uso común como son estacionamientos, subestación eléctrica y tableros, cuarto de bombas, cisternas de uso doméstico y de agua contra incendios, tanque séptico, vías de circulación peatonal, vehicular y jardines.

El generador fotovoltaico está instalado sobre el techo de la nave industrial Modelo, donde se realiza la actividad de mantenimiento de equipo móvil de camiones de carga de cemento, alimentos y minerales etc. pertenecientes al Grupo Gloria, esta nave es con forma rectangular de 80 x 50 mts, el techo consta de dos áreas, cada una de dos aguas con un ángulo de 16° de pendiente, está construida con estructura, cerramientos de metal y cubierta de chapa lo bastante resistente para soportar el peso de los paneles que van dispuestos sobre la cubierta de la nave industrial, a continuación se muestra una vista 3d de la planta.

FIGURA N°23. Vista 3D planta Raciencia



Ubicación de la nave industrial Modelo

La instalación está situada en la cubierta de la nave industrial Modelo. Esta planta industrial está orientada de Oeste a Este, con un ángulo de inclinación del techo de 16° al norte, para maximizar las horas de sol diarias. Las sombras son nulas ya que la cubierta de la nave no existe ningún edificio mayor en altura u otro objeto que pudiera proyectar sombras, la latitud es de -16.406612 y la longitud es de -71.600530. Esta ubicación se puede ver en el anexo E en el plano RAC-2012-001.

FIGURA N°24. Ubicación nave industrial Modelo



Cálculo de la energía total diaria del sistema fotovoltaico

Para el dimensionado hay 2 criterios, el primero y el que hemos utilizado es del espacio disponible en la nave industrial de la planta, ya que el generador fotovoltaico solo va a suministrar parte de la energía para autoconsumo de la empresa, ya que su demanda es alta. El segundo se determina utilizando el valor de la energía diaria en (Kwh/día) se determina utilizando el cuadro de máxima demanda de la planta de mantenimiento Modelo, en este cuadro se muestra las cargas de las oficinas administrativas, comedor, edificios de servicios y vigilancia, así como cargas proyectadas que más adelante se piensa instalar. El generador fotovoltaico solo va a suministrar parte de la energía para autoconsumo de la planta y va estar conectada a la red de baja tensión para ayudar con la demanda de energía, a continuación se describe el cuadro de máxima demanda:

TABLA N°2. Cuadro de máxima demanda

Ítem	Descripción	Cant	Potencia	Potencia	Simul	Potencia	Uso	Consumo
			por Equipo	Total	ta neida d	Total		
			(Kw)	(Kw)	(%)	(KW)	(h/día)	Kwh/día
1	Maquinas Herramientas (proyectadas)							
1.1	Torno Vertical de 3200 diámetro del plato, con control numérico	1.00	125.00	125.00	0.75	93.75	1.00	93.75
1.2	Torno Paralelo de 5000 de bancada entre puntas con control numérico	1.00	40.00	40.00	0.75	30.00	1.00	30.00
1.3	Torno Paralelo de 1500 de volteo sin escote con control numérico	1.00	80.00	80.00	0.75	60.00	1.00	60.00
1.4	Fresa de Bancada móvil 1600, 700, 500 CNC	1.00	35.00	35.00	0.50	17.50	1.00	17.50
1.5	Mandrinadora 3500/2000/1250 con control numérico	1.00	45.00	45.00	0.50	22.50	1.00	22.50
1.6	Taladro Radial de 2500 de brazo	1.00	15.00	15.00	0.50	7.50	1.00	7.50
1.7	Taladro de Columna	1.00	3.00	3.00	0.75	2.25	1.00	2.25
1.8	Pantógrafo múltiple	1.00	0.75	0.75	0.50	0.38	1.00	0.38
1.9	Máquina de soldar por Arco Sumergido	1.00	75.00	75.00	0.85	63.75	1.00	63.75
1.10	Máquinas de Soldar de 1000 amp Procesos semiautomáticos.	1.00	30.00	30.00	0.85	25.50	2.00	51.00
1.11	Equipo de Plasma 1	1.00	20.00	20.00	0.50	10.00	1.00	10.00
1.12	Compresor 2	1.00	75.00	75.00	0.80	60.00	2.50	150.00

1.1	Horno Eléctrico para Distensado	1.00	180.00	180.00	0.50	90.00	1.00	90.00
3			0	0				
2	Puentes Grúa							
2.1	Puente Grúa de 40/10 ton	1.00	45.00	45.00	0.90	40.50	2.00	81.00
2.2	Puente Grúa de 15 Ton.	1.00	25.00	25.00	0.70	17.50	2.00	35.00
2.3	Puente Grúa de 10 Ton.	1.00	25.00	25.00	0.70	17.50	2.00	35.00
3	Tomacorrientes							
3.1	Toma Corrientes trifásicos 60 amp	20.00	20.00	400.00	0.30	120.00	2.00	240.00
		0		0				
3.2	Toma Corrientes monofásicos 30 amp	40.00	1.45	58.00	0.30	17.40	3.00	52.20
		0						
4	Iluminación Planta Interior							
4.1	Iluminación Planta	120.00	0.40	48.00	0.90	43.20	12.00	518.40
		00						
5	Iluminación Planta Patios							
5.1	Iluminación Exterior	60.00	0.40	24.00	1.00	24.00	12.00	288.00
		0						
6	Oficinas administrativas (1391 m2)							
6.1	Calculo de la iluminación por áreas							
	930m2 x 50 W/m2 = 46500w	1.00	46.50	46.50	0.90	41.85	10.00	418.50
	461m2 x 50 W/m2 = 23065w	1.00	23.07	23.07	0.70	16.15	10.00	161.46
6.2	Calculo por equipos							
	Ascensor	1.00	10.00	10.00	0.80	8.00	4.00	32.00
	Avisos luminosos (3)	3.00	3.00	9.00	0.80	7.20	8.00	57.60
	Ventilación	1.00	10.00	10.00	0.80	8.00	8.00	64.00
	Cocina	1.00	20.00	20.00	0.80	16.00	3.00	48.00

	Alumbrado exterior	1.00	10.00	10.00	1.00	10.00	10.00	100.00
	Electrobombas (2 bombas de 3HP)	2.00	2.44	4.88	1.00	4.88	2.00	9.76
	Electrobombas sumidero (2 bombas de 0.75HP)	2.00	0.99	1.98	1.00	1.98	2.00	3.96
7	Banco de Pruebas (proyectado)							
7.1	Banco de Pruebas	1.00	500.00	500.00	0.40	200.00	1.00	200.00
8	Casa de Bombas (tablero SCI)							
8.1	Bombas (1 bomba 4HP, 1 bomba 60HP)	2.00	24.00	48.00	0.80	38.40	2.00	76.80
9	CKT Cerrado de TV							
9.1	CCTV	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	24.00	24.00
	Total Potencia			2,033.18				3,044.30

Cálculo de la carga diaria del sistema

La carga diaria del sistema se calcula con la siguiente formula, donde se debe de conocer la tensión del panel fotovoltaico y la energía diaria consumida.

$$Carga\ Diaria = \frac{Demanda\ total\ diaria}{Voltaje\ del\ modulo\ fotovoltaico}$$

$$Carga\ Diaria = \frac{3044.30}{35}$$

Cálculo de las HSP del mes critico

Para el cálculo de la Hora Solar Pico HSP utilizaremos el Anexo A, donde está el Atlas de energía solar del Perú que se encuentra publicada en la página web del Ministerio de Energía y Minas del Perú, donde encontramos los valores de irradiación solar promedio en (Kwh/m2) por cada mes del año correspondiente a

los datos con los que se dispone. Estos valores promedios se pueden apreciar en la Tabla 2 y del mes crítico el cual corresponde en horas. *Carga Diaria* = 86,980Ah.

TABLA N°3. HSP (Horas Solares Pico)- mes critico

Ener o	Febrer o	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Promed io	Mes critico
7,51	7,52	7,45	6,85	5,50	4,50		
Julio	Agost o	Setiem bre	Octub re	Noviem bre	Diciem bre	6,59	4,50
5,50	5,65	6,95	7,00	7,50	7,25		

Sabiendo que la potencia de panel o módulo fotovoltaico para esta planta es igual a 160 Wp, ya que se decidió utilizar el módulo fotovoltaico de 160 Wp cuyos datos técnicos están en el Anexo D. Entonces habiendo calculado el valor de las HSP que es igual a 4.50 horas. Se puede calcular la energía eléctrica que produce el módulo fotovoltaico de la siguiente manera

$$E = P \times H$$

Por lo tanto, la energía que puede entregar el módulo fotovoltaico corresponde a 160 W x 4,50 HPS = 720 Wh.

Cálculo del número de módulos del sistema fotovoltaico

Una vez hallados los valores de la carga diaria en (Ah) y el valor de las HSP para el mes crítico, se procede a realizar el cálculo del número de módulos que tendrá el sistema fotovoltaico. Como ya se mencionó, el módulo fotovoltaico utilizado en esta planta es de 160 Wp.

En la Tabla 3 se puede apreciar el procedimiento realizado para calcular el número de módulos fotovoltaicos utilizando los valores de la carga diaria y las HSP. Además, para realizar este cálculo, es muy importante tener en cuenta las características del módulo fotovoltaico.

TABLA N°4. Cálculo del número de módulos del sistema fotovoltaico

Pa so	Carga (Ah)	diaria	÷	HSP critico	mes	=	Corriente de carga del sistema (A)
1	86980		÷	4,50		=	19329
	Modulo						RED160-36P
	Tensión máxima Vmpp (V)						35
2	Potencia Max. (W)						160
	Corriente máxima Impp (A)						4.58
	Corriente SOC (A)						3.65
3	Numero de módulos [Corriente de carga del sistema (A) / Corriente SOC (A)] = 5296						

Como nos sale una cantidad muy excesiva de paneles lo cual es irreal tal cantidad desde el punto de vista del espacio y costo de la instalación, entonces consideramos que la nave industrial tiene un área útil para la instalación de paneles de 1440 m², de 80 mts de largo y 18 mts de ancho (debido a que las demás áreas tienen un ángulo de inclinación y orientación inadecuadas), donde podemos instalar 12 paneles conectados en serie y 60 grupos en paralelo que nos da un total de 720 paneles fotovoltaicos. Esta distribución y área útil se puede apreciar en el anexo E, en los planos RAC-2012-002, RAC-2012-003.

Calculo de la capacidad del sistema de generación solar fotovoltaica

Una vez hallada la cantidad de módulos del sistema fotovoltaico, se estableció cuantos se formarán en serie y cuantos módulos en paralelo habrá. Considerando que se calculó un total de 720 módulos, Se decidió dejar 12 módulos en serie para que la tensión de todo el arreglo fuera de 420 V que está dentro del rango del inversor con el cual trabajaremos. Vamos a asignar 60 módulos en paralelo para cumplir con el total de módulos (12*60=720). Como ya se conoce la cantidad y disposición de los módulos, se puede calcular la capacidad total del generador fotovoltaico.

$$(35V \cdot 12 \text{ moduloserie}) \cdot (4.58A \cdot 60 \text{ modulospalelo}) = 115 \text{ Kwp}$$

El generador fotovoltaico está formado por 720 paneles de 160 Wp de la marca Sunmodule SW160, con una potencia máxima de 115 Kw. La instalación fotovoltaica tiene dos inversores trifásicos de 60 Kw con capacidad de conexión a la red, esto por medidas de seguridad ya que si algún inversor fallase el otro seguiría suministrando energía a la instalación.

El generador fotovoltaico tiene dos arreglos idénticos, cada arreglo cuenta con 30 ramas en paralelo y con 12 módulos fotovoltaicos en serie cada rama. De esta manera las principales características de nuestro generador fotovoltaico son las siguientes:

TABLA N°5. Características del generador fotovoltaico

Parámetros del generador	Unitario	Cantidad	Total
Potencia pico:	160 Wp	720	115 Kwp
Tensión en circuito abierto:	43.8 V	12	525.6 V
Intensidad de cortocircuito:	5 A	30	150 A
Tensión en el punto de máxima potencia:	35 V	12	420 V
Intensidad en el punto de máxima potencia:	4.58 A	30	137.4 A

Estos 60 ramales se separarán en grupos de 6, este esquema eléctrico nos ayuda a definir protecciones y cableado de cada grupo del generador en “cajas de conexión de grupo” y a su vez los conductores que salgan de cada caja de conexión de grupo llegarán a una “caja de conexión de generador fotovoltaico” donde llegarán las conexiones de todos los paneles solares y saldrán los conductores hacia cada inversor.

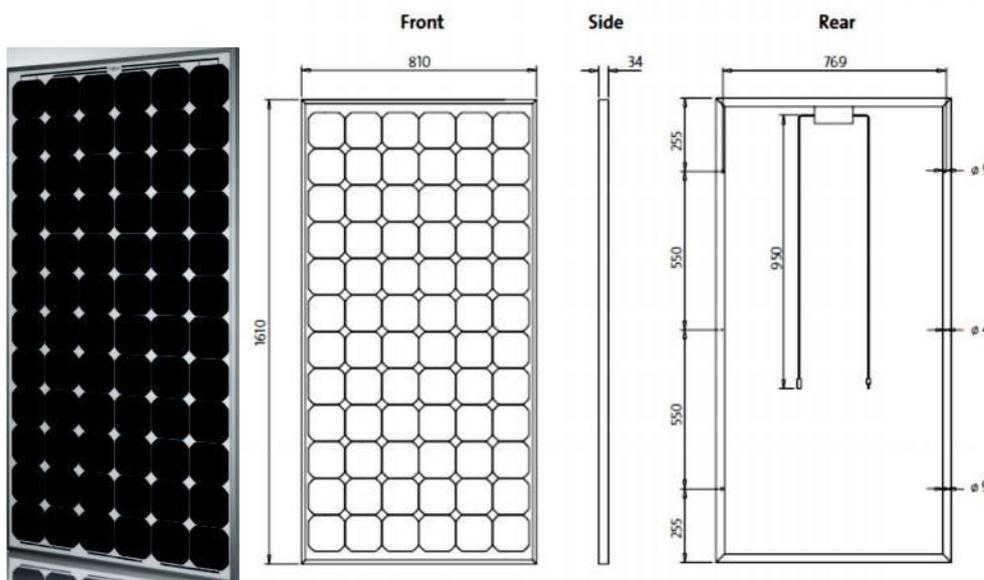
Los inversores son los encargados de convertir la corriente continua a corriente alterna que se entrega al tablero general que se encuentra en la subestación tipo caseta, que se ubica en la parte inferior de la nave junto al edificio de servicios, ver Anexo E. Se ha buscado el inversor más eficiente que cumpla con los rangos de operación necesarios para el correcto funcionamiento del generador

fotovoltaico, como el rango de tensiones de entrada al inversor, la tensión máxima de entrada, la corriente máxima, etc. eligiendo el inversor Fronius CL 60 cuya potencia de salida es de 60 Kw cada uno.

Los paneles fotovoltaicos utilizados

Para la elección de los paneles solares a utilizar, se utilizó el criterio del área a ocupar, que será en el techo de la nave industrial de mantenimiento, que posee un área total de 4.000 m² es de decir 80 mts de largo por 50 mts de ancho, pero solo 1440 m² es útil para el generador solar ya que la área restante está orientada hacia el sur, ver Anexo E. El techo es de dos aguas con un ángulo de inclinación de 16° orientado hacia el norte, la orientación de los paneles solares es la adecuada y como van adosados directamente al techo no es necesario estructura de soporte y no hay sombras ya que todos los paneles están en un mismo plano. Con estas consideraciones se ha elegido el panel solar fotovoltaico Sunmodule SW160.

FIGURA N°25. Medidas del panel fotovoltaico Sunmodule SW160



La siguiente tabla muestra los parámetros fundamentales del panel solar utilizado, esto será importante a la hora de dimensionar el cableado y protecciones e importante para la elección del inversor:

TABLA N°6. Características del panel fotovoltaico Sunmodule SW160

CARACTERISTICAS ELECTRICAS	
Potencia	160 Wp
Número de células	72
Corriente punto máxima potencia I _{mpp}	4.58 A
Tensión punto máxima potencia V _{mpp}	35 V
Corriente de cortocircuito I _{sc}	5 A
Tensión de circuito abierto V _{oc}	43.8 V
Máxima tensión del sistema	700 v
CARACTERISTICAS FISICAS	
Longitud	1610 mm
Ancho	810 mm
Espesor	34 mm
Peso	15 kg

Fijación de los módulos a la nave industrial

El sistema de fijación de los módulos fotovoltaicos permite las dilataciones térmicas, sin transmitir las cargas que puedan afectar a la integridad de los módulos. El material utilizado es de aluminio bruto capaz de resistir las cargas producidas por el peso de los módulos, con ellos instalados deben ser capaces de aguantar sobrecargas de viento, los módulos están colocados sobre la cubierta, con lo que la sujeción está integrada en ésta, se coloca guías trapezoidales interfaces a una distancia de 33 cm de los extremos de los paneles, cuatro por panel, que están atornilladas a la chapa simple de la nave mediante los 4 tornillos SB8X64/50. Encima de la guía trapezoidal, van colocados los soportes End clamp kit e Inter clamp kit que sujetan los paneles solares a la guía trapezoidal mediante tornillo M8x40. A continuación se muestran las imágenes:

FIGURA N°26. soporte

Main Components and Parts List		
		
Inter Clamp Kits	End Clamp Kits	Trapezoidal interfaces

FIGURA N°27. Características del panel fotovoltaico Sunmodule SW160

- 1) Inter Clamp Kits
- 2) End Clamp Kits
- 3) Trapezoidal interfaces

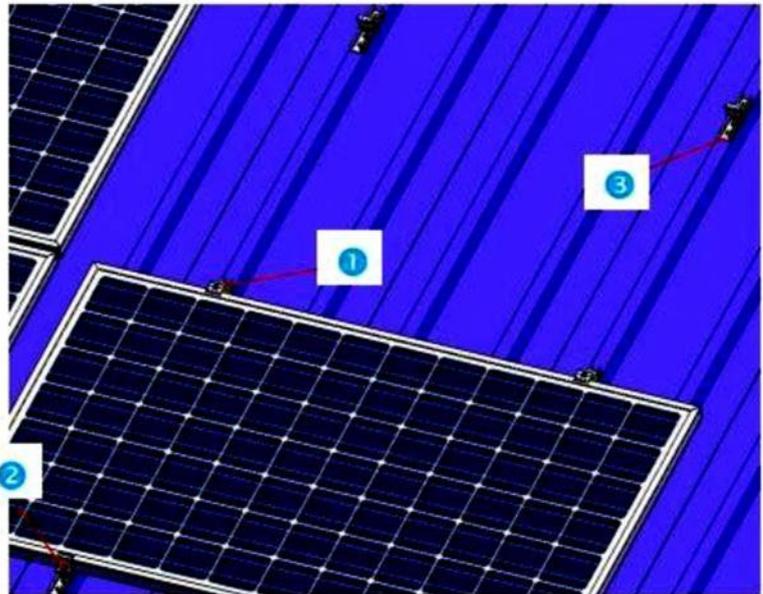


FIGURA N°28. Instalación soportes

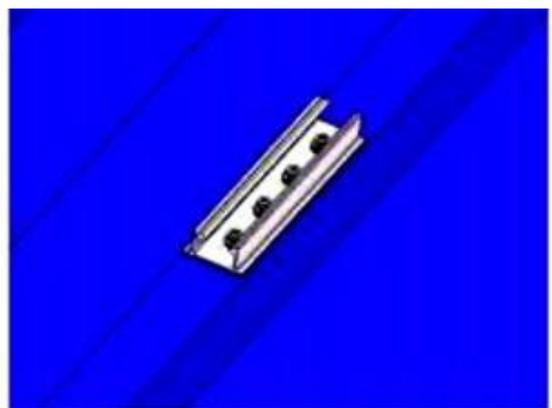
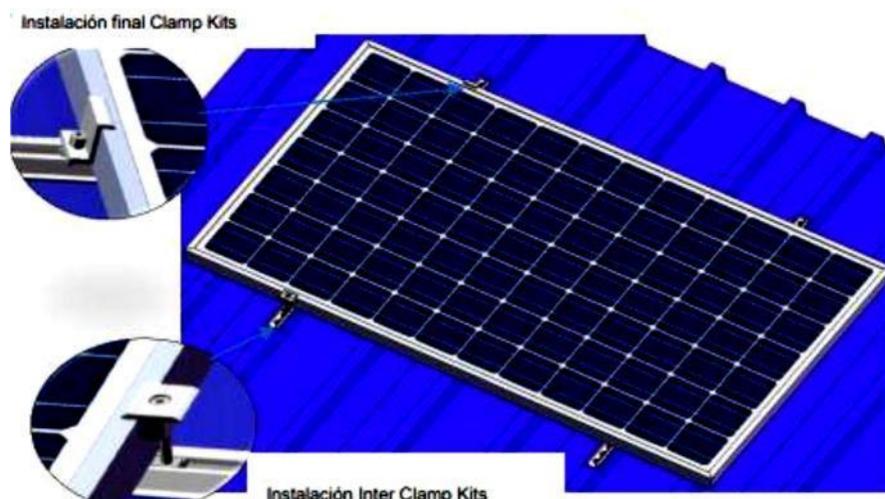


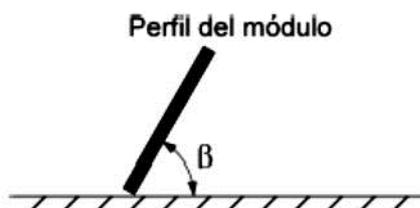
FIGURA N°29. Soporte trapezoidal interface



Secuencia instalación integrada

Inclinación de los paneles

La inclinación de los módulos solares se define mediante el ángulo de inclinación β , que es el ángulo que forma la superficie de los módulos con el plano horizontal.



El cálculo de la inclinación óptima de los paneles solares, la inclinación que deben tener los módulos fotovoltaicos siempre será en relación con la latitud del lugar donde se instalen, para la provincia de Arequipa su latitud es de 16 grados por lo tanto esa inclinación se puede considerar como la adecuada, sin embargo, existen dos parámetros que se deben tomar en cuenta:

- a) Si la insolación es en tiempo de invierno y queremos tener la mayor captación en los paneles, debemos agregar 5 grados más a la inclinación del lugar.

- b) Si la insolación es en tiempo de verano se debe restar 5 grados en la latitud del lugar.

La inclinación óptima aproximada de los paneles respecto a la horizontal, viene expresada en la siguiente tabla:

TABLA N°7. Periodo

PERIODO	INCLINACION OPTIMA
INVIERNO	B + 5
VERANO	B - 5
ANUAL	B

Utilizando este método para obtener la inclinación óptima de los paneles solares en la instalación según el periodo de diseño sería:

TABLA N°8. periodo

PERIODO	INCLINACION OPTIMA
INVIERNO	16.4066 + 5 = 21.4066
VERANO	16.4066 - 5 = 11.4066
ANUAL	16.4066

Con estas inclinaciones, se obtienen las menores pérdidas por inclinación de los módulos fotovoltaicos.

Inversor utilizado

El inversor será el encargado de convertir la corriente continua suministrada por el generador fotovoltaico en corriente alterna, de las mismas características que la de la red interior donde inyectará la energía nuestro sistema. Los inversores que se utilizan en instalaciones conectadas a red son específicos, puesto que deberán de asegurar el seguimiento de los valores de tensión y frecuencia de la

red de distribución a la que están conectados, así como impedir el funcionamiento en modo isla en caso que se descargue la línea para realizar labores de mantenimiento por parte de la compañía eléctrica distribuidora.

El inversor actúa como fuente sincronizada con la red ósea cuando la potencia suministrada por los paneles sea ínfima (nublado) o nula (por las noches) la fuente de energía será suplida por la red eléctrica en su totalidad, y cuando la radiación solar sea optima el inversor inyectara toda su potencia dispone del generador fotovoltaico.

El inversor posee de microprocesadores de control y de un PLC de comunicaciones. Trabaja conectado por su lado de CC a un generador voltaico, y por su lado CA a un transformador que adapta la tensión de salida del inversor a la de la red. Este transformador permite además el aislamiento galvánico entre la parte de CC y la CA.

Dispone de un microprocesador encargado de garantizar una curva senoidal con una mínima distorsión. La lógica de control empleada garantiza además de un funcionamiento automático completo, el seguimiento del punto de máxima potencia (MPP) y evita las posibles pérdidas durante periodos de reposo (Stand-by).

Los inversores elegidos para la planta es el Fronius CL-60, funciona en todos los puntos de trabajo con un rendimiento excepcional y con una potencia máxima de 60 Kwp.

FIGURA N°30. Inversor trifásico Fronius CL-60



Las características técnicas principales de nuestro inversor son:

TABLA N°9. Características del inversor Fronius CL-60

MARCA Y MODELO	Fronius CL 60.0
VALORES ENTRADA (DC)	
Potencia nominal DC	60 KW
Rango de tensión MPPT	230 - 500 V
Tensión Máxima DC	600 V
Corriente Máxima	280.2 A
VALORES SALIDA (AC)	
Tensión Nominal AC	400 / 230 V
Frecuencia Nominal AC	60 / 50 Hz
Coseno Phi	1 capacitivo
THD	< 3 %
DATOS GENERALES	
Eficiencia máxima	95.9 %

Refrigeración por aire Ventilador	Refrigeración por aire regulada
Consumo en stand-by	< 5 W
Consumo nocturno	12.2W
Temperatura de funcionamiento	-20 a +50 °C
Visualización	Pantalla de matriz iluminada
Grado de Protección	IP20
Fases	3
DIMENSIONES Y PESO	
Altura	1830 mm
Ancho	1105 mm
Fondo	722 mm
Peso	303 kg

Calculo de los conductores utilizados

La instalación solar fotovoltaica está dividido en varios tramos de conexión, entre los diferentes equipos y cajas de conexión que la componen. Dichos tramos de cableado poseen diferentes secciones de conductores, porque la carga que circula por cada uno de ellos es diferente dependiendo de la conexión.

El generador fotovoltaico está formado por 60 ramales en paralelo y cada ramal tiene 12 módulos en serie, la conexión de cada 6 ramales van a una caja de conexión de grupo y la conexión de todas las 10 cajas de conexión de grupos, van a 2 cajas de conexión del generador fotovoltaico, estas a su vez se conectan a 2 inversores cada caja de conexión.

En esta instalación fotovoltaica se puede diferenciar 4 tramos en la instalación; tres de ellos en corriente continua y un último tramo en corriente alterna.

Para los tramos de corriente continua se utilizan conductores de tipo NPT (STO) 0,6/1 kV de cobre con aislamiento en PVC.

TABLA N°10. Intensidad máxima admisible en amperios para cable NPT (STO) 0,6/1 kV

Tipo de cable NPT (STO) 0,6/1 kV

Sección Nominal mm ²	Aire (A)			Directamente enterrado (A)			Ducto (A)		
	3 Cables unipolares en plano	3 Cables unipolares en triángulo	1 Cable Tripolar	3 Cables unipolares en plano	3 Cables unipolares en triángulo	1 Cable Tripolar	1 Cables unipolares por ducto	3 Cables unipolares por ducto	1 Cable Tripolar
1,5	24	19,5	17,5	32	26	22	26	21	17
2,5	32	26	24	42	34	32	34	27	25
4	43	35	32	55	45	41	44	36	32
6	54	46	41	68	58	52	54	46	41
10	74	63	57	92	78	71	74	62	56
16	98	85	76	118	101	91	94	81	71
25	130	112	101	150	127	118	120	102	92
35	161	138	125	180	152	140	144	122	110
50	196	168	151	182	178	170	145	142	133
70	250	213	192	260	217	211	208	174	165
95	306	258	232	308	252	245	246	202	191
120	356	299	269	349	287	279	280	230	220
150	408	344	309	396	320	312	317	256	247
185	470	392	353	437	357	346	350	286	274
240	562	461	415	506	406	390	405	325	308
300	646	523	460	569	450	423	455	360	335
400	778	626	533	662	526	486	543	421	384
500	895	713	---	743	578	---	610	462	---

Para el cálculo de la sección en los tramos de corriente continua se utilizará la ecuación:

$$S = \frac{2LI_C}{u}$$

Donde:

- S es la sección teórica del conductor en [mm²].
- L es la longitud del conductor [m].
- I_{cc} es la corriente máxima que va a circular por los conductores y es la de cortocircuito de los paneles [A].
- -u es la caída de tensión [V] que como máximo podrán tener los conductores, que es en conductores en continua es del 1,5%.

- ρ es la conductividad del elemento que forma el conductor, en éste caso siempre se utilizará cobre y su conductividad es $56\text{m}/\Omega\cdot\text{mm}^2$.

En el último tramo de la instalación donde se ha producido la conversión de potencia continua a potencia alterna debido al inversor, el cableado utilizado es cable NYY unipolar 0,6/1kv, utilizado en sistemas de distribución de baja tensión en instalaciones eléctricas de tipo industrial.

TABLA N°11. Características eléctricas del conductor NYY unipolar 0,6/1kv

Sección Nominal(mm ²)	Resistencia conductor (Ohm/Km)		Reactancia inductiva Ohm/Km a 60Hz	Capacidad de corriente (Amp)	
	c.c	a		Aire Libre	Enterrado
	20°C	80°C		30°C	Temp=20°C 100°C-cm/W
2,5	7,41	9,16	0,182	31	43
4	4,61	5,73	0,173	41	56
6	3,08	3,83	0,164	52	70
10	1,83	2,27	0,152	71	94
16	1,15	1,43	0,143	94	121
25	0,727	0,903	0,138	126	156
35	0,524	0,651	0,132	156	187
50	0,387	0,481	0,128	192	222
70	0,268	0,334	0,124	241	272
95	0,193	0,241	0,122	300	325
120	0,153	0,192	0,119	349	370
150	0,124	0,156	0,119	402	415
185	0,0991	0,126	0,118	464	467
240	0,0754	0,097	0,117	553	540
300	0,0601	0,079	0,116	636	606
400	0,0470	0,064	0,114	742	686
500	0,0366	0,053	0,113	851	768

En este tramo del cableado es trifásico y se calcula la sección del conductor con la ecuación:

$$S = \frac{\sqrt{3L \cos \delta}}{u} = \frac{L}{CU_L}$$

Donde:

- S es la sección teórica del conductor en [mm²].
- L es la longitud del conductor [m].
- P es la potencia máxima que transporta el cable [W].
- u es la caída de tensión [V] que como máximo podrán tener los conductores, la máxima caída de tensión permitida en alterna es del 2%.
- C es la conductividad del elemento que forma el conductor, en éste caso siempre se utilizará cobre y su conductividad es 56m/Ω*mm².
- UL es la tensión de línea de la red [V].

Los cuatro tramos de cableado que está formada la instalación son los siguientes:

Paneles solares a caja de conexión de grupo

Está comprendido entre la salida de cada panel fotovoltaico conectado en serie y una caja de conexión de grupo, donde llegarán las salidas de 6 ramales de módulos conectados en serie. A las cajas de conexión de cada grupo llegan 12 conductores; 6 correspondientes a los polos positivos y 6 correspondientes a los polos negativos y saldrán 2 conductores uno de polaridad negativa y otra positiva.

Los parámetros para el cálculo de la sección mínima de los conductores de este tramo son:

TABLA N°12. Cálculo

L	20
I _{cc}	5
u	0.015*35*12
C	56

Al tratarse de un tramo de corriente continua, la sección mínima que deben tener los conductores se calcula de la siguiente manera:

$$S = \frac{2 * 20 * 5}{0.015 * 420 * 56} = 0.567 \text{ mm}^2$$

La sección normalizada inmediatamente superior a la calculada es de 4 mm².

Caja de conexión del generador fotovoltaico a cada inversor

Está comprendido entre la caja de conexión de cada generador fotovoltaico hasta cada inversor situado también en el techo. A cada inversor llegan dos cables, uno positivo y otro negativo en corriente continua.

Los parámetros para el cálculo de la sección mínima de los conductores de este tramo son:

L	18
lcc	5*6
u	0.015*35*12
C	56

Al tratarse de un tramo de corriente continua, la sección mínima que deben tener los

conductores se calcula de la siguiente manera:

$$S = \frac{2 * 18 * 30}{0.015 * 420 * 56} = 3.06 \text{ mm}^2$$

La sección normalizada inmediatamente superior a la calculada es de 4 mm².

Caja de conexión del generador fotovoltaico a cada inversor

Está comprendido entre la caja de conexión de cada generador fotovoltaico hasta cada inversor situado también en el techo. A cada inversor llegan dos cables, uno positivo y otro negativo en corriente continua.

Los parámetros para el cálculo de la sección mínima de los conductores de este tramo son:

TABLA N°14. parámetros

L	20
lcc	5*6*5
u	0.015*35*12
C	56

Al tratarse de un tramo de corriente continua, la sección mínima que deben tener los conductores será de:

$$S = \frac{2 * 20 * 30}{0.015 * 420 * 56} = 17.01mm^2$$

La sección correspondiente sería de 25mm² el cual no es capaz de soportar 150 amp, entonces se utiliza el conductor de 50 mm².

Inversores a tablero general de baja tensión

Está comprendido desde la salida trifásica de cada inversor hasta el tablero general de baja tensión ubicado en la subestación eléctrica. Este circuito es en corriente alterna. Los parámetros para el cálculo de la sección mínima de los conductores de este tramo son:

TABLA N°15. parámetros

L	70
P	60000*2
UL	400
u	0.02*400
C	56

El cableado del último tramo se realizará con cable NYY unipolar, encerrado en tubo fierro galvanizado y al tratarse de un tramo de corriente alterna, la sección mínima se calcula mediante la fórmula:

$$S = \frac{\sqrt{3_L \text{COS}\phi}}{u} = \frac{L}{CU_L} = \frac{70 * 60000}{56 * 0.02 * 400 * 400} = 46.88m^2$$

La sección del conductor NYY utilizada es de 50 mm².

La corriente que circulará desde los inversores hasta el tablero de general de baja tensión, estará calculada por la potencia máxima que cada inversor puede entregar, que es de 2*60 kW y la tensión a la cual se realiza la conexión es 400V, el factor de potencia en las instalaciones fotovoltaicas es igual a la unidad:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3_L \text{COS}\phi}} = \frac{2 * 60000}{\sqrt{3} * 400 * 1} = 173ap$$

El cable NYY unipolar 0,6/1kV de sección 50 mm² es capaz de soportar 192 amp que es un valor superior al calculado, por lo tanto cumple dicho conductor.

Cableado de protección a tierra

Se dispondrá una conexión equipotencial a tierra a la que se unirán todas las partes metálicas de los componentes de nuestro sistema fotovoltaico, que tendrá los objetivos siguientes:

- La protección de las personas frente a contactos directos e indirectos, al impedir que las masas adquieran potencial en el caso de defectos de aislamiento.
- Permitir la correcta actuación de los equipos de protección como limitadores de corriente y sobretensión en las instalaciones internas.

El electrodo de puesta a tierra de nuestra instalación será independiente del electrodo del neutro de la empresa distribuidora, así como también dispondrá de una separación galvánica entre la parte de corriente alterna y la de continua en nuestra instalación, que se logrará a través del transformador existente en nuestro inversor.

En esta instalación se utilizará la toma a tierra de la nave industrial ya que al tratarse de una nave dedicada al mantenimiento de vehículos, tiene una red de pozos a tierra conectados entre sí alrededor de la nave industrial, los conductores de protección discurrirán por las mismas canalizaciones de los conductores activos de la instalación.

Los conductores de protección tendrán diferente sección dependiendo el tramo de cableado donde se encuentren:

TABLA N°16. Conductores de puesta a tierra

	CONDUCTORES DE FASE	CONDUCTOR DE PROTECCIÓN
Módulos solares a Caja de conexión de grupo.	1.5 mm ²	1.5 mm ²
Caja de conexión de grupo a Caja de conexión de generador fotovoltaico	4 mm ²	4 mm ²
Caja de conexión de generador fotovoltaico a Inversor	50 mm ²	25 mm ²
Inversor a Red de baja tensión	50 mm ²	25 mm ²

Cálculo de las protecciones utilizadas

Al igual que para el cálculo del cableado de la instalación, el cálculo de protecciones se realizará independientemente para cada uno de los circuitos que forman la instalación, diferenciando entre tramos de corriente continua y corriente alterna ya que las protecciones deberán ser distintas para cada tramo dependiendo si es continua o alterna del tramo y al valor de corriente admisible por los conductores, un dispositivo protege contra sobrecargas a un conductor si se verifican las siguientes condiciones:

$$I_E \leq I_N \leq I_Z$$

$$I_Z \leq 1.45 * I_Z$$

Donde:

- I_B es la corriente de empleo o de utilización.
- I_N es la corriente nominal del dispositivo de protección.
- I_Z es la corriente máxima admisible por el elemento a proteger.
- I_2 es la corriente convencional de funcionamiento del dispositivo de protección.

(Fusión de los fusibles y disparo de los interruptores automáticos).

En la protección por termomagnético normalizado se cumple siempre la segunda condición porque $I_2 = 1,45 \times I_N$, por lo que solo se debe verificar la primera condición.

En la protección por fusibles se cumple que $I_2 = 1,6 \times I_N$ por lo que deben verificarse las dos condiciones.

El cálculo de protecciones se divide en dos grupos, corriente continua y otro corriente alterna, que forma la instalación fotovoltaica.

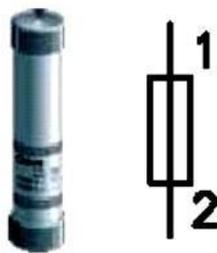
El esquema unifilar de la instalación, muestra que los tramos pertenecientes a la parte de potencia continua son tres, que se encuentran entre los paneles solares

fotovoltaicos y la entrada al inversor, las siguientes son las protecciones en continua:

Módulos solares a caja de conexión de grupo

Este tramo está protegido contra sobre intensidades mediante fusibles en cada uno de los ramales módulos del generador fotovoltaico que provoquen la apertura del circuito en caso de producirse una corriente superior a la admisible por los equipos o conductores de la instalación. Cada ramal poseerá dos fusibles de idénticas características eléctricas, uno para el conductor positivo y otro para el negativo.

FIGURA N°31. Fusible de corriente continua y símbolo normalizado



La sección del conductor en este tramo de la instalación es de 1.5 mm², la corriente de máximo punto de potencia del panel es de 4.58 amp, la corriente máxima que soporta el conductor es de 17.5 amp, entonces para que se cumpla la condición, como mínimo la corriente nominal del fusible será:

$$I_B \leq I_N \leq I_Z$$

$$480 \leq I_N \leq 17.5$$

$$I_N = 10a$$

A continuación se calcula la corriente convencional de fusión del fusible, comprobándose si el fusible es el correcto o no, debe buscarse un valor mayor que cumpla $I_2 = 1.6 * I_N = 1.6 * 10$

$$I_2 = 1.6amp$$

$$I_2 \leq 1.45 * I_z$$

$$16 \leq 1.45 * 17$$

$$16a \leq 24.6a$$

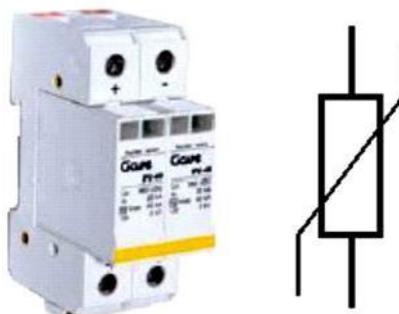
Por consiguiente se utilizan fusibles de 10 amp en cada ramal de paneles conectados en serie del generador fotovoltaico.

Caja de conexión de grupo a caja de conexión de generador fotovoltaico

Este tramo estará protegido por tres elementos:

Descargador de sobretensiones clase II.- Son los protectores de sobretensión producidas por descargas atmosféricas indirectas que se producen a una determinada distancia de la instalación, se encargan de descargar a tierra los picos de tensión transitorios que se transmiten a través de los cables de la instalación eléctrica. Para la elección de la protección contra sobretensiones a utilizar en la instalación, se tendrá en cuenta la tensión máxima de funcionamiento que puede producirse en el generador fotovoltaico para escoger un descargador que soporte dicha tensión. Esta tensión máxima aparece cuando los paneles trabajan en condiciones de circuito abierto y a una temperatura ambiente de -5°C , esto produce una tensión igual a 525,6V, por tanto se elegirá un descargador con una tensión de régimen permanente superior a este valor.

FIGURA N°32. Protección contra sobretensión CLASE II y símbolo normalizado



Interruptor-Seccionador.- Los interruptores en continua que se instalan en este tramo de la instalación, tendrán la función de aislar zonas del generador para mantenimiento y limpieza de los paneles fotovoltaicos. Se colocan 10 interruptores de este tipo, uno por cada subgrupo de 6 ramales del generador fotovoltaico y al abrirlos proporcionarán un aislamiento eficaz.

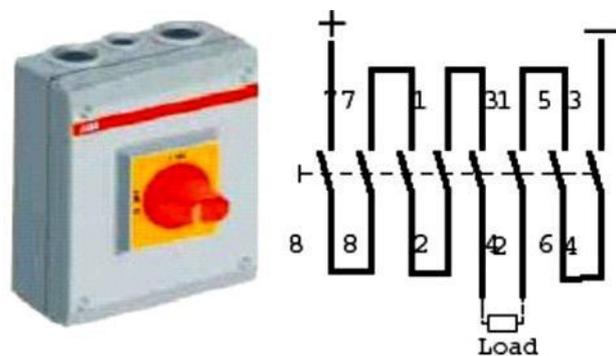
Para la elección de los interruptores-seccionadores se tienen en cuenta dos parámetros, la tensión de servicio de la línea y la corriente que deben ser capaces de interrumpir al abrirse, vendrán dados por la corriente de cortocircuito que pueda producirse en cada panel por el número de ramales que conecta el interruptor-seccionador y la tensión máxima de servicio será la tensión máxima que puede darse en la instalación.

$$I_s = 6R * 5 = 30a$$

$$V_o = 12 * 43.8 = 525.6V$$

Entonces se ha escogido un interruptor-seccionador con tensión de servicio 750V y capaz de interrumpir una corriente de 32A.

FIGURA N°33. Interruptor multipolar de corriente continúa



Fusibles.- La sección del conductor en este tramo de la instalación es de 4 mm², la corriente de máximo punto de potencia de los 6 ramales es de 4.58*6=27.48 amp, la corriente máxima que soporta el conductor es de 36 amp, entonces para que se cumpla la condición, como mínimo la corriente nominal del fusible será:

$$I_B \leq I_N \leq I_Z$$

$$27.4 \leq I_N \leq 36$$

$$I_N = 30a$$

A continuación, se calcula la corriente convencional de fusión del fusible, comprobándose si el fusible es el correcto o no, debe buscarse un valor mayor que cumpla $I_2 \leq 1.45 * I_Z$

$$I_2 = 1.6 * I_N = 1.6 * 30$$

$$I_2 = 48amp$$

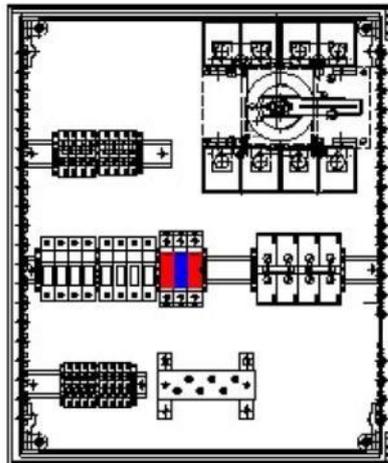
$$I_2 \leq 1.45 * I_Z$$

$$48 \leq 1.45 * 36$$

$$48a \leq 52.2a$$

Por consiguiente, se utilizan fusibles de 30 amp en cada ramal de paneles conectados en serie del generador fotovoltaico.

FIGURA N°34. Caja de conexión de grupo



Caja de conexión de generador fotovoltaico al Inversor

Este último tramo de corriente continua conecta la mitad de las cajas de conexión de grupo del generador fotovoltaico con cada inversor, este tramo consta de los siguientes elementos de protección:

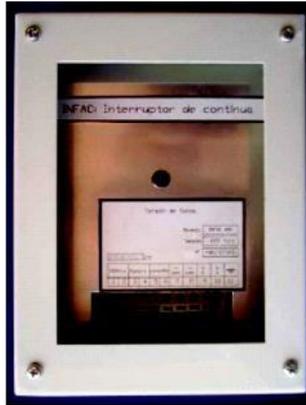
Controlador permanente de aislamiento.- son protecciones que se utilizan en circuitos de corriente continua para detectar posibles faltas de aislamiento de los conductores (positivo y negativo) a tierra. El controlador permanente de aislamiento está formado por dos dispositivos, un vigilante de aislamiento y un interruptor de continua.

La máxima tensión de funcionamiento se producirá en el circuito será cuando la temperatura ambiente sea la mínima y en condiciones de circuito abierto 525.6 Vcc, por lo tanto el vigilante de aislamiento elegido tendrá un margen de tensión que oscila entre 450 a 650 Vcc. El interruptor de corriente continua abre el circuito cuando recibe la orden del vigilante de aislamiento desconectando el inversor y drena la sobrecarga hacia la tierra de la instalación, de esta manera pueden prevenirse riesgos de electrocución del personal encargado de la instalación.

FIGURA N°35. Vigilante de aislamiento



FIGURA N°36. Interruptor en continua



Termomagnético.- Cortan el servicio en sobreintensidades pequeñas y prolongadas actúa la protección térmica y para sobreintensidades elevadas actúa la protección magnética, para todo termomagnético y fusible se cumple los siguientes requisitos:

$$I_B \leq I_N \leq I_Z$$

$$I_2 \leq 1.45 * I_Z$$

En la protección por termomagnético normalizado no es necesario comprobar la segunda condición ya que $I_2=1,45 \times I_Z$ siempre se cumple, solo es necesario comprobar la primera condición.

La sección del conductor en este tramo de la instalación es de 50 mm², la corriente de máximo punto de potencia de los 6 ramales es de $4.58 \times 6 \times 5 = 137$ amp, la corriente máxima

que soporta el conductor es de 151 amp, entonces para que se cumpla la condición, como mínimo la corriente nominal del fusible será:

$$I_B \leq I_N \leq I_Z$$

$$137 \leq I_N \leq 151$$

$$I_N = 140a$$

Por consiguiente, se utilizará un termomagnético de 140 amp en la línea que une el generador fotovoltaico con el inversor.

FIGURA N°37. Interruptor termomagnético tripolar de caja moldeada



Las protecciones en alterna están ubicadas aguas abajo del inversor, para la protección de los circuitos y conexión al tablero general de baja tensión, las protecciones en corriente alterna son:

Inversor a tablero general de baja tensión

Protección para la interconexión de máxima y mínima frecuencia (61Hz y 59Hz respectivamente) y de máxima y mínima tensión (1,1 y 0,85 pu respectivamente).

Interruptor general manual, que será un interruptor termomagnético, con objeto de poder realizar la desconexión manual.

Interruptor automático diferencial, con el fin de proteger a las personas en el caso de derivación de algún elemento de la parte continúa de la instalación.

Interruptor automático de la interconexión, para la desconexión-conexión automática de la instalación fotovoltaica en caso de pérdida de tensión o frecuencia de la red, junto a un relé de enclavamiento.

La instalación deberá disponer de una separación galvánica entre la red de distribución de baja tensión y las instalaciones fotovoltaicas, bien sea por medio de un transformador de aislamiento o cualquier otro medio que cumpla las mismas funciones.

Ahora el inversor utilizado en la instalación puede incorporar alguna de estas protecciones, solo se precisará disponer adicionalmente de las protecciones general manual e interruptor automático diferencial. El inversor Fronius CL 60

seleccionado para esta instalación, incorpora las funciones de protección de máxima y mínima tensión y de máxima y mínima frecuencia, además este inversor posee un transformador por tanto proporciona la separación galvánica entre las redes de baja tensión y las instalaciones fotovoltaicas. Por consiguiente, las protecciones que se instalarán en este tramo son solamente, un interruptor general manual (termomagnético) y un interruptor automático diferencial.

Interruptor general manual Se trata de un interruptor termomagnético similar al utilizado en el tramo anterior del circuito con la diferencia que este termomagnético está diseñado para funcionar con corriente alterna.

Para el cálculo de la intensidad nominal del interruptor a utilizar en este tramo, es necesario calcular la corriente máxima admisible por los conductores y la corriente nominal de empleo que se producirá en este tramo.

La sección de los conductores en este tramo es de 50 mm² y la corriente máxima admisible por el conductor es $I_Z=192$ amp. El valor de la intensidad nominal de funcionamiento que circulará por el tramo vendrá dado por la potencia máxima que los inversores pueden entregar a la red de baja tensión, que es de 60 Kw y la tensión a la cual se realizará la conexión que es de 400V y el factor de potencia proporcionado por las instalaciones solares fotovoltaicas debe ser igual a la unidad.

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}U_L \cos\phi} = \frac{2 * 60000}{\sqrt{3} * 400 * 1} = 173^a$$

El valor de la intensidad nominal del interruptor termomagnético a utilizar será:

$$I_B \leq I_N \leq I_Z$$

$$173 \leq I_N \leq 192$$

El interruptor termomagnético tiene una intensidad nominal de 250 amp regulable, en la línea el inversor y el punto de conexión al tablero general de baja

tensión. Se ha elegido un interruptor termomagnético marca Legrand modelo DPX3 250 industrial regulable a 175 amp y con protección diferencial integrada.

FIGURA N°38. Interruptor termomagnético diferencial



Interruptor diferencial.- Los interruptores diferenciales proporcionan protección a las personas contra descargas eléctricas, tanto en el caso de contactos directos e indirectos y también protección a las instalaciones ya que detectan las fugas a tierra midiendo la corriente que circula por los conductores. Se ha escogido un interruptor termomagnético de la marca Legrand modelo DPX3 250 con diferencial integrado escogido anteriormente.

Presupuesto de la instalación

En las siguientes tablas se mostrará la lista de precio por separado de los diferentes equipos y materiales que se utilizarán para la construcción de la instalación fotovoltaica.

TABLA N°17. Presupuesto

	CANTID	UNID	PRECIO	PRECIO
	AD	AD	UNITARI	TOTAL
			O	

EQUIPOS PRINCIPALES DE INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA				
Módulos fotovoltaicos Sunmodule SW160	720	und.	345	248,400
Inversor senoidal trifásico de conexión a red Fronius CL-60	2	und.	32,000	64,000
Fijación de módulos Inter Clamp, End Clamp y Trapezoidal interfaces, con tornillería incluida	1	gbl.	7,200	7,200
TOTAL DE EQUIPOS PRINCIPALES				319,600
CABLEADO Y CONEXIONES				
Cable NPT (STO) cobre s=1,5 mm ² (Para conexiones entre módulos solares y caja de conexión de grupo)	1,200	mts.	3	3,600
Cable NPT (STO) cobre s=4 mm ² (Para conexiones entre caja de grupo y caja de conexión de generador)	100	mts.	6	600
Cable NPT (STO) cobre s=50 mm ² (Para conexiones entre caja de conexión de generador a inversor)	45	mts.	40	1,800
Cable NYY cobre. s=50 mm ² (Para conexiones entre inversor y red de baja tensión)	80	mts.	55	4,400
Caja de conexión de grupo IP30 Famatel 700x500x160 mm	10	und.	125	1,250
Caja de conexión de generador fotovoltaico IP30 FAMATEL 1.000x550x160 mm.	2	und.	185	370
TOTAL CABLEADO Y CONEXIONES				12,020
PUESTA A TIERRA Y PROTECCIONES				
Conductor para protección de cobre S=1.5 mm ²	400	mts.	0.45	180
Conductor para protección de cobre S=4 mm ²	32	mts.	0.85	27.2

Conductor para protección de cobre S=25 mm ²	45	mts.	15	675
Conductor para protección de cobre S=25 mm ²	80	mts.	15	1,200
Fusible para continua GAVE 10A con portafusible de 10x38 mm	60	und.	6	360
Descargador SOLARTEC PST31PV para 1000VDC	10	und.	90	900
Interruptor-seccionador ABB modelo OTP32BA8MS con 8 polos de 32 A	10	und.	120	1,200
Fusible para continua GAVE 30A con portafusible de 22x127 mm.	10	und.	9	90
Vigilante de aislamiento PROAT modelo FAC650	2	und.	105	210
Interruptor de corriente continua para vigilante de aislamiento marca PROAT modelo INFAC	2	und.	100	200
Interruptor magnetotérmico tripolar de continua de caja modulada CHINT serie NM6 de 140A	2	und.	120	240
Interruptor magnetotérmico diferencial modular trifásico LEGRAND DPX ³ industrial de 250A	1	und.	160	160
TOTAL, PUESTA A TIERRA Y PROTECCIONES				5,442
INGENIERÍA Y OBRA CIVIL				
Proyecto de instalación fotovoltaica de 115 kW sobre azotea	1	gbl.	5,000	5,000
Mano de obra	1	gbl.	10,000	10,000
TOTAL, INGENIERÍA Y MANO DE OBRA				15,000
TOTAL				352,062

Disminución de la facturación eléctrica

A continuación, se muestra una tabla y un gráfico donde se puede apreciar el antes y después de la implementación de la instalación fotovoltaica, como se puede apreciar a continuación:

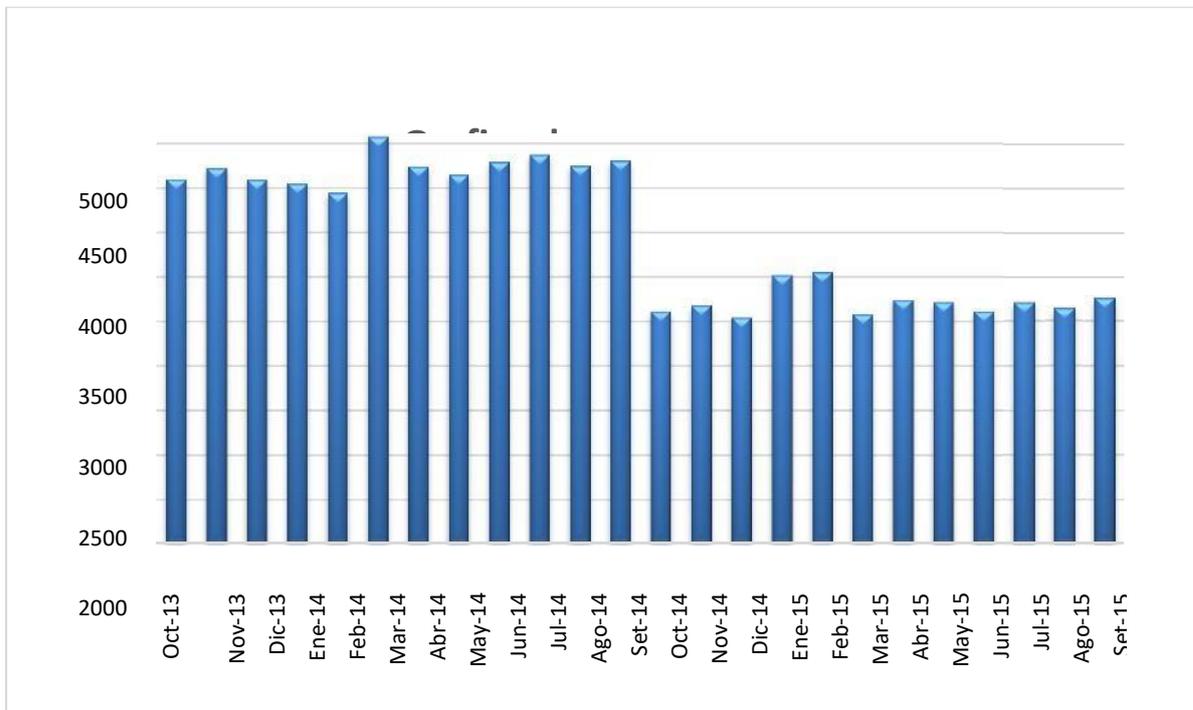
TABLA N°18. Antes y después

MES-AÑO	MONTO SOLES
oct-13	4089
nov-13	4218
dic-13	4087
ene-14	4042
feb-14	3941
mar-14	4569
abr-14	4236
may-14	4143
jun-14	4284
jul-14	4367
ago-14	4243
sep-14	4300
oct-14	2607
nov-14	2674
dic-14	2538
ene-15	3013
feb-15	3047
mar-15	2574
abr-15	2738
may-15	2713
jun-15	2607

DESPUES DE LA IMPLEMENTACIONANTES DE LA IMPLEMENTACION DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO

jul-15	2704
ago-15	2635
sep-15	2750

FIGURA N°39. Facturación del antes y después



Meses del año antes y despues del sistema fotovoltaico

De la gráfica anterior se puede observar que facturación eléctrica ha disminuido en promedio de 1493 soles, ya que la energía eléctrica generada por nuestro sistema fotovoltaico desde octubre del 2014 se está utilizando para autoconsumo de la misma empresa, antes el promedio mensual de la energía eléctrica era de 4210 soles, ahora se paga en promedio 2717 soles, con lo cual hay un ahorro considerable.

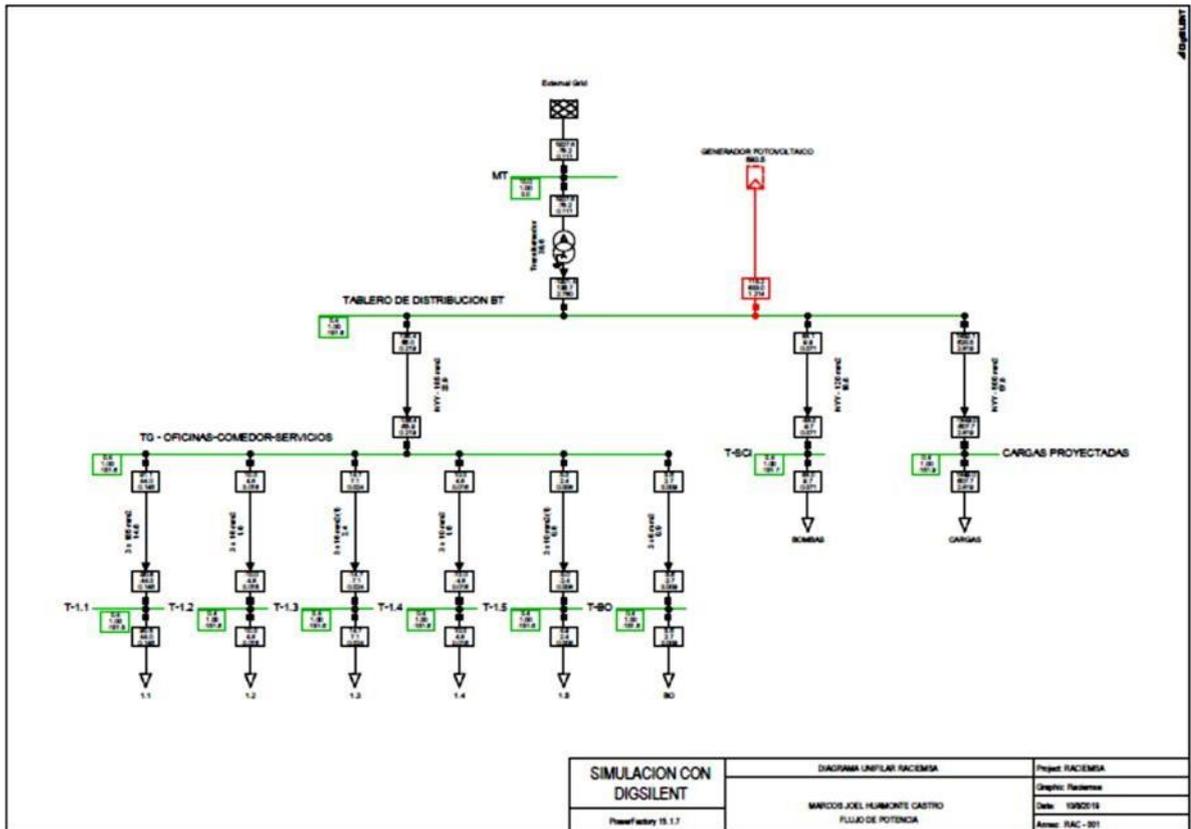
VI. RESULTADOS DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO SIMULADO CON DIGSILENT

En el presente capítulo se realizó la simulación en DIgSILENT de las instalaciones eléctricas Modelo con el sistema fotovoltaico implementado, que fue descrito en el capítulo anterior, en dicha simulación se ejecutaron los estudios de flujo de potencia, corto circuito y transitorios. Dichos estudios sirven para entender el comportamiento del sistema a través de gráficas y cuadros comparativos de los datos que fueron arrojados por la simulación.

Estas simulaciones de la incorporación del sistema fotovoltaico para autoconsumo que inyecta energía a la red de baja tensión, son necesarias para ver cómo afecta las protecciones de la instalación, en el caso que se presente una falla es importante saber cómo se vería afectado las instalaciones, si es capaz de dispersar dicha falla o no, y así poder evitar daños en los diferentes elementos de la instalación. También se puede comprobar si estos sistemas fotovoltaicos son beneficiosos para la instalación o no.

Para los diferentes tipos de análisis que se desean realizar, es necesario implementar los estudios de flujo de potencia, cortocircuito y transitorios, antes de la implementación de la instalación fotovoltaica, al 50% de la inyección de la potencia fotovoltaica y al 100% de la inyección de la potencia fotovoltaica a las redes de baja tensión, esto es necesario para tener puntos de comparación.

FIGURA N°40. Flujo de potencia de las instalaciones



Análisis del perfil de tensión

Es uno de los métodos para determinar la estabilidad en un sistema eléctrico, es a través del análisis del perfil de tensión. En un sistema de eléctrico la tensión no puede sobrepasar un determinado límite, el cual está establecido en +5% y -5% de la tensión nominal.

Se puede apreciar los valores de tensión para cada barra de la instalación, dependiendo de los diferentes casos en los que está relacionado el sistema fotovoltaico. Con los datos consignados en esta tabla se elaboró una gráfica donde se podría observar todos los perfiles de tensión para cada situación donde el sistema fotovoltaico está inyectando cierta cantidad de potencia, dicha grafica se encuentra en la Figura 41.

FIGURA N°41. Perfil de tensión

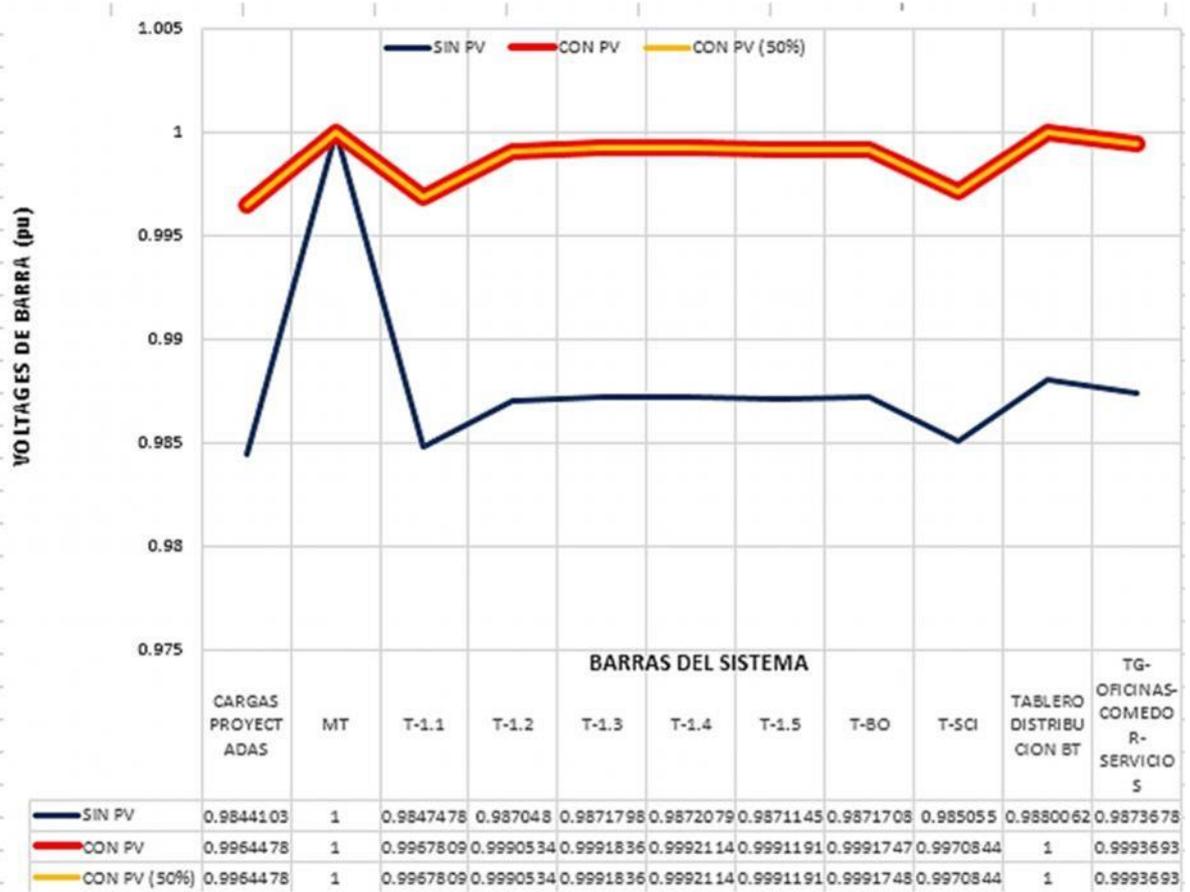


TABLA N°19. Voltajes nodales del sistema (pu)

NOMBRE BARRA		Nom.L- L	SIN PV	CON PV	PV (50%)
		Volt. kV	p.u.	p.u.	p.u.
1	CARGAS PROYECTADAS	0.4	0.984410 3	0.996447 8	0.996447 8
2	MT	10	1	1	1

3	T-1.1	0.4	0.984747 8	0.996780 9	0.996780 9
4	T-1.2	0.4	0.987048	0.999053 4	0.999053 4
5	T-1.3	0.4	0.987179 8	0.999183 6	0.999183 6
6	T-1.4	0.4	0.987207 9	0.999211 4	0.999211 4
7	T-1.5	0.4	0.987114 5	0.999119 1	0.999119 1
8	T-BO	0.4	0.987170 8	0.999174 7	0.999174 8
9	T-SCI	0.4	0.985055	0.997084 4	0.997084 4
10	TABLERO DISTRIBUCION BT	0.4	0.988006 2	1	1
11	TG-OFICINAS- COMEDOR-SERVICIOS	0.4	0.987367 8	0.999369 3	0.999369 3

Si se comparan los datos que hay registrados en la columna "sin FV" de la Tabla 10, que son los valores de tensión de todas las barras de la instalación cuando no se ha incorporado el sistema fotovoltaico, con respecto al resto, donde se presentan las mismas tensiones, pero para diferentes casos donde el sistema fotovoltaico está inyectando una determinada

cantidad de potencia. Y también comparando los diferentes perfiles de tensión que se muestran en la Figura 38. Se puede deducir que entre mayor es la cantidad de potencia que suministra el sistema fotovoltaico a las instalaciones internas de baja tensión, mayor serán las tensiones en las barras. Esto se debe

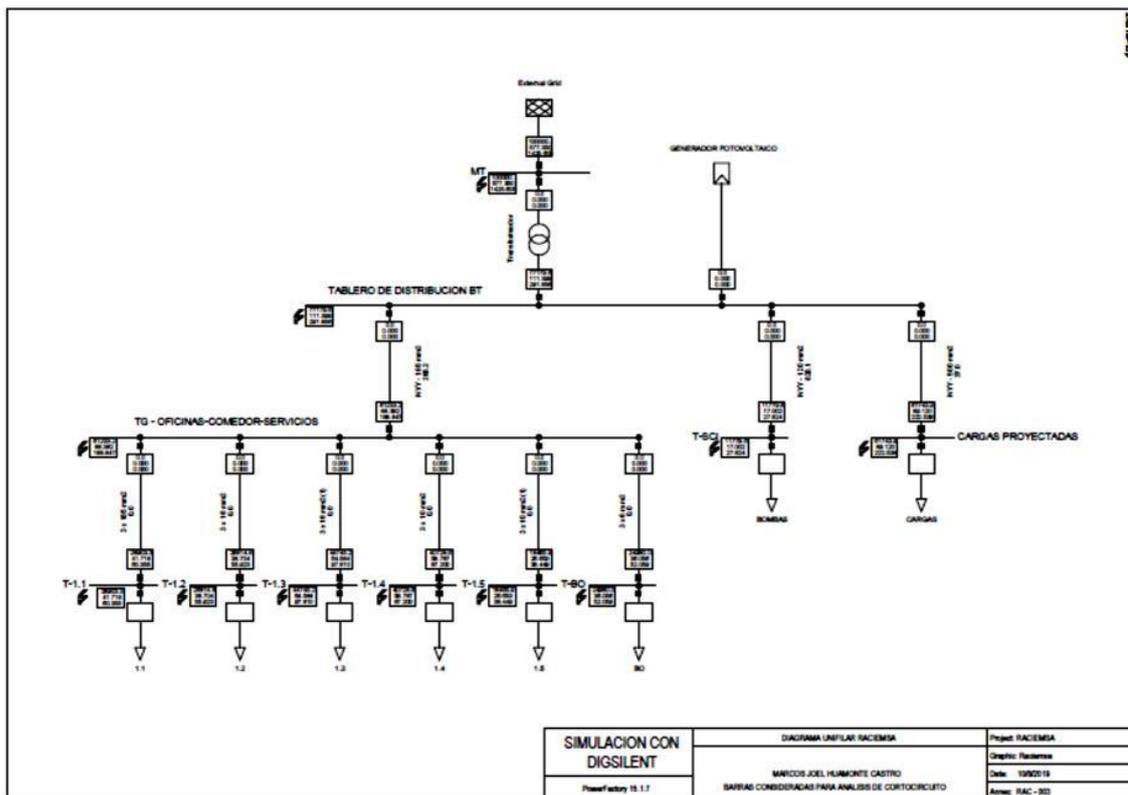
ya que debido a la inyección de potencia por parte del sistema fotovoltaico la demanda del sistema disminuye, causando una reducción en los flujos de potencia de las líneas de la instalación.

Por lo tanto, se puede concluir que el perfil de tensión puede mejorar a través del incremento de la potencia que inyecta el sistema fotovoltaico o aumento de la potencia instalada.

Análisis de corrientes de cortocircuito

Para este análisis se realiza un estudio de cortocircuito mediante la aplicación de una falla trifásica en todas las barras del sistema eléctrico Modelo esto se puede apreciar en la figura 40, con la intención de analizar el comportamiento de las corrientes de cortocircuito en cada uno de estos y con el fin de establecer una comparación entre los niveles de corrientes de cortocircuito en las diferentes barras de la instalación, en las siguientes situaciones, cuando no se ha agregado el sistema fotovoltaico, cuando se agrega el 100% de la capacidad nominal del sistema fotovoltaico y para cuando el sistema fotovoltaico operan al 50% de su capacidad nominal.

FIGURA N°42. Barras consideradas para análisis de cortocircuito



A continuación, se muestra la Tabla 20 donde se puede apreciar los valores de las corrientes de cortocircuito en cada barra del sistema para las condiciones ya mencionadas.

TABLA N°20. Corrientes de corto circuito (KA)

NOMBRE BARRA	SIN PV	CON PV	PV (50%)
	KA	KA	KA
1 CARGAS PROYECTADAS	89.1196 7	89.1196 7	89.1196 7
2 MT	577.350 3	577.350 3	577.350 3
3 T-1.1	41.7182 7	41.7182 7	41.7182 7

4	T-1.2	38.7037 6	38.7037 6	38.7037 6
5	T-1.3	64.5841 1	64.5841 1	64.5841 1
6	T-1.4	58.7867 1	58.7867 1	58.7867 1
7	T-1.5	26.6532 9	26.6532 9	26.6532 9
8	T-BO	36.0555 6	36.0555 6	36.0555 6
9	T-SCI	17.0023 2	17.0023 2	17.0023 2
10	TABLERO DISTRIBUCION BT	111.399 1	111.399 1	111.399 1
11	TG - OFICINAS-COMEDOR- SERVICIOS	88.3824 5	88.3824 5	88.3824 5

Comparando los diferentes casos que se presentan en la Tabla 11, se puede deducir que sin importar la cantidad de potencia que este inyectando el sistema fotovoltaico o independientemente del hecho de que esté implementado la instalación fotovoltaica, no cambia los valores de las corrientes de cortocircuito en las diferentes barras del sistema. La razón de que estas corrientes de cortocircuito no cambien se debe a que los inversores que están asociados con el sistema fotovoltaico limitan la corriente de cortocircuito. Esto significa que no es necesario modificar o cambiar las protecciones que se encuentren instaladas en la planta de mantenimiento Modelo.

Análisis de estabilidad: Transitorios

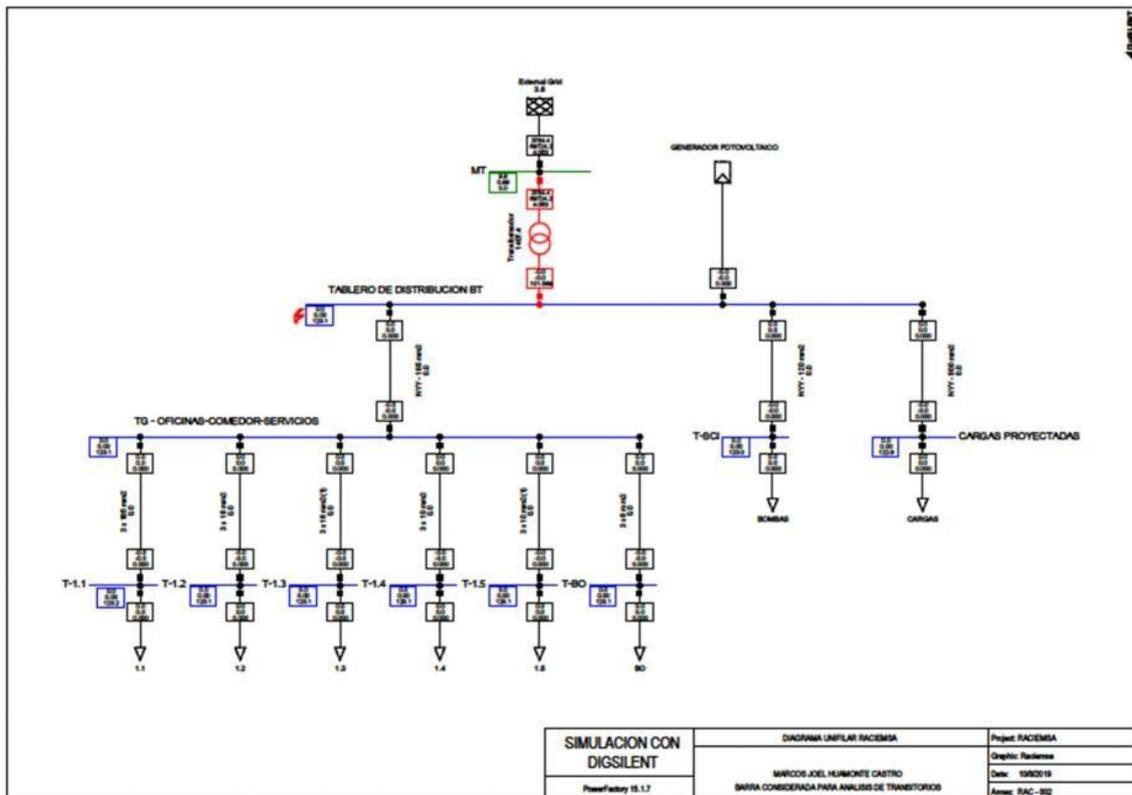
En este análisis se desea observar gráficamente la tensión, la corriente de cortocircuito y la frecuencia en los nodos principales del sistema de estudio,

cuando ocurre el mismo tipo de cortocircuito que se analizó para el caso del análisis de las corrientes de cortocircuito.

Por medio de estas graficas se determina si existe alguna distorsión que pueda afectar la estabilidad del sistema de eléctrico en las instalaciones Modelo, con la implementación del sistema fotovoltaico, debido a la ocurrencia de fenómenos transitorios. Para esto se utiliza la simulación de transitorios de DIGSILENT.

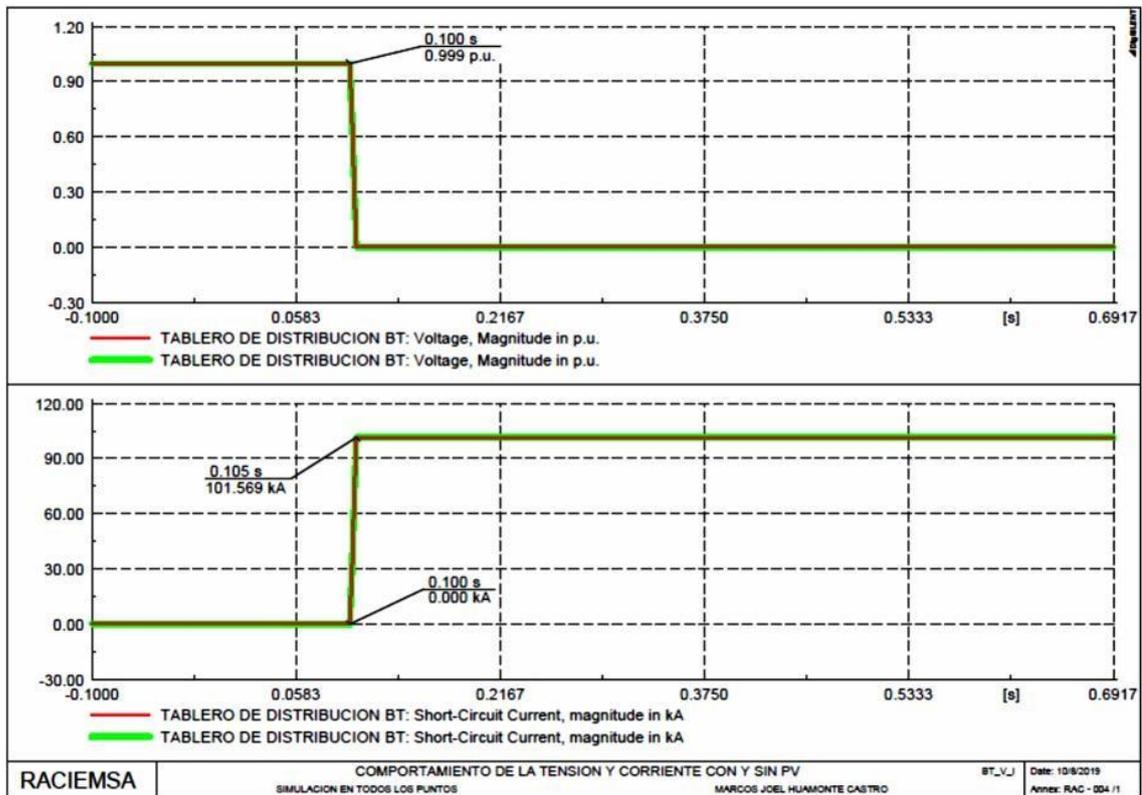
El punto donde se ubica el cortocircuito que se considera para este análisis de estabilidad, se muestra en la Figura 43. Este cortocircuito se ubica en la barra de distribución de baja tensión.

FIGURA N°43. Nodo considerado para análisis de transitorios



Para el punto mostrado en la Figura 43 se construyeron gráficos de tensión, corriente de cortocircuito y frecuencia. Pero para el caso de la tensión y corriente de cortocircuito su comportamiento en cada uno de estos puntos es el mismo, sin importar que si se han implementado el sistema de generación solar fotovoltaica o no, las señales se pueden apreciar en la Figura 44.

FIGURA N°44. Comportamiento de la tensión y corriente de cortocircuito en todos los puntos con fotovoltaico (línea roja) y sin fotovoltaico (línea verde)



Entonces como se aprecia en la Figura 42, existe una caída de tensión drástica a partir del momento en el que se origina el cortocircuito y al ocurrir la falla la corriente se dispara.

En las Figuras 45, 46, 47 se analiza la señal de la frecuencia, en las distintas barras (tablero 1.1, tablero general, tablero de distribución), en las situaciones con y sin fotovoltaico, cuando no hay el sistema fotovoltaico (línea verde) se puede apreciar que una vez ocurrida la falla, la señal cae rompiéndose el equilibrio entre la generación y demanda, pero el equilibrio se mantiene y la frecuencia se restablece. Luego se ha realizado la comparación con la frecuencia para el caso en el que se ha incorporado el sistema fotovoltaico (línea roja) inyectando la energía en las instalaciones de la planta, se puede apreciar que la frecuencia no se ve alterada y permanece en su valor normal.

FIGURA N°45. Frecuencia en la barra 1.1, con fotovoltaico (línea roja) y sin fotovoltaico (línea verde)

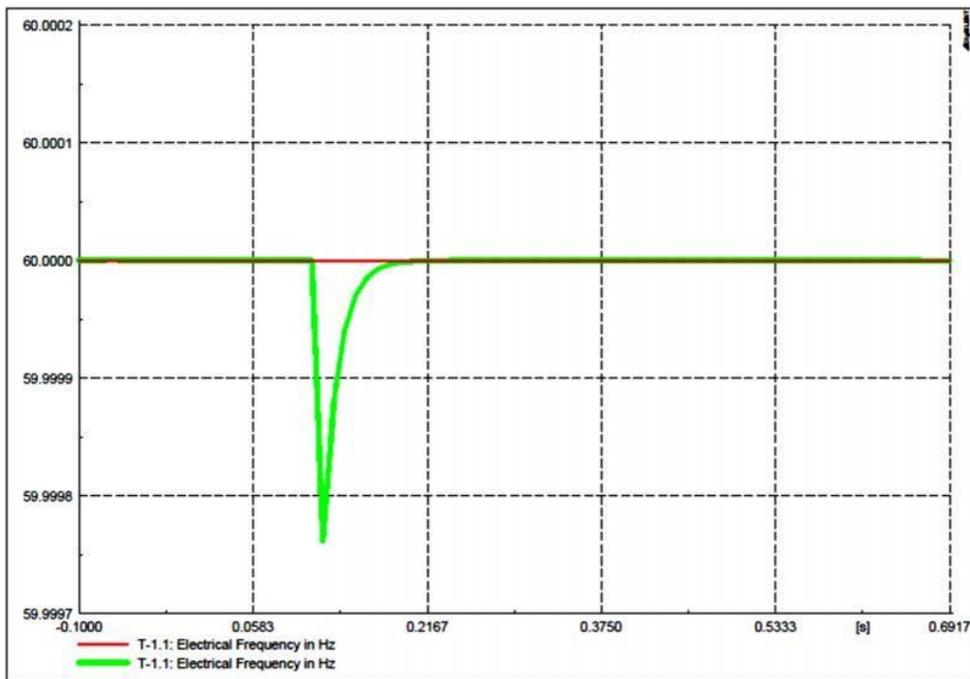


FIGURA N°46. Frecuencia en la barra general oficinas, comedor y servicios, con fotovoltaico (línea roja) y sin fotovoltaico (línea verde)

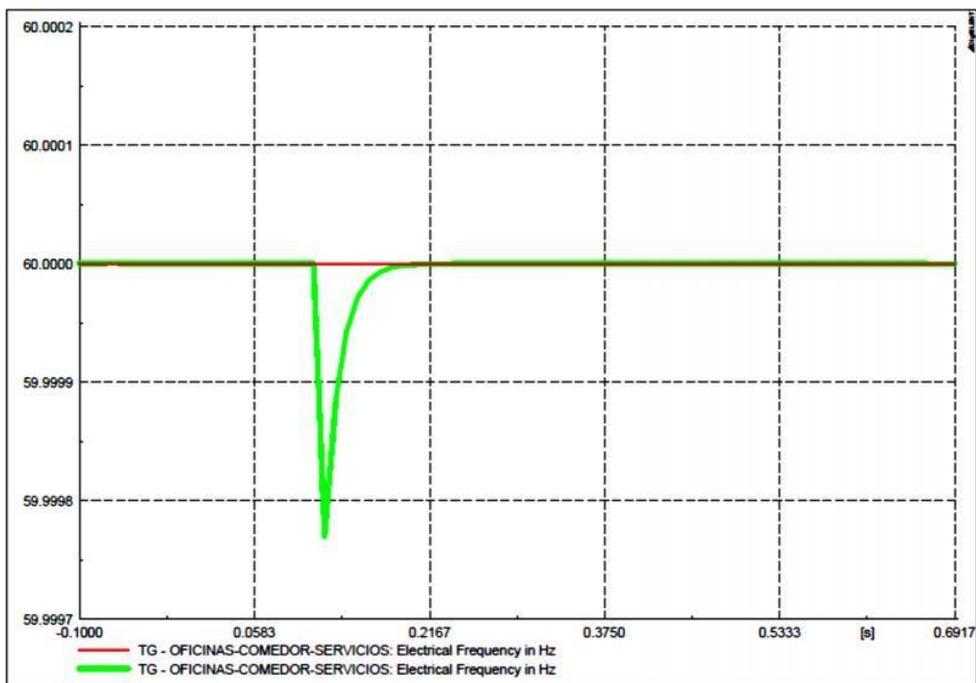
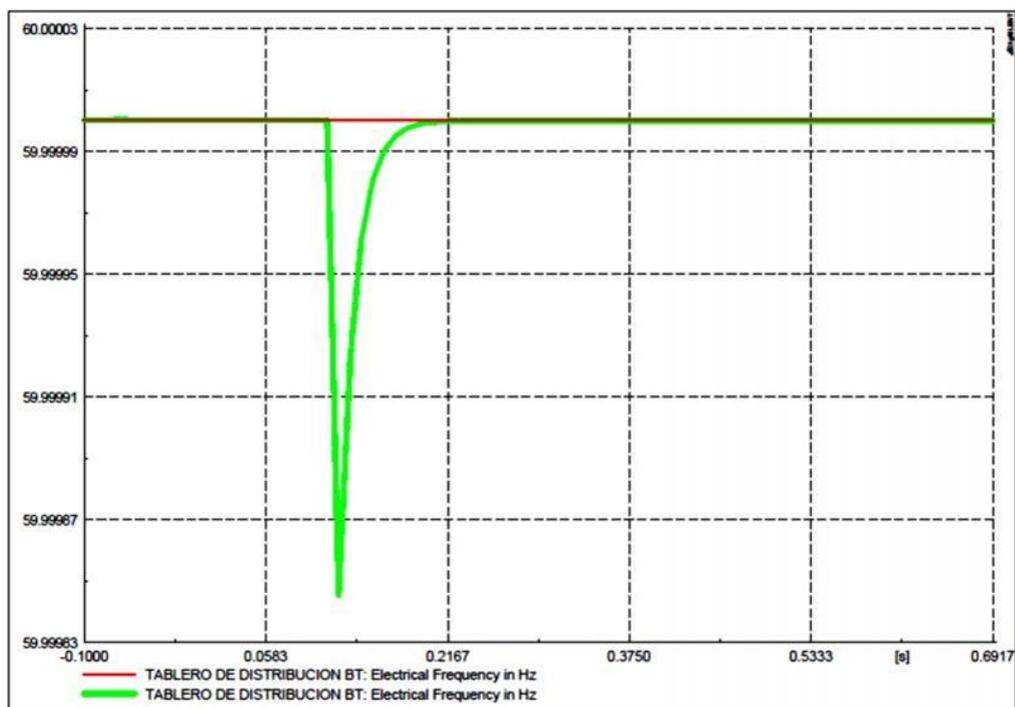


FIGURA N°47. Frecuencia en la barra de distribución, con fotovoltaico (línea roja) y sin fotovoltaico (línea verde)



En general se puede deducir que en base a los comportamientos de todas las cargas que se presentaron en este análisis de estabilidad, no se presentó ningún fenómeno transitorio que pudiera elevar los valores de la tensión, la corriente de cortocircuito y la frecuencia más allá de los valores que el sistema maneja normalmente. Ni se presentó ninguna distorsión en estas señales que fuera realmente considerable.

Por lo cual se puede decir que ante la incorporación del sistema fotovoltaico en las instalaciones de la planta de mantenimiento Modelo no se vio comprometida la estabilidad debido a alguna distorsión transitoria.

Reporte completo de resultados del DigSILENT

A continuación se muestra los resultados y parámetros del flujo de potencia de la instalación.

TABLA N°21. Resultados

		DIGILENT PowerFactory 15.1.7		Project: Date: 10/8/2019			
Complete System Report: Substations, Voltage Profiles, Grid Interchange							
Load Flow Calculation		Automatic Model Adaptation for Convergence Max. Acceptable Load Flow Error for Nodes Model Equations		No 1.00 kVA 0.10 %			
AC Load Flow, balanced, positive sequence Automatic Tap Adjust of Transformers Consider Reactive Power Limits		No No					
Grid: Raciemsas		System Stage: Raciemsas		Study Case: Study Case / 1			
	rated Voltage [kV]	Bus-voltage [kV]	Active Power [kW]	Reactive Power [kvar]	Power Factor [-]	Current Loading [kA]	Additional Data
MT	10.00 /Xnet	1.00 10.00 0.00	1927.78	-78.18	1.00	0.11	
	Cub_1 /Tr2	External Grid Transformador	1927.78	-78.18	1.00	0.11	Sk": 10000.00 MVA Tap: 0.00 Min: -2 Max: 2
IG - OFICINAS-COMEDOR-SERVICIOS							
	0.40 /Line	1.00 0.40 -151.57	91.09	43.98	0.90	0.15	14.61
	Cub_3 /Line	3 x 185 mm2	10.00	4.84	0.90	0.02	1.61
	Cub_9 /Line	3 x 16 mm2	14.70	7.12	0.90	0.02	2.36
	Cub_10 /Line	3 x 16 mm2(1)	10.00	4.84	0.90	0.02	1.61
	Cub_11 /Line	3 x 10 mm2	4.95	2.40	0.90	0.01	0.79
	Cub_12 /Line	3 x 10 mm2(1)	5.60	2.71	0.90	0.01	0.90
	Cub_13 /Line	3 x 6 mm2	-136.35	-65.89	-0.90	0.22	22.88
	Cub_15 /Line	NYI - 185 mm2					
T-SCI							
	0.40 /Lod	1.00 0.40 -151.70	48.00	9.75	0.98	0.07	
	Cub_4 /Lod	BOMBAS	-48.00	-9.75	-0.98	0.07	18.81
	Cub_3 /Line	NYI - 120 mm2					
CARGAS PROYECTADAS							
	0.40 /Lod	1.00 0.40 -151.89	1849.00	607.74	0.95	2.82	
	Cub_4 /Lod	CARGAS	-1849.01	-607.70	-0.95	2.82	57.80
	Cub_3 /Line	NYI - 500 mm2					
T-1.1							
	0.40 /Lod	1.00 0.40 -151.50	90.80	43.98	0.90	0.15	
	Cub_1 /Lod	1.1	-90.80	-43.98	-0.90	0.15	14.61
	Cub_2 /Line	3 x 185 mm2					

TABLA N°22. resultados

Grid: Raciemsa		System Stage: Raciemsa				Study Case: Study Case				Annex: / 2		
rated Voltage [kV]	[p.u.]	Bus-voltage [kV]	[deg]	Active Power [kW]	Reactive Power [kvar]	Power Factor [-]	Current [kA]	Loading [%]	Additional Data			
T-1.2	0.40	1.00	0.40	-151.56								
Cub_1 /Lod		1.2			10.00	4.84	0.90	0.02		0.01 MW	Q10: 0.00 Mvar	
Cub_3 /Lne		3 x 16 mm2			-10.00	-4.84	-0.90	0.02	1.61	0.00 kW	clod: 0.00 kvar L:	0.05 km
T-1.3	0.40	1.00	0.40	-151.57								
Cub_1 /Lod		1.3			14.70	7.12	0.90	0.02		0.01 MW	Q10: 0.01 Mvar	
Cub_2 /Lne		3 x 16 mm2(1)			-14.70	-7.12	-0.90	0.02	2.36	0.00 kW	clod: 0.00 kvar L:	0.02 km
T-1.4	0.40	1.00	0.40	-151.57								
Cub_1 /Lod		1.4			10.00	4.84	0.90	0.02		0.01 MW	Q10: 0.00 Mvar	
Cub_2 /Lne		3 x 10 mm2			-10.00	-4.84	-0.90	0.02	1.61	0.00 kW	clod: 0.00 kvar L:	0.03 km
T-1.5	0.40	1.00	0.40	-151.56								
Cub_1 /Lod		1.5			4.95	2.40	0.90	0.01		0.00 MW	Q10: 0.00 Mvar	
Cub_2 /Lne		3 x 10 mm2(1)			-4.95	-2.40	-0.90	0.01	0.79	0.00 kW	clod: 0.00 kvar L:	0.08 km
T-BO	0.40	1.00	0.40	-151.56								
Cub_1 /Lod		BO			5.60	2.71	0.90	0.01		0.01 MW	Q10: 0.00 Mvar	
Cub_2 /Lne		3 x 6 mm2			-5.60	-2.71	-0.90	0.01	0.90	0.00 kW	clod: 0.00 kvar L:	0.05 km
TABLERO DE DISTRIBUCION BT												
Cub_11 /Genstat		1.00	0.40	-151.56								
Cub_6 /Tr2		GENERADOR FOTOVOLT			115.21	832.99	0.14	1.21	693.49			
Cub_7 /Lne		Transformador			-1921.40	136.66	-1.00	2.78	38.59	Tap:	Min: -2	Max: 2
Cub_8 /Lne		NYI - 185 mm2			136.43	65.96	0.90	0.22	22.88	0.07 kW	clod: 0.00 kvar L:	0.01 km
Cub_9 /Lne		NYI - 120 mm2			48.12	9.89	0.98	0.07	18.81	0.12 kW	clod: 0.00 kvar L:	0.05 km
Cub_9 /Lne		NYI - 500 mm2			1852.07	620.48	0.95	2.82	57.80	3.07 kW	clod: 0.01 kvar L:	0.02 km

TABLA N°23. resultados

		DIGSILENT PowerFactory 15.1.7		Project: Date: 10/8/2019	
Complete System Report: Substations, Voltage Profiles, Grid Interchange					
Load Flow Calculation					
AC Load Flow, balanced, positive sequence		Automatic Model Adaptation for Convergence		No	
Automatic Tap Adjust of Transformers		Max. Acceptable Load Flow Error for Nodes		1.00 kVA	
Consider Reactive Power Limits		Model Equations		0.10 %	
Grid: Raciensa		System Stage: Raciensa		Study Case: Study Case	
				Annex: / 3	
rtd.V [kV]		Bus - voltage [kV] [deg]		Voltage - Deviation [%]	
				-10 -5 0 +5 +10	
MT	10.00	1.000	10.00	0.00	
TG - OFICINAS-COMEDOR-SERVICIOS	0.40	0.999	0.40-151.57		
T-SCI	0.40	0.997	0.40-151.70		
CARGAS PROYECTADAS	0.40	0.996	0.40-151.89		
T-1.1	0.40	0.997	0.40-151.50		
T-1.2	0.40	0.999	0.40-151.56		
T-1.3	0.40	0.999	0.40-151.57		
T-1.4	0.40	0.999	0.40-151.57		
T-1.5	0.40	0.999	0.40-151.56		
T-BO	0.40	0.999	0.40-151.56		
TABLERO DE DISTRIBUCION BT	0.40	1.000	0.40-151.56		

TABLA N°25. resultados

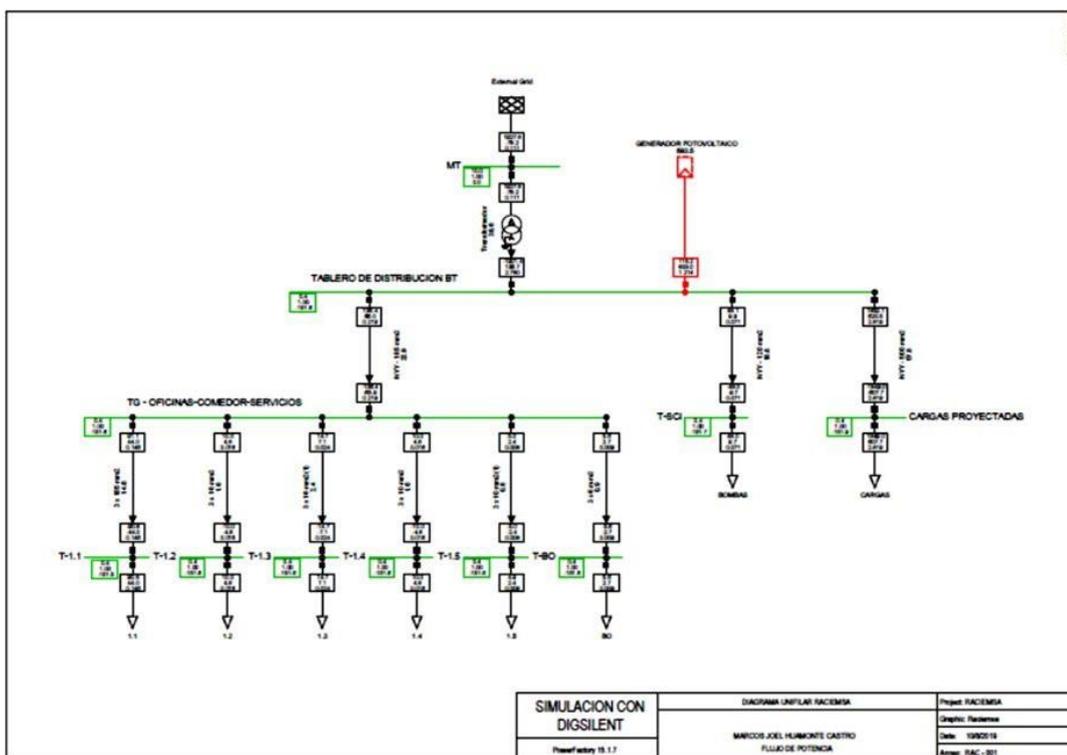
		DIGSILENT PowerFactory 15.1.7		Project: Date: 10/8/2019	
Complete System Report: Substations, Voltage Profiles, Grid Interchange					
Load Flow Calculation		Automatic Model Adaptation for Convergence Max. Acceptable Load Flow Error for Nodes Model Equations		No 1.00 kVA 0.10 %	
AC Load Flow, balanced, positive sequence Automatic Tap Adjust of Transformers Consider Reactive Power Limits		No No			
Total System Summary					
Generation [kW]/ [kvar]		Motor Load [kW]/ [kvar]		Compen- sation [kW]/ [kvar]	
External Infeed [kW]/ [kvar]		Load [kW]/ [kvar]		Inter Area Flow [kW]/ [kvar]	
Total Losses [kW]/ [kvar]		Total Losses [kW]/ [kvar]		Load Losses [kW]/ [kvar]	
No-load Losses [kW]/ [kvar]		No-load Losses [kW]/ [kvar]		No-load Losses [kW]/ [kvar]	
\Tesis\Raciemsa\Network Model\Network Data\Raciemsa					
115.21 832.99		0.00 0.00		0.00 0.00	
2033.05 683.38		0.00 0.00		1927.78 -78.18	
0.00 0.00		0.00 0.00		9.93 71.47	
6.38 65.33		6.38 65.33		3.55 6.14	
Total:					
115.21 832.99		0.00 0.00		0.00 0.00	
2033.05 683.38		0.00 0.00		1927.78 -78.18	
0.00 0.00		0.00 0.00		9.93 71.47	
6.38 65.33		6.38 65.33		3.55 6.14	

VII. ANALISIS DE LOS RESULTADOS

Estas simulaciones de la incorporación del sistema fotovoltaico para autoconsumo que inyecta energía a la red de baja tensión, son necesarias para ver cómo afecta las protecciones de la instalación, en el caso que se presente una falla es importante saber cómo se vería afectado las instalaciones, si es capaz de dispersar dicha falla o no, y así poder evitar daños en los diferentes elementos de la instalación. También se puede comprobar si estos sistemas fotovoltaicos son beneficiosos para la instalación o no.

Para los diferentes tipos de análisis que se desean realizar, es necesario implementar los estudios de flujo de potencia, cortocircuito y transitorios, antes de la implementación de la instalación fotovoltaica, al 50% de la inyección de la potencia fotovoltaica y al 100% de la inyección de la potencia fotovoltaica a las redes de baja tensión, esto es necesario para tener puntos de comparación.

FIGURA N°48. Flujo de potencia de las instalaciones



Análisis del perfil de tensión

Es uno de los métodos para determinar la estabilidad en un sistema eléctrico, es a través del análisis del perfil de tensión. En un sistema de eléctrico la tensión no puede sobrepasar un determinado límite, el cual está establecido en +5% y -5% de la tensión nominal.

En la tabla 26 se puede apreciar los valores de tensión para cada barra de la instalación, dependiendo de los diferentes casos en los que está relacionado el sistema fotovoltaico. Con los datos consignados en esta tabla se elaboró una gráfica donde se podría observar todos los perfiles de tensión para cada situación donde el sistema fotovoltaico está inyectando cierta cantidad de potencia, dicha grafica se encuentra en la Figura 49.

FIGURA N°49. Perfil de tensión

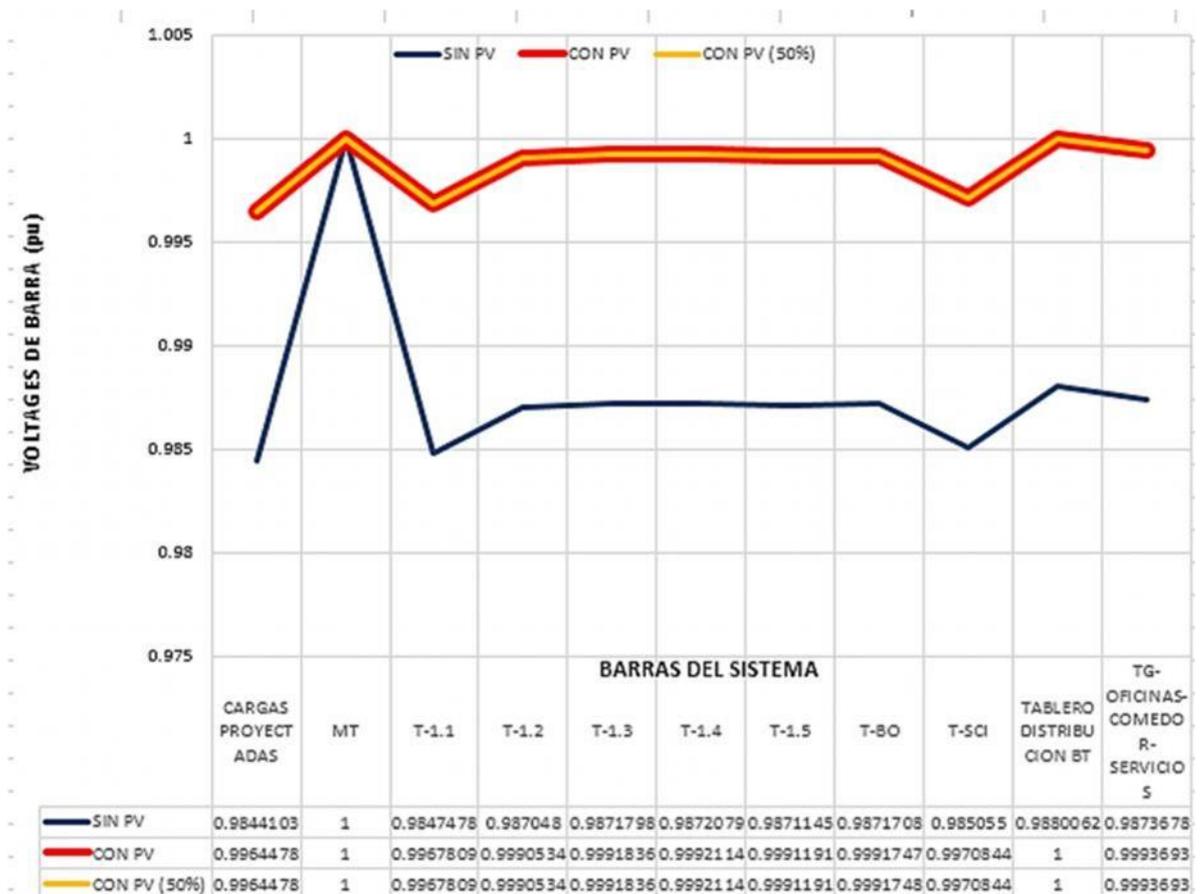


TABLA N°26. Voltajes nodales del sistema (pu)

NOMBRE BARRA	Nom.L- L	SIN PV	CON PV	PV (50%)
	Volt.			
	kV	p.u.	p.u.	p.u.
1 CARGAS PROYECTADAS	0.4	0.984410 3	0.996447 8	0.996447 8
2 MT	10	1	1	1
3 T-1.1	0.4	0.984747 8	0.996780 9	0.996780 9
4 T-1.2	0.4	0.987048	0.999053 4	0.999053 4
5 T-1.3	0.4	0.987179 8	0.999183 6	0.999183 6
6 T-1.4	0.4	0.987207 9	0.999211 4	0.999211 4
7 T-1.5	0.4	0.987114 5	0.999119 1	0.999119 1
8 T-BO	0.4	0.987170 8	0.999174 7	0.999174 8
9 T-SCI	0.4	0.985055	0.997084 4	0.997084 4
10 TABLERO DISTRIBUCION BT	0.4	0.988006 2	1	1
11 TG-OFICINAS- COMEDOR-SERVICIOS	0.4	0.987367 8	0.999369 3	0.999369 3

Si se comparan los datos que hay registrados en la columna "sin FV" de la Tabla 10, que son los valores de tensión de todas las barras de la instalación cuando no se ha incorporado el sistema fotovoltaico, con respecto al resto, donde se presentan las mismas tensiones, pero para diferentes casos donde el sistema fotovoltaico está inyectando una determinada

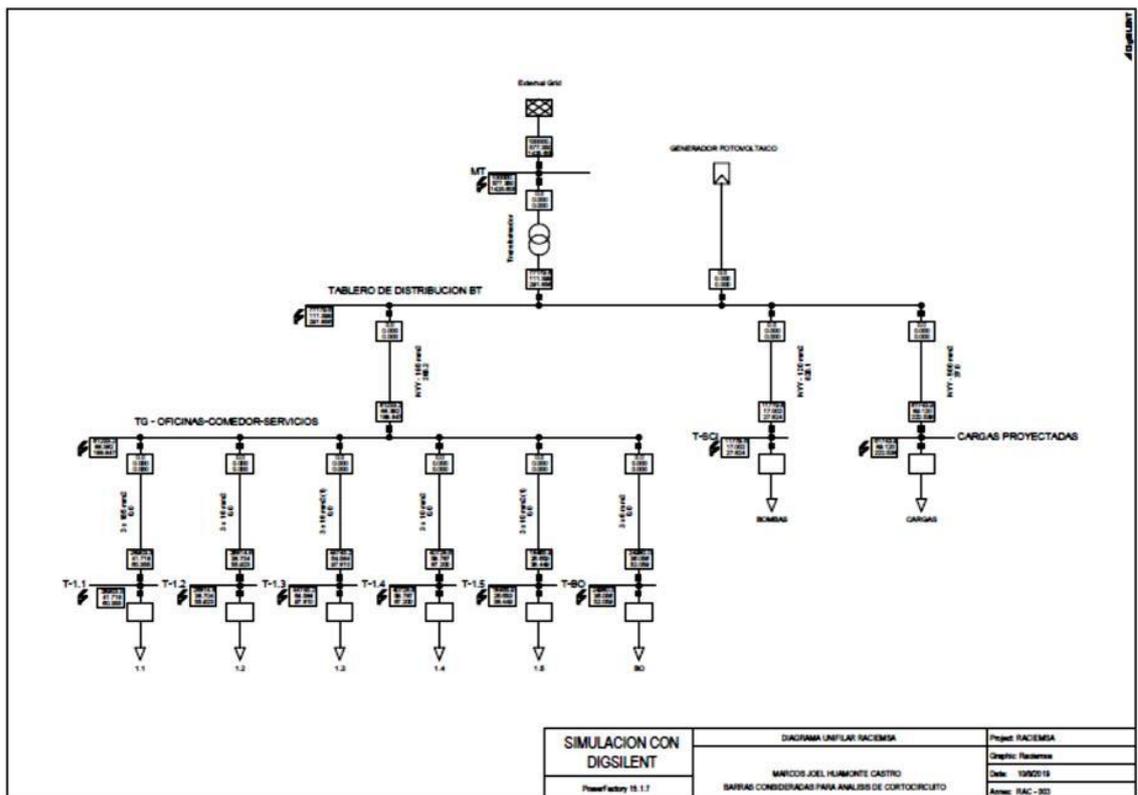
cantidad de potencia. Y también comparando los diferentes perfiles de tensión que se muestran en la Figura 38. Se puede deducir que entre mayor es la cantidad de potencia que suministra el sistema fotovoltaico a las instalaciones internas de baja tensión, mayor serán las tensiones en las barras. Esto se debe ya que debido a la inyección de potencia por parte del sistema fotovoltaico la demanda del sistema disminuye, causando una reducción en los flujos de potencia de las líneas de la instalación.

Por lo tanto, se puede concluir que el perfil de tensión puede mejorar a través del incremento de la potencia que inyecta el sistema fotovoltaico o aumento de la potencia instalada.

Análisis de corrientes de cortocircuito

Para este análisis se realiza un estudio de cortocircuito mediante la aplicación de una falla trifásica en todas las barras del sistema eléctrico de Raciencia esto se puede apreciar en la figura 50, con la intención de analizar el comportamiento de las corrientes de cortocircuito en cada uno de estos y con el fin de establecer una comparación entre los niveles de corrientes de cortocircuito en las diferentes barras de la instalación, en las siguientes situaciones, cuando no se ha agregado el sistema fotovoltaico, cuando se agrega el 100% de la capacidad nominal del sistema fotovoltaico y para cuando el sistema fotovoltaico operan al 50% de su capacidad nominal.

FIGURA N°50. Barras consideradas para análisis de cortocircuito



A continuación, se muestra la Tabla 27 donde se puede apreciar los valores de las corrientes de cortocircuito en cada barra del sistema para las condiciones ya mencionadas.

TABLA N°27. Corrientes de corto circuito (KA)

NOMBRE BARRA	SIN PV	CON PV	PV (50%)
	kA	kA	kA
1 CARGAS PROYECTADAS	89.11967	89.11967	89.11967
2 MT	577.3503	577.3503	577.3503
3 T-1.1	41.71827	41.71827	41.71827
4 T-1.2	38.70376	38.70376	38.70376
5 T-1.3	64.58411	64.58411	64.58411
6 T-1.4	58.78671	58.78671	58.78671
7 T-1.5	26.65329	26.65329	26.65329

8	T-BO	36.05556	36.05556	36.05556
9	T-SCI	17.00232	17.00232	17.00232
10	TABLERO DISTRIBUCION BT	111.3991	111.3991	111.3991
11	TG - OFICINAS-COMEDOR-SERVICIOS	88.38245	88.38245	88.38245

Comparando los diferentes casos que se presentan en la Tabla 27, se puede deducir que sin importar la cantidad de potencia que este inyectando el sistema fotovoltaico o independientemente del hecho de que esté implementado la instalación fotovoltaica, no cambia los valores de las corrientes de cortocircuito en las diferentes barras del sistema. La razón de que estas corrientes de cortocircuito no cambien se debe a que los inversores que están asociados con el sistema fotovoltaico limitan la corriente de cortocircuito. Esto significa que no es necesario modificar o cambiar las protecciones que se encuentren instaladas en la planta de mantenimiento de Raciencia.

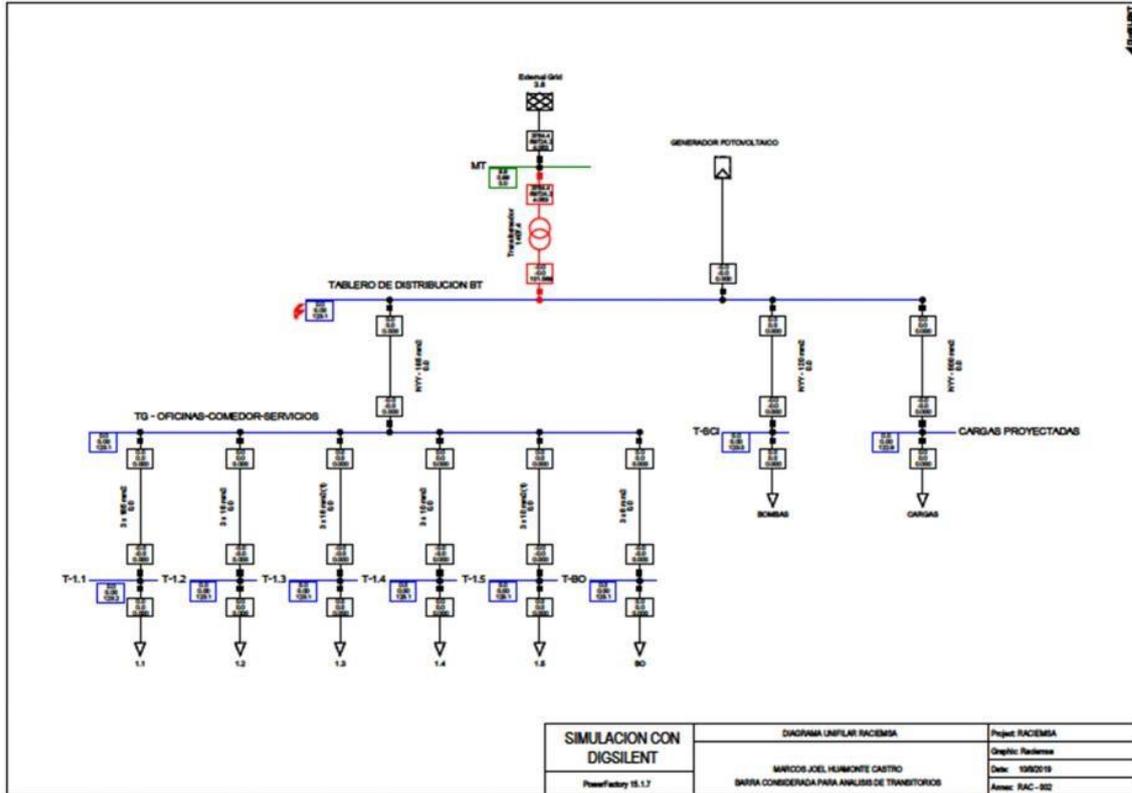
Análisis de estabilidad: Transitorios

En este análisis se desea observar gráficamente la tensión, la corriente de cortocircuito y la frecuencia en los nodos principales del sistema de estudio, cuando ocurre el mismo tipo de cortocircuito que se analizó para el caso del análisis de las corrientes de cortocircuito.

Por medio de estas graficas se determina si existe alguna distorsión que pueda afectar la estabilidad del sistema de eléctrico en las instalaciones de Raciencia, con la implementación del sistema fotovoltaico, debido a la ocurrencia de fenómenos transitorios. Para esto se utiliza la simulación de transitorios de DIgSILENT.

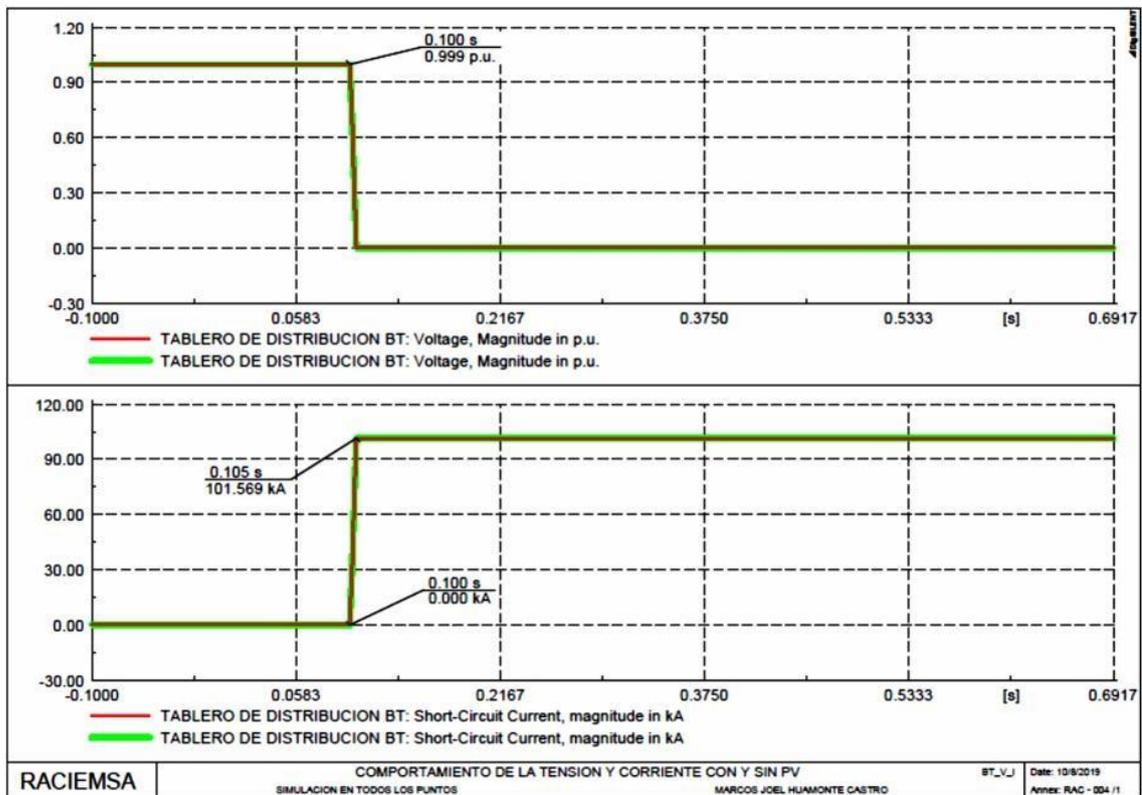
El punto donde se ubica el cortocircuito que se considera para este análisis de estabilidad, se muestra en la Figura 51. Este cortocircuito se ubica en la barra de distribución de baja tensión.

FIGURA N°51. Nodo considerado para análisis de transitorios



Para el punto mostrado en la Figura 51 se construyeron gráficos de tensión, corriente de cortocircuito y frecuencia. Pero para el caso de la tensión y corriente de cortocircuito su comportamiento en cada uno de estos puntos es el mismo, sin importar que si se han implementado el sistema de generación solar fotovoltaica o no, las señales se pueden apreciar en la Figura 52.

FIGURA N°52. Comportamiento de la tensión y corriente de cortocircuito en todos los puntos con fotovoltaico (línea roja) y sin fotovoltaico (línea verde)



Entonces como se aprecia en la Figura 52, existe una caída de tensión drástica a partir del momento en el que se origina el cortocircuito y al ocurrir la falla la corriente se dispara.

En las Figuras 53, 54, 55 se analiza la señal de la frecuencia, en las distintas barras (tablero 1.1, tablero general, tablero de distribución), en las situaciones con y sin fotovoltaico, cuando no hay el sistema fotovoltaico (línea verde) se puede apreciar que una vez ocurrida la falla, la señal cae rompiéndose el equilibrio entre la generación y demanda, pero el equilibrio se mantiene y la frecuencia se restablece. Luego se ha realizado la comparación con la frecuencia para el caso en el que se ha incorporado el sistema fotovoltaico (línea roja)

inyectando la energía en las instalaciones de la planta, se puede apreciar que la frecuencia no se ve alterada y permanece en su valor normal.

FIGURA N°53. Frecuencia en la barra 1.1, con fotovoltaico (línea roja) y sin fotovoltaico (línea verde)

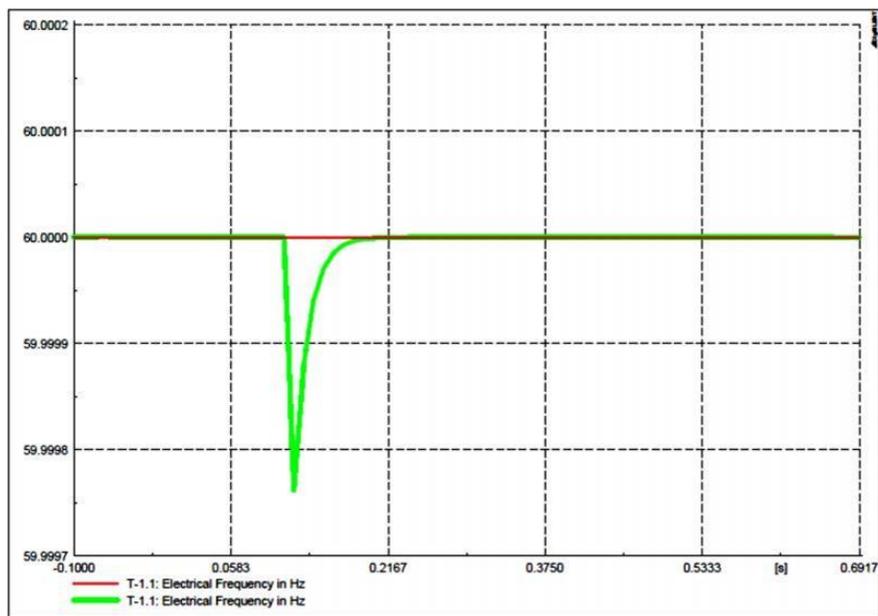


FIGURA N°54. Frecuencia en la barra general oficinas, comedor y servicios, con fotovoltaico (línea roja) y sin fotovoltaico (línea verde)

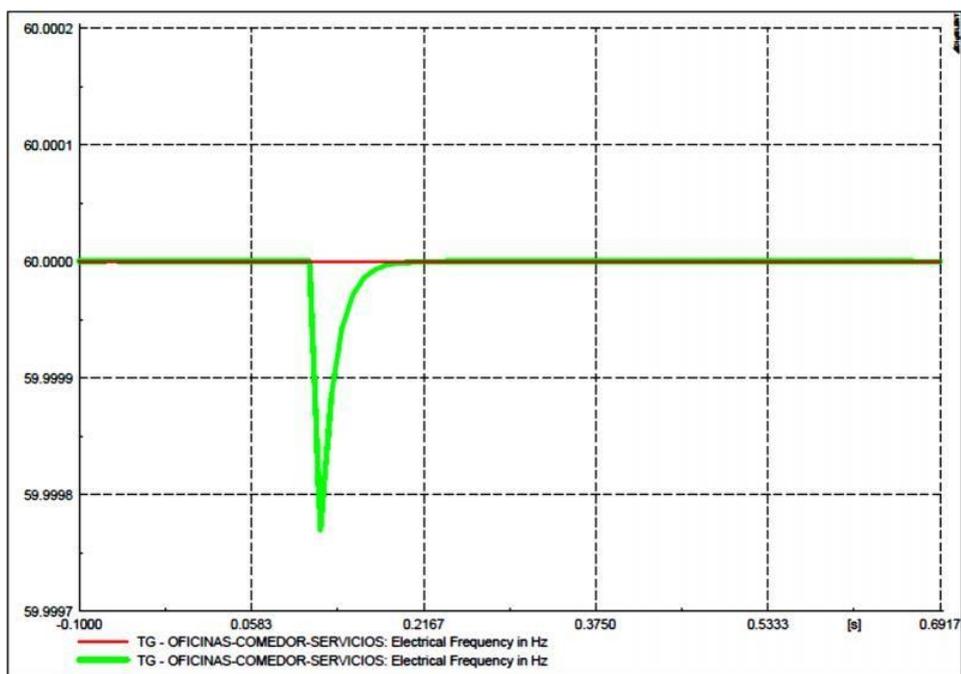
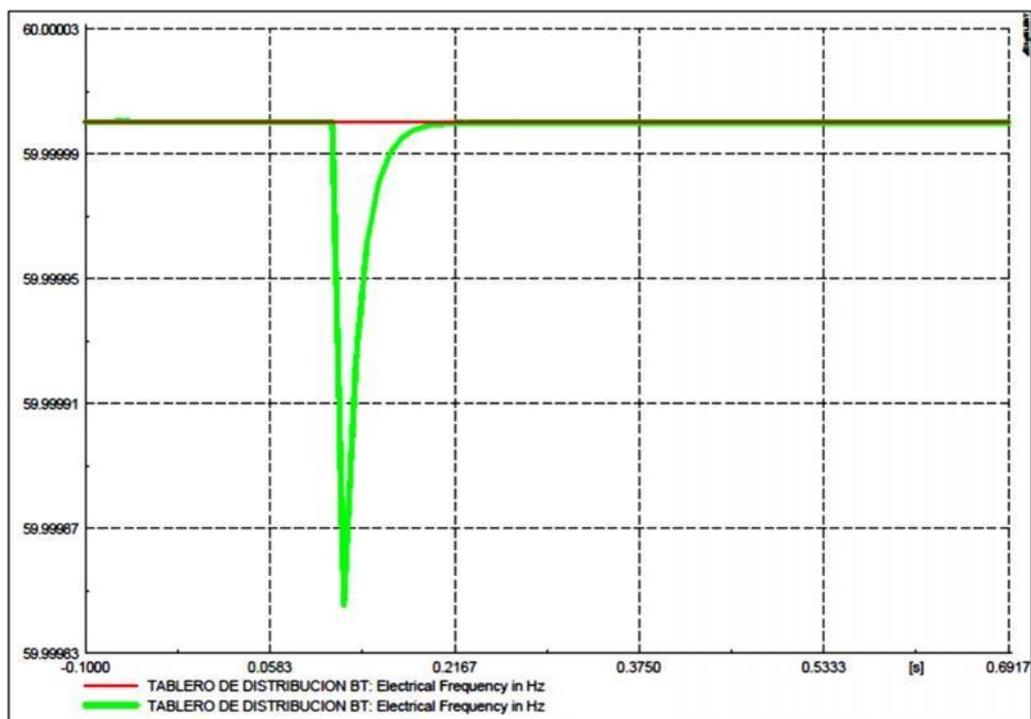


FIGURA N°55. Frecuencia en la barra de distribución, con fotovoltaico (línea roja) y sin fotovoltaico (línea verde)



En general se puede deducir que en base a los comportamientos de todas las cargas que se presentaron en este análisis de estabilidad, no se presentó ningún fenómeno transitorio que pudiera elevar los valores de la tensión, la corriente de cortocircuito y la frecuencia más allá de los valores que el sistema maneja normalmente. Ni se presentó ninguna distorsión en estas señales que fuera realmente considerable.

Por lo cual se puede decir que ante la incorporación del sistema fotovoltaico en las instalaciones de la planta de mantenimiento de Raciencia no se vio comprometida la estabilidad debido a alguna distorsión transitoria.

Reporte completo de resultados del DigSILENT

A continuación se muestra los resultados y parámetros del flujo de potencia de la instalación.

TABLA N°29. resultados y parámetros

Grid: Raciemsa		System Stage: Raciemsa				Study Case: Study Case				Annex:		
rated Voltage [kV] [p.u.]		Bus-voltage [kV]	Phase angle [deg]	Active Power [kW]	Reactive Power [kvar]	Power Factor [-]	Current [kA]	Loading [%]	Additional Data			
T-1.2	0.40 /Lod	1.00	0.40 -151.56	10.00	4.84	0.90	0.02	1.61	P10: 0.01 MW	Q10: 0.00 Mvar		
	Cub_1 /Lod	1.2		-10.00	-4.84	-0.90	0.02		Pv: 0.00 kW	cLod: 0.00 kvar L:		0.05 km
	Cub_3 /Lne	3 x 16 mm2										
T-1.3	0.40 /Lod	1.00	0.40 -151.57	14.70	7.12	0.90	0.02	2.36	P10: 0.01 MW	Q10: 0.01 Mvar		
	Cub_1 /Lod	1.3		-14.70	-7.12	-0.90	0.02		Pv: 0.00 kW	cLod: 0.00 kvar L:		0.02 km
	Cub_2 /Lne	3 x 16 mm2(1)										
T-1.4	0.40 /Lod	1.00	0.40 -151.57	10.00	4.84	0.90	0.02	1.61	P10: 0.01 MW	Q10: 0.00 Mvar		
	Cub_1 /Lod	1.4		-10.00	-4.84	-0.90	0.02		Pv: 0.00 kW	cLod: 0.00 kvar L:		0.03 km
	Cub_2 /Lne	3 x 10 mm2										
T-1.5	0.40 /Lod	1.00	0.40 -151.56	4.95	2.40	0.90	0.01	0.79	P10: 0.00 MW	Q10: 0.00 Mvar		
	Cub_1 /Lod	1.5		-4.95	-2.40	-0.90	0.01		Pv: 0.00 kW	cLod: 0.00 kvar L:		0.08 km
	Cub_2 /Lne	3 x 10 mm2(1)										
T-BO	0.40 /Lod	1.00	0.40 -151.56	5.60	2.71	0.90	0.01	0.90	P10: 0.01 MW	Q10: 0.00 Mvar		
	Cub_1 /Lod	BO		-5.60	-2.71	-0.90	0.01		Pv: 0.00 kW	cLod: 0.00 kvar L:		0.05 km
	Cub_2 /Lne	3 x 6 mm2										
TABLERO DE DISTRIBUCION BT												
	0.40 /Genstat	1.00	0.40 -151.56	115.21	832.99	0.14	1.21	693.49	Tap: 0.00	Min: -2	Max: 2	
	Cub_11 /Tr2	GENERADOR FOTOVOLT		-1921.40	136.66	-1.00	2.78	38.59	Pv: 0.07 kW	cLod: 0.00 kvar L:		0.01 km
	Cub_6 /Lne	Trasformador		136.43	65.96	0.90	0.22	22.88	Pv: 0.12 kW	cLod: 0.00 kvar L:		0.05 km
	Cub_7 /Lne	NYI - 185 mm2		48.12	9.89	0.98	0.07	18.81	Pv: 3.07 kW	cLod: 0.01 kvar L:		0.02 km
	Cub_8 /Lne	NYI - 120 mm2		1852.07	620.48	0.95	2.82	57.80				
	Cub_9 /Lne	NYI - 500 mm2										

TABLA N°30. resultados y parámetros

		DIGSILENT PowerFactory 15.1.7		Project: Date: 10/8/2019	
Complete System Report: Substations, Voltage Profiles, Grid Interchange					
Load Flow Calculation		AC Load Flow, balanced, positive sequence Automatic Tap Adjust of Transformers Consider Reactive Power Limits		Automatic Model Adaptation for Convergence Max. Acceptable Load Flow Error for Nodes Model Equations	
		No No		No 1.00 kVA 0.10 %	
Grid: Raciensa		System Stage: Raciensa		Study Case: Study Case	
		Annex: / 3			
		rtd.V [kV]		Voltage - Deviation [%]	
		[p.u.]		-10 -5 0 +5 +10	
		Bus - voltage [kV] [deg]			
MT		10.00 1.000 10.00 0.00			
TG - OFICINAS-COMEDOR-SERVICIOS		0.40 0.999 0.40-151.57			
T-SCI		0.40 0.997 0.40-151.70			
CARGAS PROYECTADAS		0.40 0.996 0.40-151.89			
T-1.1		0.40 0.997 0.40-151.50			
T-1.2		0.40 0.999 0.40-151.56			
T-1.3		0.40 0.999 0.40-151.57			
T-1.4		0.40 0.999 0.40-151.57			
T-1.5		0.40 0.999 0.40-151.56			
T-BO		0.40 0.999 0.40-151.56			
TABLERO DE DISTRIBUCION BT		0.40 1.000 0.40-151.56			

TABLA N°31. Resultados y parámetros

		DIGSILENT PowerFactory 15.1.7		Project: Date: 10/8/2019							
Load Flow Calculation											
Complete System Report: Substations, Voltage Profiles, Grid Interchange											
AC Load Flow, balanced, positive sequence Automatic Tap Adjust of Transformers Consider Reactive Power Limits		No No	Automatic Model Adaptation for Convergence Max. Acceptable Load Flow Error for Nodes Model Equations		No 1.00 kVA 0.10 %						
Grid: Raciemsa			System Stage: Raciemsa								
Study Case: Study Case			Annex: / 4								
Volt. Level [kV]	Generation [kW] / [kvar]	Motor Load [kW] / [kvar]	Load [kW] / [kvar]	Compen- sation [kW] / [kvar]	External Infeed [kW] / [kvar]	Interchange to	Interchange [kW] / [kvar]	Power Interchange [kW] / [kvar]	Total Losses [kW] / [kvar]	Load Losses [kW] / [kvar]	NoLoad Losses [kW] / [kvar]
0.40	115.21 832.99	0.00 0.00	2033.05 683.38	0.00 0.00	0.00 0.00	10.00 kV		-1921.40 136.66	3.56 13.00 6.37 58.48	3.56 13.00 2.82 52.33	0.00 -0.01 3.55 6.15
10.00	0.00 0.00	0.00 0.00	0.00 0.00	0.00 0.00	1927.78 -78.18	0.40 kV		1927.78 -78.18	0.00 0.00 6.37 58.48	0.00 0.00 2.82 52.33	0.00 0.00 3.55 6.15
Total:	115.21 832.99	0.00 0.00	2033.05 683.38	0.00 0.00	1927.78 -78.18			0.00 0.00	9.93 71.47	6.38 65.33	3.55 6.14

TABLA N°32. resultados y parámetros

		DIGSILENT PowerFactory 15.1.7		Project: Date: 10/8/2019	
Complete System Report: Substations, Voltage Profiles, Grid Interchange					
Load Flow Calculation		Automatic Model Adaptation for Convergence Max. Acceptable Load Flow Error for Nodes Model Equations		No 1.00 kVA 0.10 %	
AC Load Flow, balanced, positive sequence Automatic Tap Adjust of Transformers Consider Reactive Power Limits		No No			
Total System Summary					
Generation [kW]/ [kvar]		Motor Load [kW]/ [kvar]		Load [kW]/ [kvar]	
Compen- sation [kW]/ [kvar]		External Infeed [kW]/ [kvar]		Inter Area Flow [kW]/ [kvar]	
Total Losses [kW]/ [kvar]		No Load Losses [kW]/ [kvar]		Annex: / 5	
\Tesis\Raciemsa\Network Model\Network Data\Raciemsa					
115.21 832.99		0.00 0.00		2033.05 683.38	
0.00 0.00		0.00 0.00		1927.78 -78.18	
0.00 0.00		0.00 0.00		9.93 71.47	
3.55 6.14		6.38 65.33		Total: 115.21 832.99	
3.55 6.14		6.38 65.33		1927.78 -78.18	
9.93 71.47		0.00 0.00		0.00 0.00	
6.38 65.33		0.00 0.00		0.00 0.00	

CONCLUSIONES

1. En el presente trabajo se describe el diseño, selección de componentes de la instalación solar y materiales de un sistema fotovoltaico conectado a la red interior para autoconsumo, contribuyendo así a una mejor sostenibilidad energética y medioambiental. Apreciando que el impacto que causa dicha instalación fotovoltaica en las instalaciones de la empresa es casi nula ya que se integra con las instalaciones, esto se puede comprobar por los diferentes tipos de análisis que se realizaron. Se simuló la instalación fotovoltaica conectado a la red interior, evaluando su perfil de tensión, cortocircuito y transitorios.
2. En el caso del análisis de perfil de tensión se pudo determinar que entre mayor sea la potencia que inyecta el sistema fotovoltaico al sistema de distribución interno de baja tensión, más mejorará el perfil de tensión. Pero en general se puede decir que la conexión del sistema fotovoltaico se convierte en una buena alternativa para mejorar los problemas de regulación del sistema eléctrico. Después de realizar el análisis para las corrientes de cortocircuito se pudo llegar a la conclusión que independientemente de la cantidad de potencia que inyecte el sistema fotovoltaico, estos no cambiarán en las protecciones del sistema eléctrico, ante la ocurrencia de una falla en cualquier punto de la instalación, ya que el inversor asociado al sistema fotovoltaico limita la corriente que entrega este. Por tanto no es necesario ni modificar, ni cambiar las protecciones existentes en el sistema de baja tensión de las instalaciones.
3. El análisis de estabilidad permite saber que los sistemas fotovoltaicos pueden mejorar la señal de la frecuencia como se vio en las distintas simulaciones realizadas en el capítulo anterior. La reducción de la facturación eléctrica en promedio de 1493 soles, ya que la energía eléctrica generada por nuestro sistema se destinaría al autoconsumo, la empresa antes de la instalación del generador fotovoltaico pagaba en promedio 4210 soles, ahora paga en promedio 2717 soles.

4. La mejora de la imagen de la empresa dedicada al transporte, que se sensibiliza con el medio ambiente, al obtener la energía eléctrica limpia. Y en establecer las ventajas y desventajas de la generación solar fotovoltaica. En general se puede concluir que a través de todos los análisis que se realizaron en la planta, puede tener un impacto positivo en este ya que no solo ayudara con los problemas de regulación que presenten, sino que también ayudaran a alimentar demandas en algunos puntos de la instalación y los flujos de potencia se reducirán en algunas líneas causando que las pérdidas en el sistema se reduzcan.

RECOMENDACIONES

- 1.** Profundizar el análisis de forma simulada de la instalación fotovoltaica conectado a la red interior, evaluando su perfil de tensión, cortocircuito y transitorios.
- 2.** Analizar las corrientes de cortocircuito para garantizar que la cantidad de potencia que inyecte el sistema fotovoltaico, estos no cambian en las protecciones del sistema eléctrico.
- 3.** Realizar los cálculos con ajustes pre establecido para comparar la reducción de la facturación eléctrica.
- 4.** Establecer las ventajas y desventajas de la generación solar fotovoltaica analizando la información que se obtuvo en la planta, a fin de ayudar a alimentar demandas en algunos puntos de la instalación y los flujos de potencia.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARADO FAJARDO, ANDREA CATALINA. 2014. ANÁLISIS, DISEÑO Y SIMULACIÓN DE SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO PARA SUMINISTRO ELÉCTRICO EN APOYO A PROGRAMA NUTRICIONAL EN LA ESCUELA RURAL EL CARDONAL, TIBANÁ (BOYACÁ) – COLOMBIA. BOGOTÁ : UNIVERSIDAD LIBRE, 2014.

Anguiano Sánchez, Alejandra. 2019. Análisis del impacto en el costo eléctrico al implementar estrategias de ahorro y eficiencia energética en industrias del sector de fabricación en Mexicali, B.C. Mexicali : UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA, 2019.

CARDENAS BARRIOS, Deivid Bonny. 2017. Cálculo de Huella de Carbono del Archivo Central Hochschild Mining sede Lima 2016 a través del Estándar Corporativo de Contabilidad y Reporte. Lima : UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS, 2017.

Carreño Pérez, Juan Carlos. 2016. Herramienta sistematizada de análisis Técnico Económico simplificado, para la generación fotovoltaica y eólica en las zonas no interconectadas de Colombia. Bogotá : Universidad Libre de Colombia, 2016.

Castro Bayas, Julián Guillermo y Jara Fajardo, John Erick. 2016. *Modelado matemático y construcción de dos elementos resistivos, para el análisis de sobretensiones debido a impulsos de tipo maniobra en alta tensión.* Guayaquil : Universidad Politécnica Salesiana, 2016.

Cherni, Judith A. 2002. *ENERGÍA RENOVABLE para áreas rurales: SOLUCIÓN Y BARRERAS.* Bogotá : UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, 2002.

Cornejo Lalupú, Héctor Armando. 2013. *SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO DE CONEXIÓN A RED EN EL CENTRO MATERNO INFANTIL DE LA UNIVERSIDAD DE PIURA.* Piura : Universidad de Piura, 2013.

DE LEÓN MORALES, VÍCTOR HERBERT. 2008. *GENERACIÓN ELÉCTRICA FOTOVOLTAICA EN LA FACULTAD DE INGENIERÍA USAC Y ESTUDIO DEL APROVECHAMIENTO.* GUATEMALA : UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA, 2008.

Felipe Huamán, Gonzalo. 2020. *Diseño de un sistema fotovoltaico on grid de autoconsumo e inyección 0 conectado a la red eléctrica del centro de salud Haqira, Apurímac 2020.* Lima : Universidad Tecnológica del Perú, 2020.

Fonseca Muñoz, Wilson Israel. 2017. *Modelamiento de centrales fotovoltaicas en digsilent power factory, considerando mecanismos de control de potencia activa y reactiva.* Quito : Escuela Politécnica Nacional, 2017.

García Jacobo, F. y Romero Guerrero, J.A. 2020. *Diseño de un modelo de simulación, utilizando un software de eventos discretos, en una línea de producción de tejido industrial.* Estado de México : Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica, 2020.

Huamonte Castro, Marcos Joel. 2019. *ANÁLISIS Y DISEÑO DE LA GENERACIÓN SOLAR FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE MANTENIMIENTO DE RACIENCIA GRUPO GLORIA SIMULADO CON DIGSILENT.* Arequipa : UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA, 2019.

Mejía-Rodríguez, Jorge Antonio, Ávila-Ramírez, David Carlos y Córdova Canela, Fernando. 2015. *Las innovaciones tecnológicas orientadas al autoabastecimiento energético sostenible:.* Bogotá : Universidad Nacional de Colombia, 2015. <http://dx.doi.org/10.15446/bitacora.v26n1.43547>.

Ministerio de Energía y Minas de Guatemala. 2020. *Estudio y perfil básico de la medición solar en finca "La Sabana".* Guatemala : Ministerio de Energía y Minas de Guatemala, 2020.

Moncada Osorio, Diego Fernando. 2015. *IMPACTO DE LA MASIFICACIÓN DE LA GENERACIÓN SOLAR FOTOVOLTAICA EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN.* Pereira : UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA, 2015.

Ocón Valdez, Rodrigo y Romero Badillo, Norma Angélica. 2015. *SIMULACIÓN DIGITAL COMO HERRAMIENTA DE APOYO EN LA ENSEÑANZA E INTEGRACIÓN A LA INDUSTRIA DE LOS ALUMNOS DE INGENIERÍA.* MEXICO : IEEE SECCION MEXICO, 2015.

PEÑAFIEL SARAGURO, JUAN CARLOS y SILVA MANZANO, CÉSAR HUGO. 2012. *ANÁLISIS, DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ENERGÍA AUXILIAR AUTOMATIZADO PARA COLECTORES SOLARES Y CALEFONES EN EL USO RACIONAL Y EFICIENTE DE ENERGÍA.* RIOBAMBA : ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO, 2012.

RAMÍREZ CORONA, ADAN GERARDO y MENDOZA LIÉVANOS, VÍCTOR NOEL. 2014. *SISTEMA PARA EVALUAR LA EFICIENCIA Y EL AHORRO ENERGÉTICO DE UN SERVICIO ELÉCTRICO RESIDENCIAL.* México D.F. : UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, 2014.

RAMOS LÓPEZ, HUMBERTO y LUNA PUENTE, RAFAEL. 2014. *DISEÑO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO INTEGRADO A LA RED PARA EL AREA DE ESTACIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD TECNOLOGICA DE SALAMANCA.* CHIHUAHUA : UNIVERSIDAD TECNOLOGICA DE SALAMANCA, 2014.

TOLÓN MARTÍN, TAMARA ISABEL. 2013. *OPERACIÓN Y GESTIÓN DE MICRORREDES ENERGÉTICAS URBANAS EN UN ENTORNO DE SOSTENIBILIDAD ENERGÉTICA Y AMBIENTAL.* Barcelona : Universidad Politécnica de Barcelona, 2013.

Valdiviezo Salas, Paulo Daniel. 2014. *DISEÑO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA EL SUMINISTRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA A 15 COMPUTADORAS PORTÁTILES EN LA PUCP.* Lima : PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ, 2014.

