

Diseño de una microrred aislada para una finca comunitaria ubicada en una zona rural no interconectada del municipio de Cantagallo Bolívar

Fabián Albeiro Ortiz Niño

Cristian David Gómez Sandoval

Trabajo de grado para optar el título de ingeniero electricista

Director:

José Alejandro Amaya Palacio

Doctor en Microelectrónica

Codirector:

Óscar Arnulfo Quiroga Quiroga

Doctor en Tecnología

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica Electrónica y Telecomunicaciones

Bucaramanga

2020

Dedicatoria

Todo lo que soy es producto de las enseñanzas y sacrificio de las dos mujeres que han forjado mi camino, mi mamá y mi nona, por tanto, este pequeño logro es más de ellas que mío.

A mi papá que siempre me brindó su apoyo incondicional y confianza en cada una de las situaciones favorables y adversas.

A mi compañera de vida, quien desde el inicio de este proceso me ha acompañado y apoyado.

A cada uno de los miembros de mi familia, los que están y los que ya no, cada uno de ellos contribuyó en mi formación personal y profesional.

A cada uno de mis compañeros de lucha, puesto que han contribuido a que mi formación sea integral, ética, humana y política, manteniendo en mí la esperanza de la utopía que soñamos y la transformación social que tanto anhelamos.

Cristian David Gómez Sandoval

Dedicatoria

Afortunado por contar con el amor de dos personas nobles, perseverantes y resilientes quienes me formaron en esencia y me han acompañado cada paso, cada decisión; a ustedes madre y padre va dedicado este logro el cual no es mío sino nuestro.

A mis dos hermanas, quienes amo profundamente y son motivación constante de crecer integralmente cada día. A mi familia en general quienes directa e indirectamente han sido una escuela constante de vida. A Liliana Pujimuy por su gran apoyo, cariño y compañía en parte del desarrollo de este interesante ejercicio.

A Misión Lápiz y Papel, quien representa en mí un libro que se construye a diario buscando no solo visibilizar la sociedad en que vivimos, sino un martillo para transformarla.

A la vida, la cual me ha permitido vivir situaciones y compartir con personas fundamentales para mi formación integral al servicio de la sociedad. A la memoria de todas aquellas personas que a través de la historia han luchado, luchamos y lucharán por conquistar derechos para todos los seres y a construir una sociedad empática, justa e incluyente.

Fabian Albeiro Ortiz Niño

Agradecimientos

La asociación campesina del valle del río Cimitarra (ACVC) nos abrió las puertas y puso a disposición todos los recursos necesarios, además de la confianza, lo cual fue vital para la realización de este trabajo de grado; por tal razón agradecemos a cada una de las personas que pusieron su granito de arena en este trabajo.

La escuela de ingenierías eléctrica, electrónica y telecomunicaciones fue el espacio que nos permitió forjarnos como profesionales a la cual agradecemos sobremanera; en particular agradecemos el importante apoyo del profesor José Amaya, quien desde el primer momento secundó esta idea, además de los profesores Óscar Quiroga y Juan Manuel Rey, quienes ayudaron a consolidar el fundamento teórico de este proyecto.

Tabla de Contenido

Introducción	16
1. Estimación de la demanda y potencial energético de la microrred.....	20
1.1 Caracterización de la demanda de energía eléctrica	20
1.1.1 Demanda industrial.	21
1.1.1.1 Fábrica de lácteos.....	21
1.1.1.2 Vivero.	24
1.1.2 Demanda residencial.....	25
1.1.3 Demanda total.	27
1.2 Cálculo del potencial energético existente en la zona	29
1.2.1 Potencial hídrico.	30
1.2.2 Potencial de biomasa.....	37
1.2.3 Potencial Solar.	46
1.2.4 Potencial total de generación de energía eléctrica	49
2. Dimensionamiento y caracterización de la microrred.....	50
2.1 Dimensionamiento de la microrred.....	50
2.1.1 Gestión de la demanda.	56
2.1.1.1 Demanda temporada seca.	56
2.1.1.2 Demanda temporada de lluvia.	58
2.1.1.3 Generación optimizada.	60
2.1.1.4 Dimensionamiento optimizado de la microrred.....	61
2.2 Caracterización de la microrred	67

2.2.1 Componentes de la microrred.	69
2.2.2 Control de la microrred	69
2.2.2.1 Control primario.....	70
2.2.2.2 Control secundario.....	72
2.2.3 Selección de la topología de la microrred.....	72
3. Diseño del sistema de generación	77
3.1 Diseño del sistema de generación hidroeléctrico.....	78
3.1.1 Diseño de la turbina	82
3.1.2 Selección de la turbina.	99
3.1.3 Configuración del sistema de generación hidroeléctrica.	100
3.1.3.1 Parámetros del generador.....	104
3.1.3.2 Selección del generador.	104
3.1.3.3 Selección del controlador de generación hidroeléctrica.	105
3.1.3.4 Selección del inversor para generación hidroeléctrica.....	105
3.2 Diseño del sistema de generación fotovoltaico.....	106
3.2.1 Configuración del sistema de generación fotovoltaico.....	112
3.2.2 Selección de paneles fotovoltaicos.	113
3.2.3 Selección del inversor para generación fotovoltaica.	114
3.3 Sistema de acumulación.....	116
3.3.1 Configuración del sistema de acumulación.	117
3.3.2 Selección del inversor para el sistema de acumulación.	119
4. Diseño de la red de distribución e instalaciones de uso final.....	120
4.1 Diseño del sistema de distribución	120

4.1.1 Configuración de la red de distribución.....	121
4.1.1.1 Tipo de sistema según su nivel de tensión.....	121
4.1.1.2 Tipo de sistema según su configuración topológica.....	122
4.1.2 Elementos del sistema de distribución.....	122
4.1.2.1 Conductores.....	122
4.1.2.2 Postería y herrajería.....	123
4.1.2.3 Transformadores.....	123
4.1.2.4 Medidores.....	124
4.2 Diseño de las instalaciones de uso final.....	124
5. Protecciones eléctricas.....	127
5.1 Sistema de protección contra sobreintensidades DC.....	129
5.2 Sistema de protección contra sobreintensidades AC.....	129
5.3 Coordinación de protecciones.....	132
5.4 Sistema de puesta a tierra y protección contra rayos.....	133
6. Conclusiones.....	135
Referencias Bibliográficas.....	138
Apéndices.....	144

Lista de Tablas

Tabla 1. Procesos operación fábrica de lácteos	21
Tabla 2. Demanda de potencia máxima total horaria laboral en [kW]	27
Tabla 3. Demanda de potencia máxima total horaria no laboral en [kW]	27
Tabla 4. Estudio caudal acueducto "El Jabonal"	31
Tabla 5. Estudio caudal quebrada "30 Cruces"	32
Tabla 6. Composición del estiércol avícola, bobino y porcino.....	38
Tabla 7. Tasa de producción de estiércol por especie.....	41
Tabla 8. Porcentaje de materia seca por especie.....	41
Tabla 9. Porcentaje de sólidos volátiles por especie.....	42
Tabla 10. Producción de biogás por especie.....	42
Tabla 11. Características turbinas y microturbinas con base en biogás.....	43
Tabla 12. Potencial energético a partir de biomasa	45
Tabla 13. Caracterización de sistemas de generación no convencionales.	68
Tabla 14. Datos óptimos de parámetros constructivos del hidrotornillo	84
Tabla 15. Diámetros típicos de tubos centrales y diámetros externos asociados.....	86
Tabla 16. Parámetros iniciales diseño turbina de Arquímedes	97
Tabla 17. Parámetros constructivos esenciales turbina de Arquímedes	98
Tabla 18. Parámetros finales diseño turbina de Arquímedes.....	99
Tabla 19. Características principales de la turbina seleccionada.....	99
Tabla 20. Características principales del generador seleccionado.....	104
Tabla 21. Características principales del controlador seleccionado	105

Tabla 22. Características principales del inversor seleccionado.....	105
Tabla 23. Características principales del panel seleccionado	113
Tabla 24. Características principales de las baterías seleccionadas.....	119
Tabla 25. Características principales del controlador de carga.....	120
Tabla 26. Características principales de las protecciones eléctricas de la microrred	131
Tabla 27. Caracterización de las fallas simuladas	132
Tabla 28. Valores de referencia para valores para resistencia de puesta a tierra.....	134
Tabla 29. Tiempos de disparo de las protecciones eléctricas falla barraje AC 1.....	175
Tabla 30. Tiempos de disparo de las protecciones eléctricas falla barraje AC 2 en condiciones de operación normales	175
Tabla 31. Tiempos de disparo de las protecciones eléctricas falla barraje AC 2 en condiciones de operación contingente	175
Tabla 32. Tiempos de disparo de las protecciones eléctricas falla barraje AC de carga industrial (fábrica de lácteos).....	175
Tabla 33. Tiempos de disparo de las protecciones eléctricas falla barraje AC de carga residencial (casa principal).....	175
Tabla 34. Tiempos de disparo de las protecciones eléctricas falla barraje AC de generación ..	175

Lista de Figuras

Figura 1	Vista aérea finca comunitaria La Bufalera	17
Figura 2	Demanda de potencia máxima fábrica de lácteos.....	22
Figura 3	Demanda de energía horaria fábrica de lácteos	23
Figura 4	Demanda de potencia máxima vivero	24
Figura 5	Demanda de energía horaria vivero.....	25
Figura 6	Demanda de potencia residencial horaria.....	26
Figura 7	Demanda de potencia total horaria laboral.....	28
Figura 8	Demanda de potencia total horaria no laboral.....	28
Figura 9	Punto de generación hidroeléctrica "30 cruces"	33
Figura 10	Perfil de caudal, quebrada 30 cruces	34
Figura 11	Ábaco de operación de hidroturbinas	35
Figura 12	Perfil de potencial de generación hidroeléctrica	37
Figura 13	Establo para ordeño finca "LA BUFALERA"	45
Figura 14	Perfil del potencial de generación a partir de biomasa.....	46
Figura 15	Perfil de temperatura máxima promedio multianual	47
Figura 16	Perfil de irradiancia promedio multianual.....	47
Figura 17	Perfil de potencial de generación fotovoltaica mensual multianual	48
Figura 18	Perfil del potencial total de generación	49
Figura 19	Comparación de energía crítica	51
Figura 20	Comparación de potencia promedio.....	52
Figura 21	Comparación de potencia máxima	53

Figura 22	Gestión demanda de potencia máxima para días laborables (temporada seca).....	57
Figura 23	Gestión demanda de potencia máxima para días no laborables (temporada seca).....	58
Figura 24	Gestión demanda de potencia máxima para días no laborables (temporada de lluvia)59	
Figura 25	Gestión demanda de potencia máxima para días laborables (temporada de lluvia)....	59
Figura 26	Potencial total de generación optimizado.....	60
Figura 27	Comparación de energía para la temporada seca	62
Figura 28	Comparación de potencia para la temporada seca.....	62
Figura 29	Comparación de potencia máxima para la temporada seca.....	63
Figura 30	Comparación de energía para la temporada de lluvia	64
Figura 31	Comparación de potencia para la temporada de lluvia.....	64
Figura 32	Comparación de potencia máxima para la temporada de lluvia.....	65
Figura 33	Componentes de la microrred.....	69
Figura 34	Referencia de tensión para el modo de control por tensión.....	71
Figura 35	Característica P-f y Q-V.	71
Figura 36	Diagrama de bloques control secundario microrred.....	72
Figura 37	Estructura estándar microrred AC.....	73
Figura 38	Estructura tipo anillo	74
Figura 39	Estructura tipo radial	75
Figura 40	Estructura tipo alimentador	75
Figura 41	Estructura 1 microrred híbrida.....	76
Figura 42	Diagrama unifilar microrred "LA BUFALERA"	77
Figura 43	Verificación del caudal de diseño.....	81
Figura 44	Proceso de diseño de la turbina de Arquímedes	82

Figura 45	Eficiencia del hidrotornillo respecto al porcentaje de caudal.....	96
Figura 46	Parámetros estructurales Tornilo de Arquimedes.....	98
Figura 47	Estructura general de un sistema de velocidad fija	100
Figura 48	Estructura general de un sistema mejorado de velocidad variable.....	102
Figura 49	Estructura general de un sistema completo de velocidad variable	103
Figura 50	Esquema del efecto fotovoltaico en una celda solar.....	107
Figura 51	Esquema general del sistema fotovoltaico	112
Figura 52	Configuración física de un arreglo fotovoltaico.....	113
Figura 53	Configuración física del arreglo de baterías para el sistema de acumulación.....	118
Figura 54	Localización espacial del sistema de distribución.....	121
Figura 55	Secuencia de disparo falla barraje AC 1.....	174
Figura 56	Curva de selectividad barraje AC 1	175
Figura 57	Secuencia de disparo falla barraje AC 2 en condiciones de operación normales	175
Figura 58	Curva de selectividad barraje AC 2 en condición de operación normal	175
Figura 59	Secuencia de disparo falla barraje AC 2 en condiciones de operación contingente .	175
Figura 60	Curva de selectividad barraje AC 2 en condición de operación contingente	175
Figura 61	Secuencia de disparo falla barraje AC de carga industrial (fábrica de lácteos)	175
Figura 62	Curva de selectividad barraje AC de carga industrial (fábrica de lácteos).....	175
Figura 63	Secuencia de disparo falla barraje AC de carga residencia (casa principal)	175
Figura 64	Curva de selectividad barraje AC de carga residencial (casa principal)	175
Figura 65	Secuencia de disparo falla barraje AC de generación	175
Figura 66	Curva de selectividad barraje AC de generación	175

Lista de Apéndices

Apéndice A. Caracterización de la demanda	144
Apéndice B. Cálculo caudal.....	145
Apéndice C. Generación	146
Apéndice D. Dimensionamiento.....	147
Apéndice E. Caracterización de la demanda seca.....	148
Apéndice F. Caracterización de la demanda lluvia.....	149
Apéndice G. Generación seca.....	150
Apéndice H. Generación lluvia.....	151
Apéndice I. Dimensionamiento seca.....	152
Apéndice J. Dimensionamiento lluvia	153
Apéndice K. Código modelado hidrotornillo.....	154
Apéndice L. Catálogos equipos seleccionados	155
Apéndice M. Localización sistema de distribución	170
Apéndice N. Diagrama unifilar de la microrred y plano del sistema de distribución.....	171
Apéndice O. Memorias de cálculo de instalaciones de uso final y sistema de distribución.....	172
Apéndice P. Plano instalaciones de uso final.....	173
Apéndice Q. Simulación coordinación de protecciones	174

Resumen

Título: Diseño de una microrred aislada para una finca comunitaria ubicada en una zona rural no interconectada del municipio de cantagallo bolívar*

Autor: Cristian David Gómez Sandoval, Fabián Albeiro Ortiz Niño**

Palabras Clave: Microrred, generación distribuida, tornillo de Arquímedes, generador síncrono de imanes permanentes.

Descripción: Este proyecto presenta el diseño de una microrred en modo isla para la finca comunitaria “La Bufalera”, ubicada en zona rural del municipio de Cantagallo, Bolívar. Ésta da valor agregado a las materias primas de la zona mediante la ejecución de proyectos productivos. La mayor dificultad para consolidar los proyectos es la ausencia de suministro energético, puesto que estos proyectos requieren de equipos de tipo industrial para su ejecución. Con el fin de solventar la necesidad descrita se propone la solución presentada en este documento.

Se realizó un estudio de campo para determinar las condiciones existentes, tanto de demanda actual y proyectada como del potencial de generación de energía eléctrica, con el fin de elaborar el perfil energético disponible y el perfil de carga proyectada, lo cual permitió dimensionar los componentes de la microrred.

Inicialmente se dimensionó la microrred a partir de la comparación de los perfiles de potencial de generación y demanda de energía eléctrica en diferentes escalas temporales, identificando los niveles críticos de operación; este dimensionamiento adopta estrategias de gestión energética que permiten disminuir los puntos máximos de demanda, optimizando así el diseño planteado; se diseñó un sistema de generación de energía eléctrica conformado por energía hidroeléctrica y solar fotovoltaica, acompañadas de un sistema de almacenamiento conformado por baterías, además de un grupo electrógeno, ya existente, el cual funciona como respaldo. A su vez, se realizó el diseño del sistema de distribución e instalaciones de uso final conforme a las consideraciones de diseño definidas y la normativa establecida a nivel nacional y regional.

Finalmente, se realizó el proceso de selección de equipos para los sistemas que componen la microrred. Para seleccionar los equipos de protección se realizó una simulación de la coordinación de las protecciones eléctricas; los equipos de los demás sistemas fueron seleccionados mediante los datos obtenidos a partir del proceso de dimensionamiento, además de criterios técnicos y normativos previamente establecidos.

* Trabajo de Grado

** Facultad de ingenierías fiscomecánicas. Escuela de ingeniería eléctrica, electrónica y telecomunicaciones.
Director: José Alejandro Amaya Palacio. Codirector: Óscar Arnulfo Quiroga Quiroga

Abstract

Title: Design of an isolated microgrid for a community farm located in an un interconnected rural area of the municipality of Cantagallo Bolivar*

Authors: Cristian David Gomez Sandoval, Fabian Albeiro Ortiz Niño**

Key words: Archimedes' screw, distributed generation, microgrid, synchronous generator of permanent magnets.

Description: This project presents the design of an island-mode microgrid for “La Bufalera” community farm, located in the rural area of the municipality of Cantagallo, Bolivar. This gives added value to the raw materials of the area, through the execution of productive projects. The greatest difficulty in consolidating projects is the absence of energy supply, in as much as the projects require industrial-type equipment for their execution. In order to solve the need described, the solution is proposed in this presented document.

A field study was carried out to determinate the existing conditions, both of current and projected demand, as well as the potential of the electric energy generation, with the object to elaborate the available energetic profile, and the projected load profile, which permitted to dimensionate of the microgrid components.

Initially, the microgrid was dimensioned from the comparison of the profiles of generation potential, and demand for electrical energy at different temporal scales, identifying the critical levels of operation. This dimensioning adopts energy management strategies, that allow lowering the maximum demand points, optimizing the proposed design, an electric power generation system was designed consisting of hydroelectric and solar photovoltaic energy, accompanied by a storage system made up of batteries, in addition to an existing generator, which works as a support. At the same time, the design of the distribution system and end-use facilities were carried out in accordance with the defined design considerations, and the regulations established at the national and regional level.

Finally, the equipment selection process was carried out, for the systems that make up the microgrid. To select the protection equipment, a simulation of the coordination of the electrical protections was performed; the other systems protections were selected using the data obtained from the sizing process, in addition to previously established technical and regulatory criteria.

* Bachelor Thesis

** Faculty of Physical Mechanical Engineering, Electronics and Telecommunications Engineering School.
Director: José Alejandro Amaya Palacio. Codirector: Óscar Arnulfo Quiroga Quiroga

Introducción

El Magdalena medio colombiano, extenso valle interandino en la parte central del país, comprende parte de los departamentos de Antioquia, Bolívar, Boyacá, Cesar y Santander. La zona se caracteriza por estar sitiada debido a su histórico conflicto protagonizado en gran medida por paramilitarismo, guerrillas y terrorismo de estado, pero también por ser un valle rico en productos agrarios, ganadería, minería y pesca, actividades sustento de sus habitantes, quienes en gran parte son personas, familias que han sido desplazadas por el mismo conflicto en otras zonas del país; producto del conflicto y abandono estatal, sin dejar de lado su localización alejada de los grandes cascos urbanos y de difícil acceso, ha mantenido a sus pobladores sufriendo necesidades incluso tan básicas como salud, educación y servicios públicos. Todas estas causas constituyen la motivación principal para el surgimiento de la Asociación Campesina del Valle del río Cimitarra (ACVC), la cual acoge pobladores de la región, gran parte de ella constituida como zona de reserva campesina (ZRC), y se postula como una alternativa formal para la organización del territorio y su despertar económico, siendo el brazo de apoyo para diversos proyectos comunitarios entre los cuales se destacan los desarrollados en la finca comunitaria “La bufalera”, mostrada en la **Figura 1**, ubicada en el municipio de Cantagallo, Bolívar, entre los cuales se encuentran: “Ecobúfalo campesino”, que consiste en dar valor agregado al búfalo y todos sus derivados, un trapiche comunitario, una arrocera, la cual tiene su fábrica empacadora en la vereda puerto Matilde, Yondó, Antioquia, y finalmente con un vivero de plantas aromáticas que proyecta a mediano plazo una fábrica para la extracción de aceites esenciales. Tales características hacen de este sitio un ambiente propicio para el desarrollo económico que contrasta con la falta del suministro de energía eléctrica el cual limita la productividad de las actividades mencionadas con anterioridad. Es importante resaltar que la vereda Puerto Matilde cuenta con suministro de energía eléctrica

proveniente de del sistema interconectado nacional, ésta se encuentra ubicada a aproximadamente 2 kilómetros de la finca comunitaria; sin embargo, teniendo en cuenta que ésta se encuentra en una ubicación limítrofe entre los departamentos de Antioquia y Bolívar, estando el área de los proyectos concentrada en este último, conflictos administrativos y económicos han impedido ubicar un punto de suministro de energía eléctrica en la finca comunitaria.

Figura 1
Vista aérea finca comunitaria La Bufalera



Nota. Proporcionada por la ACVC.

En pro de la superación en todo el territorio nacional de las condiciones anteriormente mencionadas, fue realizada una negociación entre el gobierno Colombiano y las Fuerzas Armadas Revolucionarias de Colombia – Ejército del Pueblo (FARC-EP). El acuerdo en su punto 1 (Hacia un Nuevo Campo Colombiano: Reforma Rural Integral) plantea el acceso integral y efectivo a la tierra con innovación, ciencia, tecnología y asistencia técnica, lo cual permita mejorar la productividad agregando valor a los productos y así asegurar oportunidades de buen vivir que se

derivan del acceso a bienes públicos como salud, vivienda, educación, infraestructura y conectividad. En este acuerdo, el Gobierno Nacional se compromete a diseñar e implementar un Plan Nacional de Electrificación Rural y un Plan Nacional de Conectividad Rural, con criterios de ampliación de la cobertura eléctrica, promoción y aplicación de soluciones tecnológicas apropiadas para la generación de energía eléctrica de acuerdo a las particularidades del medio rural y las comunidades, asistencia y promoción de las capacidades organizativas de las comunidades para garantizar el mantenimiento y la sostenibilidad de las obras y la capacitación en el uso adecuado de la energía para garantizar su sostenibilidad (FARC-EP & Gobierno Colombiano, 2016).

En ese sentido, el presente trabajo de grado tiene como objetivo principal realizar el diseño de un sistema eléctrico aislado, que comprenda la generación, distribución e instalaciones de uso final, que permita solventar las necesidades energéticas de la finca “LA BUFALERA” y asimismo ejecutar los proyectos que se tienen planteados a corto y mediano plazo; para tal fin, es necesario realizar el cálculo de la demanda eléctrica de la finca, teniendo en cuenta los requerimientos existentes y proyectados, determinar el potencial de generación, considerando las distintas fuentes primarias aprovechables existentes en el área, diseñar el sistema de generación de energía eléctrica que permita satisfacer la demanda calculada, haciendo énfasis en el dimensionamiento y su ubicación, el diseño de la red eléctrica e instalaciones de uso final para cada tipo de carga, ya sea industrial y/o residencial, el sistema de protecciones y su respectiva coordinación para el adecuado funcionamiento, así como la selección de los equipos requeridos para la puesta en marcha de la microrred.

Para lograr estos objetivos, se realizará un análisis que permita establecer el potencial de generación de energía eléctrica a partir de fuentes alternativas disponibles en la zona. Se

determinarán los requerimientos de energía eléctrica existentes y proyectados en la finca “La Bufalera” acompañados de un seguimiento de su modo operación que permita evidenciar su patrón de funcionamiento actual. A partir de la información de potencial energético disponible y el perfil de demanda construido, se definirá la topología y caracterización de la microrred y se establecerá, de ser necesario, una estrategia de gestión de demanda que regule la conexión de las cargas al sistema, tratando de obtener una curva de demanda lo más llana posible; la descripción planteada hasta el momento será punto de partida para dimensionar un sistema de generación acorde a las potencialidades y necesidades encontradas. Asimismo, se requiere tanto de un sistema que permita transportar la energía eléctrica desde su punto de generación hasta el de consumo, como de instalaciones que permitan hacer uso de la misma; por tal razón, se realizará el diseño de un sistema que permita distribuir y usar dicha energía, que incluya memoria de cálculos, diagramas unifilares y planos de las cargas existentes. El diseño de la microrred contará con un sistema de protección contra posibles fallas, brindando mayor seguridad tanto a los equipos que componen la microrred como al suministro energético que las cargas demanden; este esquema se comprobará mediante simulaciones asistidas por software. Por último, se llevará a cabo la selección de los equipos van a componer la microrred, sin dejar de lado las conclusiones y recomendaciones que el estudio realizado arroje.

Teniendo en cuenta que, así como El Magdalena Medio, algunas otras regiones del país, y en general algunos países de América Latina, presentan condiciones similares, puesto que también cuentan con zonas lejanas no interconectadas a una red nacional, el trabajo de grado planteado pretende ser un insumo para la formulación de futuros proyectos en pro de reducir la brecha tecnológica, económica y social campo-ciudad y así estimular el desarrollo agroindustrial.

1. Estimación de la demanda y potencial energético de la microrred

En el proceso de diseño de una microrred aislada es imprescindible una adecuada caracterización de la demanda y en general del consumo de potencia y energía eléctrica de las cargas que la componen, así como de sus respectivas condiciones de uso y tiempos de operación. A continuación, se realiza una descripción de cada uno de los tipos de cargas, su funcionamiento y su respectivo perfil.

La estimación del potencial energético existente en una zona en particular se calcula a partir del conocimiento de los datos históricos de diferentes variables intrínsecas de la misma, tales como: medidas de caudal en fuentes hídricas cercanas y diferencias de altura o saltos presentes en ellas, datos de irradiancia y temperatura, velocidad del viento y precipitación, así como la cantidad y tipo de material orgánico disponible para la producción de biogás, por nombrar algunos.

1.1 Caracterización de la demanda de energía eléctrica

Para describir la demanda de las diferentes cargas industriales, se especificó el horario y tiempo de uso de cada una de las máquinas que componen cada proceso, a partir de ello, se elabora un análisis para los datos de potencia y energía, obteniendo como resultado un perfil horario diario por medio del cual se evidencian los diferentes picos de potencia que genera la superposición operativa de las diferentes cargas, así como el consumo total de energía que ellas representan.

La demanda residencial se calculó teniendo en cuenta el perfil de demanda residencial rural planteado en la norma de la ESSA, siendo este el operador de red más cercano al punto de ubicación de la carga; adicionalmente se tomó como referencia la adenda de la norma anteriormente mencionada para determinar la demanda máxima de potencia, la cual es planteada con relación al número de usuarios conectados a la red (Actualización de la adenda modificatoria

a la norma para cálculo y diseño de sistemas de distribución de la Electrificadora De Santander S.A ESP., 2014).

1.1.1 Demanda industrial. La carga industrial está conformada por una fábrica de lácteos en la cual se producen derivados de la leche de Búfala, tales como, yogur, queso campesino y mozzarella; adicionalmente, un vivero en el cual se realizarán procesos para la obtención de aceites esenciales a partir de plantas aromáticas. Dichas cargas son consideradas de tipo industrial debido a que la compone maquinaria pesada como motores, calderas y refrigeración, entre otros.

1.1.1.1 Fábrica de lácteos. El proceso de producción de la fábrica consta de las etapas que se muestran a continuación en la **Tabla 1**.

Tabla 1.
Procesos operación fábrica de lácteos

PROCESO	HORAS	
	Inicio	Finalización
Recepción	8:00	9:00
Filtración	9:00	10:00
Descremado	10:00	11:00
Pasteurización	11:00	12:00
Cuajado	12:00	13:00
Hilado	14:00	15:00
Moldeo	15:00	16:00
Inmersión en salmuera	15:00	16:00
Empacado	16:00	17:00
Almacenamiento	17:00	18:00

Nota. Información extraída de tesis de Stefano Vaccarone

Dicho proceso se replica de lunes a sábado, siendo el domingo día de descanso y por consiguiente no hay producción.

Los procesos anteriormente mencionados evidencian un perfil de operación horario que depende de la puesta en marcha o salida de la maquinaria que los mismos requieren; asimismo, la

descripción de este perfil de operación se construye a través de los valores de potencia máxima, la cual superpone los datos de potencia nominal de los equipos que se encuentran operando en el mismo instante de tiempo, y energía, la cual representa el consumo total de energía de los equipos que se encuentran operando durante la misma hora en específico, y en el cual se involucra su factor de demanda. El perfil de potencia máxima no corresponde al consumo de energía, puesto que los equipos no operan a plena carga durante todo su proceso, debido a que su finalidad es determinar la magnitud de los picos de potencia que se pudieran presentar si los equipos que operan simultáneamente presentan un consumo nominal; esta metodología se utilizará en todo el presente documento para determinar los perfiles correspondientes a las cargas industriales.

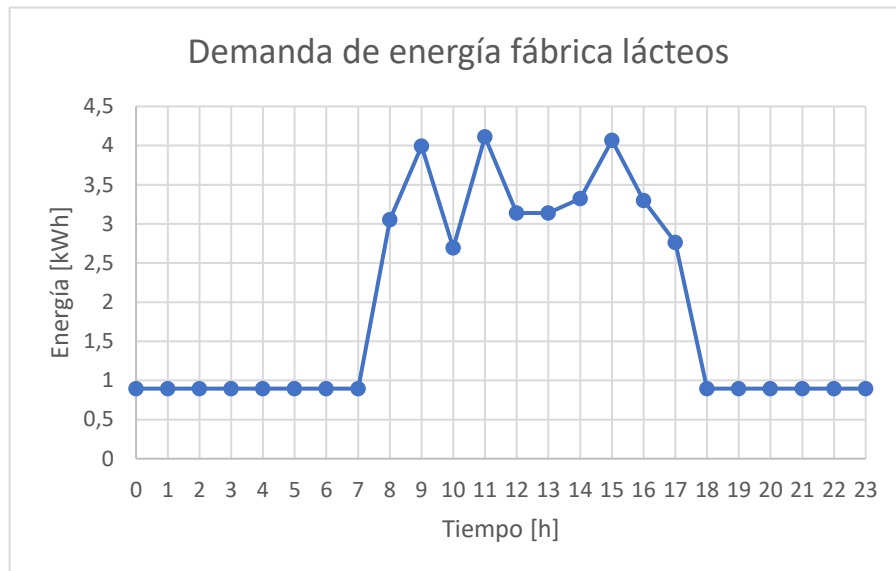
En la hoja “Demanda_Industrial_Horaria” contenida en el **Apéndice A**, presenta la descripción horaria que compone de manera detallada el perfil de demanda y potencia máxima. Datos más específicos que constituye la base de su construcción, factores de carga y detalles de ésta, se presenta en la hoja “Carga fábrica de lácteos” del **Apéndice A**; a partir del análisis de los datos consignados en “Demanda_Industrial_Horaria”, se obtienen la **Figura 2** en la cual podemos observar la demanda de potencia.

Figura 2
Demanda de potencia máxima fábrica de lácteos



Asimismo, mediante la **Figura 3** podremos observar la demanda de energía eléctrica en un jornal de producción.

Figura 3
Demanda de energía horaria fábrica de lácteos



Con base en estas gráficas se puede identificar picos de potencia y el total de energía requeridos para realizar el correcto dimensionamiento del sistema de generación planteado para abastecer dicha demanda.

1.1.1.2 Vivero. Una fracción considerable de la demanda industrial total que debe abastecer el sistema de generación planteado en la microrred está representada por el vivero; esta demanda está constituida por cargas tales como: motores, motobombas, calderas y algunos sistemas de control. Dicha maquinaria se encarga de realizar los procesos de producción de aceites esenciales, cuya descripción y operación se evidencian en la hoja “Demanda vivero” del **Apéndice A**. La operación del vivero mantiene un horario laboral establecido correspondiente a las cargas industriales, por lo tanto, dicho proceso se replica de lunes a sábado, siendo el domingo día de descanso y por consiguiente sin producción.

Los procesos anteriormente mencionados, la puesta en marcha o salida de maquinaria que estos requieren, conforman un perfil de operación horario. A partir del análisis de estos datos consignados en la hoja “Demanda vivero” del **Apéndice A**, se obtienen la **Figura 4** para la demanda de potencia máxima y la **Figura 5** para la demanda de energía eléctrica mostradas a continuación.

Figura 4
Demanda de potencia máxima vivero

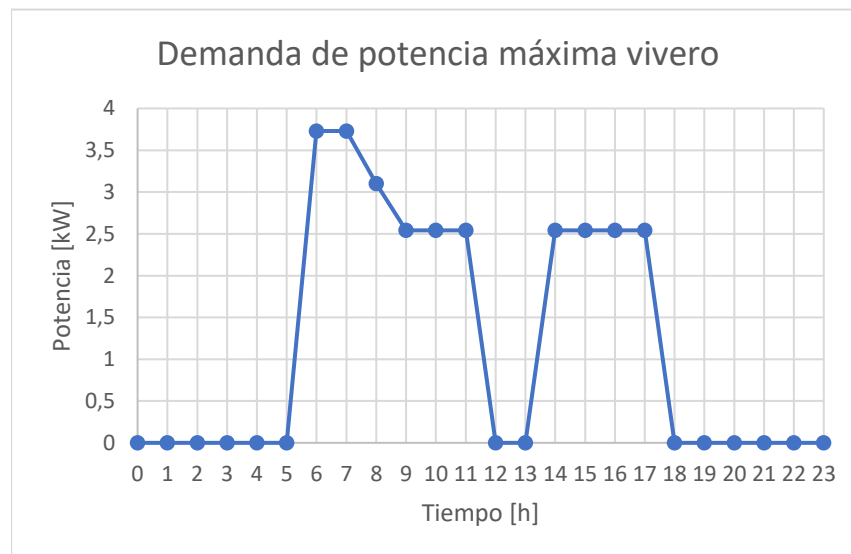
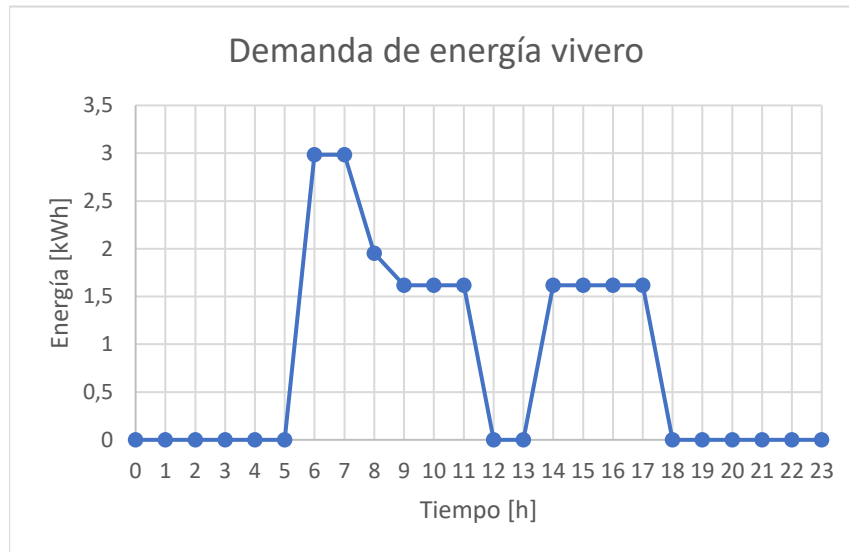


Figura 5
Demanda de energía horaria vivero



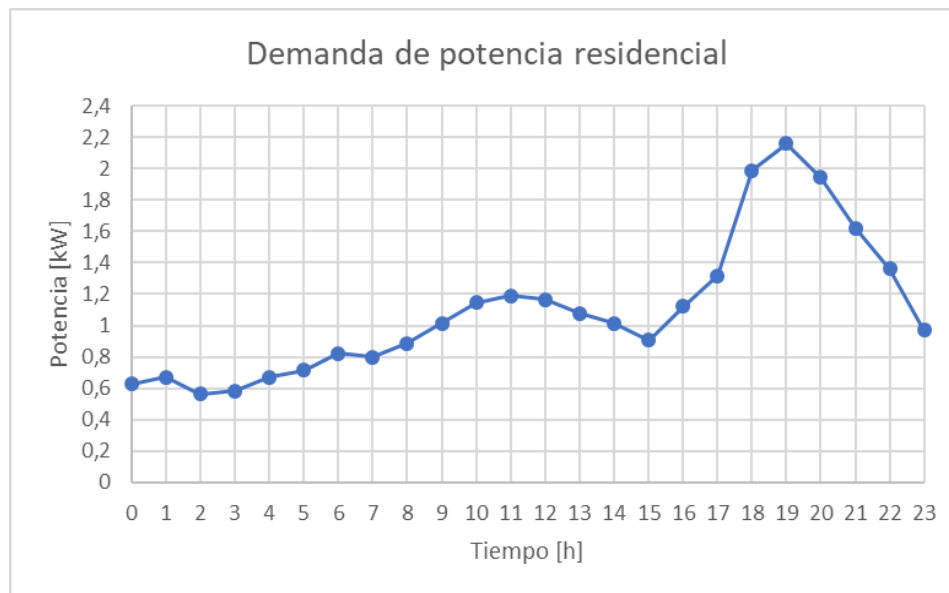
La demanda de potencia máxima de las cargas industriales se obtiene a partir de la superposición de equipos que operan simultáneamente, suponiendo que éstos operan a plena carga. A su vez, la demanda de energía de los procesos industriales se obtiene a partir de la superposición de la potencia promedio, la cual se determina a partir de factores de carga tipo de los equipos que componen la carga.

1.1.2 Demanda residencial. Los operadores de red se han encargado de analizar el comportamiento del consumo de energía eléctrica de diversos grupos de usuarios, entre ellos los de tipo residencial rural, el cual se toma como referencia para establecer la curva de demanda residencial horaria

Para el caso de estudio, la carga residencial está compuesta por dos viviendas rurales; adicionalmente, se encuentran 3 cargas (trapiche, granero y zona de ordeño) los cuales no poseen ninguna carga de tipo industrial (sólo cuenta con alumbrado y tomacorriente general) y el periodo de uso de dos de estas cargas (trapiche y granero) no es diario y adicionalmente no es coincidente

en periodos de tiempo considerables, ya que se utiliza dos temporadas al año y por periodos no mayores a un mes. Tomando en cuenta estas características, se decide considerar las tres cargas anteriormente mencionadas como dos usuarios de tipo residencial, para un total de cuatro usuarios,

Figura 6
Demanda de potencia residencial horaria



con los cuales se elabora el perfil horario, evidenciado en la **Figura 6**. La demanda máxima diversificada para 4 usuarios es 2.4 kVA , con un factor de potencia de 0.9 en atraso como valor característico para la carga tipo residencial (Actualización de la adenda modificatoria a la norma para cálculo y diseño de sistemas de distribución de la Electricadora De Santander S.A ESP., 2014).

1.1.3 Demanda total. Para la construcción de la demanda de potencia máxima total que representa la microrred, se hace uso de los perfiles de consumo anteriormente descritos, superponiendo los datos horarios que cada perfil representa, obteniendo como resultado una descripción detallada a escala horaria de los picos de potencia que dicha microrred presenta. La demanda tiene un perfil semanal el cual contempla tanto días laborables, días en los que se presenta carga industrial y residencial, como no laborables, en los cuales solo está presente el perfil residencial acompañado de las cargas esenciales pertenecientes al proceso industrial de la fábrica de lácteos.

La **Tabla 2** presenta de manera clara y detallada el consumo horario presente en los días laborables.

Tabla 2.
Demanda de potencia máxima total horaria laboral en [kW]

Carga	Hora																							
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Fábrica de Lácteos	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	5,6	5,8	4,0	6,9	4,9	4,9	4,7	7,6	4,9	4,9	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2
Vivero	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,7	3,7	3,1	2,5	2,5	2,5	0,0	0,0	2,5	2,5	2,5	2,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Residencial	1,0	0,6	0,7	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,2	1,1	1,0	0,9	1,1	1,3	2,0	2,2	1,9	1,6	1,4
Total	3,2	2,9	2,9	2,8	2,8	2,9	6,7	6,8	9,5	9,2	7,6	10,6	6,1	6,1	8,3	11,2	8,3	8,5	3,6	4,2	4,4	4,2	3,9	3,6

De la misma manera, la **Tabla 3** lo hace con los días no laborables.

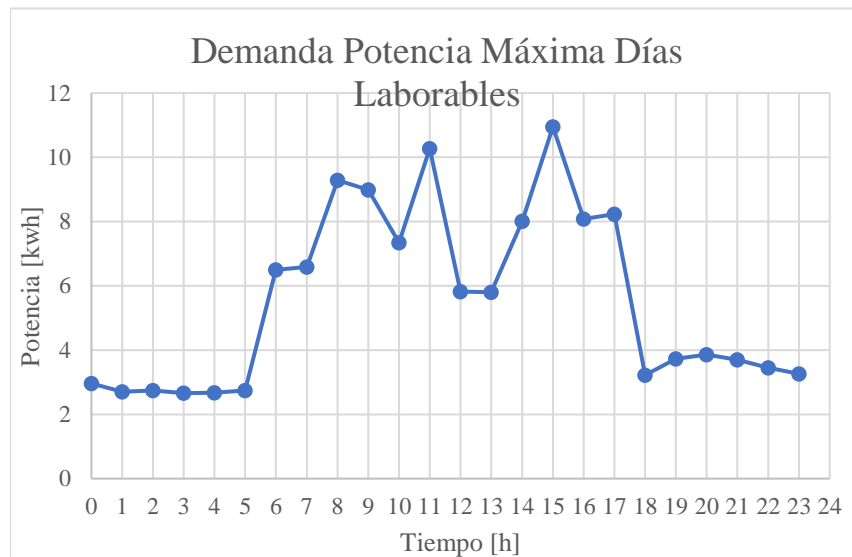
Tabla 3.
Demanda de potencia máxima total horaria no laboral en [kW]

Carga	Hora																							
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Esencial fábrica de lácteos	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2
Residencial	1,0	0,6	0,7	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,2	1,1	1,0	0,9	1,1	1,3	2,0	2,2	1,9	1,6	1,4
Total	3,2	2,9	2,9	2,8	2,8	2,9	3,0	3,1	3,0	3,1	3,3	3,4	3,4	3,4	3,3	3,3	3,1	3,4	3,6	4,2	4,4	4,2	3,9	3,6

Estas dos tablas resumen la demanda de potencia horaria en una semana tipo.

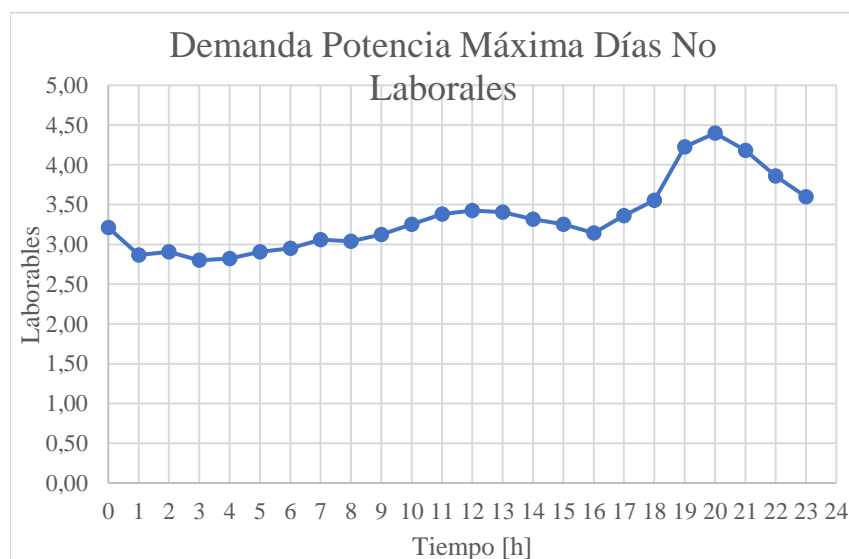
La **Figura 7** presenta el perfil de consumo total de potencia máxima que se presenta en los días laborables.

Figura 7
Demanda de potencia total horaria laboral



A su vez, la **Figura 8** presenta el perfil de demanda de potencia total para los días no laborables.

Figura 8
Demanda de potencia total horaria no laboral



A través de las **Figura 7** y **Figura 8** se puede identificar el perfil de operación estándar de una semana.

Los análisis de energía de esta sección se presentan en el **Apéndice A** de forma más detallada y para un año de operación estándar.

1.2 Cálculo del potencial energético existente en la zona

El caso de estudio en particular se encuentra ubicado en zona rural del municipio de Cantagallo, Bolívar, perteneciente al territorio denominado “magdalena medio” nombre que recibe tras ser recorrido por el río más largo del país (río Magdalena) y a su vez de gran cantidad de vertientes que le alimentan, razón que lo caracteriza como un lugar con gran potencial hidroenergético; adicionalmente el lugar de estudio cuenta con una capacidad importante en cuestión de recurso solar puesto que se encuentra situado en alturas no mayores a los 200 m.s.n.m. Por otro lado, el sitio de estudio hace parte de un proyecto comunitario que tiene como base económica la cría de bovinos, especialmente de búfalos, los cuales pueden ser fuente de materia prima para la obtención de biogás.

En ese sentido, se realizó el estudio para determinar el potencial de cada una de estas fuentes y adicionalmente se hizo un análisis del potencial conjunto.

1.2.1 Potencial hídrico. Las fuentes hídricas son consideradas, dentro de la generación de energía eléctrica, como una de las fuentes que brindan mayor confiabilidad debido a su continuidad durante temporadas prolongadas marcadas por el cambio estacional (lluvia y sequía). Adicionalmente y de manera favorable, la finca para la cual se realiza el estudio cuenta con la presencia de dos quebradas las cuales fueron objeto de estudio preliminar permitiendo determinar cuál de ellas posee mayor potencial y viabilidad para la generación de energía eléctrica. Es importante resaltar la existencia de investigaciones previas en la zona concernientes al estudio de las fuentes hídricas; en ese sentido, en la zona presenta un estudio previo en el cual evidencia el alto potencial para la generación de energía eléctrica de las fuentes mencionadas con anterioridad, lo cual exhorta a realizar una verificación de los datos arrojados por el mismo (Vaccarone, 2016).

En tal virtud, utilizando el método del flotador, el cual consiste en identificar un punto relativamente homogéneo geométricamente, posteriormente crear un perfil de área transversal a partir de medidas de profundidad y finalmente hacer una medición indirecta de la velocidad mediante el uso de un objeto flotante que no presente gran afectación por el rozamiento producido con el aire en la quebrada y midiendo el tiempo que se demora en recorrer una distancia determinada con anterioridad, se realizó la estimación de caudal. Los resultados obtenidos al hacer dicha medición se presentan en la **Tabla 4** para la quebrada “El Jabonal” y **Tabla 5** la quebrada “30 Cruces”. El cálculo de los valores mostrados en las tablas anteriormente mencionadas se puede apreciar de forma específica en el **Apéndice B**.

Tabla 4.
Estudio caudal acueducto "El Jabonal"

Estudio caudal acueducto "El Jabonal"				
Área transversal		Velocidad		
Eje x [cm]	Eje y [cm]	Área Parcial [cm ²]	Tiempo [s] (d=1 m)	Intento
0,0	0,0	76,0	2,0	1
10,0	15,2	106,3	2,5	2
16,5	17,5	109,6	1,8	3
23,5	13,8	44,9	1,6	4
30,0	0,0	-	2,0	5
			1,5	6
			2,2	7
			1,7	8
			1,8	9
			1,9	10
Área Total [cm²]		336,7	Promedio [s]	1,9
Área Total [m²]		0,0336675	Vel [m/s]	0,53086
Caudal [m³/s]		0,01787		

Tabla 5.
Estudio caudal quebrada "30 Cruces"

Estudio caudal quebrada 30 cruces				
Área transversal			Velocidad	
Eje x [cm]	Eje y [cm]	Área Parcial [cm ²]	Tiempo [s] (d=1 m)	Intento
0	0,0	40,0	3,8	1
10	8,0	155,0	3,4	2
20	23,0	310,0	2,9	3
30	39,0	435,0	3,0	4
40	48,0	425,0	3,0	5
50	37,0	390,0	2,8	6
60	41,0	405,0	3,2	7
70	40,0	440,0	2,7	8
80	48,0	452,5	2,8	9
90	42,5	422,5	3,2	10
100	42,0	355,0		
110	29	190		
120	9,0	65,0		
130	4,0	6,0		
133,0	0,0	-		
Área Total [cm²]		4091	Promedio [s]	3,04
Área Total [m²]		0,4	Vel [m/s]	0
Caudal [m³/s]			0,13457	

Otro factor importante que se debe tener en cuenta es la presencia de saltos de altura en las fuentes hídricas, así como la distancia entre estos y la zona en la cual se encuentran ubicadas las cargas. En la fuente hídrica “El jabonal”, se encontró un salto de aproximadamente 8 metros con distancia aproximada de 3 kilómetros al punto de ubicación de las cargas; de la misma manera, para “30 cruces” se encontró un salto de 3 metros aproximadamente, con una distancia aproximada de 2 kilómetros al punto de carga.

A partir de este estudio preliminar se define el punto “30 cruces” mostrado en la **Figura 9**, como el de mayor potencial energético para abastecer la demanda; por lo tanto, se toma la decisión de realizar un estudio más detallado en dicho punto para determinar un perfil hídrico anual, realizar

una selección de la turbina más adecuada para el aprovechamiento del recurso y estimar la generación de energía eléctrica.

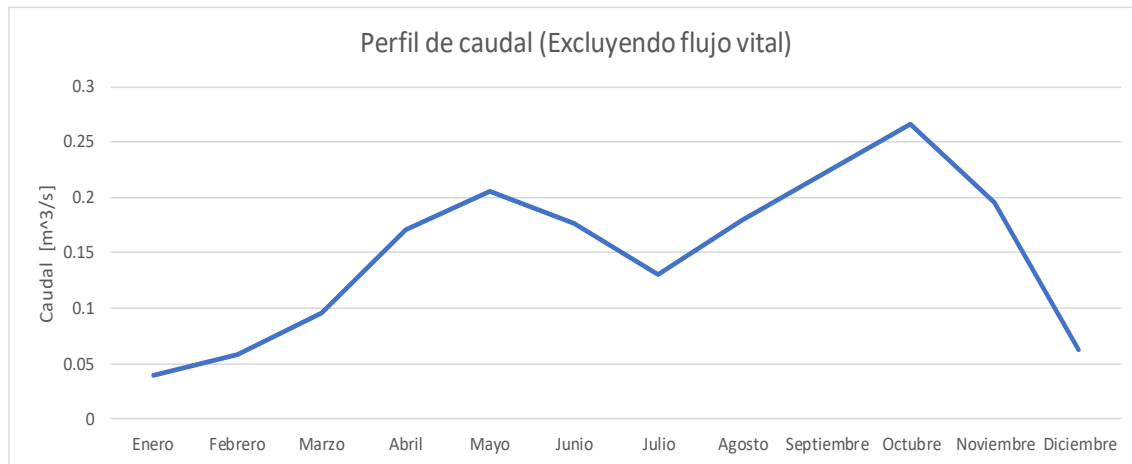
Figura 9
Punto de generación hidroeléctrica "30 cruces"



Los resultados obtenidos a partir del estudio coincidieron con los datos suministrados en el documento descrito (Vaccarone, 2016), esto sumado a la falta de medidas históricas del caudal para la fuente hídrica en cuestión, converge en la decisión de tomar el perfil planteado por éste, el cual se muestra en la **Figura 10**, como la base para la selección de la turbina y posterior establecimiento del perfil de generación de energía eléctrica.

Cabe resaltar que el estudio realizado es para una turbina de tipo Pelton, la cual requiere desviar el agua de su cauce, razón por la cual se debe reservar un porcentaje del caudal promedio anual, que representa un mínimo de flujo vital que tendrá como función mantener el cauce del río y por consiguiente su equilibrio ecosistémico.

Figura 10
Perfil de caudal, quebrada 30 cruces



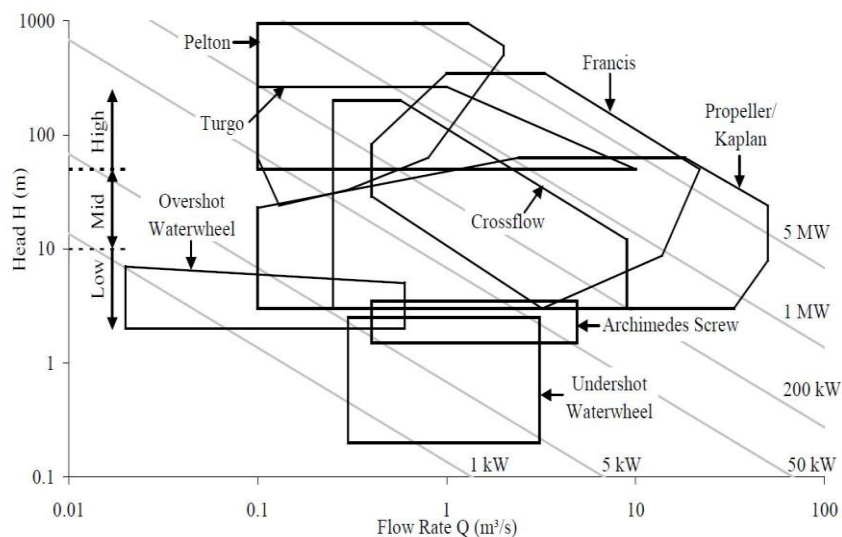
Se puede observar que el dato de caudal tomado en una visita técnica realizada los días 2, 3 y 4 de agosto del 2019 se asemeja al obtenido en el estudio anteriormente mencionado como medida característica del mes de julio, teniendo en cuenta que el dato obtenido por éste corresponde a un perfil mensual y la visita fue realizada una vez terminado el mes de julio, presentando un error porcentual despreciable tal como se muestra en la ecuación siguiente, se toma el perfil encontrado por éste como base de los estudios subsiguientes; a su vez, se pudo identificar que el río llamado como “Bufalera” en tal estudio, es denominado por los pobladores del lugar como quebrada “30 cruces”.

$$Error_{Caudal} = \frac{0.13 - 0.134572368}{0.13} * 100 = 3.51$$

Con base en el perfil de caudal, establecido como dato de entrada del dimensionamiento del sistema de generación hidroeléctrica, se procede a seleccionar la turbina que permita aprovechar las condiciones disponibles con la mayor eficiencia y bajo impacto ambiental; consecuentemente,

se realiza un estudio de las turbinas existentes (*Simmons y Lubitz - 2017 - Archimedes screw generators for sustainable energy.pdf*, s. f.), y a partir del ábaco de generación mostrado en la **Figura 11**, se opta por seleccionar 2 de ellas (Archimedes screw y Overshot waterwheel) las cuales cumplen con las condiciones paramétricas previamente establecidas (salto y caudal) y ahondar en su análisis para elegir la más acertada.

Figura 11
Ábaco de operación de hidroturbinas



Nota. Extraída de Archimedes Screw Generators for Sustainable Energy Development

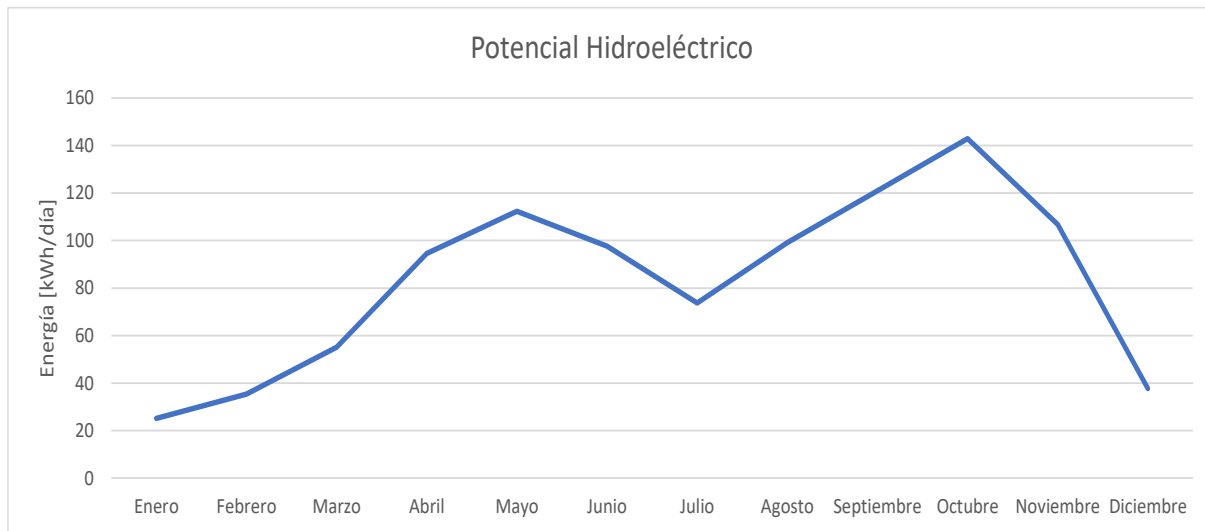
Se puede observar que en la **Figura 11**, la turbina Overshot Waterwheel, presenta gran favorabilidad con respecto al parámetro de caudal concerniente al caso de estudio, puesto que se encuentra situado en un rango de operación entre 0.03 y 0.8 m³/s, mientras que en cuanto al parámetro de salto no presenta las condiciones más adecuadas, su rango de operación se encuentra entre 4 y 8 metros; por el contrario, la turbina Archimedes Screw, presenta una baja favorabilidad en cuanto al parámetro de caudal, teniendo un rango de operación entre 0.5 m³/s y 1.4 m³/s mientras que resulta siendo más conveniente en cuanto al parámetro de salto, el cual se ajusta a un rango de operación entre 2 y 5 m.

Por otra parte, se realizó un estudio de eficiencia para estas turbinas, en el cual se encontró que la eficiencia máxima para la rueda Overshot está en un rango del 50 al 70% (Zaman & Khan, 2012) y a su vez, con un mínimo de operación del 20% del caudal nominal (Wahyudi et al., 2013). Al realizar el mismo estudio para la turbina Archimedes screw, puede observarse que para un caudal del 14% del caudal de diseño, el sistema funciona a 71% de rendimiento. A plena carga, el sistema tiene un rendimiento del 85%. El rendimiento máximo se da para una carga del 87% del caudal, con un valor de rendimiento del 86% (Fernández Piegari, 2010). A su vez, la gráfica de rendimiento vs porcentaje de caudal presentada en (Alberto Mejia, 2011), plantea un rango eficiencia del 75% (a 20% del caudal nominal) y el 90% (a caudal nominal). Finalmente, se plantea una eficiencia máxima del 83%. En ese sentido, se define un rango de eficiencia de la turbina Archimedes screw entre el 75 y el 85%, además de un porcentaje de caudal mínimo del 20% con respecto al caudal nominal (Raza et al., 2013).

Teniendo en cuenta que la disponibilidad del recurso es la mayor limitante, se debe tener en cuenta que el sistema escogido tenga la mayor eficiencia y así aprovechar el poco recurso disponible; por tal razón se prioriza este criterio y como consecuencia de ello se elige la turbina Archimedes screw como la opción más adecuada para el sistema de generación hidroeléctrico propuesto.

Con base en la selección de la turbina Archimedes Screw, el perfil de caudal anual existente y los demás elementos que conforman el sistema de generación (transformador mecánico, generador eléctrico, entre otros), se encontró el perfil de potencial de generación de energía eléctrica el cual se presenta en la **Figura 12**; para ello se utilizó el perfil de eficiencia contra porcentaje de caudal nominal presentado en la (Fernández Piegari, 2010) y las eficiencias típicas de los demás componentes presentadas en (Nuernbergk, 2012).

Figura 12
Perfil de potencial de generación hidroeléctrica



1.2.2 Potencial de biomasa. El término biomasa, desde su aprovechamiento como recurso energético, comprende toda la materia orgánica que puede transformarse en combustibles, más conocidos como biocombustibles, por medio de diferentes procesos y tecnologías. Este recurso se encuentra inmiscuido en el área de energías renovables por considerarse parte del flujo original y cíclico de la naturaleza proveniente del proceso de conversión fotosintético, donde la biomasa se clasifica en dos categorías: de conversión directa y de conversión indirecta.

La biomasa de conversión directa está relacionada con los recursos que obtienen su energía directamente de los procesos de fotosíntesis, tales como: la biomasa natural, la biomasa de cultivos energéticos y algunos componentes de la biomasa residual como los residuos de cosechas, los de poda de zonas verdes, entre otros. Por otra parte, la biomasa de tipo conversión indirecta está asociada a los residuos que requieren un proceso secundario para generar poder energético puesto que no proceden directamente de un proceso fotosintético sino de un derivado de éste, tales como el estiércol de los animales, los procesos de descomposición, entre otros (Balaguera & Ojeda, 2017).

Para el caso de estudio corresponde analizar la biomasa residual del sector pecuario, debido a que éste es el recurso disponible; este tipo de biomasa está relacionada con los diferentes residuos de los animales y su poder energético es obtenido por medio de la conversión indirecta del proceso fotosintético, es decir por la ingesta de semillas, plantas o vegetales. Los residuos de este sector provienen ya sea de animales vivos y sus procesos primarios, estiércol, o de animales muertos y su proceso industrial representado en piel, pezuñas y huesos.

En los residuos animales, el estiércol es el desecho con mayor potencial de estudio en el ámbito energético. Este recurso está definido por diversos parámetros que dependen de factores como: cantidad y calidad del alimento suministrado, el grupo etario y la actividad productiva del animal, existiendo así algunos parámetros que caracterizan dicho residuo como biomasa; dependiendo de la especie de la cual se deriven, dichas variables son el pH, la relación carbono/nitrógeno y la humedad de las heces. En la **Tabla 6** se presentan los datos estandarizados para dichos parámetros.

Tabla 6.
Composición del estiércol avícola, bobino y porcino

Parámetro	Avícola		Bovino	Porcino
	Engorde	Ponedoras		
pH	7.5		7.6	7.3
Relación C/N	32/1		18/1	13/1
Humedad	18 - 30 %	56 - 75 %	71 - 89 %	67 - 75 %

*Adaptado de tesis Potencial Energético De La Biomasa Residual Pecuaria
Del Departamento De Cundinamarca – Colombia*

Por otra parte, la biomasa generada en el sector pecuario no puede ser implementada de forma directa como energía, sino que requiere de una transformación para obtener de ella un combustible, ya sea gaseoso, líquido o sólido, del cual se adquiera energía para un determinado fin; esta transformación requiere de un proceso que puede ser termoquímico o de digestión anaerobia, y su selección depende de la cantidad de humedad disponible en la materia orgánica que se requiere transformar. Teniendo en cuenta que la digestión anaerobia requiere un alto contenido de humedad

en los residuos para producir los microorganismos que se encargarán del proceso de descomposición, se definió que para las especies bovina, porcina y avícola ponedoras, reproductoras y de levante, la tecnología a implementar es la digestión anaerobia, mientras que para el sector avícola de engorde los procesos termoquímicos son los óptimos. A continuación, se profundizará en el modelado matemático del proceso de digestión anaerobia, teniendo en cuenta que el caso de estudio está compuesto de especies bovinas.

El proceso de digestión anaerobia hace parte de la tecnología biológica, siendo el único de ellos que sirve para la transformación de la biomasa residual pecuaria; se caracteriza por precisar de materia orgánica con altos contenidos de humedad, siendo por tanto utilizada en los sectores bovino, porcino y parte del avícola. El modelado matemático de este proceso gira alrededor de 5 parámetros: número de animales, materia seca, sólidos volátiles, producción de biogás y poder calorífico inferior del metano, los cuales se relacionan en la siguiente ecuación.

$$PE_{BRP} = \sum_{i=1}^n MR_i * \%MS_i * SV * B_0 * PCl_{CH_4}$$

Donde:

PE_{BRP} : Potencial energético de la biomasa residual digestión anaerobia $\frac{TJ}{Año}$

MR : Masa de residuo $\frac{Kg \text{ ESTIÉRCOL}}{Año}$

$\%MS$: Porcentaje de materia seca $\frac{Kg \text{ MS}}{Kg \text{ ESTIÉRCOL}}$

SV : Sólidos volátiles $\frac{Kg \text{ SV}}{Kg \text{ MS}}$

B_0 : Producción de biogás $\frac{m^3}{Kg \text{ SV}}$

PCI_{CH_4} : Poder Calorífico Inferior del metano $\frac{TJ}{m^3}$

i: Subíndice asociado al grupo etario de cada sector.

La masa de residuo relaciona la cantidad de estiércol producida por un grupo de animales de la misma especie, por lo tanto, se puede determinar mediante dos parámetros, el número de animales y la tasa de producción de estiércol, los cuales se relacionan en la siguiente ecuación:

$$MR = NA * T_{PE}$$

Donde:

MR : Masa de residuo $\frac{\text{Kg ESTIÉRCOL}}{\text{Año}}$

NA : Número de animales Cabezas

T_{PE} : Tasa de producción de estiércol $\frac{\text{Kg ESTIÉRCOL}}{\text{Cabezas} - \text{Año}}$

La tasa de producción de estiércol representa la cantidad del mismo que puede producir en promedio un animal de una determinada especie y etapa etaria, durante un periodo de tiempo, en este caso, un año. Dichos valores se encuentran estandarizados y se presentan en la **Tabla 7**.

*Tabla 7.
Tasa de producción de estiércol por especie*

Tipo de ganado		Tasa de producción de estiércol (Kg/cabeza*año)
Avícola	Ponedoras	38,33
	Engorde	25,55
	Promedio	31,94
Bovino	Bovino < 1 año	1.460
	Bovino entre 1 y 2 años	3.285
	Bovino entre 2 y 3 años	5.110
	Bovino > 3 año	6.570
Porcino	Lechón lactante	102,2
	Precebos	445,3
	Levante	799,35
	Reproductor	2.051,3
	Hembra lactante	2.693,7
	Hembra gestante	1.971
	Promedio	1343,8

Adaptado de tesis Potencial Energético De La Biomasa Residual Pecuaria Del Departamento De Cundinamarca – Colombia

El porcentaje de materia seca corresponde al porcentaje de residuos sólidos del estiércol, lo que significa la parte del mismo al ser extraída toda la humedad que contiene. Los valores estandarizados se presentan en la **Tabla 8**.

*Tabla 8.
Porcentaje de materia seca por especie*

Especie	% de materia seca (%MS) o solidos totales (%ST) - [Kg MS/Kg Estiércol]
Avícola de engorde	0,8
Avícola ponedora	0,35
Bovino	0,18
Porcino	0,31

Adaptado de tesis Potencial Energético De La Biomasa Residual Pecuaria Del Departamento De Cundinamarca – Colombia

Los sólidos volátiles hacen referencia a la proporción de materia sólida que pasa a estado gaseoso mediante la exposición a temperaturas superiores a los 550 °C. Los valores normalizados por especie se presentan en la **Tabla 9**.

*Tabla 9.
Porcentaje de sólidos volátiles por especie*

Especie	Sólidos Volátiles (%SV) - [Kg SV/Kg MS]
Avícola	0,65
Bovino	0,8
Porcino	0,73

Adaptado de tesis Potencial Energético De La Biomasa Residual Pecuaria Del Departamento De Cundinamarca – Colombia

El biogás es una mezcla de gases combustibles que se obtienen mediante el proceso de digestión anaerobia, su composición está estrechamente relacionada con la clase de biomasa implementada para su producción, siendo esta generalmente metano entre un 60 y 70%, gas carbónico entre un 30 y 40%, hidrógeno en aproximadamente un 1.0%, nitrógeno en 0.5% y finalmente monóxido de carbono, oxígeno y ácido sulfúrico en una proporción de 0,1% cada uno. A su vez, los valores de producción de biogás dependen directamente de la especie, lo cual se muestra en la **Tabla 10**, donde se encuentran los valores típicos para cada una de ellas.

*Tabla 10.
Producción de biogás por especie*

Especie	Producción de Biogás [m3/kg SV]
Avícola	0,31
Bovino	0,21
Porcino	0,32

Adaptado de tesis Potencial Energético De La Biomasa Residual Pecuaria Del Departamento De Cundinamarca – Colombia

Por último, el poder calorífico inferior determina la cantidad de energía que puede ser liberada por la biomasa a través de un proceso de combustión. En el caso de la digestión anaerobia corresponde a la entregada por el metano, cuyo valor es de $22.4 \left[\frac{MJ}{m^3} \right]$, es decir $2.24 \cdot 10^{-5} \left[\frac{TJ}{m^3} \right]$.

Después de identificar la capacidad de generación de biogás que posee la biomasa existente, es necesario examinar el principio general de funcionamiento, el cual corresponde a la transformación de energía mecánica producida por una turbina o motor a combustión, en energía eléctrica, por medio de un generador, ya sea para autogenerar o cogenerar energía, solventado así necesidades de abastecimiento de energía.

Para el caso particular de la generación eléctrica mediante biogás, la energía mecánica es producida mediante una turbina o un motor de combustión a gas, donde a partir de la energía aportada por un combustible se produce energía mecánica y se genera una importante cantidad de calor en forma de gases calientes y con un alto porcentaje de oxígeno (Quiroz Marchant & de la Cerda, s. f.).

Generalmente las plantas con turbina de gas se utilizan para cubrir cargas puntuales, como sistema de respaldo o bien, si se tiene acceso a un combustible barato, para cubrir la carga base. Los componentes básicos de una planta con turbina de Biogás son: un compresor, una cámara de combustión y una turbina. En un sistema basado en biogás, la energía puede ser generada a partir de una turbina o una microturbina y sus principales características se presentan en la **Tabla 11**.

Tabla 11.

Características turbinas y microturbinas con base en biogás

Característica	Turbinas	Microturbinas
Combustible Biogás	100%	100%
Tamaño	100 (KW) - 50 (MW)	20 a 500 (kW)
Eficiencia	25 a 40 (%)	20 a 30 (%)
Emisiones CO2 (kg/MWh)	545-700	600-800
Emisiones Nox (kg/MWh)	2-5	0.01-0.07
Presencia H2S (ppm)	5.000	10.000

Adaptado de Curso de Formación Especializada En Biogás para Profesionales

Finalmente, para determinar la capacidad de generación de energía eléctrica que existe en un año se emplea la siguiente ecuación, la cual se fundamenta en las variables y expresiones presentadas en el presente literal.

$$1TJ = 0.2777777778 \text{ GWh}$$

$$P_{eléctrico} = \frac{P_{BRP} \cdot TJ / \text{Año} \cdot 0.2777777778 \text{ GWh} \cdot \eta_{turbina}}{1TJ} \text{ GWh/Año}$$

Es preciso recordar que la finca comunitaria para la cual se plantea este proyecto cuenta constantemente con una cantidad de bovinos (búfalos) superior a 50; sin embargo, es necesario especificar que estos se encuentran dispersos por gran parte del territorio de la finca (alrededor de 200 hectáreas), por tanto, no es posible disponer de la totalidad de materia orgánica que éstos producen sin generar una labor de recolección bastante compleja logísticamente para la comunidad. Un análisis en campo llevó a determinar que existe una posibilidad parcial de recolección de este material; esta se presenta en el lugar de ordeño (espacio cerrado) mostrado en la **Figura 13**, en el cual permanecen aproximadamente 25 de estos bovinos durante 8 horas cada día, lo cual representa dos terceras partes del tiempo en el cual pueden generar materia fecal.

Figura 13
Establo para ordeño finca "LA BUFALERA"



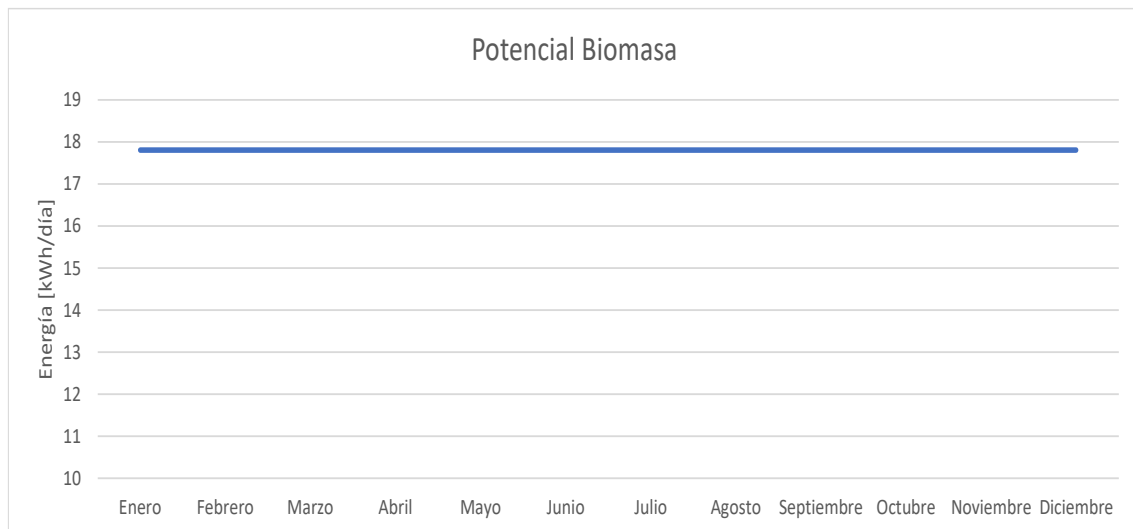
Para la generación de biogás a partir de material disponible (estiércol bovino) se selecciona el proceso de digestión anaerobia como la tecnología más adecuada para la producción del mismo y se determinan los valores de las variables necesarias para determinar el potencial de generación de energía eléctrica (número de animales, tasa de producción de estiércol, porcentaje de materia seca sólidos volátiles, producción de biogás y poder calorífico), los cuales son mostrados en la **Tabla 12**.

Tabla 12.
Potencial energético a partir de biomasa

Potencial de generación de energía eléctrica a partir de biomasa											
Número de animales	Tasa de producción de estiércol [kg/cabeza *año]	Masa de residuo [kg/año]	Porcentaje de materia seca [Kg MS/Cabezas Año]	sólidos volátiles [kg SV/kg MS]	Producción de biogás [m3/Kg SV]	Poder calorífico del metano [TJ/m ³]	Potencia energética de la biomasa residual anaerobia [TJ/Año]	Eficiencia turbina a gas	Potencial energético eléctrico [GWh/año]	Potencial energético eléctrico [kWh/mes]	Potencial energético eléctrico [kWh/día]
25	3406,66667	85166,67	18%	0,8	0,21	2,24E-05	0,057689856	0,4	0,00640998	534,16533	17,805511

Además, con base en las consideraciones mostradas anteriormente se obtiene el perfil de potencial de generación de energía eléctrica a partir de biomasa en un promedio mensual, el cual podemos apreciar en la **Figura 14**.

Figura 14
Perfil del potencial de generación a partir de biomasa

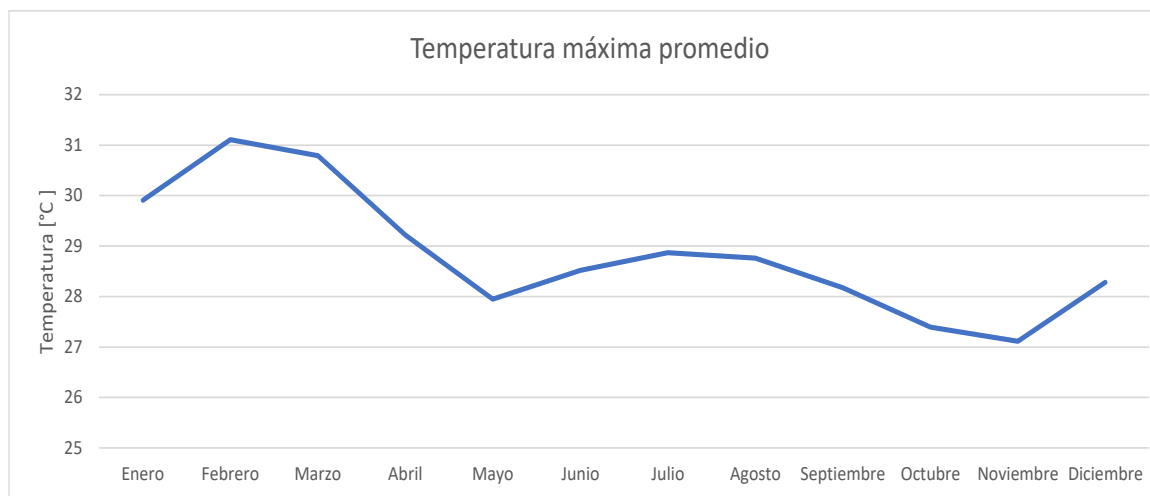


Los datos arrojados mediante el proceso de transformación de biomasa en biogás (digestión anaerobia) evidencian un bajo potencial energético con respecto a las demás fuentes de generación. Hay que tener en cuenta que cada sistema de generación de energía que se plantee como solución, requiere un conjunto de mecanismos que tienen una influencia de gran relevancia en el costo total del proyecto.

1.2.3 Potencial Solar. La región en estudio cuenta con características de irradiancia favorables para la generación de energía eléctrica mediante el uso de fuentes fotovoltaicas; además de ello, el área específica disponible es una zona que ha sido deforestada con fines agrícolas por lo tanto no cuenta con vegetación cercana de tamaño considerable, que sean obstáculos fuentes de sombra a dicha área, favoreciendo una alta capacidad de aprovechamiento del recurso disponible.

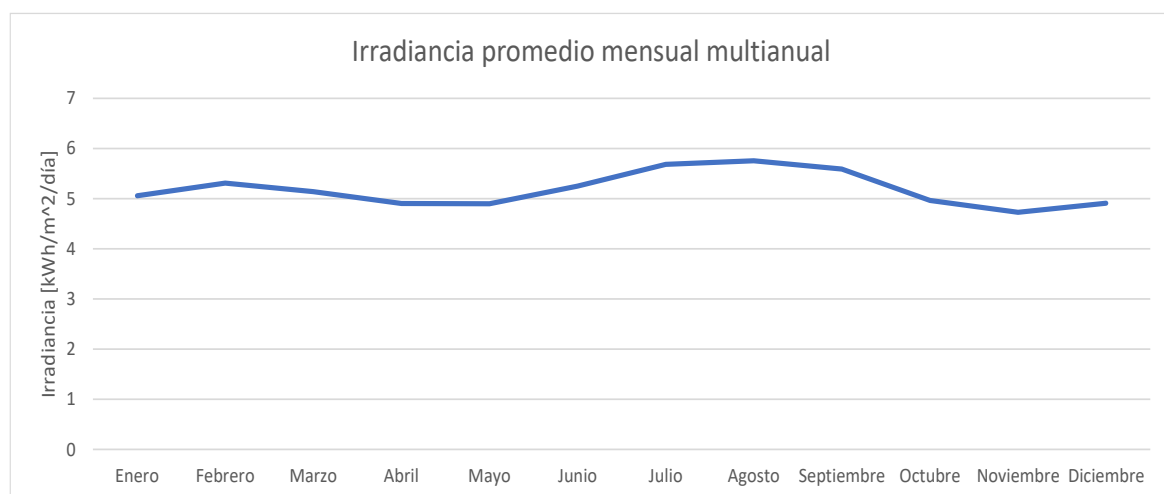
Teniendo en cuenta la característica expuesta, se procedió a obtener los datos con mayor relevancia para la generación fotovoltaica (temperatura e irradiancia). Fue posible conseguir los promedios de los últimos diez años proporcionados por la NASA, para la ubicación correspondiente al espacio anteriormente mencionado. Los datos de temperatura máxima promedio multianual se muestran en la **Figura 15**.

Figura 15
Perfil de temperatura máxima promedio multianual



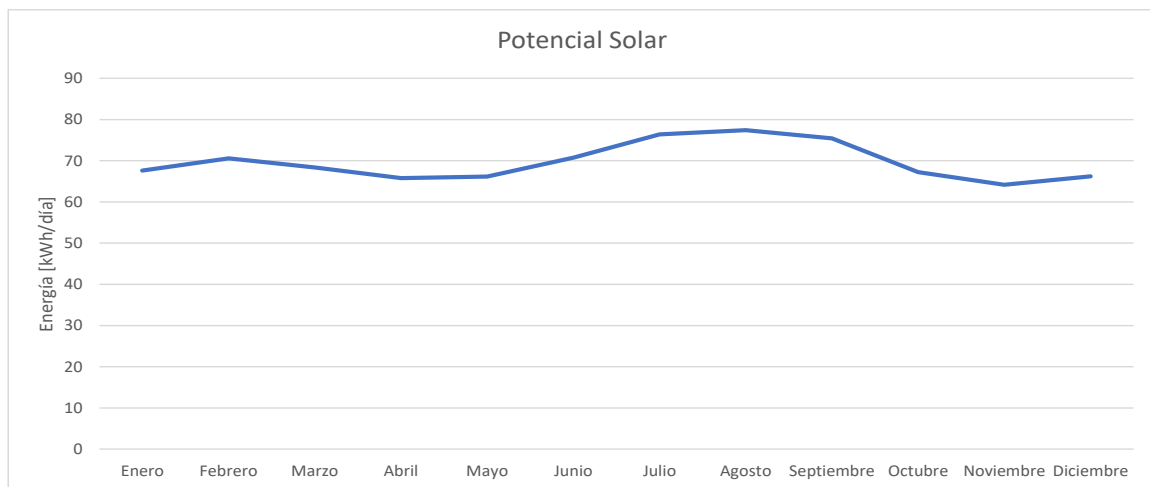
Así mismo, los datos de irradiancia promedio multianual se presentan en la **Figura 16**.

Figura 16
Perfil de irradiancia promedio multianual



Para determinar el potencial fotovoltaico se incorporaron paneles tipo con potencia pico de 330 Wp , a su vez se tiene en cuenta el factor de calentamiento que está influenciado directamente por la temperatura máxima ambiente, el cual representa el impacto de la temperatura sobre la eficiencia de las celdas; adicionalmente es preciso resaltar que en la finca “La Bufalera” se cuenta con un área de 144 m² , correspondiente a 16 m de largo y 9 m de ancho, disponible para instalación de paneles los cuales presentan un área estándar de 2 m² , los cuales corresponden a 1 m de ancho y 2 m de largo; por consiguiente serán 48 la cantidad máxima de paneles que pueden ser instalados en dicha área. El perfil de generación de energía eléctrica fotovoltaica se presenta a continuación en la **Figura 17**. Los datos se presentan de manera más detallada en el **Apéndice C** y las expresiones del sistema fotovoltaico se presentarán en el proceso de diseño.

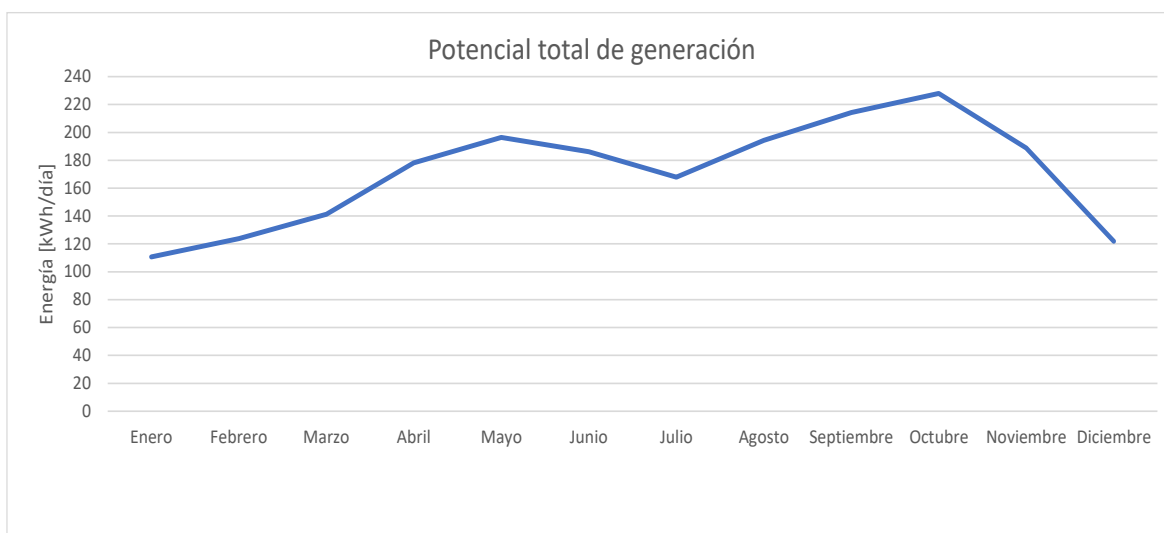
Figura 17
Perfil de potencial de generación fotovoltaica mensual multianual



El potencial de generación fotovoltaica, a pesar de que es superior al suministrado a partir de biomasa, presenta limitantes puesto que sólo se obtiene energía en las horas del día que se cuenta con radiación solar; adicionalmente, comparándolo con el potencial hidroeléctrico, presenta desfavorabilidad puesto que éste último suministra energía de manera continua las 24 horas del día.

1.2.4 Potencial total de generación de energía eléctrica Una vez obtenida la información expuesta en el literal 4 del presente documento/en este literal, concerniente al potencial energético de las diferentes fuentes de energía eléctrica en consideración, se realiza una sumatoria de dichas curvas con el fin de obtener el perfil de potencial energético resultante, el cual nos brinda la información suficiente y consecuentemente proceder a realizar un dimensionamiento adecuado de los equipos necesarios para brindar la mayor confiabilidad de un flujo continuo de energía eléctrica a la microrred. A continuación, la **Figura 18** muestra los datos que dan forma al perfil de potencial total de generación de energía eléctrica suministrado por las fuentes disponibles

Figura 18
Perfil del potencial total de generación



Se identifica el pico máximo de potencial de energía en 228 con un mínimo de 98 kWh/día, dichos valores reflejan un panorama favorable para dos terceras partes del año en el que el potencial de generación diario llega incluso a duplicar la demanda en cuestión, así mismo una situación crítica se presenta en los meses de diciembre, enero, febrero y marzo para los cuales habrá la necesidad de tener especial cuidado en la sección de dimensionamiento del presente documento.

2. Dimensionamiento y caracterización de la microrred

En este capítulo se realiza una comparación entre los perfiles de potencial y demanda de energía eléctrica, con el fin de determinar si existe la energía requerida para alimentar las cargas existentes y proyectadas. Adicionalmente, se describen los componentes que integran la microrred y cómo éstos se ordenan topológicamente.

2.1 Dimensionamiento de la microrred

Para el caso de estudio, el perfil que describe la demanda de la microrred, sumado a su diversidad en el tipo de cargas y sus diferentes ciclos de operación, evidencia particularidades de gran importancia que se debe tener en consideración a la hora del dimensionamiento. En primera medida, para días laborables (lunes a sábado), existen momentos puntuales del día en los que se presentan picos de potencia debido a la entrada en operación de maquinaria correspondiente a los procesos mencionados que superan el doble del promedio del consumo de potencia diaria; por otro lado, y como se nombra en el literal anterior, la tercera parte del año los datos de potencial energético diario son, en parte, inferiores a su consumo total de energía.

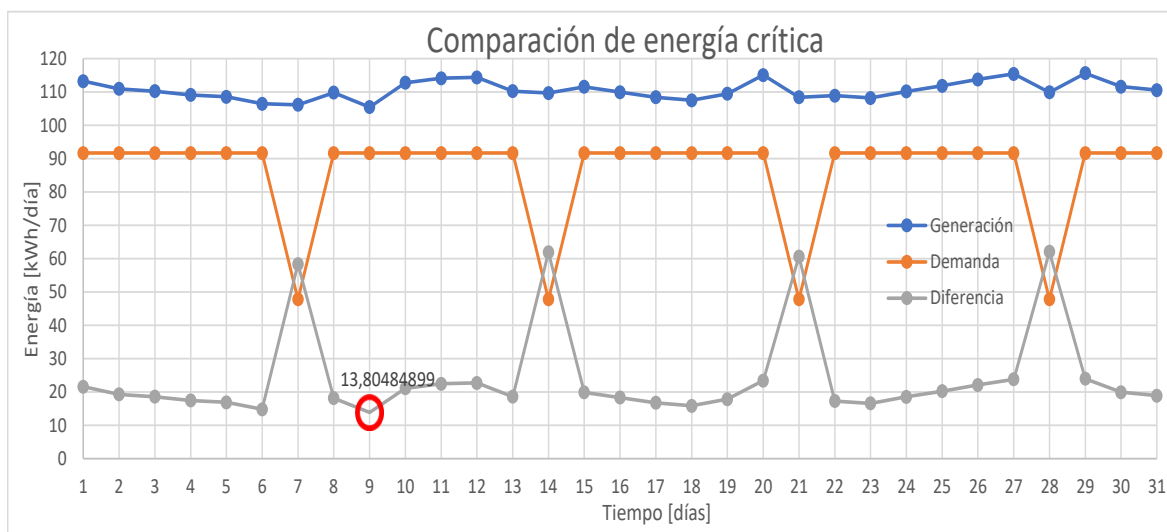
El objetivo principal es hacer una comparación de los datos y examinar si existe una superposición de potencias en una hora específica del día que puedan limitar o entorpecer la operación del sistema. A partir de este análisis preliminar se identificó que el potencial energético disponible es suficiente para solventar la demanda de energía durante todo el año, así como días en los que, si bien se dispone de la energía (acumulada en el día) suficiente para satisfacer la demanda, existen horas específicas del día en los cuales la potencia instantánea generada por el conjunto de fuentes es insuficiente para el abastecimiento de la misma, razón por la cual se requiere de una fuente adicional a las planteadas para obtener la potencia requerida y así, una alta confiabilidad del suministro de energía al sistema.

Es de gran importancia entender que el usuario final de un sistema eléctrico representa un consumo energético el cual debe ser abastecido en su totalidad por el sistema de generación. Teniendo en cuenta que se debe satisfacer el principio de conservación de la energía y resaltando que la disponibilidad energética puede ser trasladada temporalmente mediante sistemas de almacenamiento de energía, se asume la demanda de energía como criterio principal para el dimensionamiento del sistema de generación, lo cual se ve reafirmado a partir de la discriminación de los datos de energía de manera horaria, que a su vez se traduce en potencia promedio.

Los picos de potencia máxima presentados en los procesos industriales debido la superposición de cargas considerables en momentos puntuales actuando a condiciones nominales, son la base para dimensionar el sistema de acumulación, y así garantizar la operación satisfactoria de la microrred.

La **Figura 19** presenta el mes (enero) en el cual se encuentra el punto crítico de la diferencia entre la energía generada y la consumida, con una escala diaria.

Figura 19
Comparación de energía crítica

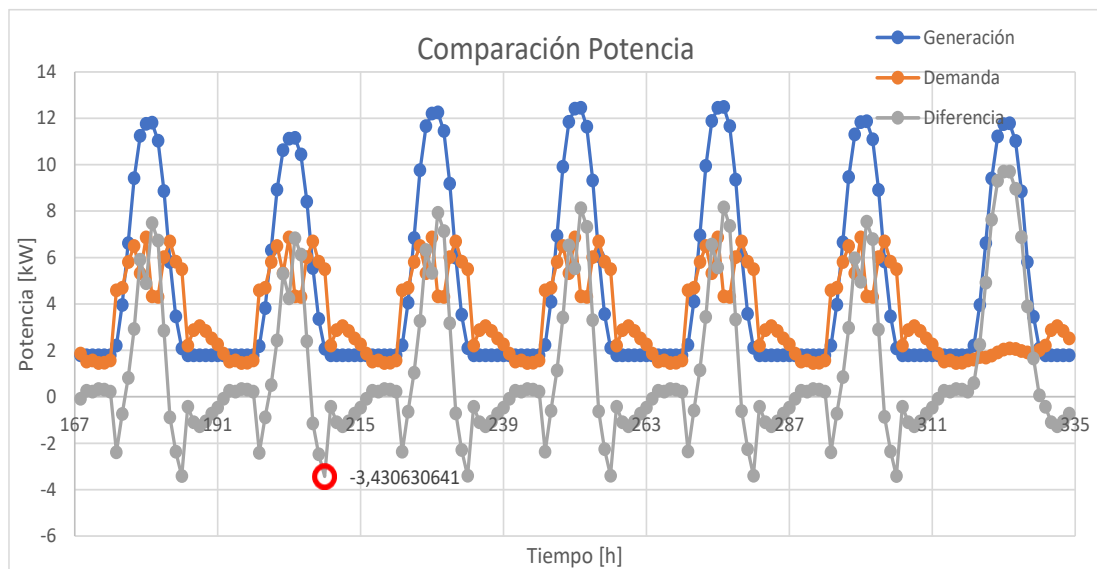


Los datos que componen el perfil de demanda de energía eléctrica se presentan de manera detallada en la hoja “Perfil demanda energía anual” contenida en el **Apéndice A** con una escala

diaria y manteniendo un dominio anual; asimismo la generación de energía eléctrica se presenta en la hoja “Perfil energía_total generada” del **Apéndice C** (manteniendo el dominio y la escala de la carga), resaltando que el objetivo principal del análisis de energía es determinar si la generación tiene la capacidad de satisfacer la demanda en dicha escala de tiempo.

Asimismo, la **Figura 20** evidencia los datos de potencia promedio y su respectivo punto crítico el cual corresponde con la ubicación presentada en los datos de energía (día 9).

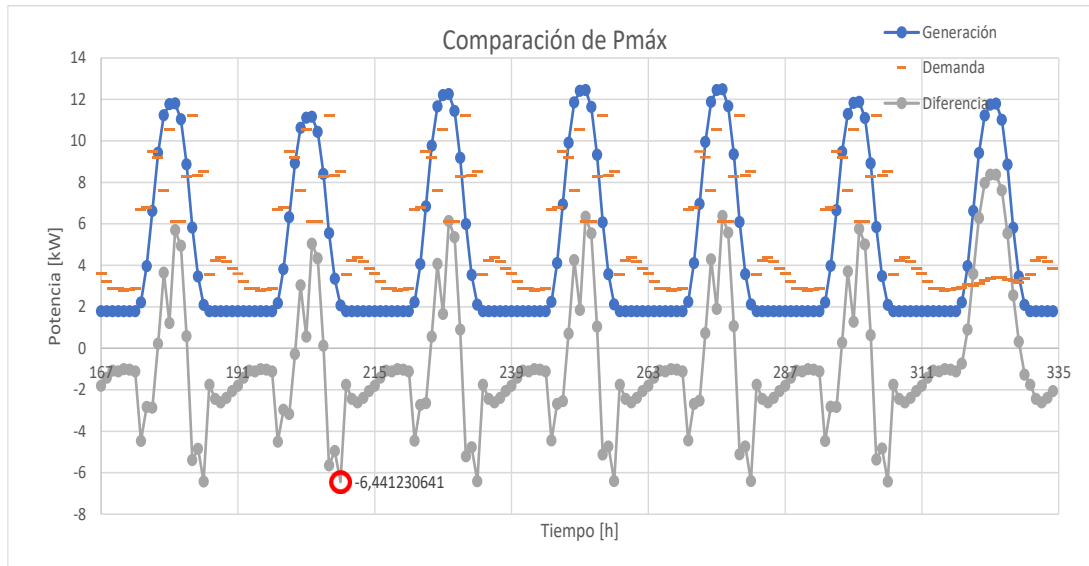
Figura 20
Comparación de potencia promedio



Los datos que conforman el perfil de demanda de potencia media y máxima se presentan de manera más completa en las hojas “Perfil demanda potencia anual” y “Perfil demanda pmáx anual” respectivamente, las cuales se encuentran contenidas en el **Apéndice A** y presentan una periodicidad mayor (horaria); adicionalmente, los datos de generación de potencia eléctrica se relacionan en la hoja “Perfil potencia_total generada” del **Apéndice C** (manteniendo escala y dominio de la carga).

La **Figura 21** muestra la semana en la cual se presenta el punto crítico de la diferencia entre la potencia generada y la máxima demandada, ésta se presenta a escala horaria

Figura 21
Comparación de potencia máxima



El proceso de dimensionamiento de una manera ampliada se presenta en el **Apéndice D**.

Es parte esencial en todo sistema de potencia la existencia de un barra principal (barra slack) la cual teóricamente debe ser capaz de suministrar una potencia infinita durante un tiempo prolongado. Teniendo en cuenta que a partir del análisis anteriormente realizado se puede inferir que el sistema de generación de energía propuesto no tiene la capacidad suficiente para asumir la demanda en momentos específicos del día en los cuales se presenta una alta demanda de potencia máxima, se requiere de un sistema de apoyo (en las microrredes normalmente se utiliza como fuentes de apoyo, bancos de baterías, grupos electrógenos y celdas de combustible) que permita brindar dicha característica a la barra principal (barra slack) del diseño a proponer y por ende satisfacer la condición crítica en cuestión de demanda.

Se identifica como valor crítico en cuanto energía diaria un exceso mínimo de 13.8 kWh; asimismo, en cuanto a potencia máxima se encuentra el punto máximo de deficiencia en 6.44 kW;

el valor de energía en exceso corresponde al valor crítico de la comparación entre la demanda y la totalidad del potencial energético disponible, lo cual quiere decir que para satisfacer la demanda es necesario utilizar todo este potencial, de manera que se pueda dejar un margen de error correspondiente a la inexactitud de los datos. Por otra parte, para que el sistema de almacenamiento funcione como barra slack, se plantea que éste pueda operar entregando la deficiencia de potencia máxima durante 3 horas continuas, teniendo en cuenta que es la duración máxima que presentan los puntos críticos de las cargas industriales, las cuales son las de mayor relevancia para el sistema; adicionalmente se incluye la profundidad de descarga del 80% para el sistema de acumulación, teniendo en cuenta que es un parámetro fundamental para optimizar la vida útil de éste y un margen de seguridad del 40%, teniendo en cuenta que es un componente fundamental para el funcionamiento de la microrred. La energía que éste tiene la capacidad de almacenar se presenta en la siguiente ecuación.

$$E_{acu} = \frac{P_{m\acute{a}x} * M_{seg} * h_{cap}}{Prof_{desc} * F_{temp}}$$

Donde:

E_{acu} : *Energía sistema de acumulación*

$P_{m\acute{a}x}$: *Potencia máxima*

M_{seg} : *Margen de seguridad*

h_{cap} : *horas de capacidad de suministro*

$Prof_{desc}$: *Profundidad de descarga*

F_{temp} : *Factor de corrección por temperatura*

$$E_{acu} = \frac{6.44 * 1.4 * 3}{0.8 * 1} = 33.81 \text{ kWh}$$

La convención utilizada para realizar la comparación de los datos de demanda y generación tanto de potencia como de energía se basa en la resta de la demanda a la generación disponible en cada momento de operación del sistema; en ese sentido, cuando la generación es mayor que la demanda, la comparación arroja un valor positivo, lo cual significa que el sistema tiene un superávit energético y no requiere de un sistema adicional. Por otro lado, cuando la demanda es mayor que la generación, la comparación entrega un valor negativo, lo cual significa que existe una deficiencia energética siendo el valor mínimo aquel que evidencia el punto más crítico y por ende, el eje principal para el proceso de dimensionamiento; cabe aclarar que esta convención será replicada para todos los procesos de dimensionamiento desarrollados en el presente documento.

Es importante observar que los periodos críticos anteriormente mencionados se encuentran en los meses de diciembre (potencia) y enero (energía); estos meses corresponden a una misma temporada estacional, la sequía, la cual se desarrolla en los meses de diciembre, enero, febrero y marzo. El dimensionamiento se realizó con base en dicha temporada, lo cual arroja un sobredimensionamiento para gran parte del año restante.

Para obtener un dimensionamiento más adecuado a todas las temporadas del año, el cual minimice al máximo posible el sobredimensionamiento, se plantea una gestión de la demanda, la cual se desarrollará en la siguiente sección.

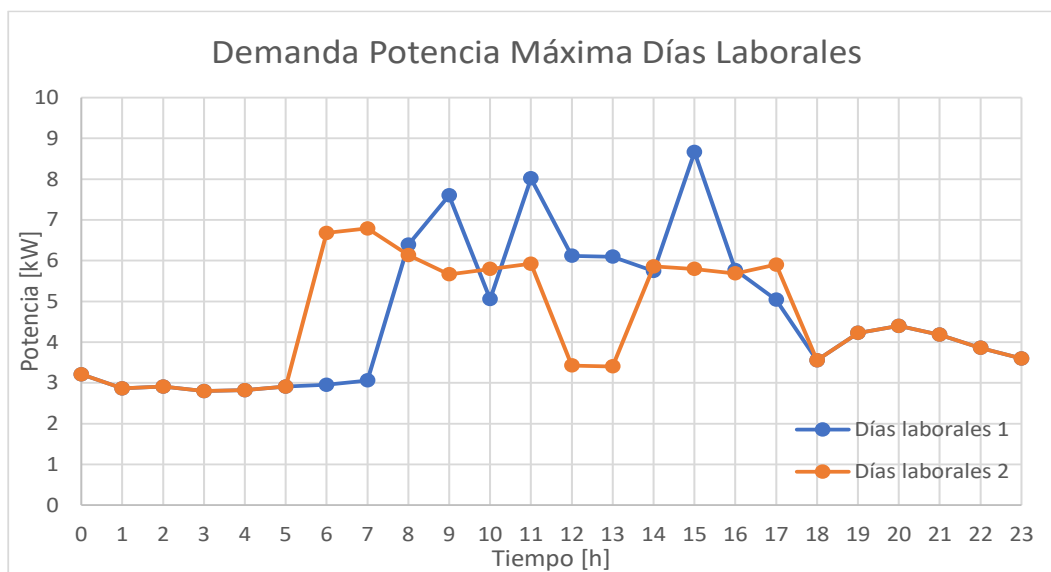
2.1.1 Gestión de la demanda. A partir de las conclusiones obtenidas en el literal anterior, se plantea una gestión de la demanda para cada una de las temporadas climáticas existentes, sequía y lluvia; para ello, es necesario replantear el perfil de consumo, ajustándolo a unas condiciones establecidas conjuntamente con los usuarios. Es necesario ajustar el sistema de generación teniendo en consideración la variación del perfil de demanda, así como el factor económico el cual, evidentemente, aumentará de manera considerable a mayor cantidad de sistemas propuestos; en ese sentido, se toma la decisión de excluir el potencial energético a partir de biogás del grupo de sistemas propuestos como fuentes de generación, teniendo en cuenta que dicha fuente es la de menor capacidad de generación (bajo las condiciones actuales) y no justifica su alto costo logístico y económico.

2.1.1.1 Demanda temporada seca. La temporada de sequía está caracterizada por albergar bajos niveles de precipitación (niveles críticos de caudal en las fuentes hídricas) y altos niveles de temperatura (mayores niveles de irradiancia); aunque las fuentes anteriormente descritas presentan una complementariedad estacional, partiendo de la premisa de que la fuente hídrica representa la generación más constante y robusta cuya condición brinda la característica principal de bajo potencial energético a la temporada seca, es evidente la existencia de un margen de energía estrecho y una disponibilidad energética no correspondiente temporalmente a la demanda, debido a la operación de la carga industrial, lo cual genera deficiencias de potencia máxima; estas condiciones obligan a tomar medidas para abastecer dicha carga de la manera eficiente, acorde al potencial de generación existente; por tanto, la propuesta de gestión de demanda para esta temporada establece el uso industrial intercalado.

Teniendo en cuenta que la sumatoria de cargas debida a la superposición de procesos industriales genera la condición más crítica para el sistema, se establecen tres perfiles de operación característicos: día laboral 1, día laboral 2 y día no laboral. El día laboral 1 está caracterizado por la operación de la fábrica de lácteos como único proceso industrial, y a su vez como carga principal. Por otro lado, el día laboral 2 establece la operación de la fábrica de aceites esenciales (vivero) como único proceso industrial, manteniendo la carga esencial de la fábrica de lácteos (refrigeración) y en su conjunto conforman la carga principal para tal característica. El perfil de las características 1 y 2 es mostrado en la **Figura 22**.

Figura 22

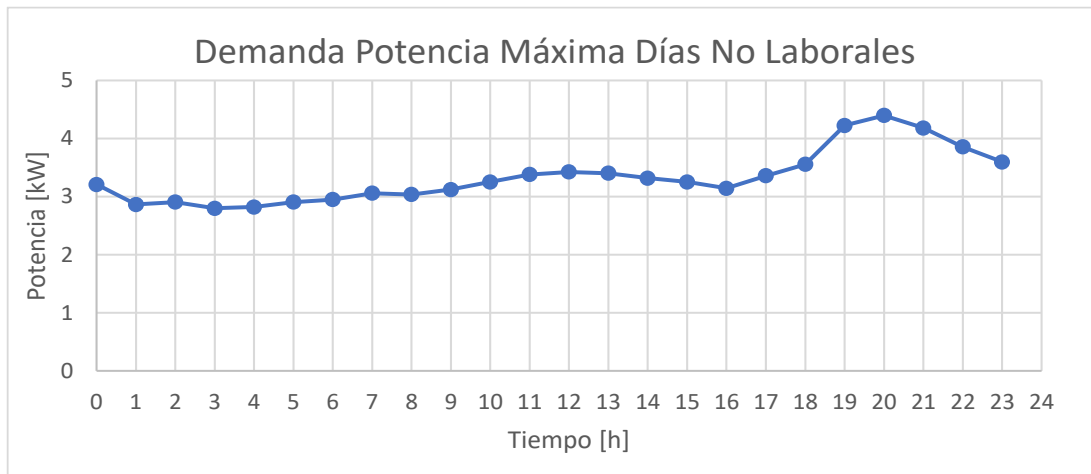
Gestión demanda de potencia máxima para días laborables (temporada seca)



Por último, el día no laboral contempla la carga residencial y la carga esencial de la fábrica de lácteos (existentes en todas las características ya mencionadas) como la única carga a asumir por el sistema de generación y se relaciona en la **Figura 23**. Un análisis numérico más detallado se relaciona en la hoja “Demanda Potencia Máxima” del **Apéndice E**.

Figura 23

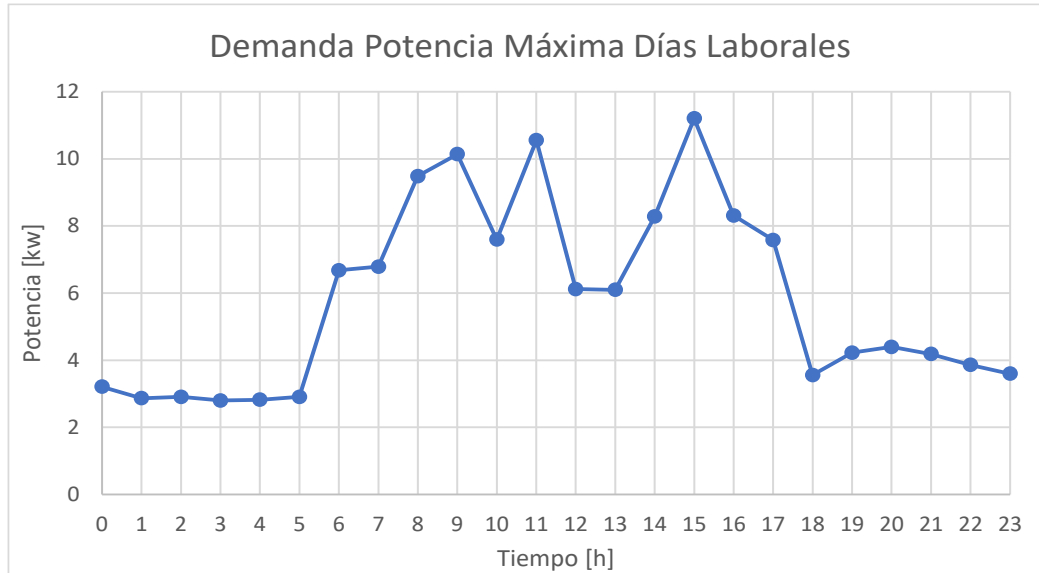
Gestión demanda de potencia máxima para días no laborables (temporada seca)



2.1.1.2 Demanda temporada de lluvia. La temporada de lluvia se caracteriza por presentar altos niveles de precipitación (niveles de caudal en las fuentes hídricas cercanos y superiores al promedio anual) y una moderada temperatura (niveles de irradiancia menos favorables para la generación fotovoltaica). Aunque las fuentes anteriormente descritas también presentan una complementariedad estacional, partiendo de la premisa de que la fuente hídrica representa la generación más constante y robusta, la cual para el caso de la temporada de lluvia representa un superávit de energía, sigue siendo una limitante la potencia máxima demandada como producto de la superposición de procesos industriales; a partir de las conclusiones anteriores, se definen dos perfiles de operación característicos, días laborables y días no laborables, los cuales corresponden al funcionamiento que se tenía previo a la gestión de demanda. Los días laborables, cuyo perfil característico se presenta en la **Figura 24**, concentran los procesos industriales además de la carga residencial.

Figura 24

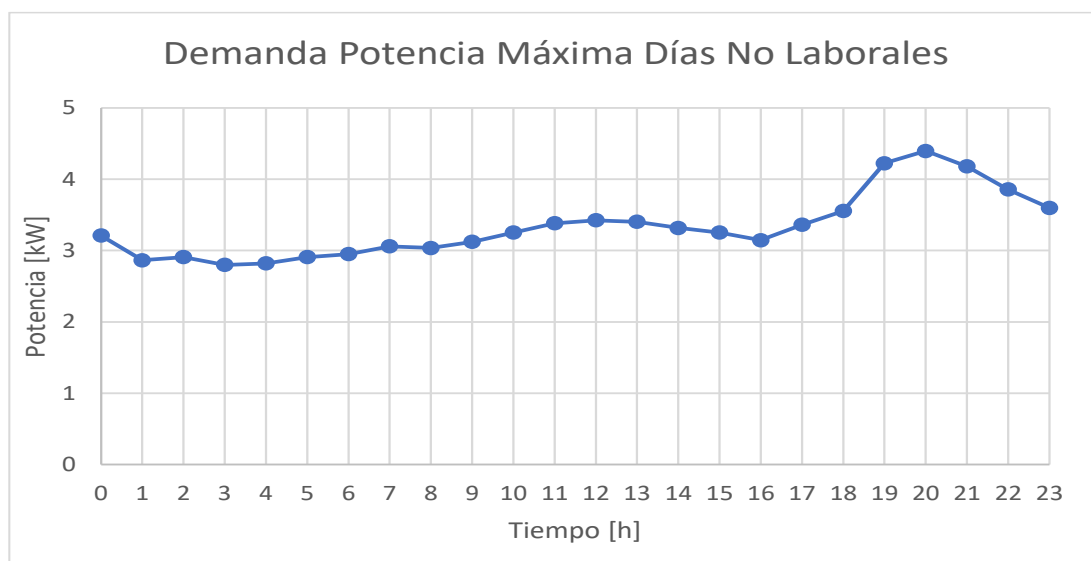
Gestión demanda de potencia máxima para días laborables (temporada de lluvia)



Los días no laborables, que consecuentemente presentan su perfil en la **Figura 25**, sólo corresponden a la carga residencial, la cual se complementa con la carga esencial de la fábrica de lácteos, cuyo funcionamiento debe ser ininterrumpido. Un análisis más detallado de lo anteriormente mencionado se relaciona en la hoja “Demanda Potencia Máxima” del **Apéndice F**.

Figura 25

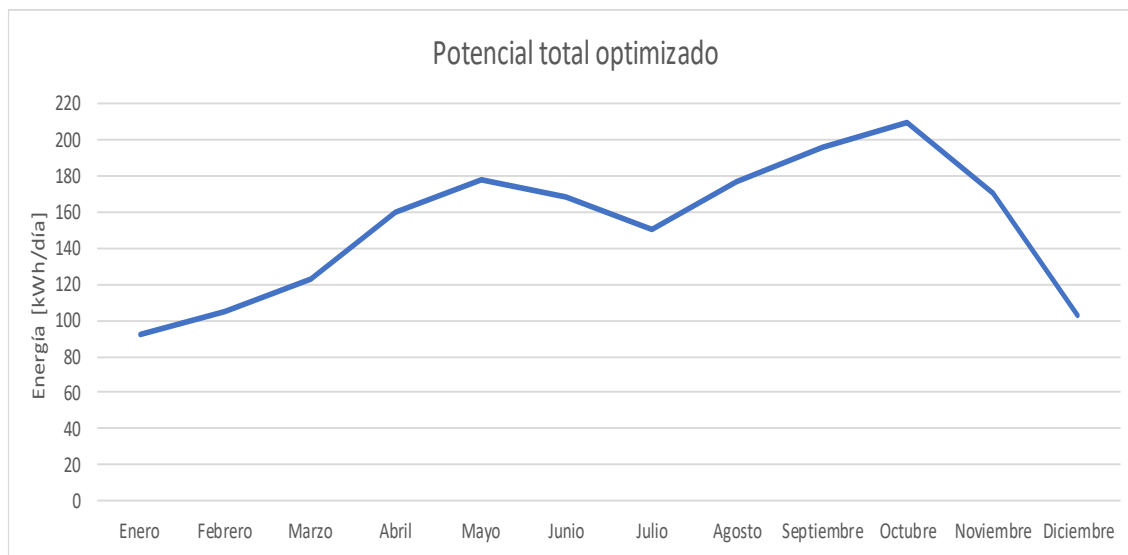
Gestión demanda de potencia máxima para días no laborables (temporada de lluvia)



2.1.1.3 Generación optimizada. El sistema de generación optimizado se asemeja en gran medida al planteado previamente a la gestión de la carga, teniendo en cuenta que el potencial existente en la zona no se ve modificado por la misma; sin embargo, debido a ésta, se obtiene una sobreproducción de energía en gran cantidad de periodos de tiempo, lo que conlleva a excluir de la propuesta el sistema de generación con base en biogás. La exclusión de esta fuente de generación tiene como consecuencia una disminución considerable en el costo inicial de implementación del sistema, además de los costos generados debido a logística y mantenimiento del mismo.

Para determinar el potencial de generación de las fuentes restantes (hidroeléctrica y solar fotovoltaica), se recurrirá a la misma metodología planteada en la sección **1.2.1** para la generación hidroeléctrica y **1.2.3** para la solar fotovoltaica. La **Figura 26** muestra el potencial total de generación de energía eléctrica existente.

Figura 26
Potencial total de generación optimizado

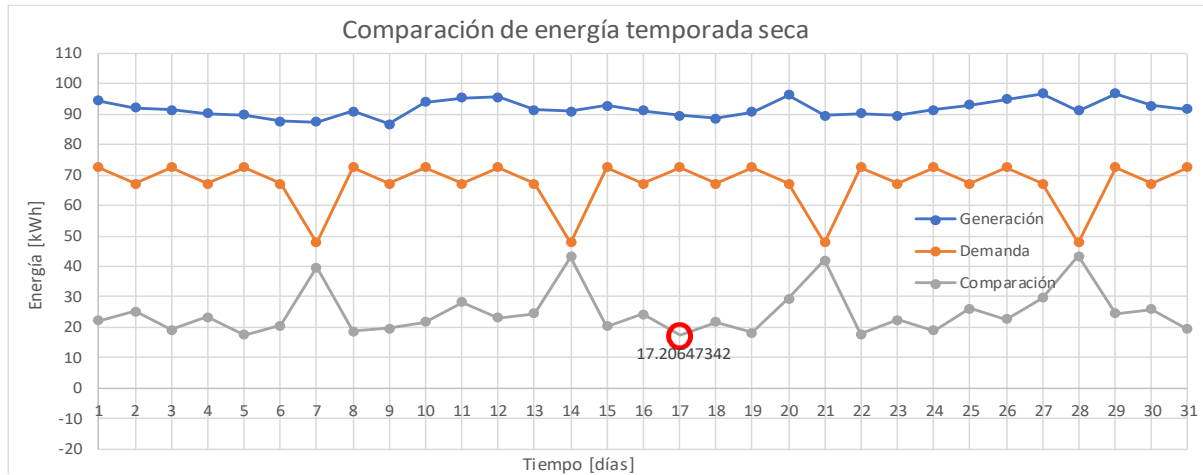


Una vez culminado este estudio de potencial, el paso a seguir es realizar la comparación entre el perfil total de generación optimizado y los perfiles de demanda construidos a partir de la gestión, dicho proceso corresponde al dimensionamiento y se presenta a continuación.

2.1.1.4 Dimensionamiento optimizado de la microrred. A partir de los resultados obtenidos mediante la gestión de la demanda y la optimización realizada en cuanto a potencial total disponible para la generación de energía eléctrica, se puede inferir que a pesar de que la demanda en la temporada seca no incluye superposición de procesos industriales, es preciso tener en cuenta que es la época con menor precipitación y por ende menor potencial de generación, recalcando que la generación hidroeléctrica representa la fuente más robusta. Por otro lado, la temporada con mayor potencial de generación es la de lluvia, sin embargo ésta presenta una superposición de procesos industriales, lo cual genera un mayor nivel de demanda; teniendo en cuenta esta consideración, se dispone a realizar un estudio comparativo entre los perfiles correspondientes a cada una de las temporadas (seca y lluviosa) y el perfil de potencial total de generación optimizado con el fin de determinar la condición más crítica; es preciso aclarar que esta condición se presenta a nivel de potencia, emanada de la superposición instantánea de la operación de equipos de alto consumo, resaltando la gran importancia de que dicha condición debe tener la capacidad de satisfacer las demás condiciones de operación y así garantizar un alto nivel de confiabilidad en cuanto al suministro de energía eléctrica para el sistema.

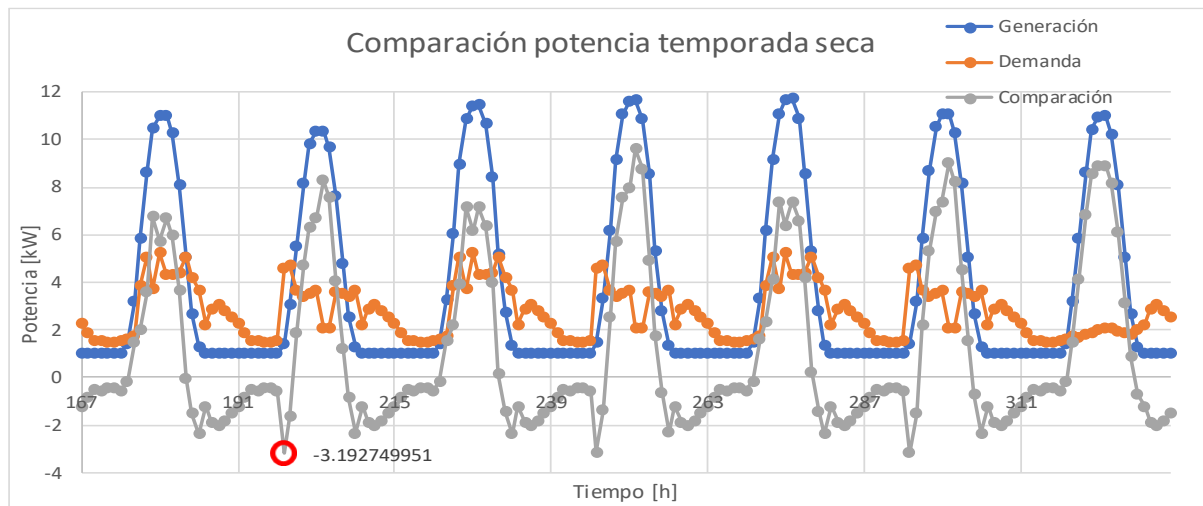
En la **Figura 27** se identifica el punto más crítico en cuanto la comparación de energía total acumulada en un día para la temporada seca, el cual se presentó en el día 17 del año que corresponde al mes de enero y cuyo exceso de energía presenta un valor de 17.2 kWh .

Figura 27
Comparación de energía para la temporada seca



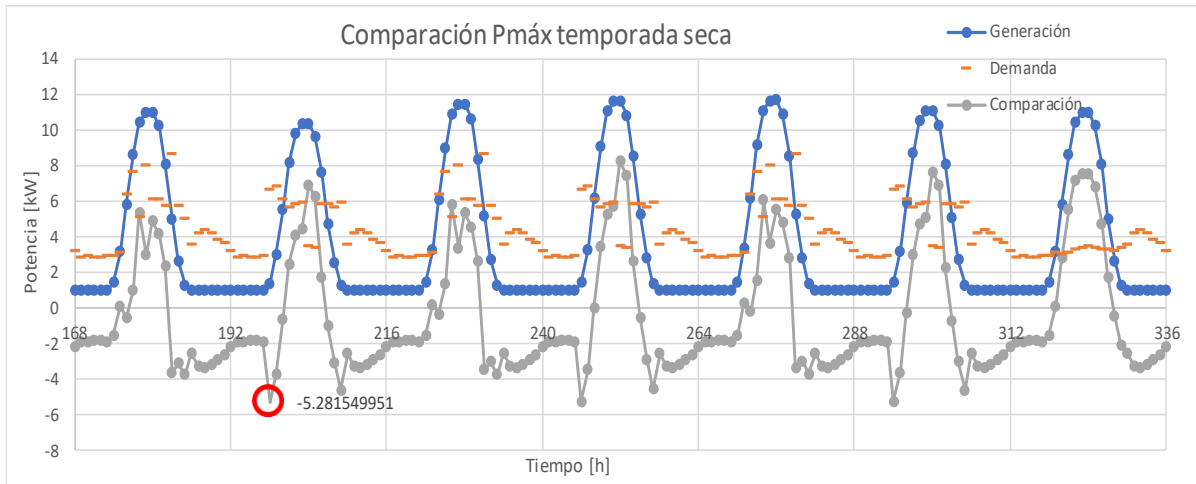
Una adecuada discriminación de los datos de energía de manera horaria traducido como potencia promedio se presentan en la **Figura 28**, para los cuales se identifica el valor crítico de 3.19 kW presentado en la hora 198 del año.

Figura 28
Comparación de potencia para la temporada seca



La **Figura 29** presenta la comparación de los datos de generación y demanda de potencia alrededor del punto crítico, siendo este el de mayor deficiencia de potencia; este punto crítico se encuentra ubicado en la hora 198 del año, correspondiente al día 9, perteneciente al mes de enero y cuyo valor es de 5.28 kW.

Figura 29
Comparación de potencia máxima para la temporada seca

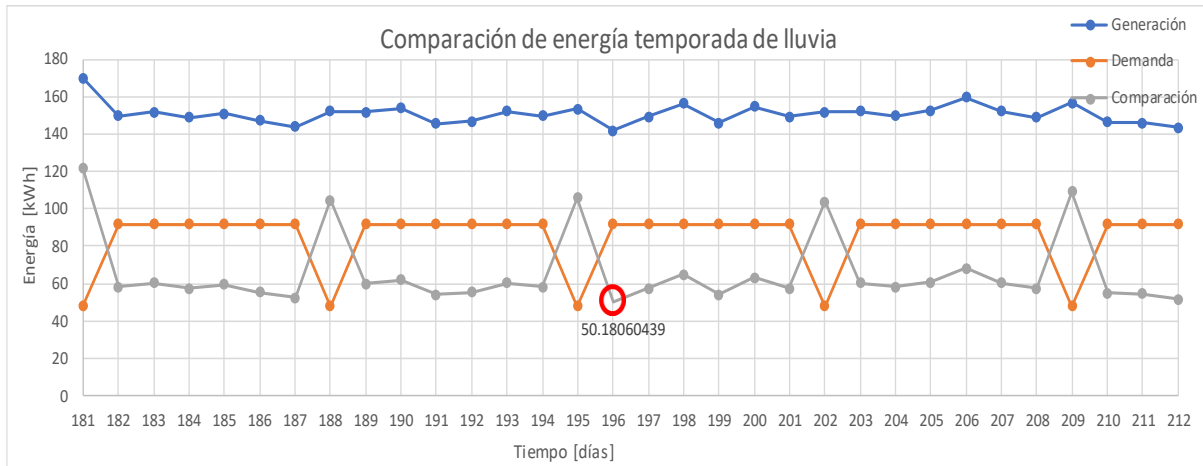


Los datos que componen el perfil de demanda de potencia promedio, máxima y energía eléctrica gestionada para la temporada de sequía se presentan de manera detallada en el **Apéndice E**, con un dominio anual y conservando los datos de potencia con una escala horaria mientras que el perfil de energía mantiene una escala diaria; asimismo la generación de potencia y energía eléctrica optimizada para la misma temporada se presenta en el **Apéndice G** (manteniendo las características de escala y dominio correspondientes a la demanda). El dimensionamiento para la temporada seca se desarrolla mediante la comparación de los datos anteriormente expuestos, el cual se presenta de manera detallada en el **Apéndice I**.

En la **Figura 30** se identifica un superávit de energía total acumulada en un día, en la cual el punto que presenta menor sobreproducción de la misma para la temporada lluviosa se encuentra

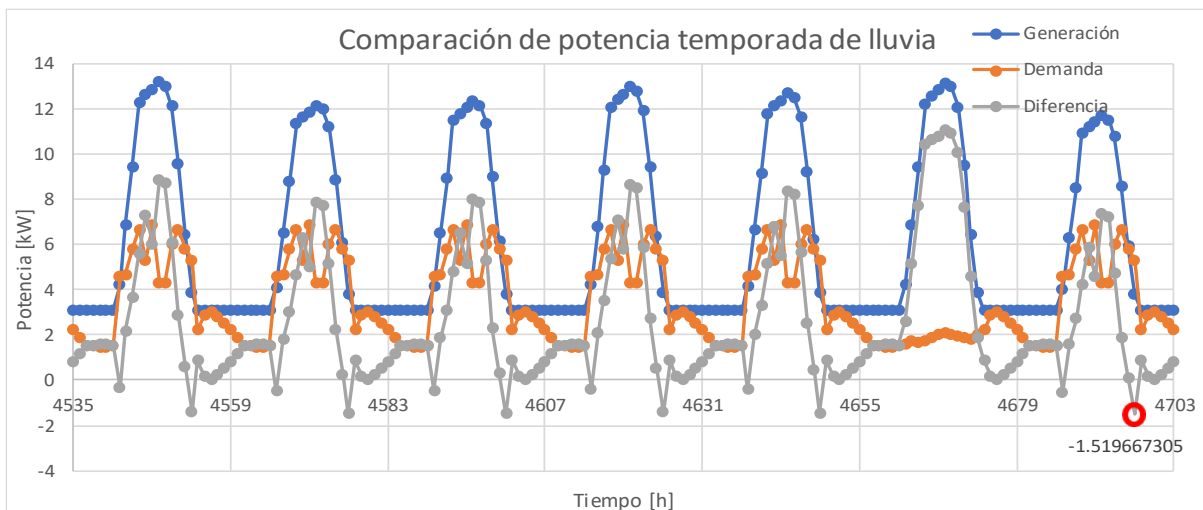
ubicado en el día 196 del año, el cual corresponde al mes de julio y siendo 50.18 kWh su respectivo valor.

Figura 30
Comparación de energía para la temporada de lluvia



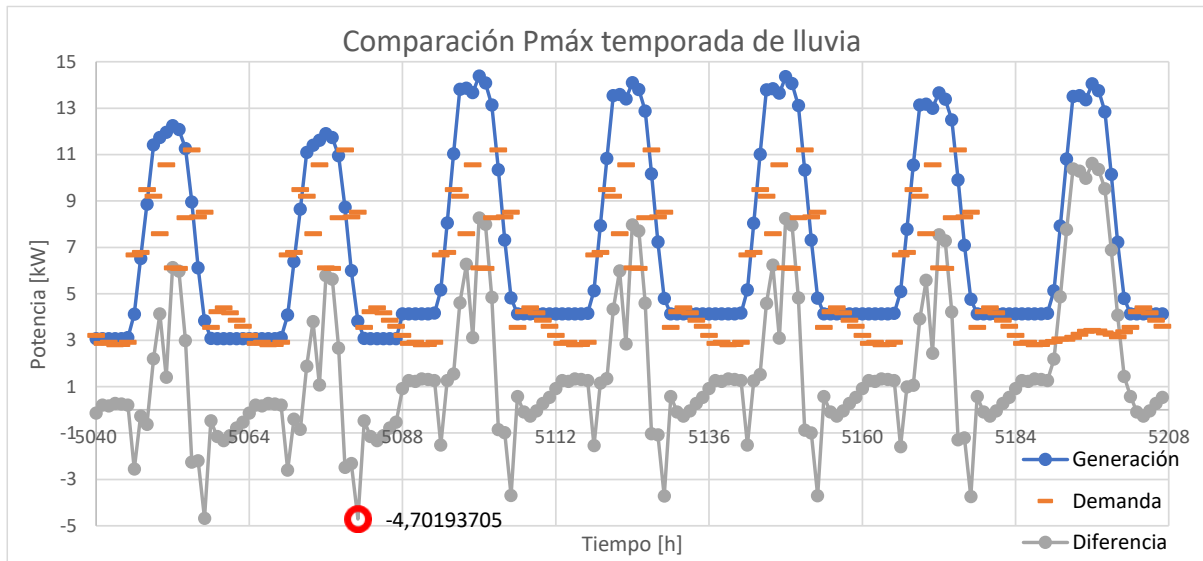
Siguiendo la metodología utilizada anteriormente, la **Figura 31** muestra la comparación entre la demanda de potencia promedio y el potencial de generación existente, con una deficiencia máxima de 1.52 kW ubicado temporalmente en el día 196 del año, el cual a su vez corresponde a la ubicación donde ocurre la máxima deficiencia de energía.

Figura 31
Comparación de potencia para la temporada de lluvia



La **Figura 32** presenta la comparación de los datos de generación y demanda de potencia máxima alrededor del punto crítico, siendo éste el de mayor deficiencia de energía; este punto crítico se encuentra ubicado en la hora 5081 del año, correspondiente al día 212, perteneciente al mes de julio y cuyo valor es de 4.7 kW.

Figura 32
Comparación de potencia máxima para la temporada de lluvia



Los datos correspondientes al perfil de demanda de potencia promedio, máxima y energía eléctrica para la temporada de lluvia mantienen un dominio anual, siendo en estos en particular la escala (horaria y diaria respectivamente), el **Apéndice F** muestra la totalidad de los datos mencionados anteriormente. El **Apéndice H** contempla los datos de generación de potencia y energía eléctrica optimizada para la temporada de lluvia (manteniendo las características de escala y dominio correspondientes a la demanda); todo esto con el fin de que los datos en cuestión mantengan escalas y dominios consecuentes y así poder realizar la adecuada comparación y posterior dimensionamiento para la temporada de lluvia mostrado en el **Apéndice J**.

A partir del análisis de las gráficas anteriormente expuestas se identificó que a pesar de haber realizado un proceso de gestión de demanda en el cual se regula el consumo de carga, los puntos críticos de demanda se encuentran ubicados en la temporada seca; por lo tanto el dimensionamiento se realizará con base en dicha temporada, descartando los datos concernientes a la temporada lluviosa al ser de menor deficiencia energética y por ende encontrarse acogida por el sustento energético propuesto para la temporada seca.

Como se mencionó en el epígrafe **2.1**, todo sistema de potencia requiere, en esencia, la existencia de un barraje principal (barra slack), el cual tenga la capacidad de suplir los cambios abruptos de carga que presente el sistema y de esa manera regular los parámetros principales que atañen al funcionamiento adecuado de la microrred (tensión y frecuencia). Teniendo en cuenta que el sistema de generación de energía propuesto no tiene la capacidad suficiente para asumir la demanda en instantes específicos del día, es necesario un sistema que realice un traslado temporal de energía, de los puntos con superávit a los que presenten deficiencia y así asuma dicha característica (en las microrredes normalmente se utiliza como fuentes de apoyo: bancos de baterías, grupos electrógenos y celdas de combustible).

Para dimensionar la barra slack es necesario dimensionar el sistema de suministro que va a solventar los cambios energéticos abruptos en el sistema; este sistema de suministro corresponde al sistema de almacenamiento, el cual se dimensiona con el criterio mencionado en la sección **2.1**, el cual consiste en que dicho sistema debe tener la capacidad de suministrar la máxima deficiencia de potencia, incluido un factor de seguridad del 40%. Se considera que dicho sistema debe tener la capacidad de suministrar la máxima deficiencia de potencia durante al menos 3 horas, de manera que garantice un buen nivel de confiabilidad al sistema; adicionalmente se debe tener en cuenta el porcentaje de descarga al cual se puede permitir que llegue el banco de baterías, factor que influye

decisivamente en la vida útil de las mismas, que para el caso se considera en 80%. El cálculo del sistema de almacenamiento se realiza con base en la presentada en la sección **2.1**, siendo 33.81 kWh la energía necesaria a suplir por el sistema de acumulación y cullo dimensionamiento en detalle se presenta en la sección **3.3** del presente documento.

Es importante tener en cuenta que el sistema posee múltiples fuentes de generación y por ende no se requiere plantear un tiempo de autonomía prolongado, puesto que sólo en caso de contingencia no se podrá satisfacer la demanda de energía. Un tiempo de deficiencia de energía mayor al especificado anteriormente se considerará como contingencia, siendo necesario para solventar esta condición la entrada en operación del grupo electrógeno.

2.2 Caracterización de la microrred

El concepto de microrred se puede definir como un conjunto de cargas interconectadas y a su vez, conectadas con fuentes de generación distribuidas. Funciona como una entidad única y además controlable que puede producir energía (*IEEE Standard for the Specification of Microgrid Controllers*, 2020); adicionalmente, presenta dos modos de operación, conectada a la red o en isla, por lo tanto, debe cumplir con las necesidades locales de confiabilidad y seguridad (Perea et al., 2008).

Se definen niveles de operación para clasificar los diferentes sistemas alternativos para la generación de energía eléctrica, los cuales se muestran en la **Tabla 13**. Se establece que las microrredes por lo general utilizan fuentes energéticas renovables que se adaptan a los recursos existentes en el lugar de implementación y además de ellos, utilizan grupos electrógenos como apoyo para trabajar en insuficiencia de los recursos renovables o en casos de emergencias (de Alaminos et al., 2014).

Tabla 13.
Caracterización de sistemas de generación no convencionales.

POTENCIA DEL SISTEMA	DENOMINACION	GENERACION	CARACTERISTICAS
Hasta 0,5 kW	Sistemas autonomos individuales	Fotovoltaica	Distribucion en CC o CC+CA en vivienda
0,5 hasta 10 Kw	Sistemas autonomos individuales	Fotovoltaica	Normalmente distribucion en CA en vivienda
10 hasta 100 Kw	Sistemas centralizados - MICRORREDES	Fotovoltaica Grupo	Distribucion en CA a grupo de consumidores.
		Aerogenerador	Generacion centralizada
100 kW en adelante	MINIRREDES	Las anteriores mas otras fuentes energeticas	Distribucion en CA a grupo de consumidores. Generacion descentralizada

Nota. Tomado de Estudio sobre las Microrredes y su aplicación a proyectos de electrificación de zonas rurales aisladas

Finalmente se establece una serie de condiciones para denominar un subsistema de energía eléctrica como microrred, las cuales son: poseer fuentes de generación o almacenamiento de energía eléctrica cerca de las cargas, características de control y gestión de la energía generada localmente y la posibilidad de funcionar en modo conectado o desconectado de la red.

A partir de una adecuada caracterización de los parámetros existentes para el caso de estudio (demanda y potencial energético), se hace necesario definir cómo el uso de los recursos encontrados se puede consolidar para dar forma al sistema (microrred), garantizando así una operación organizada, flexible y confiable, de tal manera que se pueda solventar la necesidad energética inicialmente encontrada; para tal fin, es preciso establecer el tipo de microrred que se va a adoptar, establecer la forma adecuada de interconectar cada uno de los componentes o subsistemas que la conforman y a su vez el papel que estos juegan dentro de la misma, secuencia que converge en el planteamiento de la topología que tendrá la microrred.

Entendiendo que el caso de estudio se encuentra ubicado aproximadamente a 3 km del sistema interconectado nacional se hace necesario establecer el modo aislado como el único posible; dicha configuración está conformada por un sistema de potencia trifásico operando a tensión 220 V

(tensión de línea) en AC, puesto que todas las cargas que hacen parte del diseño de la microrred son de este tipo, y las fuentes de generación distribuida que operan en DC, presentan facilidad para ser convertidas.

2.2.1 Componentes de la microrred. Para determinar los componentes de la microrred fue necesario hacer un análisis del estado actual del caso de estudio, de manera tal que se puedan aprovechar todos los recursos existentes (grupo electrógeno e instalaciones de uso final) para ser integrados a la microrred; a su vez se tuvo en cuenta las necesidades de abastecimiento de energía, las posibles fuentes que pudieran suplirla y los sistemas que garantizan una adecuada operación de la microrred. A partir de las observaciones anteriores, se determinaron los componentes de la microrred a diseñar para el caso de estudio, los cuales se presentan en la **Figura 33**.

Figura 33
Componentes de la microrred



2.2.2 Control de la microrred Es necesario un control adecuado de la microrred para que opere de manera estable y económica. Las estructuras de control de microrred están diseñadas según los requisitos y especificaciones del sistema, los cuales son (Manna & Goswami, 2017):

- Regulación de tensión y frecuencia.
- Coordinación adecuada entre carga y generación.

- Optimización del costo operativo de la microrred.

Las microrredes requieren un esquema de control fuerte que tenga una estructura jerárquica, la cual aborda un requisito de control en una jerarquía diferente. Consta de nivel primario, secundario y terciario.

La estabilidad de voltaje y frecuencia de la microrred se realiza a partir del control primario en el modo isla. En el modo de funcionamiento en isla de la microrred, es esencial proporcionar una distribución de energía adecuada entre cargas y generación.

La desviación de voltaje y frecuencia generada por la operación de los controles primarios se compensa con el control secundario. El control terciario gestiona el flujo de energía entre la microrred y la red principal y asegura un funcionamiento óptimo y estable del sistema. A continuación, se describen el control primario y secundario, teniendo en cuenta que el caso de estudio está enfocado una microrred en isla.

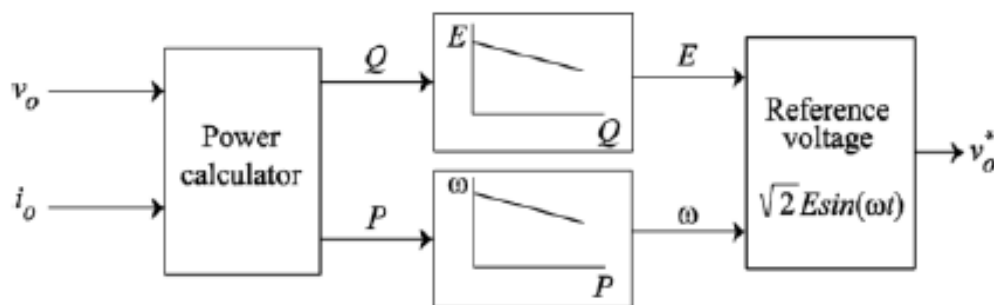
2.2.2.1 Control primario. El objetivo del diseño del control primario es satisfacer algunos de los requisitos enumerados a continuación:

- Estabilizar la tensión y frecuencia de la microrred. Durante el modo de funcionamiento en isla, la microrred puede perder su estabilidad tanto de voltaje y frecuencia si se produce un cambio brusco entre la carga y la potencia generada.
- Monitorear la conexión y desconexión tanto de las cargas como de los recursos de generación de energía eléctrica.
- Aliviar corrientes circulantes sobre los dispositivos electrónicos para evitar

El control primario generalmente se implementa en los modos PQ o control de voltaje. En el modo de control PQ, la entrega de potencia activa y reactiva se regula en un punto de referencia determinado.

En el modo de control de voltaje, el recurso energético funciona como un VSC controlado por voltaje, donde el voltaje de referencia se determina mediante las características de caída, como se muestra en la **Figura 34**.

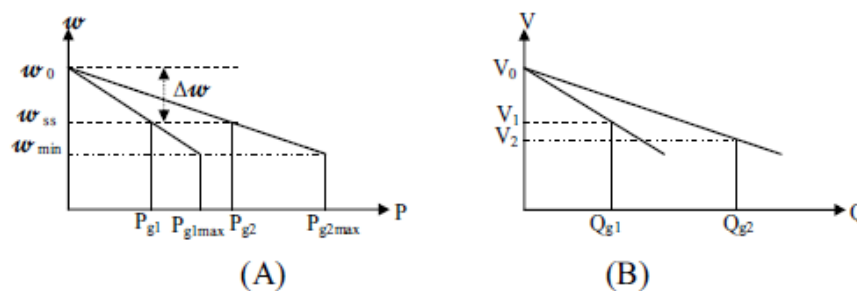
Figura 34
Referencia de tensión para el modo de control por tensión



Nota. Tomado de *Micro-grid Operation and Control*.

La técnica de control de caída propicia un control independiente, autónomo e inalámbrico. Generalmente se usan dos tipos de métodos de control de caída para el control del modo de voltaje, las características de caída de frecuencia de potencia activa y las características de caída de voltaje de potencia reactiva, ilustradas en la **Figura 35**.

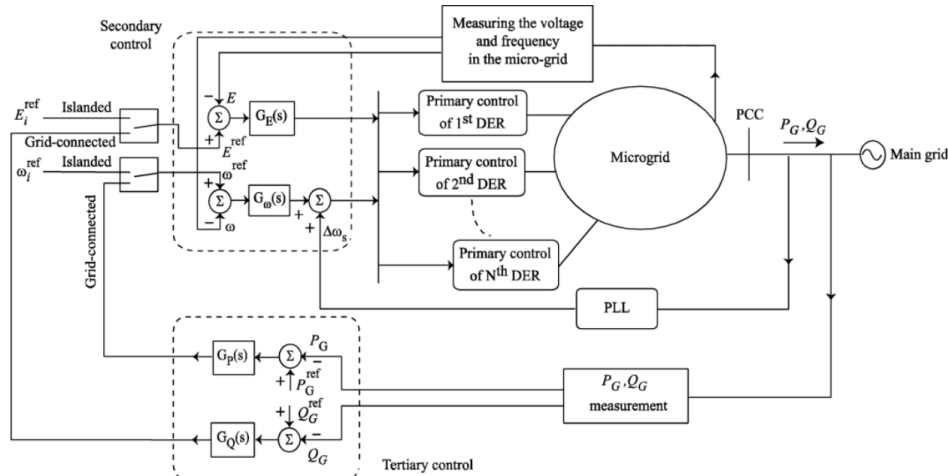
Figura 35
Característica P-f y Q-V.



Nota. Tomado de *Micro-grid Operation and Control*.

2.2.2.2 Control secundario. El control secundario se realiza con base en un controlador centralizado que puede restaurar el voltaje y la frecuencia de la microrred, además de compensar las desviaciones causadas por el control primario. La **Figura 36** presenta el diagrama de bloques del control secundario.

Figura 36
Diagrama de bloques control secundario microrred



Nota. Tomado de Micro-grid Operation and Control.

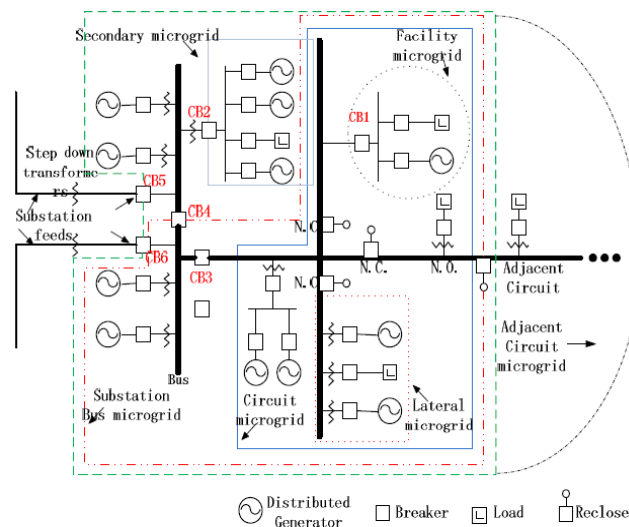
2.2.3 Selección de la topología de la microrred. Para definir una topología para una microrred es necesario tener en cuenta factores tan importantes como las características del terreno, el área disponible, la distribución y magnitud de las cargas; de igual forma se debe considerar la ubicación y distribución de los equipos de generación, configuración y trazado de la red de distribución, longitudes de los circuitos ramales, niveles de tensión, calibre de conductores y toda la información que sea precisa para construir un diagrama unifilar de la red para consecuentemente, modelarla y simularla (Garzón Hidalgo & Saavedra Montes, 2017).

La topología de red eléctrica de una microrred puede ser una red de corriente continua, una red de corriente alterna, una combinación de las mismas o incluso una red de corriente alterna de alta frecuencia. El sistema puede ser monofásico o trifásico y puede conectarse en nivel de baja o media tensión a la red eléctrica general (Pérez Fernández, 2017).

Se plantea un grupo de topologías típicas para microrredes híbridas AC-DC, las cuales se plantean a continuación (Jia et al., 2015).

De acuerdo con los parámetros inicialmente definidos para la microrred, esta se define como: microrred a nivel de sistema, microrred comercial e industrial y microrred rural. La **Figura 37** es una estructura de microrred (*IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems*, s. f.), proporcionada por IEEE1547.4-2011.

Figura 37
Estructura estándar microrred AC

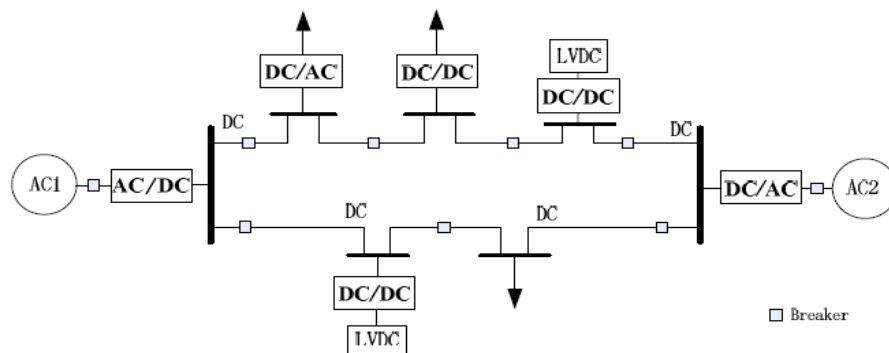


Nota. Tomada del estándar IEEE1547.4-2011.

A su vez, en la actualidad es necesario cumplir con los diferentes requisitos de calidad de la electricidad; por lo tanto, existen varias estructuras de red de CC típicas en los últimos años, como el tipo de anillo, el tipo de radial, el tipo de alimentador, entre otras.

La estructura tipo anillo presenta una serie de conexiones que configuran un barraje central en CC; por tal razón, la generación distribuida y las cargas de CA deben acceder a él mediante un convertidor electrónico de potencia. Esta topología se muestra en la **Figura 38**.

Figura 38
Estructura tipo anillo



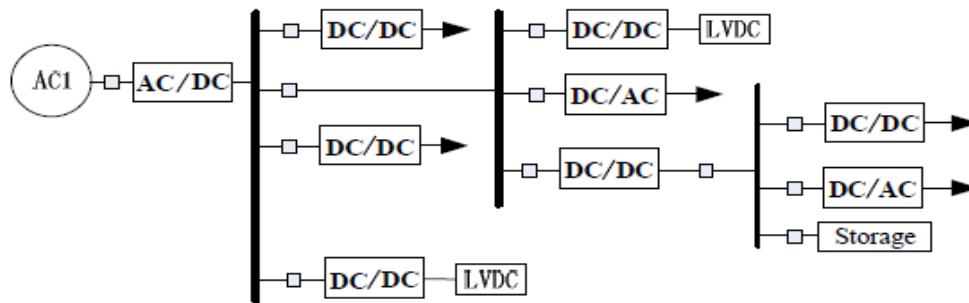
Nota. Tomada de Architecture Design for New AC-DC Hybrid Micro-grid.

La arquitectura tipo anillo presenta un alto nivel de confiabilidad puesto que los barrajes que contienen cada uno de los elementos se encuentran conectados a la misma en dos partes diferentes; este tipo de configuración se utiliza en sistemas de alta complejidad, en los cuales es un requisito principal tener suministro continuo, teniendo en cuenta que representa un alto costo.

Por otra parte, la estructura de CC radial, la cual se muestra en la **Figura 39**, está conectada a la red de distribución mediante un convertidor electrónico de potencia bidireccional, mientras que la generación distribuida y las cargas están conectadas a un bus de CC ya sea directa o indirectamente. Adicionalmente presenta barrajes de CC con diferentes niveles de tensión; este tipo de configuración presenta una confiabilidad moderada, puesto que gran parte del sistema

puede quedar sin suministro energético tan sólo con la avería de un dispositivo; sin embargo, tiene una gran facilidad en el diseño del sistema de protección y detección de fallas.

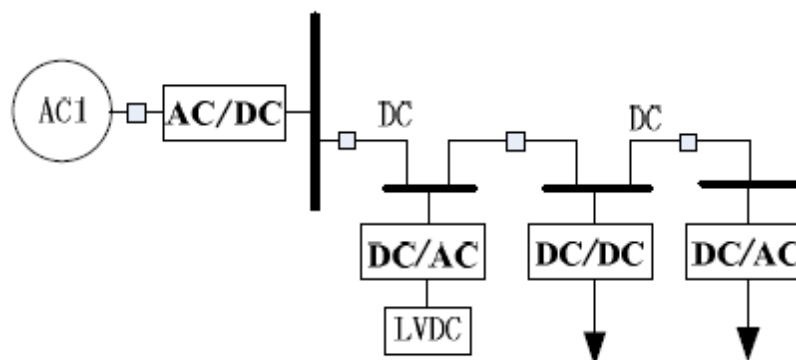
Figura 39
Estructura tipo radial



Nota. Tomado de *Architecture Design for New AC-DC Hybrid Micro-grid*.

Por último, en la **Figura 40** se presenta la estructura de tipo alimentador; ésta tiene una configuración similar a la estructura tipo anillo, pero sólo se puede conectar a la red de distribución a través de un solo convertidor bidireccional. Todo lo mencionado implica que presente un bajo nivel de confiabilidad; por el contrario, presenta ventajas en cuanto a su simplicidad de diseño, sistema de control, de proyecciones y detección de fallas. Se utiliza generalmente en zonas rurales aisladas.

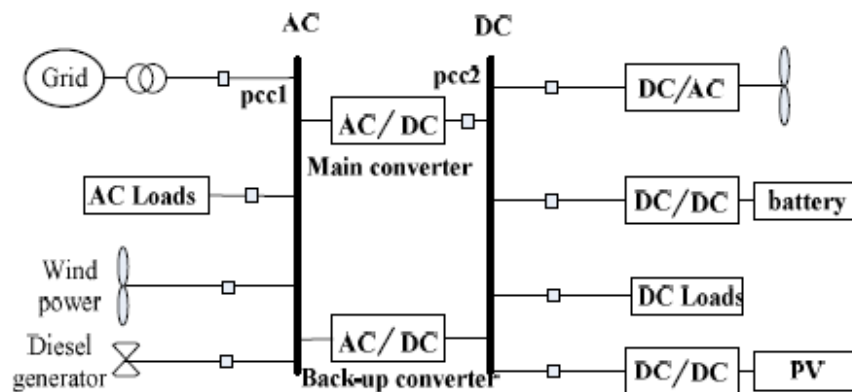
Figura 40
Estructura tipo alimentador



Nota. Tomado de *Architecture Design for New AC-DC Hybrid Micro-grid*.

Alternativamente, en la **Figura 41** se presenta una topología más moderna para las microrredes híbridas AC-DC; este tipo de estructura se compone de dos partes, un barraje en AC que alimenta las cargas AC y la misma fuente de alimentación y otro en DC que tiene las fuentes de alimentación en DC y cargas del mismo tipo, los cuales se interconectan mediante un convertidor bidireccional; esta configuración puede estar conectada a la red de distribución a través del barraje de AC mediante un transformador.

Figura 41
Estructura 1 microrred híbrida



Nota. Tomado de (Architecture Design for New AC-DC Hybrid Micro-grid)

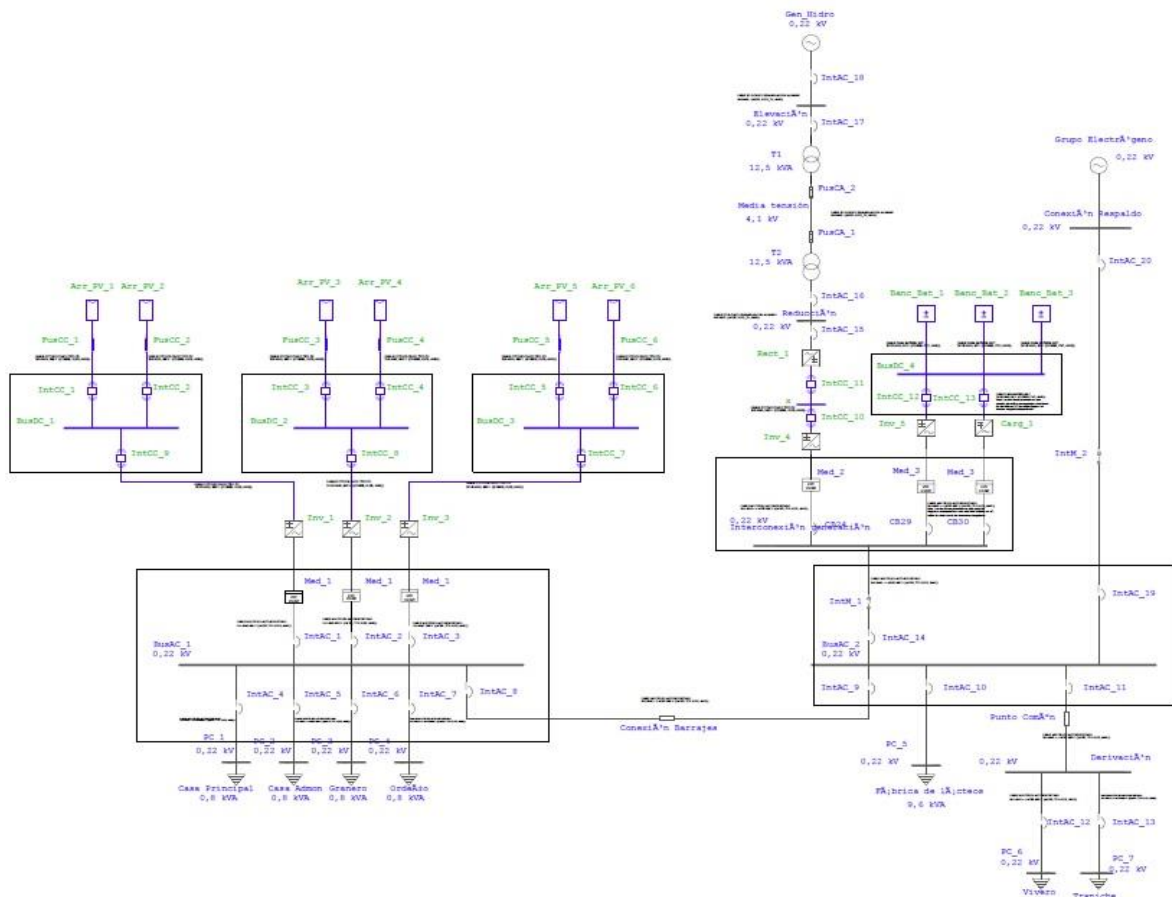
Una vez identificados los puntos geográficos donde están ubicados cada uno de los componentes de la microrred se procede a proponer la configuración topológica más adecuada que permita interconectarlos. A continuación, se realizará una descripción más detallada de la topología, acompañada de un esquema que la ilustre claramente. La topología de la microrred está compuesta por dos barrajes en AC interconectados, a uno de ellos estarán conectados el sistema de respaldo, el sistema de generación distribuida 1 correspondiente al sistema de generación hidroeléctrica, las cargas más cercanas al barraje siendo estas las más representativas del sistema y el sistema de acumulación, el cual le proporciona la característica de barra slack al darle la posibilidad de entregar potencia para sostener los parámetros de tensión y frecuencia previamente establecidos. El segundo barraje está compuesto por el sistema de generación distribuida 2

correspondiente al sistema de generación fotovoltaico, además de las cargas en AC restantes (ordeño, granero, casa principal y casa de administración).

En la **Figura 42** se muestra el diagrama unifilar de la microrred, en el cual es posible identificar la topología correspondiente a la descripción anteriormente mencionada.

Figura 42

Diagrama unifilar microrred "LA BUFALERA"



3. Diseño del sistema de generación

Los sistemas de generación distribuida que pueden hacer parte de una microrred son generalmente fuentes de energía renovable tales como: solar fotovoltaica, eólica, micro y pequeñas centrales hidroeléctricas, biomasa, celdas de combustible, esquemas de cogeneración, entre otros (López & Barrios, 2012). Es de saber que la implementación de dichos sistemas depende del

potencial de generación de cada una de estas en el punto de ubicación de la microrred y sus cercanías. En este proyecto se profundizará sólo en micro y pequeñas centrales hidroeléctricas, solar fotovoltaica y biomasa.

Como se estableció en el capítulo anterior, el sistema de generación propuesto está conformado tanto por generación hidroeléctrica como por fotovoltaica, así como por un sistema de acumulación como complemento. La generación hidroeléctrica se compone de un hidrotornillo, la fotovoltaica de paneles solares y el sistema de acumulación por baterías. El presente capítulo busca establecer los parámetros constructivos de los mismos, así como los valores de referencia para la selección de equipos.

3.1 Diseño del sistema de generación hidroeléctrico

El proceso de generación de energía eléctrica a través del recurso hídrico consiste en que la energía cinética del agua se convierte en energía mecánica en el eje de una turbina. La energía mecánica es transferida a un generador eléctrico que, para mantener las condiciones de calidad exigidos al producto eléctrico, debe rotar a velocidad constante; además de los elementos anteriormente mencionados, para producir esta transferencia de energía es necesario agregar dispositivos de conversión de velocidad de rotación entre el eje de la turbina y el del generador, y un sistema de regulación para adaptar la potencia hidráulica que se entrega con la potencia eléctrica que se demanda (Pérez Fernández, 2017).

Las centrales hidroeléctricas se pueden clasificar por su forma de operación y por su tamaño; por su operación se clasifican en: centrales de agua fluyente, centrales con embalse o de regulación y central de acumulación por bombeo. Por su tamaño, las centrales hidroeléctricas se clasifican en: picocentrales, microcentrales, minicentrales, pequeñas centrales y centrales.

Las centrales de agua fluyente consisten en emplear la energía hidráulica en el instante que se dispone de ella para accionar turbinas y no cuentan con posibilidad de reserva de energía. La central con embalse o de regulación se basa en embalsar una gran cantidad de volúmenes de agua mediante la construcción de represas, brindando así la posibilidad de regular el agua que pasa por las turbinas y así almacenar energía. Finalmente, las centrales de acumulación por bombeo consisten en la construcción de dos embalses situados a un nivel diferente, así cuando existe gran cantidad de demanda se utiliza el agua del embalse del nivel superior para generar energía, depositándose luego de dicho proceso en el embalse inferior y cuando se presenta baja demanda, el agua del embalse del nivel inferior es bombeada al de nivel superior para ser reutilizada en el proceso de generación de energía eléctrica.

Las picocentrales se caracterizan por tener una capacidad instalada entre 0.5 y 5 kW, las microcentrales entre 5 y 50 kW, las minicentrales entre 50 y 500 kW, aplicable a zonas no interconectadas o casos aislados de zonas interconectadas; por su parte, las pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) cuentan con una capacidad instalada entre 500 y 20.000 kW y las centrales hidroeléctricas (CH) con una mayor a 20 MW. Las PCH se utilizan en zonas interconectadas y no interconectadas con la posibilidad de participar en el despacho eléctrico sólo si poseen una capacidad instalada superior a 10 MW mientras que las CH se encuentran obligadas a participar en el despacho eléctrico (*Atlas Climatológico, Radiación y viento.*, 2018).

Es importante resaltar que la fuente hídrica de la que se dispone en el caso de estudio es utilizada para tanto para riego como para el proyecto Ecobúfalo, además, es un aspecto preponderante en el proyecto garantizar el menor impacto ambiental posible; por tal razón no existe la posibilidad de realizar represamientos de agua; en tal virtud, se concluye que la central a utilizar debe ser de agua fluyente y se ahonda en el estudio de dichas centrales.

Las turbinas utilizadas comúnmente para centrales de agua fluyente que además cumple con la condición de tener un bajo impacto ambiental son: waterwheel undershot, overshot y breastshot (rueda hidráulica de paso bajo, medio o alto) y hydro screw (hidrotornillo).

Debido a las características particulares encontradas en el afluente, salto y caudal, se identifica el hidrotornillo como la opción más adecuada para ser parte del sistema de generación hidroeléctrico debido a su alta eficiencia ante las características que el caso de estudio presenta; por ende, se profundiza en el estudio de los principales parámetros constructivos y de conversión de energía para dicha alternativa.

El sistema de generación hidroeléctrico está basado en una central de agua fluyente, compuesta por un hidrotornillo (tornillo de Arquímedes) como turbina; este tipo de centrales no requieren de un caudal vital, puesto que como se especificó anteriormente, no precisan de represamientos ni desvíos del cauce de la fuente hídrica; por tal razón, a los valores presentados en la **Figura 10** se les adicionó el caudal vital del potencial energético.

Por otra parte, para determinar el caudal de diseño se tuvo en cuenta en principio evitar tener pérdidas de caudal por sobreflujo, las cuales ocurren después del 120% del caudal de diseño, razón por la cual, se toma el mayor valor de caudal obtenido en el año como el caudal máximo que representa el 120% del caudal de diseño; por tanto, para determinar el valor del caudal de diseño se aplica una regla de tres simple, representada por la siguiente ecuación.

$$Q_{dis} = \frac{Q_{m\acute{a}x} * 100\%}{120\%}$$

Donde:

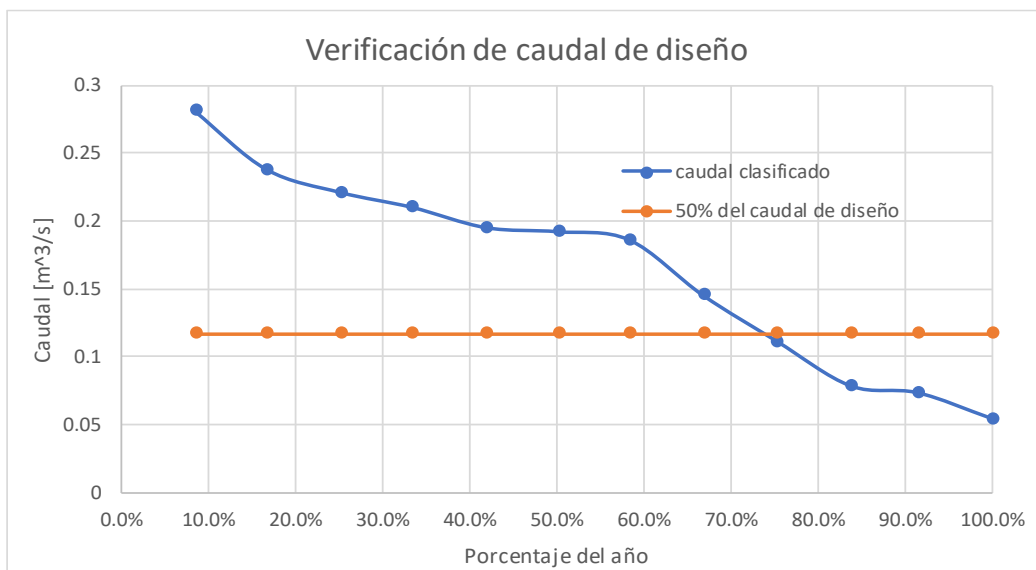
Q_{dis} : *Caudal de diseño*

$Q_{m\acute{a}x}$: *Máximo valor de caudal mensual obtenido en un año*

$$Q_{dis} = \frac{0.281 * 100\%}{120\%} = 0.2342 \frac{m^3}{s}$$

Una vez determinado el caudal de diseño se procede a realizar un proceso de verificación de su pertinencia; para ello, se tuvo en cuenta que la turbina seleccionada (hidrotornillo) presenta eficiencias superiores al 80% para caudales iguales o superiores al 50% del caudal nominal o de diseño. En ese sentido, en la **Figura 43** se evidencia que el caudal presente en más del 75% de los días del año es superior al 50% del caudal de diseño, por ende, en toda esta temporada la turbina mantiene rendimientos superiores al 80%, un caudal de diseño menor generaría una disminución porcentual considerable en la eficiencia de la turbina y uno mayor, la aparición de pérdidas de caudal por desbordamiento.

Figura 43
Verificación del caudal de diseño



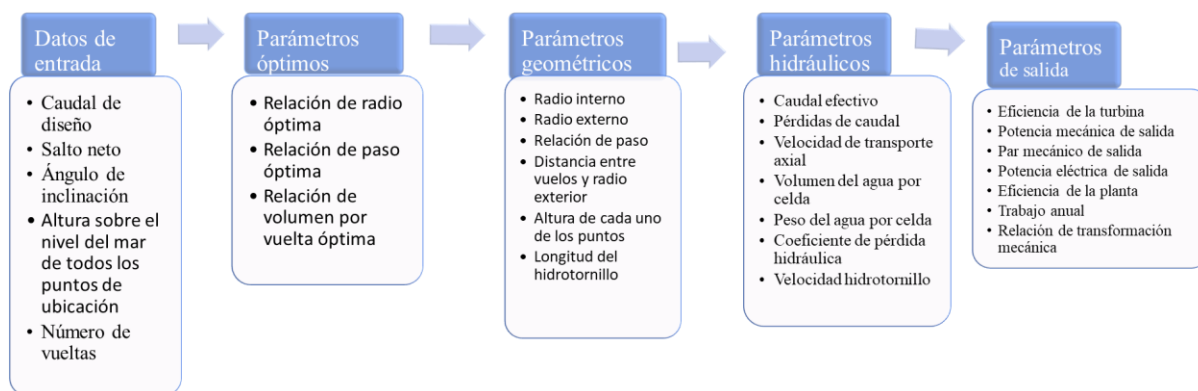
Una vez determinado el caudal de diseño y obtenido el salto como las variables principales de entrada, se procede a determinar los parámetros constructivos del sistema de generación hidroeléctrico conformado por: turbina, generador, controlador, inversor y su correspondiente

instalación eléctrica. El diagrama unifilar del sistema de generación hidroeléctrico se presenta en la **Figura 42**, junto con los demás componentes de la microrred.

Es importante entender que todo recurso hídrico natural disponible presenta gran intermitencia en su caudal, siendo este dependiente de la variación en las precipitaciones presentes en el año; en ese sentido, la configuración que se adopta en el caso de estudio para la transformación de dicho potencial energético en energía eléctrica corresponde a una de velocidad variable tal como se especificará en la selección del generador; por tal razón, se hace necesaria la transformación de la energía eléctrica generada en AC a DC por medio del controlador y posteriormente convertida de nuevo en AC por medio de un inversor. Este sistema en conjunto realiza la tarea de estabilizar parámetros para suministrar la energía generada de manera adecuada al barraje de generación de la microrred.

3.1.1 Diseño de la turbina El proceso de diseño de la turbina se esquematiza en la **Figura 44**.

Figura 44
Proceso de diseño de la turbina de Arquímedes



Para modelar el hidrotornillo, se presenta una serie de pasos que se listan a continuación (Nuernbergk, 2012):

- Determinación de flujo y altura de caída.

La cabeza bruta es:

El margen bruto puede desviarse de la diferencia de nivel de agua para sistemas con una altura geodésica baja H . Por lo general, se permite contar solo con H en lugar de H_{Bruto} . Luego configura el flujo de diseño Q_{ent} (por ejemplo, expansión 100 días). El caudal debe indicarse en $\frac{m^3}{s}$. Medición de los niveles de agua superior e inferior para diferentes salidas.

- Determinación del número de vueltas N y la inclinación del tornillo β .

El número de vueltas y la inclinación hacia la horizontal determina la eficiencia del tornillo hidrodinámico y la capacidad de tragar. Para sitios con poca altura y alto flujo, use una pequeña pendiente β . Por el contrario, se usa una pendiente alta cuando el flujo es bajo y la pendiente es alta. Una inclinación más fuerte acorta el tornillo con cuchilla y aumenta la eficiencia. De los cálculos de optimización para $(\lambda \cdot v \cdot \eta_{WKS})^2$, encontrados en **Tabla 14** y como resultado de un proceso iterativo, se deduce que se obtienen relaciones favorables para varias vueltas de $N=3$ y una inclinación de $\beta= 26^\circ$ (el flujo y la eficiencia son altos).

Tabla 14.
 Datos óptimos de parámetros constructivos del hidrotornillo

Number of blades N	Optimal radius ratio ρ^*	Optimal pitch ratio λ^*	Optimal volume-per-turn ratio $\lambda^*v(N, \rho^*, \lambda^*)$	Optimal volume ratio $v(N, \rho^*, \lambda^*)$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
1	0.5358	0.1285	0.0361	0.2811
2	0.5369	0.1863	0.0512	0.2747
3	0.5357	0.2217	0.0598	0.2697
4	0.5353	0.2456	0.0655	0.2667
5	0.5352	0.2630	0.0696	0.2647
6	0.5353	0.2763	0.0727	0.2631
7	0.5354	0.2869	0.0752	0.2619
8	0.5354	0.2957	0.0771	0.2609
9	0.5356	0.3029	0.0788	0.2601
10	0.5356	0.3092	0.0802	0.2592
11	0.5358	0.3145	0.0813	0.2586
12	0.5360	0.3193	0.0824	0.2580
13	0.5360	0.3234	0.0833	0.2574
14	0.5360	0.3270	0.0841	0.2571
15	0.5364	0.3303	0.0848	0.2567
16	0.5362	0.3333	0.0854	0.2562
17	0.5362	0.3364	0.0860	0.2556
18	0.5368	0.3380	0.0865	0.2559
19	0.5364	0.3404	0.0870	0.2555
20	0.5365	0.3426	0.0874	0.2551
21	0.5370	0.3440	0.0878	0.2553
22	0.5365	0.3465	0.0882	0.2544
23	0.5369	0.3481	0.0885	0.2543
24	0.5367	0.3500	0.0888	0.2538
25	0.5371	0.3507	0.0891	0.2542
.
.
.
∞	0.5394	0.3953	0.0977	0.2471

Nota. Adaptado de the turn of the screw: optimal design of an archimedes screw

- Determinación del radio interno y externo R_i , R_a .

Un fabricante entrega el tornillo hidrodinámico y todas las dimensiones son fijas. El caracol es entonces solo para ser recalculado. O diseña el tornillo en sí, de modo que una primera aproximación para el radio exterior es:

$$R_a = \left(\frac{Q_t \cdot \tan \beta}{K_1 \cdot (\lambda \cdot v)} \right)^{3/7} m$$

$$K_1 = \frac{(10, \dots, 11.2) \cdot \pi^2}{6 \cdot 4^{1/3}} = 10.362, \dots, 11.606 \frac{m^{2/3}}{s}$$

para determinar Los valores para $(\lambda \cdot v)^3$ se toman de los cálculos de optimización de la **Tabla 14** para los valores de ϱ_R y λ del valor seleccionado de $(\lambda \cdot v \cdot \eta_{WKS})$. Elegir K_1 te da un margen de maniobra. Del mismo modo, se obtiene el valor de ϱ_R a partir de las ilustraciones. El radio interno viene dado por:

$$R_i = \varrho_R \cdot R_a$$

Si no se encuentra un tubo central adecuado con el radio R_i de la **Tabla 15**, se elige el siguiente radio más grande R_i y se ajusta el radio exterior $R_a = \frac{R_i}{\varrho_R}$. De este modo, se asegura que el flujo Q esté garantizado para cualquier caso. El tubo central determina la estabilidad de la construcción (flacidez, transmisión de par). Importante aquí es un dimensionamiento suficiente del grosor de la pared.

Tabla 15.
Diámetros típicos de tubos centrales y diámetros externos asociados

Nr.	Di	Da	Nr.	Di	Da	Nr.	Di	Da
	[m]	[m]		[m]	[m]		[m]	[m]
1	0,219	0,416	11	1,22	2,259	21	2,22	4,111
2	0,273	0,506	12	1,32	2,444	22	2,32	4,296
3	0,324	0,6	13	1,42	2,63	23	2,42	4,481
4	0,406	0,752	14	1,52	2,815	24	2,52	4,667
5	0,508	0,941	15	1,62	3	25	2,62	4,852
6	0,61	1,13	16	1,72	3,185	-	-	-
7	0,711	1,317	17	1,82	3,37	-	-	-
8	0,813	1,506	18	1,92	3,556	-	-	-
9	0,914	1,693	19	2,02	3,741	-	-	-
10	1,016	1,881	20	2,12	3,926	-	-	-

Nota. Adaptado de Entwurfsfluss für Wasserkraftschnecken

- Determinación del paso S.

El paso se determina a partir de la relación de paso λ :

$$S = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_a \cdot \lambda}{\tan \beta} \text{ m}$$

El valor de λ resulta a su vez de la elección de $(\lambda \cdot v \cdot \eta_{WKS})$. El paso no debe ser demasiado grande, de lo contrario la velocidad de transporte axial en el tornillo sin fin se vuelve demasiado grande. Con la determinación del paso, se determinan todos los parámetros internos del tornillo.

- Determinación de la distancia entre los vuelos y el radio exterior ssp.

La distancia debe ser aproximada:

$$S_{sp} = 0.0045 \cdot \sqrt{2 \cdot R_a} \text{ m}$$

Si se usa un comedero de acero, esta dimensión se debe usar como espaciador para la plancha. Para un comedero de concreto, la enseñanza existente de hierro plano debe implementar esta medida.

- Determinación del caudal efectivo (caudal que genera torque) y las pérdidas de caudal Q_w y Q_g respectivamente:

Las pérdidas de caudal corresponden a las pérdidas de caudal entre el caparazón y los vuelos y las pérdidas por desbordamiento. Las pérdidas por desbordamiento pueden despreciarse para llenados inferiores al 120%. Por lo tanto, las pérdidas de caudal corresponden a la siguiente ecuación (Lubitz et al., 2014):

$$Q_g = 2.5 \cdot S_{sp} \cdot (2 \cdot R_a)^{3/2} \frac{m^3}{s}$$

A partir de las pérdidas y el caudal de diseño (caudal total) se determina el caudal útil (caudal que genera torque), mediante la siguiente ecuación:

$$Q_w = Q_t - Q_g \frac{m^3}{s}$$

- Determinar la velocidad del volumen de entrega por revolución V_u .

Primero calcule el volumen entregado por revolución:

$$V_u = \frac{2 \cdot \pi^2 \cdot R_a^3}{\tan \beta} \cdot (\lambda \cdot v)$$

utilizando el valor de $(\lambda \cdot v)$. Entonces ahora puede calcular la velocidad con la siguiente ecuación.

$$n_{WKS} = 60 \cdot \frac{Q_w}{V_u}$$

La velocidad no debe ser mayor que:

$$n_{WKS} \leq \frac{53}{(2 \cdot R_a)^{2/3}}$$

Con el control de velocidad a través de un convertidor de frecuencia, esta es la velocidad máxima permitida a la que también se debe alcanzar la carga completa.

Cuando se opera a velocidad fija o con un generador de cambio de polos, esta velocidad debe usarse para determinar la relación de transmisión.

- Determinación de la velocidad de transporte axial c_{ax} .

La velocidad de transporte axial es:

$$c_{ax} = S \cdot \frac{n}{60} \frac{m}{s}$$

Esta velocidad es importante para todos los procesos en el tornillo y no debe ser demasiado grande.

- Determinación de volumen y masa en una celda V_S .

El volumen en una celda entre dos hojas adyacentes es:

$$V_S = \frac{V_u}{N} m^3$$

Esto da como resultado un peso de agua en cada celda de:

$$m_S = \rho \cdot V_S \text{ kg}$$

Este valor luego se usará para calcular las fuerzas y el diseño de los rodamientos.

- Determinación de la profundidad óptima del agua en el agua superior h_2 o la altura de entrada h_{zu} .

Primero, calcule la relación de volumen normalizado para el punto de llenado óptimo:

$$v_{T,F} = \frac{Q_t}{\mu_R \cdot \pi \cdot R_a^2 \cdot c_{ax}}$$

donde μ_R es el coeficiente de barrera. Posteriormente, la altura de entrada se determinará a partir de κ . El flujo Q_t incluye la corriente activa Q_w y la corriente de fuga Q_g aproximadamente 2.5% a 4.5% de Q_w . Aquí, se hace una distinción entre dos áreas: a) el tubo sólido parcialmente lleno, los resultados de la ecuación:

$$v_T = \frac{\alpha_8}{2 \cdot \pi} - \frac{(1 - \kappa)}{\pi} \cdot \sqrt{1 - (1 - \kappa)^2} \text{ donde } 0 \leq \kappa < (1 - \varrho_R)$$

Y b) el tubo lleno parcialmente lleno con tubo central interno, la ecuación resulta:

$$v_T = \frac{\alpha_8 - \alpha_9 \cdot \varrho_R^2}{2 \cdot \pi} - \frac{(1 - \kappa)}{\pi} \cdot \left[\sqrt{1 - (1 - \kappa)^2} - \sqrt{\varrho_R^2 - (1 - \kappa)^2} \right]$$

donde $(1 - \varrho_R) \leq \kappa < (1 + \varrho_R)$

Los ángulos correspondientes están determinados por las ecuaciones:

$$\alpha_8 = 2 \cdot \cos^{-1}(1 - \kappa) \qquad \alpha_9 = 2 \cdot \cos^{-1}\left(\frac{1 - \kappa}{\varrho_R}\right)$$

Para determinar κ , se usa Newton o un método gráfico. Ventajoso es el procedimiento gráfico, porque entonces uno tiene una idea de cómo afectan las fluctuaciones de la capa freática. Damos valores de $\kappa = 0, 1, 2$ y calcula diferentes valores de v_T . Estos deben compararse con el valor determinado anteriormente $v_{T,F}$ para el punto de llenado óptimo, hasta que se obtenga un valor para κ con el que se pueda lograr el llenado óptimo. La profundidad de agua requerida en el nivel de KSP en el agua superior es la misma para el llenado óptimo con κ conocido:

$$h_2 = R_a \cdot \kappa \cdot \cos \beta \text{ m}$$

Luego, calcule el coeficiente de pérdida hidráulica:

$$\zeta = \left(\frac{v_T \cdot \pi}{2 \cdot \kappa \cdot \cos \beta} - 1 \right)^2$$

- Determinación de la altura del umbral w , la profundidad del agua h_1 y la altura de entrada h_{zu} .

Para un canal hidráulicamente favorable (mayor flujo de salida en una superficie dada, menor fricción), $h_1 = R_a$, ya que se debe seleccionar el ancho del canal $b_1 = 2 \cdot R_a$. La altura del umbral es para dicho canal:

$$w = R_a - h_2 - \frac{1}{2 \cdot g} \cdot \left(\frac{Q_t}{h_2 \cdot b_1} \right)^2 \cdot \left[1 + \zeta - \left(\frac{h_2}{R_a} \right)^2 \right] [m] \text{ donde } h_1 = R_a$$

La altura de entrada resulta en:

$$h_{zu} = R_a - w \quad m$$

Cabe señalar que w no es negativo. De lo contrario, debe cambiar los parámetros del tornillo.

- Determinación del punto SP .

El valor de la altura de entrada h_{zu} se usa para determinar la altitud geodésica del punto SP a una altitud conocida del agua superior:

$$SP = OWS - h_{zu} \quad msnm$$

Si no se conoce la altitud geodésica del nivel de agua superior OWS , establezca el punto SP en el valor cero. El nivel superior del agua es entonces $OWS = h_{zu}$. Esto proporciona un punto de referencia para el sistema de altura. También necesita los siguientes valores de niveles de energía:

$$c_1 = \frac{Q_t}{2 \cdot R_a^2} \frac{m}{s} \qquad H_{E1} = h_1 + \frac{c_1^2}{2 \cdot g}$$

$$c_2 = \frac{Q_t}{2 \cdot R_a \cdot h_2} \frac{m}{s} \qquad H_{E2} = h_2 + w + \frac{c_2^2}{2 \cdot g} \cdot (1 + \zeta)$$

Debe ser $H_{E1} = H_{E2}$. Además, uno puede aproximar las pérdidas computacionales con $c_1 \approx c_0$.

- Determinación de la profundidad submarina óptima h_4 .

El nivel subacuático estandarizado es:

$$= (1 + \varrho_R) \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\varrho_R} \right)^2} - \lambda \cdot \frac{2 \cdot \pi}{N}$$

La profundidad del agua en el agua resulta en:

$$h_4 = R_a \cdot \cos \beta \cdot \tau \quad m$$

El ancho del canal en el submarino debe ser $b_4 = 2 \cdot R_a$. Además, el canal debe diseñarse lo más elíptico posible y, por lo tanto, adaptarse a la salida del tornillo hidrodinámico.

- Determinación del punto TP .

El valor hh_4 se usa para determinar la elevación geodésica del punto TP , que es:

$$UWS = OWS - H \text{ msnm}$$

$$TP = UWS - h_4 \text{ msnm}$$

Si la fundición trasera del canal produce un talón en TP , entonces puede darle al canal una única pendiente.

- Determinación de la longitud del tornillo de paleta.

La longitud del tornillo con cuchilla da como resultado:

$$L_B = \frac{H + R_a \cdot (\tau \cdot \cos \beta - 1) + w}{\sin \beta} \text{ m}$$

La longitud del tubo central está determinada por dos factores. Por un lado, la tubería central apenas debe sobresalir del agua superior (incluso en marea alta); para lograr condiciones de entrada favorables, debería ser posible una conexión directa a la caja de cambios. Por otro lado, el tamaño y la ubicación del rodamiento en el submarino es importante para la longitud.

- Registre el tornillo hidrodinámico.

Ahora se deben determinar los niveles de agua (UWS, OWS) y los rellenos de las celdas. Es mejor trabajar con información de altitud geodésica, ya que tiene una relación con la red de altitud geodésica. Esto concluye la primera parte del proceso de cálculo. La siguiente parte contiene el cálculo de eficiencia del tornillo.

- Determinación de la eficiencia del tornillo η_{WKS} :

Para determinar la eficiencia del hidrotornillo, se procedió a realizar una división entre el caudal efectivo (caudal que genera torque) sobre el caudal total de entrada; este análisis contempla las

pérdidas de caudal producidas entre el caparazón y las cuchillas o vuelos del hidrotornillo. La ecuación para determinar la eficiencia del hidrotornillo es:

$$\eta_{WKS} = \frac{Q_w}{Q_t}$$

- Determinación de la potencia hidráulica P_{th} :

La potencia hidráulica teóricamente disponible es:

$$P_{th} = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \text{ W}$$

- Determinación de la potencia del eje mecánico del tornillo P_{mech} :

La potencia de onda mecánica es entonces:

$$P_{mech,opt} = \eta_{WKS} \cdot P_{th} \text{ W}$$

Dado que el caudal puede superarse en un 120% tan pronto como se excede el nivel de entrada óptimo, el rendimiento mecánico es de alrededor de:

$$P_{mech} = 1.2 \cdot P_{mech,opt} \text{ W}$$

más grande. Esto asegura que la unidad no esté sobrecargada. La tercera parte del flujo de diseño incluye los componentes de la planta.

- Selección del funcionamiento del sistema:

Los siguientes conceptos de funcionamiento se utilizan para plantas hidroeléctricas con tornillos Archimedean:

a) Funcionamiento resistente a la velocidad: solo el reductor, que consiste en un bloque del reductor con engranajes rectos y una transmisión por correa, el embrague y el generador deben dimensionarse.

b) Operación estable a la velocidad con dos velocidades por un generador de cambio de polos. El diseño se lleva a cabo como se indica en a), pero para dos o tres velocidades.

c) Operación de velocidad variable con convertidor de frecuencia. El diseño del convertidor debe realizarse teniendo en cuenta los datos del convertidor de frecuencia. Puedes prescindir de la transmisión por correa.

El funcionamiento del sistema a) se usa si hay un nivel de agua superior particularmente uniforme. Por ejemplo, si un sistema de turbina controla indirectamente el nivel del agua. El funcionamiento del sistema b) se usa cuando se busca una solución de bajo costo para un nivel superior de agua variable. Evita la pérdida del convertidor de frecuencia. El concepto de funcionamiento c) debe aplicarse cuando se trata de corregir bien el nivel superior del agua y lograr una muy buena resistencia a la carga parcial.

- Cálculo del par del tornillo M:

El par requerido por el tubo central es:

$$M = \frac{P_{mech}}{\omega} = \frac{P_{mech} \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot n}$$

El par permanece relativamente constante para diferentes caudales cuando el llenado de las celdas se mantiene casi constante. Este par se debe utilizar para dimensionar la caja de engranajes, el acoplamiento y el tubo central o los accesorios del eje. Los datos de la caja de cambios se toman del catálogo del fabricante. Se debe proporcionar un acoplamiento para compensar las vibraciones de flexión.

Cabe señalar que, debido a su propio peso, el tornillo hidrodinámico tensiona el tubo central al doblarse y que debe tenerse en cuenta un factor de seguridad. Además, la caja de cambios debe estar dispuesta de manera que el brazo de torsión esté sujeto a presión.

- Determinación de energía eléctrica, selección de generador:

Si la eficiencia de transmisión es conocida por la velocidad de operación, use:

$$P_{elek,Gen} = \eta_{Kupp} \cdot \eta_{Getr} \cdot \eta_{RR} \cdot \eta_{Gen} \cdot P_{mech} \quad W$$

Si la especificación del fabricante para la eficiencia de la transmisión se desvía de la velocidad de operación, entonces el par de fricción $M_{R,Getr}$ se calcula a partir de las especificaciones del fabricante y, por lo tanto, la pérdida de potencia y la eficiencia de la velocidad de operación. Como valores aproximados son $\eta_{Kupp} = 0.998$, $\eta_{Getr} = 0.98$ por marcha, $\eta_{RR} = 0.99$ y $\eta_{Gen} = 0.9$ para usar. El generador establece el rendimiento de P_{elek} (potencia eléctrica). Se permite una sobrecarga del 5% del generador, si no se encuentra un valor estándar. Sin embargo, la sobrecarga permanente reduce la vida útil del generador, por lo que tiene sentido seleccionar el siguiente generador más grande en tales casos. En el funcionamiento del convertidor de frecuencia, el generador se elige un poco más grande (consulta con el fabricante del convertidor de frecuencia). La elección del generador se realiza de acuerdo con las listas de productos del fabricante respectivo. Cuando se opera sin transmisión por correa, ajuste $\eta_{RR} = 1$.

- Determinación de la potencia eléctrica del convertidor de frecuencia.

La potencia de entrada eléctrica nominal del convertidor de frecuencia debe ser igual a la potencia eléctrica del generador:

$$P_{elek,FU} = \eta_{FU} \cdot P_{elek,Gen}$$

El rango de frecuencia ajustable del inversor es $f = 0, \dots, 1,05 \cdot \frac{p \cdot n_{syn}}{60}$. En el funcionamiento del inversor del generador, el generador debe tener un enfriamiento forzado (ventilador adicional, que funciona independientemente de la velocidad del generador). Se pueden obtener más datos de la hoja de datos del fabricante. La eficiencia de la planta es entonces:

$$\eta_A = \eta_{Kupp} \cdot \eta_{Getr} \cdot \eta_{RR} \cdot \eta_{Gen} \cdot \eta_{WKS}$$

Para un funcionamiento estable a la velocidad, la potencia de salida corresponde a la potencia del generador $\eta_{FU} = 1$. Cuando se opera sin transmisión por correa, ajuste $\eta_{RR} = 1$.

- Determinación de la relación de transmisión i:

La relación de transmisión está determinada por la velocidad del generador en condiciones de carga completa y la velocidad óptima del tornillo hidrodinámico:

$$i = n_{WKS} : n_{Gen,max}$$

Esta traducción debe ser realizada por la transmisión. La velocidad del generador se calcula en una operación de velocidad estable de la siguiente manera:

$$n = \frac{n_{syn}}{2} \pm \sqrt{\frac{n_{syn}^2}{4} + \frac{60 \cdot P_{th} \cdot \eta_{WKS} \cdot \eta_{Getr} \cdot n_{syn}}{2 \cdot \pi \cdot \frac{2 \cdot M_K}{S_K}}}$$

Para esto, se debe conocer la relación $\frac{2 \cdot M_K}{S_K}$ (información del fabricante). Esto se calcula para la curva característica linealizada de la siguiente manera:

$$\frac{2 \cdot M_K}{S_K} = \frac{M_N}{1 - \frac{\eta_N}{n_{syn}}}$$

Si estos datos M_N y η_N no se conocen para la operación del generador, la información de la velocidad del generador se usa en la operación del motor a la potencia nominal P_N y se calcula $\eta_{N,gen} = 2 \cdot n_{syn} - \eta_{N,mot}$. Luego se obtiene el par nominal M_N del generador con la ecuación:

$$M_N = \frac{P_N}{\frac{2 \cdot \pi \cdot n_{N,gen}}{60}}$$

- Determinación del trabajo anual W:

Si los datos para los desagües se conocen como una línea de duración, se pueden determinar las líneas de duración para la altura de caída y la eficiencia. El trabajo anual resulta de la integral bajo la curva de rendimiento de la energía eléctrica activa P_{elek} . Lo siguiente aplica:

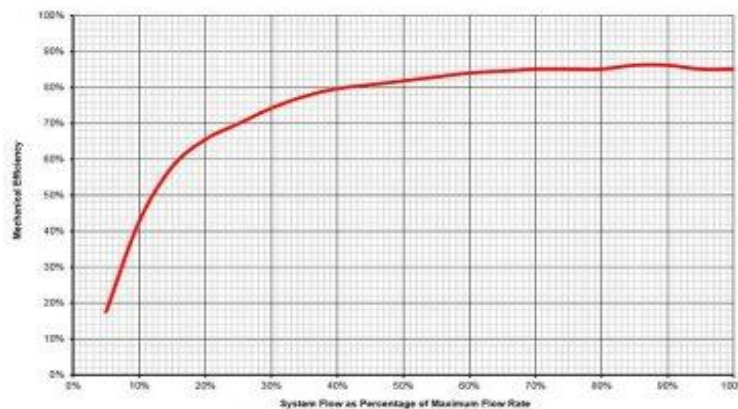
$$W = \int_0^{t=365} P_{N,elek} \cdot dt$$

La determinación se realiza utilizando el método gráfico (contando los cuadrados). El trabajo anual es el punto de partida para calcular la rentabilidad de una planta. Como primera aproximación, se pueden suponer 200 días de carga completa. Se debe realizar un cálculo de costo-beneficio para evitar malas inversiones.

- Eficiencia característica del hidrotornillo.

La **Figura 45** muestra el perfil de operación característico del hidrotornillo mediante una relación entre porcentaje de caudal (respecto al caudal nominal) y eficiencia a la cual el hidrotornillo operaría (*Typical Archimedean Screw Hydro Turbine Efficiency Curve, 2017*).

Figura 45
Eficiencia del hidrotornillo respecto al porcentaje de caudal



Nota. Tomada de página web Renewable First.

El hidrotornillo presenta una alta eficiencia aún en condiciones críticas de caudal manteniendo porcentajes de eficiencia superiores al 80% para caudal igual o superior al 40% del caudal nominal.

Se usan las ecuaciones anteriormente mencionadas para dimensionar la turbina; asimismo, se plantea su modelamiento en (*MATLAB, 2019*), el cual se encuentra en el **Apéndice K**.

Como base del modelamiento se tomaron los valores mostrados en la **Tabla 16** para los parámetros iniciales.

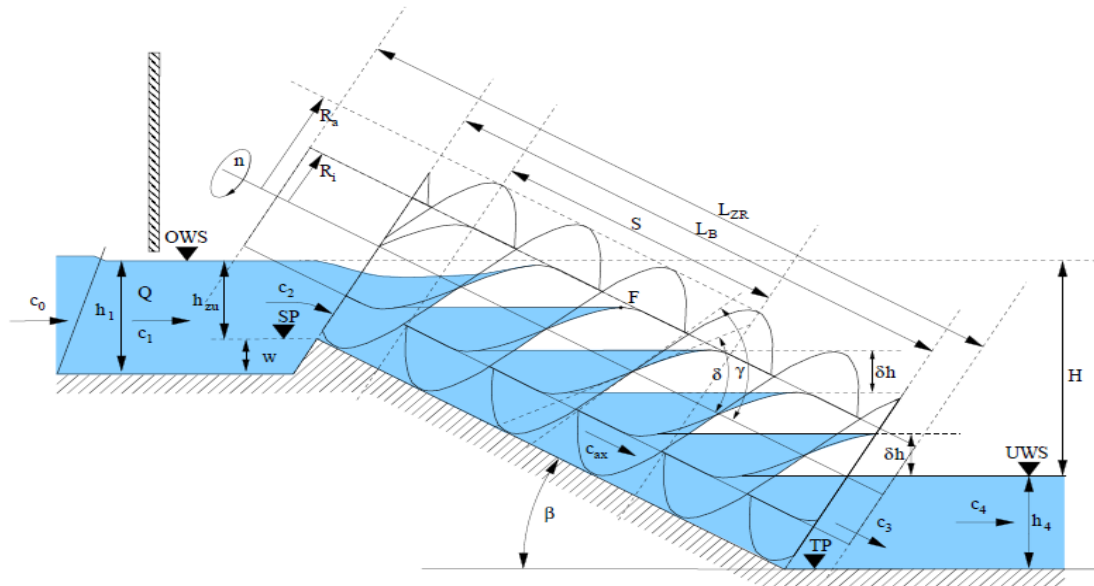
Tabla 16.
Parámetros iniciales diseño turbina de Arquímedes

Parámetro	Variable	Valor
<i>Salto neto</i>	H	3 [m]
<i>Caudal total de diseño</i>	Q_{dis}	$0.2342 \left[\frac{m^3}{s} \right]$
<i>Relación de radio óptimo</i>	R_0	0.5357
<i>Relación de paso óptima</i>	λ	0.2217
<i>Relación de volumen por vuelta óptima</i>	λv	0.0598
<i>Ángulo de inclinación hidrotornillo</i>	β	38°

Los valores óptimos se obtienen de métodos numéricos (Rorres, 2000). Adicionalmente, se ha podido mostrar que el ángulo de inclinación es inversamente proporcional a la eficiencia (Erinofiardi et al., 2017); sin embargo, se toma este valor de diseño puesto que favorece los parámetros constructivos del hidrotornillo y coincide con datos propuestos por los fabricantes (Ritz Atro, 2005).

A partir del ingreso de los valores de entrada en el modelado, se obtienen los parámetros constructivos de mayor relevancia, los cuales permiten ya sea seleccionar la turbina bajo catálogo de fabricante (en caso de importación), o proveer los parámetros constructivos esenciales a un constructor nacional; dichos parámetros son ubicados para plena identificación en la **Figura 46** y sus respectivos valores se muestran en la **Tabla 17**.

Figura 46
Parámetros estructurales Tornilo de Arquimedes



Nota. Tomada de Entwurfsluss für Wasserkraftstnecken

Tabla 17.
Parámetros constructivos esenciales turbina de Arquímedes

Parámetro	Variable	Valor	Parámetro	Variable	Valor
Paso	S	1.0069 [m]	Profundidad submarina óptima	h_4	0.4 [m]
Velocidad	n	48.47 [rpm]	Profundidad de entrada	h_{zu}	0.3 [m]
Altura geodésica punto TP	TP	156.58 [msnm]	Velocidad 1	c_1	$0.0373 \left[\frac{m}{s} \right]$
Altura umbral	w	0.1953 [m]	Velocidad 2	c_2	$0.0227 \left[\frac{m}{s} \right]$
Altura geodésica punto OWS	OWS	160 [msnm]	Velocidad axial	c_{ax}	$0.8134 \left[\frac{m}{s} \right]$
Altura geodésica punto UWS	UWS	157 [msnm]	Longitud del tornillo con cuchilla	L_B	4.95 [m]
Distancia entre vólvulos y radio exterior	S_{sp}	0.2066 [m]	Longitud total del tornillo	L_{ZR}	5.93 [m]
Altura geodésica agua superior	SP	159.63 [msnm]	Radio externo	R_a	0.56 [m]
Profundidad 1	h_1	0.5 [m]	Radio interno	R_i	0.3 [m]
Profundidad 2	h_2	0.3 [m]			

Teniendo en cuenta los datos obtenidos se determinan los parámetros de salida correspondientes a la generación de energía, tales como: potencias, eficiencias y caudales, los cuales se muestran en la **Tabla 18**.

Tabla 18.
Parámetros finales diseño turbina de Arquímedes

Parámetro	Variable	Valor	Parámetro	Variable	Valor
Potencia hidráulica teórica	P_{th}	6.86 [kW]	Eficiencia de la planta	η_A	0.8
Potencia eléctrica generada	$P_{elek,Gen}$	5.13 [kW]	Caudal total	Q_t	0.23
Potencia mecánica óptima	$P_{mech,opt}$	5.13 [kW]	Caudal útil	Q_w	0.22
Eficiencia del hidrotornillo	η_{WKS}	0.94	Pérdidas de caudal	Q_g	0.014

3.1.2 Selección de la turbina. La selección de la turbina se realizó con base en el resultado del estudio realizado anteriormente y sus características principales se presentan en la **Tabla 19**.

Tabla 19.
Características principales de la turbina seleccionada

TIPO	RADIO EXTERNO [m]	MARCA
Hidrotornillo	0,6	Ritz-Atro

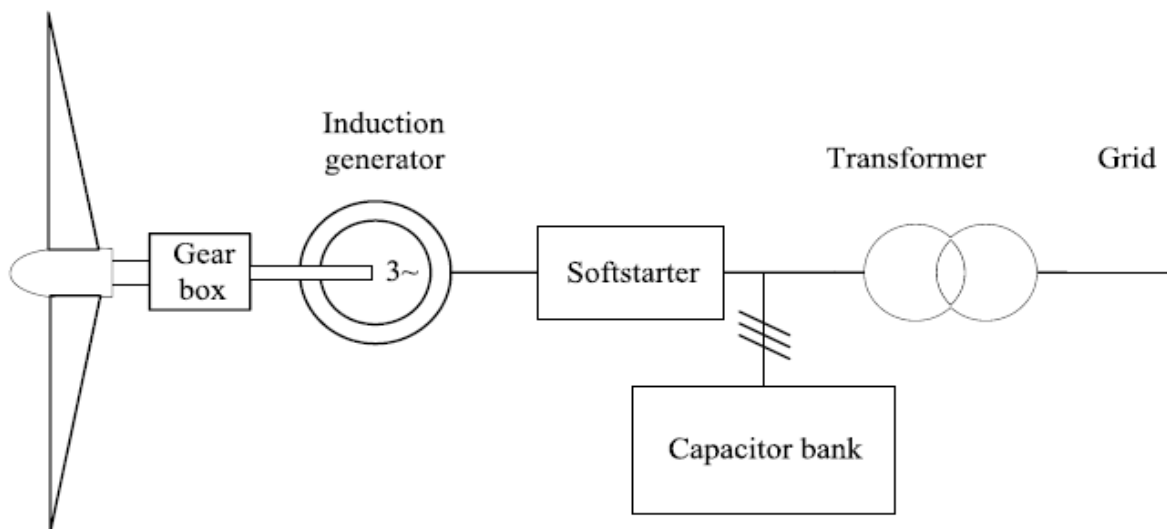
A su vez, el catálogo se relaciona en el **Apéndice L**; sin embargo, cabe resaltar que se deben especificar algunas condiciones adicionales al fabricante.

3.1.3 Configuración del sistema de generación hidroeléctrica. Para seleccionar la configuración más adecuada es importante tener en cuenta que el modo de operación de una turbina de Arquímedes se asemeja en buena medida a una turbina eólica, puesto que la fuerza motriz es intermitente y no se tiene gran control sobre esta. Se plantean las topologías más utilizadas en esta aplicación, las cuales pueden ser adaptadas al caso de estudio.

- Sistemas de velocidad fija.

Los sistemas de velocidad fija funcionan a velocidad constante. Eso significa que, independientemente de la velocidad de la entrada, la velocidad del rotor de la turbina es fija y está determinada por la frecuencia de la red. Los sistemas de velocidad fija generalmente están equipados con generadores de inducción de jaula de ardilla (SCIG), arrancador suave y banco de condensadores y están conectados directamente a la red, como se muestra en la **Figura 47** (Munteanu et al., 2008).

Figura 47
Estructura general de un sistema de velocidad fija



Nota. Tomado de Optimal control of wind energy systems.

Inicialmente, la máquina de inducción está conectada en régimen de conducción de modo que genera un par electromagnético en la misma dirección que el par de entrada. En estado

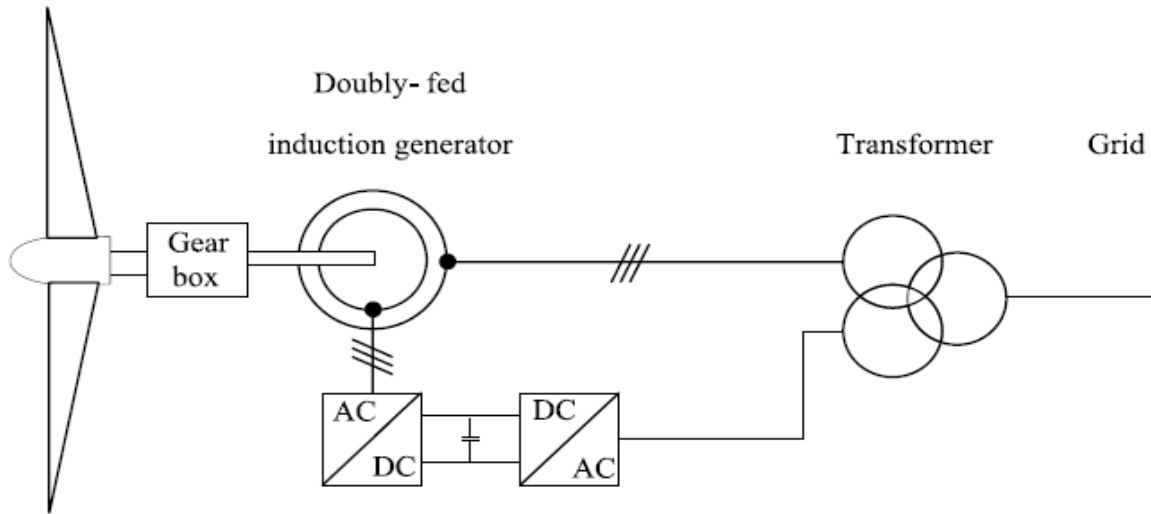
estacionario, la velocidad de rotación excede la velocidad síncrona y el par electromagnético es negativo. Esto corresponde a la operación de la máquina de inducción de jaula de ardilla en modo de generación. Como está directamente conectado a la red, el SCIG trabaja en su característica mecánica natural que tiene una pendiente acentuada (correspondiente a un pequeño deslizamiento) dada por la resistencia del rotor. Por lo tanto, la velocidad de rotación SCIG está muy cerca de la velocidad síncrona impuesta por la frecuencia de la red. Además, las variaciones de la velocidad del viento inducirán solo pequeñas variaciones en la velocidad del generador. Como la potencia varía proporcionalmente con la velocidad de entrada en cubos, las variaciones electromagnéticas asociadas son importantes.

- Sistemas de velocidad variable.

Las turbinas de velocidad variable son actualmente las más utilizadas. La operación de velocidad variable es posible debido a la interfaz de los convertidores electrónicos de potencia, lo que permite un desacoplamiento total (o parcial) de la red.

El sistema basado en un generador de inducción doblemente alimentado (DFIG), es actualmente el más utilizado por la industria de aerogeneradores y su configuración se muestra en la **Figura 48**.

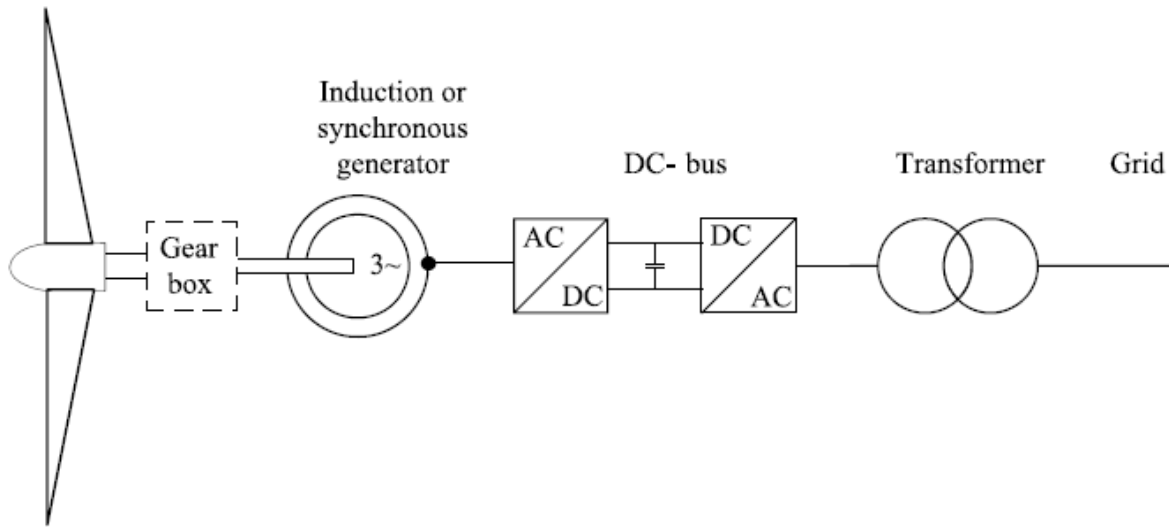
Figura 48
Estructura general de un sistema mejorado de velocidad variable



Nota. Tomado de *Optimal control of wind energy systems*.

Los sistemas de velocidad variable completos son muy flexibles en términos de qué tipo de generador se utiliza. Como se presenta en la **Figura 49**, puede equiparse con una inducción (SCIG) o un generador síncrono. El generador síncrono puede ser un generador síncrono de rotor bobinado (WRSG) o un generador síncrono de imán permanente (PMSG), siendo este último el más utilizado por la industria de aerogeneradores. El inversor de corriente de respaldo está clasificado para la potencia del generador y su funcionamiento es similar al del sistema basado en DFIG. Su lado del rotor garantiza que la velocidad de rotación se ajuste dentro de un amplio rango, mientras que su lado de la red transfiere la potencia activa a la red e intenta cancelar el consumo de energía reactiva. Esta última característica es importante especialmente en el caso de sistemas equipados con SCIG.

Figura 49
Estructura general de un sistema completo de velocidad variable



Nota. Tomado de *Optimal control of wind energy systems*

PMSG no requiere suministro de energía para la excitación, ya que es suministrado por los imanes permanentes. El estator de un PMSG está enrollado y el rotor tiene un sistema de postes de imanes permanentes. El polo sobresaliente de PMSG funciona a bajas velocidades y, por lo tanto, la caja de engranajes (**Figura 49**) se puede quitar. Esta es una gran ventaja de sistemas basados en PMSG ya que la caja de cambios es un dispositivo sensible en los sistemas de energía eólica. Lo mismo se puede lograr utilizando PMSG multipolar de accionamiento directo con gran diámetro.

La naturaleza síncrona de PMSG puede causar problemas durante el arranque, la sincronización y la regulación de voltaje y necesitan un sistema de enfriamiento, ya que los materiales magnéticos son sensibles a la temperatura y pueden perder sus propiedades magnéticas si se exponen a altas temperaturas.

3.1.3.1 Parámetros del generador. Se precisa del valor de las variables nominales como insumo fundamental para una adecuada selección del generador, teniendo en cuenta que dichos datos son los proporcionados comercialmente por los fabricantes; estas variables son: tipo de generador, tipo de sistema, tensión nominal, potencia nominal, velocidad nominal, frecuencia.

En el entendido que la topología de la microrred contempla barraje trifásico en AC al cual irá conectado el generador a seleccionar mediante una red eléctrica de longitud de 1.6 km, los parámetros anteriormente descritos, exceptuando el tipo de generador, corresponden a los del barraje. El tipo de generador se seleccionó a partir del análisis de la topología más adecuada para las condiciones preexistentes tales como la velocidad variable en la entrada y la imposibilidad de control en la misma (Rohmer et al., 2015); para estas condiciones el generador más adecuado es un síncrono de imanes permanentes (Munteanu et al., 2008).

3.1.3.2 Selección del generador. A partir de las condiciones planteadas en la sección anterior se seleccionó un generador síncrono trifásico de imanes permanentes cuyas características principales se muestran en la **Tabla 20**.

Tabla 20.
Características principales del generador seleccionado

GENERADOR	POTENCIA NOMINAL [kW]	TENSIÓN NOMINAL [V]	VELOCIDAD NOMINAL [rpm]	TIPO	EFICIENCIA [%]	PESO [kg]	VIDA ÚTIL (AÑOS)
GDF-280	10	220	60	PMSG 3F	85	680	20

El catálogo del generador se muestra en el **Apéndice L**.

Es de gran importancia aclarar que los elementos ofrecidos por los diferentes fabricantes se realizan bajo pedido, la frecuencia de operación requerida por la turbina de Arquímedes, según cálculos de simulación es de 49 r.p.m , razón por la cual se solicita al fabricante que la velocidad nominal de operación del generador (GDF-280) sea de 50 r.p.m; esta selección permitirá prescindir

del uso de transformación mecánica, ayudando a mejorar la eficiencia en la conversión de la energía, pues la conversión de energía no contará con las pérdidas debido al multiplicador de velocidad, también el valor en el costo de implementación para este sistema de generación y por ende del proyecto en general.

3.1.3.3 Selección del controlador de generación hidroeléctrica. Se seleccionó un controlador para el generador puesto que es necesario mantener ciertos parámetros eléctricos de salida tales como tensión y frecuencia, sus características básicas se presentan en la **Tabla 21**.

Tabla 21.
Características principales del controlador seleccionado

MARCA	MODELO	POTENCIA [kW]	TENSIÓN [V]
Engelec	WWS100	10	120/220/240

El catálogo del controlador se muestra en el **Apéndice L**.

3.1.3.4 Selección del inversor para generación hidroeléctrica. El inversor para el sistema hidroeléctrico se seleccionó con base en la configuración establecida; para tal fin, este debe ser de tipo conectado a la red y sus características principales se presentan en la **Tabla 22**.

Tabla 22.
Características principales del inversor seleccionado

MARCA	MODELO	POTENCIA [kW]	TENSIÓN ENTRADA [V]	TENSIÓN SALIDA [V]	EFICIENCIA [%]
Ginlong	GCI-10K-W	10	30-400	220/230/240	97,5

El catálogo correspondiente al inversor se relaciona en el **Apéndice L**.

3.2 Diseño del sistema de generación fotovoltaico

Mediante dispositivos llamados celdas solares, se transforma directamente mediante el efecto fotovoltaico la energía solar en eléctrica, con eficiencias que alcanzan comercialmente el 30 % en sistemas de mayor potencia. Esta tecnología es muy utilizada en la generación de electricidad en telecomunicaciones, sistemas en isla, cargadores de baterías y electrificación en zonas no interconectadas, así como en fachadas de edificaciones donde están integradas las celdas (*Atlas Climatológico, Radiación y viento.*, 2018).

Existen materiales semiconductores en el comercio y se encuentran en variadas formas (por ejemplo, celdas o células circulares o cuadradas típicamente del orden de 100 cm^2 , agrupadas por formas y tamaños acordes a la necesidad), los cuales transforman la energía de los fotones de la radiación solar en electricidad (efecto fotovoltaico).

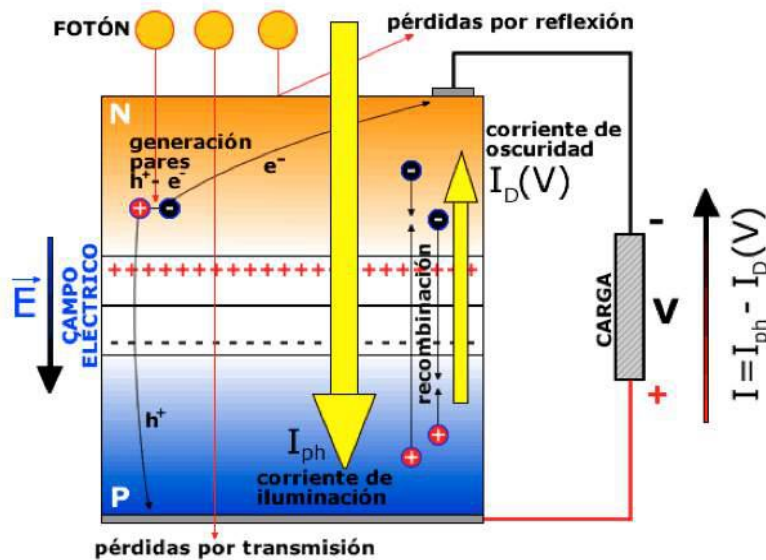
La tecnología fotovoltaica (FV) genera corriente eléctrica para uso directo o almacenamiento (baterías, producción de hidrógeno, etc.). Una celda fotovoltaica puede generar una potencia eléctrica alrededor de un Watt. Las celdas individuales se ensamblan para formar módulos. Si se necesita generar más electricidad los módulos se agrupan para formar lo que se conoce como arreglo.

Esta tecnología se utiliza en zonas con radiación solar suficiente con potencias de algunos kiloWatts pico (kWp), ya sea en zonas urbanas o aisladas, en la medida en que sus costos sean competitivos con respecto a otras alternativas. Adicionalmente, existen granjas solares, con potencias del orden de MWp, los cuales se encuentran conectados a la red, suministrando energía bajo un entorno de mercado.

El efecto fotovoltaico consiste en un fenómeno que se presenta cuando se unen dos materiales semiconductores un donador (material tipo N) y otro receptor (material tipo P) de electrones, tal

como se ilustra en la **Figura 50**. Los semiconductores más utilizados tienen una base de cristal de silicio dopado, adicionando átomos del grupo V (donador) o el grupo III (receptor), que dan origen, mediante fotones de luz a un flujo de electrones desde el material N al P, generando una diferencia de potencial (o voltaje) entre los dos materiales.

Figura 50
Esquema del efecto fotovoltaico en una celda solar



Nota. Tomada del Atlas de radiación solar, ultravioleta y ozono de Colombia.

La tecnología solar, considerando sus mejoras en eficiencias y precios, puede traer condiciones muy favorables para incrementar su aporte en el suministro de energía y en la economía.

A su vez, cabe resaltar que Colombia tiene el propósito de avanzar en la cobertura universal del servicio de energía eléctrica, para lo cual busca integrarlo con iniciativas productivas y ampliar la gama de opciones en cuanto a soluciones tecnológicas. Este propósito se consolida a través de la firma de diferentes compromisos internacionales, tales como energía sostenible para todos (SE4ALL) y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) (Estados Unidos & Agencia para el Desarrollo Internacional, 2017).

En ese sentido, la normativa nacional emanada de dichos compromisos ya no contempla únicamente una expansión de la red y generación con diésel en las zonas no interconectadas, sino que la energía solar fotovoltaica y otras formas de generación amigables con el medio ambiente, se conviertan en una alternativa viable para dar solución a la cobertura del servicio en ellas, especialmente en el caso de usuarios de viviendas aisladas que no conforman núcleos o conglomerados poblacionales.

La metodología por utilizar en el diseño del sistema fotovoltaico se define mediante los siguientes pasos: definición del tipo de planta, caracterización de la localización, caracterización y dimensionamiento de los componentes: generador fotovoltaico (número de paneles necesarios), cuadros de distribución, acumulador, regulador y por último el sistema inversor (Vega De Kuyper & Ramirez Morales, 2014).

- Definición del tipo de planta:

Para el dimensionamiento de una instalación fotovoltaica se debe tener en cuenta principalmente dos consideraciones, en primer lugar, que dicho sistema sea capaz de alimentar las cargas conectadas al sistema o en su defecto, el área disponible para la instalación de módulos fotovoltaicos. La corriente continua (CC) producida por dichos módulos puede ser utilizada directamente o transformada en corriente alterna (CA), dependiendo la topología del sistema y el tipo de cargas que componen el sistema eléctrico.

En todo sistema de generación, existen pérdidas, las cuales limitan la eficiencia del suministro y por esta razón son un factor importante para la elección componentes de la planta y posterior dimensionamiento de los mismos. Entre las pérdidas energéticas más frecuentes de los sistemas fotovoltaicos se encuentran: pérdidas del módulo, pérdidas por temperatura, pérdidas por espectro,

pérdidas por reflexión, pérdidas por diferencia de potencia entre los módulos, pérdidas por el ángulo de incidencia de los rayos del sol, pérdidas por suciedad, pérdidas por sombra, entre otras.

- Caracterización de la localización.

La caracterización del lugar para el cual se desarrolla el diseño parte de identificación de parámetros como altura en (msnm), datos recopilados históricamente y compilados estadísticamente por la nasa o la estación meteorológica activa más cercana de irradiancia, temperatura máxima y ambiente, área disponible, posibles sombras por parte de la naturaleza o construcciones cercanas, datos geográficos.

- Caracterización y dimensionamiento de los componentes.

Un sistema fotovoltaico en general se compone de los siguientes subsistemas: generador fotovoltaico (número de paneles necesarios), cuadros de distribución, acumulador, regulador y por último el sistema inversor; dependiendo de las características de la carga y tipo usuario, seleccionar cuales de ellos harán parte del sistema fotovoltaico que satisfaga de manera óptima las necesidades energéticas del usuario. Una vez se tengan claros los componentes que conformarán el sistema de generación se procede a realizar el dimensionamiento de cada uno de ellos.

El proceso de dimensionamiento del generador fotovoltaico se realiza con base en el concepto de horas solar pico (HSP) descrito como el número de horas en que se dispone de una hipotética irradiancia solar constante de $1000 \frac{W}{m^2}$. El valor de las horas solares pico se obtiene dividiendo el valor de la irradiancia incidente entre el valor de la irradiancia en condiciones estándar de medida y se presenta en la siguiente ecuación:

$$HSP = \frac{I}{G(h)}$$

El número de módulos que se requieren para satisfacer la demanda de energía (N_T) considera la demanda promedio diaria mensual (L_{mderit}) y la energía generada por cada módulo (E_P).

$$N_T = \frac{L_{mderit}}{E_P}$$

La energía fotovoltaica generada por cada módulo durante un día se calcula de la manera siguiente:

$$E_P = P_{MPP} \cdot HSP_{crit} \cdot PR$$

Donde:

P_{MPP} : potencia pico del módulo en condiciones estándar.

PR : factor global de funcionamiento del módulo.

Un sistema de generación fotovoltaico se compone de arreglos, los cuales constan de módulos en serie y/o en paralelo. Para determinar este arreglo se debe tener en cuenta la tensión nominal del módulo, la tensión de la batería y corriente máxima a suministrar.

El cuadro de distribución es un equipo que permite dividir la alimentación entrante en circuitos independientes (de alterna, continua o mixtos), que se protegen y controlan mediante interruptores y fusibles. El dimensionamiento de estos elementos depende de la tensión y la intensidad de corriente.

Un componente importante en el sistema fotovoltaico es la regulación de la carga, debido a la fluctuación que el mismo presenta. Para dimensionar este componente se debe tener en cuenta la intensidad de corriente máxima de entrada y salida al regulador, las cuales dependen de la generación fotovoltaica pico y la intensidad máxima de las cargas, respectivamente. Es recomendable considerar su dimensionamiento con base en el 120% del valor más crítico, ya sea la corriente de cortocircuito o la corriente máxima de salida (consumo de la carga), siendo la mejor opción aquel regulador que soporte la corriente más alta.

El cálculo de la corriente de entrada (I_{ent}) se efectúa mediante la siguiente ecuación:

$$I_{ent} = M_{seg} \cdot I_{mod,cc} \cdot N_P$$

En la cual M_{seg} representa el factor de seguridad para evitar daños en el regulador fijado en 1.25 y $I_{mod,cc}$ es la corriente de cortocircuito del módulo fotovoltaico.

Para el cálculo de la corriente de entrada (I_{sal}) es necesario estimar las potencias requeridas por la carga tanto en corriente continua como en alterna. El cálculo de la corriente de salida está dado por la siguiente ecuación:

$$I_{sal} = \frac{1.25 P_{CC} + \frac{P_{CA}}{\eta_{inv}}}{V_{bat}}$$

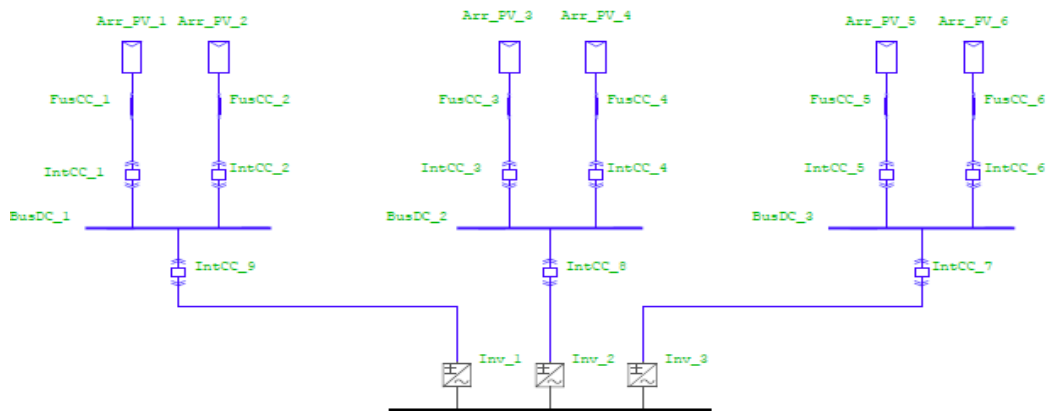
Donde P_{CC} es la potencia de las cargas en corriente continua, P_{CA} las de alterna, η_{inv} el rendimiento del inversor considerado en 95% y V_{bat} como se había especificado anteriormente, representa la tensión de la batería.

El diseño del sistema de acumulación (baterías) coincide con el diseño del sistema de acumulación general planteado en la sección **2.1.1.4**, ajustándolo a las condiciones particulares de la carga.

Teniendo en cuenta que la demanda de un sistema eléctrico puede darse tanto en AC como en DC, el sistema de generación fotovoltaico puede requerir de un bloque de inversión, el cual variará dependiendo de las variables de entrada del sistema

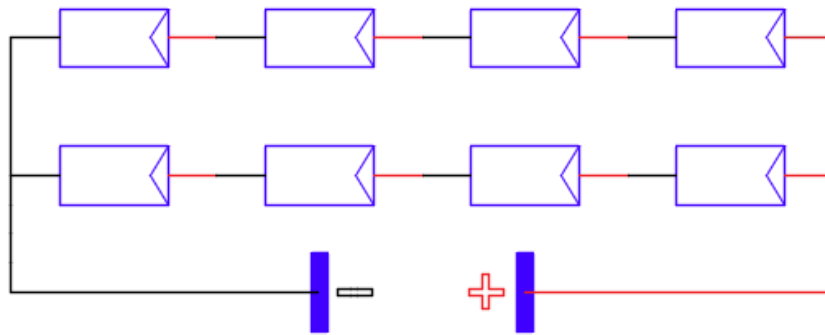
El sistema de generación fotovoltaico está compuesto por arreglos de paneles fotovoltaicos, reguladores, inversores y la instalación eléctrica restante, los cuales se aprecian en la **Figura 51**. Los parámetros fundamentales que sustentan el diseño de este sistema de generación y la respectiva selección de equipos se muestran a continuación.

Figura 51
Esquema general del sistema fotovoltaico



3.2.1 Configuración del sistema de generación fotovoltaico. El dimensionamiento del sistema fotovoltaico se puede plantear mediante dos metodologías, una de ellas a partir de una demanda energética específica y la otra a partir de un área establecida. Para el caso de estudio se toma la segunda alternativa, la cual consta de un área de 136 m² disponibles para la instalación de dicho sistema representados en 16 m de largo y 8.5 m de ancho, evitando hacer uso de inversores de alta potencia y micro-inversores para cada panel. La configuración eléctrica dispuesta para la generación fotovoltaica consta de 6 arreglos (un inversor y regulador por arreglo), cada uno de ellos conformados por 8 paneles, 4 ramas en paralelo compuestas de dos paneles en serie cada una, para un total de 48 paneles. La configuración física que tendrán los paneles en cada uno de estos arreglos fotovoltaicos se muestra a continuación en la **Figura 52**.

Figura 52
Configuración física de un arreglo fotovoltaico



Se debe tener en cuenta que en el dimensionamiento se estableció el parámetro de potencia pico mínima para cada uno de los módulos fotovoltaicos; adicionalmente, se establece una potencia pico mínima por módulo de 330 Wp y la tensión nominal de salida para los arreglos fotovoltaicos en 77 V.

Es importante resaltar que se deben tener en cuenta las sombras generadas por los paneles y para ello fue utilizada una herramienta de software (*Flledist*, 2012).

3.2.2 Selección de paneles fotovoltaicos. La selección adecuada de los paneles es fundamental para el aprovechamiento del área disponible; por lo tanto, la eficiencia es un factor determinante para la selección de estos. Las características principales de los paneles seleccionados se presentan en la **Tabla 23**.

Tabla 23.
Características principales del panel seleccionado

Panel	Potencia máxima [Wp]	Tensión nominal [V]	Corriente nominal [A]	Voc [V]	Isc [A]	Eficiencia [%]	Dimensiones [mm]	Tecnología
SRP-340-BMA-HV	340	38,4	8,86	46	9,32	17,17	1996x992x40	Monocristalino

El catálogo correspondiente al panel se relaciona en el **Apéndice L**.

3.2.3 Selección del inversor para generación fotovoltaica. Se define al inversor de corriente como el dispositivo electrónico cuya función es convertir corriente continua (CC) de entrada a una alterna (CA) de salida, siendo dicha característica principal la que nos brinda el control sobre los parámetros de tensión y frecuencia con los cuales se alimentará la carga. Los inversores más comunes en el mercado son para corriente continua con tensiones de 12, 24 o 48 V y, según el número de fases requeridas pueden ser monofásico para instalaciones eléctricas residenciales y oficinas, o trifásico para operar en líneas eléctricas de instalaciones industriales o de sistemas de transporte. Los inversores se consideran de baja o alta potencia si es menor o mayor a 2000 W respectivamente. El dimensionamiento del inversor debe con un factor de seguridad que brinde flexibilidad al sistema.

El dimensionamiento del inversor debe partir de una topología previamente establecida, la cual determina la cantidad de inversores a utilizar y los parámetros a condiciones nominales de los mismos (tensión, potencia y frecuencia de salida). En ese sentido, es posible plantear el dimensionamiento a partir de las cargas en AC o la potencia que puedan suministrar los módulos fotovoltaicos ya sea a nivel individual o en arreglos.

En primera medida, al plantear el dimensionamiento a partir de las cargas en AC se debe tener especial cuidado en detallar si las cargas de consumo energético con valor considerable utilizan sistemas que permitan evitar los picos de potencia en los arranques (arrancadores) o requiere de tenerlos en cuenta para su dimensionamiento; adicionalmente, cabe aclarar que una microrred contempla una cantidad considerable de usuarios que componen una carga total diversificada, por lo tanto los efectos que representan los picos de arranque en equipos puntuales se ven atenuados. Partiendo del hecho de contar con estas consideraciones, la potencia nominal del inversor está dada por la siguiente ecuación:

$$P_{inv} = M_{seg} * P_{m\acute{a}x}$$

Donde M_{seg} es un factor de seguridad = 1.25 y $P_{m\acute{a}x}$ representa la potencia total que consume la carga en AC.

Una vez establecida en la topología de la microrred el uso de dos barrajes trifásicos en AC con un nivel de tensión de línea de 220 V, es necesario transformar la energía eléctrica generada en corriente continua proveniente de los paneles fotovoltaicos en corriente alterna para que esta pueda ser suministrada al sistema, función específica para la cual son utilizados los inversores. Partiendo de que ya fueron determinados los arreglos que compondrán el sistema fotovoltaico, se utilizará un inversor para cada uno de ellos. Estos inversores se dimensionan de acuerdo con las características de tensión y corriente máximas que dichos arreglos presentan.

El parámetro fundamental para seleccionar los inversores de cada uno de los arreglos se determina mediante la ecuación mostrada a continuación.

$$I_{m\acute{a}x_inv} = I_{COCI/m\acute{o}dulo} * N_{ramas_paralelo} * F_{seguridad} A$$

Donde:

$I_{m\acute{a}x_inv}$ = Corriente de corto circuito

$$I_{m\acute{a}x_inv} = 9.32 * 4 * 1.25 = 46.6 A$$

Para el caso de estudio no se utilizó controlador solar puesto que los inversores disponibles en el mercado aceptan un amplio rango de tensiones; adicionalmente, cabe resaltar que en el punto de generación fotovoltaica no se encuentra el sistema de acumulación, otra razón suficiente para prescindir del controlador. El inversor seleccionado es el mismo que se usó para la generación hidroeléctrica, por tal razón su respectivo catálogo y características serán las mismas que se referencian en la sección **3.1.3.4** del presente documento.

3.3 Sistema de acumulación

Muchas de las fuentes de energía renovable tienen comportamiento aleatorio, por ejemplo: la velocidad del viento sobre las turbinas eólicas, la radiación solar en las fuentes fotovoltaicas, la altura de las olas del mar en las fuentes mareomotrices, entre otros. Las fuentes renovables están conectadas a las redes eléctricas o microrredes de electricidad. Pero la disponibilidad aleatoria de la energía primaria da como consecuencia períodos con exceso y deficiencia de energía. Esto ha llevado a que se desarrollen diferentes formas para almacenar la energía sobrante a fin de utilizarlo cuando sea necesario y las condiciones de operación del sistema eléctrico lo permitan.

En cuanto al sistema de acumulación, las baterías más utilizadas para instalaciones fotovoltaicas son las de plomo ácido con dos vasos de 2 V cada uno, las cuales son instaladas en arreglos serie-paralelo con el fin de obtener la tensión requerida, ya sea 12, 24, 48, 120 o 300 V.

El parámetro principal para el dimensionamiento de la batería es su capacidad de almacenamiento de carga eléctrica en amperios hora (Ah) o miliamperios hora (mAh). Bajo la premisa de que, a mayor carga almacenada, mayor tiempo demorará en descargarse; de igual manera, mientras mayor sea la carga, menor será su tiempo de descarga. El tiempo de descarga del sistema de almacenamiento, dado el consumo de la carga, se determina mediante la siguiente ecuación.

$$\textit{Tiempo de descarga} = \frac{\textit{Carga}}{\textit{Consumo}}$$

Un término muy importante a tener en cuenta se denomina profundidad de descarga, el cual determina el nivel máximo de descarga del sistema de acumulación antes de la desconexión con el regulador con el fin de su protección, usualmente se considera para un ciclo diario ($\text{Prof}_{\text{desc,max}}$) entre el 15 y el 20%.

Para el caso de estudio el sistema de acumulación es clave en el proceso de dimensionamiento puesto que es el componente de la microrred que tendrá la responsabilidad de brindarle la propiedad a la barra, en la cual se encuentra adherido, de “slack”; este barraje brindará el recurso energético al sistema de potencia cuando las fuentes principales no tengan la capacidad de asumir las variaciones de la carga. Dicho sistema se dimensiona a partir de la deficiencia de potencia máxima presentada en la superposición de las cargas en periodos específicos como se plantea en la sección **2.1.1.4** del presente documento. Además, se requiere garantizar que este sistema tenga la capacidad de suministrar dicha potencia de manera instantánea, por lo cual se debe tener especial cuidado en la delimitación de algunos parámetros.

3.3.1 Configuración del sistema de acumulación. El sistema de acumulación consta de tres arreglos iguales de baterías conectados a cada una de las fases, cada arreglo está conformado por dos ramas en paralelo integradas por tres baterías en serie de 12 V cada una estableciendo así un nivel de tensión de 36 V en DC; cada arreglo mediante su respectivo inversor permitirá el flujo de energía entre el sistema de acumulación y la microrred, dichos arreglos deben poseer una característica de carga y descarga que pueda mantener la energía suficiente a la barra “slack”, para satisfacer la máxima deficiencia de potencia encontrada en el proceso de dimensionamiento; a su vez, se hace necesario que el sistema de acumulación tenga la capacidad mantener dicha potencia durante el periodo máximo de trabajo continuo identificado, el cual corresponde a 3 horas.

Las ecuaciones a partir de las cuales se determinan los parámetros que permiten seleccionar las baterías se presentan a continuación mediante la ecuación presentada en la sección **2.1** y la mostrada a continuación.

$$Cap_{nom_ciclo} = \frac{E_{acu}}{T_{bat}} \quad Ah$$

Donde:

Cap_{nom_ciclo} : Capacidad nominal por ciclo de carga de la batería en kAh

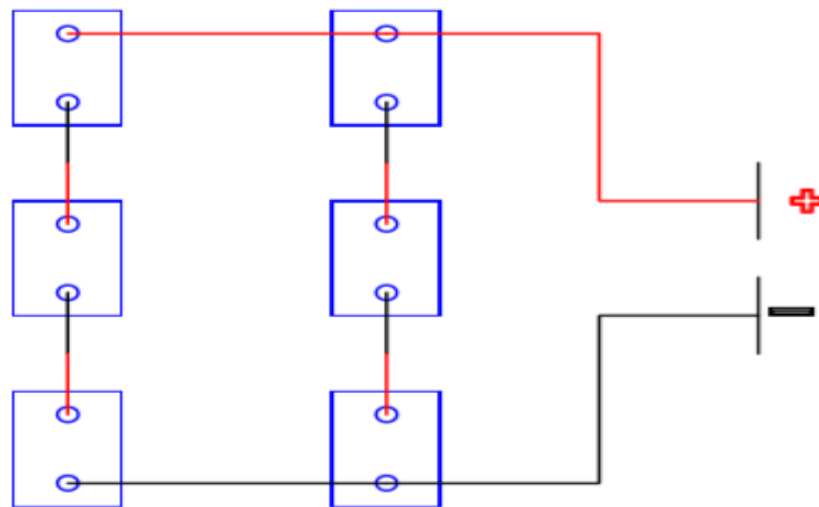
T_{bat} : Tensión de salida de la batería en V

$$Cap_{nom_bat} = \frac{E_{acu}}{T_{bat}} = \frac{33.81}{12} = 2.8175 \quad kAh$$

El sistema de acumulación estará compuesto por tres arreglos de baterías que tiene dos ramas en paralelo que a su vez se encuentran conformadas por tres baterías en serie.

La configuración física del arreglo que representa el sistema de acumulación se presenta a continuación en la **Figura 53**.

Figura 53
Configuración física del arreglo de baterías para el sistema de acumulación



Para seleccionar las baterías se tuvieron en cuenta los cálculos realizados en capítulos anteriores; sin embargo, uno de los criterios principales tenidos en cuenta fueron los ciclos de vida de éstas, siendo este uno de los inconvenientes en este tipo de sistemas. Las características básicas se muestran en la **Tabla 24**.

Tabla 24.
Características principales de las baterías seleccionadas

MARCA	REFERENCIA	TENSIÓN [V]	CAPACIDAD [Ah]	MÁXIMA CORRIENTE [A]	PESO [kg]
Epblue DG Series	STB200 12-G	12	200 (20 h)	2000 (5s)	61

3.3.2 Selección del inversor para el sistema de acumulación. Teniendo en cuenta que el sistema de acumulación presenta proceso de carga y descarga se requiere del uso un inversor bidireccional ya sea para transformar la energía proveniente del barraje al cual se encuentra conectado y almacenarla en continua o para entregar en alterna la almacenada. Es necesario determinar la capacidad de potencia máxima que podrá soportar el dispositivo y por tanto, la corriente máxima; estos valores se encuentran intrínsecamente ligados a los valores correspondientes al banco de baterías.

Los valores de selección para el inversor bidireccional corresponden a los valores de corriente de carga y descarga del banco de baterías; asimismo, la tensión máxima que debe soportar el inversor es la máxima suministrada por el mismo.

Para seleccionar el equipo de control de carga fue muy importante tener en cuenta que el sistema de acumulación es el gobernador del sistema, por lo tanto, el inversor debe ser de tipo fuera de red; a su vez, el controlador de carga cumple las funciones tanto de cargador como de inversor. Las características principales del controlador de carga se presentan en la **Tabla 25**.

Tabla 25.
Características principales del controlador de carga

MARCA	MODELO	POTENCIA [kW]	TENSIÓN ENTRADA [V]	TENSIÓN SALIDA [V]	EFICIENCIA [%]
Victron Energy	Quattro	4	38-66	220	95

4. Diseño de la red de distribución e instalaciones de uso final

En una microrred es muy importante aprovechar al máximo la energía generada por los sistemas de distribuidos, puesto que en muchas ocasiones dichos sistemas presentan intermitencias y limitaciones en el suministro. Teniendo en cuenta que las instalaciones de uso final y las redes de distribución concentran el mayor porcentaje de pérdidas en un sistema de potencia, su adecuado diseño permite generar un gran impacto en la eficiencia global de la microrred.

4.1 Diseño del sistema de distribución

La red de distribución es una parte de gran importancia para un sistema de potencia eléctrica convencional puesto que permite transportar la energía desde las líneas de transmisión hasta los consumidores finales, ya sean industriales, comerciales o residenciales, de tal forma que ésta pueda ser aprovechada en dichos puntos de consumo; para ello, debe ajustarse a los parámetros eléctricos estandarizados existentes en la normativa de cada lugar. Sin embargo, el papel de la red de distribución en la microrred es todavía más relevantes puesto que éste se encarga de transportar la energía desde los sitios donde se ubica la generación distribuida hasta los puntos de carga, con los parámetros eléctricos que son necesarios para su correcto uso.

generación hidroeléctrica se utilizará un sistema trifásico tensión de 4,16 kV puesto que la distancia entre éste y su punto de conexión es de 1.6 km.

4.1.1.2 Tipo de sistema según su configuración topológica. Teniendo en cuenta la ubicación de las cargas y su importancia se adopta una configuración aérea de tipo radial puesto éstas no son indispensables y por tal razón no se justifica una mayor inversión en un sistema de mayor complejidad.

Además, se toma selecciona un sistema de distribución trifásico tetrafilas con neutro uniaterrizado puesto que es el que más se ajusta al nivel de complejidad de la configuración propuesta (Ramirez Castaño, s. f.).

4.1.2 Elementos del sistema de distribución. Para dimensionar cada uno de los componentes del sistema de distribución es necesario cumplir determinadas características técnicas que generalmente se encuentran estandarizadas en la normativa de cada lugar.

4.1.2.1 Conductores. Para determinar el tipo de conductores es necesario tener en cuenta la zona en la cual se van a utilizar los mismos, la configuración de la red y además de esto, parámetros técnicos tales como la capacidad de corriente, la regulación de tensión y las pérdidas de potencia.

Por tal razón, la red de distribución que conecta la generación hidroeléctrica con el barraje de generación será compacta y utilizará cable ecológico puesto que la zona por la cual se extiende presenta altos niveles de vegetación.

Los demás conductores de la red de distribución serán los acordes a la normativa existente en la zona, para lo cual serán de tipo THW (aluminio aislado), con diferentes calibres acorde a las condiciones técnicas especificadas más adelante.

Los catálogos correspondientes a los conductores anteriormente mencionados se presentan en el **Apéndice L**.

El calibre de los conductores se determina a partir de la corriente máxima que se espera circule por el mismo, incluyendo un factor de seguridad del 125% establecido en la NTC 2050 (Garzón Hidalgo & Saavedra Montes, 2017). Además de ello es importante que el conductor permita satisfacer la regulación de tensión y pérdidas de potencia exigidas. Para el caso se acoge la exigida en la ADENDA RURAL de la norma técnica de la ESSA (Actualización de la adenda modificatoria a la norma para cálculo y diseño de sistemas de distribución de la Electrificadora De Santander S.A ESP., 2014).

Las memorias de cálculo se encuentran en el **Apéndice O** donde en la hoja llamada “regulación” se muestra el cumplimiento de la norma anteriormente mencionada en cada uno de los tramos de la red de distribución. Las ecuaciones que se utilizaron como base para estos cálculos se encuentran en la literatura técnica y la normatividad vigente (*Normas para el cálculo y diseño de sistemas de distribución*, 2005).

4.1.2.2 Postería y herrajería. La postería y herrajería correspondiente al sistema de distribución corresponde a la exigida por la ADENDA RURAL de la norma técnica de la ESSA (Actualización de la adenda modificatoria a la norma para cálculo y diseño de sistemas de distribución de la Electrificadora De Santander S.A ESP., 2014).

4.1.2.3 Transformadores. Los transformadores de distribución que se utilizarán en el diseño planteado serán trifásicos de tipo DY autoprotegidos puesto que cumplen los requisitos de la configuración planteada y su relación de tensión será 220/4160 V.

El catálogo de los transformadores que fueron seleccionados para el caso de estudio se encuentra en el **Apéndice L**, donde se presentan sus parámetros de manera más detallada.

4.1.2.4 Medidores. La medición en cualquier sistema de potencia se debe realizar en los puntos de conexión. Se entiende como punto de conexión eléctrico en el cual los activos de conexión de un usuario o de un generador se conectan al STN (Sistema de Transmisión Nacional), a un STR (Sistema de Transmisión Regional) o a un SDL (Sistema de Distribución Local). El punto de conexión eléctrico entre los sistemas de dos (2) Operadores de Red (OR). El punto de conexión entre niveles de tensión de un mismo OR., el punto de conexión entre el sistema de un OR y el STN con el propósito de transferir energía eléctrica (*Código de medida*, 2014).

El sistema de distribución concerniente, todos los puntos se clasifican como de tipo 5 puesto que su consumo es inferior a 5 MWh-mes y por tal razón el índice de clase para energía activa es 1 o 2 y para reactiva 2 y 3.

La ubicación de los medidores del sistema de distribución se muestra en el diagrama unifilar de la microrred, el cual se muestra en la **Figura 42** y su correspondiente catálogo en el **Apéndice L**.

4.2 Diseño de las instalaciones de uso final

El diseño de las instalaciones de uso final cuenta con particularidades ya explicadas con anterioridad en el momento en que se caracterizó el consumo de energía eléctrica que demanda la microrred; en primer lugar, las cargas como lo son: trapiche, granero y ordeño, serán asumidas como cargas residenciales y en segundo lugar, se decide considerar las tres cargas anteriormente nombradas como dos usuarios de tipo residencial, para un total de cuatro usuarios, con los cuales se elaboró el perfil horario.

Los circuitos ramales para cada casa (Principal y administración) cuentan con los circuitos mínimos exigidos por la sección 210 del (*Código Eléctrico Colombiano*, 1998), se plantea en cada una de cargas un circuito exclusivo para lavado y planchado, otro circuito para pequeños artefactos ubicado en la cocina y dos circuitos más que cubren uso general de las demás zonas que conforman

la unidad residencial; en el caso de la carga residencial de la casa principal cabe aclarar que el cuarto de baño, aunque cuenta con tres divisiones, estas son exclusivamente para duchas y por lo tanto el diseño no contempla tomacorrientes GFCI como exige la norma, se cuenta con un lavamanos externo el cual guarda el cumplimiento de dicha norma manteniendo el tomacorriente GFCI que la misma exige; por otro lado, vale la pena aclarar que previo diálogo con la administración de “LA BUFALERA” dio claridad de que estas unidades residenciales no viven constantemente más de tres personas, se concertó dejar dos tomacorrientes por cada habitación y para el caso específico de la casa de administración la cual posee dos bodegas, una pequeña y una mediana las cuales no están en funcionamiento, se decide dejar uno y dos tomacorrientes respectivamente por uso esporádico o de ser requerido para uso a mediano plazo probablemente también esporádico. La caracterización de los circuitos se encuentra descrita en el cuadro de cargas ubicado en el **Apéndice O** en el cual podemos observar la corriente máxima que fluirá por cada circuito constatando que dichas corrientes no superan las corrientes máximas de carga como se indica en la sección 210 del (*Código Eléctrico Colombiano*, 1998), de allí se determina el uso alambre AWG # 12 para los circuitos de lavado y planchado, así como los de pequeños artefactos; para los demás circuitos, de uso general, se utilizará alambre AWG #14. Asimismo, en el caso de las instalaciones finales para granero, ordeño y trapiche, se hace la aclaración pues aunque son tomados como carga residencial, no poseen cuartos de lavado y planchado, cocina, ni tampoco cuartos de baño, por tal razón se definen en concertación con la administración según conocimiento en experiencia del uso que a estos espacios se da, estas cargas contarán con circuitos de uso general los cuales podemos ver caracterizados en el cuadro de cargas ubicado en **Apéndice O**; allí mismo se podrá identificar el calibre del conductor a utilizar para estos circuitos (AWG # 14) y el

cumplimiento en cuanto a la corriente máxima de carga como se exige en la sección 210 del (*Código Eléctrico Colombiano*, 1998)

En cuanto a la instalación de uso final de la carga que representa el vivero contiene tanto circuitos monofásicos para uso general, como circuitos de alimentación trifásica utilizados por las maquinas que componen el proceso de extracción de los aceites esenciales, en este caso de iluminación y tomas para uso general se cuenta con 3 circuitos monofásicos relativamente equilibrados los cuales estarán alimentados por cada una de las fases que trae la acometida trifásica principal por medio de alambre AWG # 14. El proceso de extracción de aceites esenciales está compuesto por una serie de cargas inductivas (motobomba circuito de enfriamiento, motobomba tanque de almacenamiento, motor de recepción de aire de la caldera, motor picadora material vegetal y el motor del ventilador de la torre de enfriamiento) las cuales estarán alimentadas, cada una de ellas, por medio de circuitos trifásicos independientes dimensionados específicamente para cada máquina, se puede identificar que los circuitos trifásicos de todas las máquinas están compuesto por alambre AWG # 14 a excepción del motor de la picadora vegetal, el cual representa la carga de mayor consumo y llevará alambre AWG #12 la anterior selección cumple con los requisitos exigidos por la sección 430 del (*Código Eléctrico Colombiano*, 1998) en cuanto al calibre del conductor de acuerdo con la corriente nominal del equipo. La caracterización de los circuitos que componen la carga del vivero se encuentra descrita en el **Apéndice O**, en el cual también podremos identificar que las corrientes que fluirán por dichos conductores no excederán la corriente máxima de carga permitida por la sección 210 del (*Código Eléctrico Colombiano*, 1998) según conductores elegidos.

El cálculo de la demanda diversificada para las diferentes cargas residenciales se determina a partir de la tabla de demanda rural encontrada en la (Actualización de la adenda modificatoria a la

norma para cálculo y diseño de sistemas de distribución de la Electrificadora De Santander S.A ESP., 2014b). Las acometidas principales que alimentan cada una de las diferentes cargas residenciales se determinan en cumplimiento a la sección 210 B del (*Código Eléctrico Colombiano*, 1998) la cual exige como calibre mínimo en cobre al AWG # 8. El conductor elegido para la acometida trifásica principal que alimenta el vivero es el alambre en cobre AWG #6 conductor que garantiza que las corrientes que fluirán por dichos conductores no excederán la corriente máxima de carga permitida por la sección 210 del (*Código Eléctrico Colombiano*, 1998) según conductores elegidos. En el **Apéndice O** se encuentra la hoja de cálculo llamada regulación, en la cual podremos encontrar de manera más detallada la información acerca de la corriente, calibre del conductor, regulación y pérdidas entre otros parámetros los cuales también fueron uso para el diseño del sistema de distribución.

El diseño de las instalaciones eléctricas para las diferentes cargas va acompañado de sus respectivos planos, los cuales no se encuentran a escala, pero igualmente permiten identificar a que circuito pertenece cada punto de la instalación, su ubicación espacial, las protecciones que se utilizarán y las características de la acometida principal, planos requeridos en todo diseño y los cuales podemos encontrar los **Apéndice P** para su respectivo análisis.

5. Protecciones eléctricas

Los sistemas de protecciones eléctricas tienen como objetivos: proteger personas y equipos, reducir su influencia dentro de estos, vigilar continuamente las variables concernientes a un sistema de potencia y detectar condiciones de falla (Ramírez Castaño, 2003).

Su función principal es remover el servicio cuando algún elemento del sistema de potencia sufre un cortocircuito u opera de manera anómala; además de ello tiene como función secundaria indicar la localización y el tipo de falla.

Las fallas generalmente son causadas por sobre intensidades que se deben a sobrecargas, las cuales ocurren si durante el funcionamiento de una carga se consume una potencia mayor a la nominal, o cortocircuitos, los cuales se presentan cuando dos conductores que se encuentran a un potencial diferente se ponen en contacto a través de un elemento de baja impedancia (Vargas & Segura, 2017).

Para realizar el diseño de un sistema de protección es necesario realizar el cálculo de las corrientes de falla, a partir de las cuales se determinan las características nominales de los equipos para finalmente coordinar los mismos de manera que tengan una adecuada operación. Otras consideraciones que son características de cada sistema de potencia tales como la localización y naturaleza de las cargas y las condiciones ambientales del circuito a proteger deben ser tenidas en cuenta en el diseño de sistemas de protección.

La filosofía de la operación de las protecciones debe tener en cuenta condiciones fundamentales, tales como: disparos indeseados, omisiones de disparo y la combinación de estas; en ese sentido, un buen diseño debe garantizar que no se presente ninguna de estas condiciones y de tal manera asegurar que éste es confiable.

Para microrredes, la literatura plantea los esquemas más utilizados como son: Sobre-corriente y componentes simétricas, protección adaptiva, protección diferencial, protección de distancia, protección basada en voltaje y despliegue de dispositivos externos (Mirsaeidi et al., 2014).

Adicionalmente, dependiendo de la configuración se pueden encontrar diferentes niveles y direcciones de las corrientes de falla; por ejemplo, en una microrred que esté conectada a la red,

sus protecciones deben tener la capacidad de adaptarse a la bidireccionalidad; si es un sistema aislado se debe tener en cuenta que los niveles de corriente de falla disminuyen puesto que el rango de potencia de los generadores es menor.

Por otra parte, las protecciones de la microrred ser flexible ya que tanto las cargas como los sistemas de generación distribuidos pueden ser desconectados en cualquier momento, lo cual genera un cambio ya sea en las direcciones de la corriente o en sus límites. El sistema de puesta a tierra debe tener en cuenta dichas variaciones además de los dos modos de operación de la microrred (Planas Fullaondo, 2012).

Para el caso de estudio se dimensionó un sistema de protección contra sobre intensidades generadas ya sea por sobrecargas o por cortocircuitos que se puedan producir en la microrred; para tal dimensionamiento fue necesario realizar el cálculo de las corrientes de falla, el cual se realizó mediante la herramienta de software (*ETAP DEMO*, 2014) y se muestra en el **Apéndice Q**.

5.1 Sistema de protección contra sobreintensidades DC

La microrred a pesar de tener una topología de corriente alterna AC, presenta generación distribuida en corriente directa DC, lo cual implica un esquema de protección para dichos sectores.

En ese sentido, las protecciones utilizadas con mayor frecuencia son: relés de sobre corriente, fusibles y diodos de bloqueo. Los equipos de control y generación utilizados en los tramos de DC contienen este tipo de protecciones internamente, por lo cual no se ahondará en su descripción.

5.2 Sistema de protección contra sobreintensidades AC

Las protecciones eléctricas del sistema se ubicaron de manera tal que las fallas puedan ser despejadas con la mayor velocidad posible y generando el menor impacto para la microrred; cabe resaltar que es necesario tener en cuenta que la microrred presenta múltiples fuentes de generación

distribuida, por lo cual es necesario analizar los casos críticos a la hora de realizar el dimensionamiento. El diagrama unifilar de las protecciones eléctricas se presenta en el diagrama unifilar general de la microrred, el cual se muestra en la **Figura 42**.

A su vez, las protecciones seleccionadas se presentan en la **Tabla 26**, junto con sus características fundamentales de selección tales como tensión de operación, talla, corriente de operación, etc.

Tabla 26.

Características principales de las protecciones eléctricas de la microrred

IDENTIFICACIÓN	LOCALIZACIÓN	POLOS	TENSIÓN [V]	TAMAÑO [A]	REFERENCIA
IntAC_1	Protección bus 1	1	220	50	ABB S200-B
IntAC_2	Protección bus 1	1	220	50	ABB S200-B
IntAC_3	Protección bus 1	1	220	50	ABB S200-B
IntAC_4	Protección cargas	1	220/127	25	ABB S800-B
IntAC_5	Protección cargas	1	220/127	25	ABB S800-B
IntAC_6	Protección cargas	1	220/127	25	ABB S800-B
IntAC_7	Protección cargas	1	220/127	25	ABB S800-B
IntAC_8	Protección Interconexión barras	3	220	50	ABB S200-D
IntAC_9	Protección Interconexión barras	3	220	50	ABB S200-D
IntAC_10	Protección cargas	3	220	50	ABB S800-B
IntAC_11	Protección Interconexión cargas	3	220	40	ABB S200-B
IntAC_12	Protección cargas	3	220	50	ABB S800-B
IntAC_13	Protección cargas	1	220/127	25	ABB S800-B
IntAC_14	Protección bus 2	3	220	50	ABB S200-B
IntAC_15	Protección Interconexión generación	3	220	25	ABB S200-K
IntAC_16	Protección controlador de generación	3	220	25	ABB S200-K
IntAC_17	Protección transformador	3	220	25	ABB S200-K
IntAC_18	Protección transformador	3	220	25	ABB S200-K
IntAC_19	Protección generación	3	220	25	ABB S200-K
IntAC_20	Protección controlador de baterías	3	220	32	ABB S200-K
IntAC_21	Protección controlador de baterías	3	220	32	ABB S200-K
IntAC_22	Protección grupo electrógeno	3	220	63	ABB S800-C
IntAC_23	Protección bus 2	3	220	63	ABB S800-B

5.3 Coordinación de protecciones

La coordinación del sistema de protecciones eléctricas es necesaria para garantizar que el sistema sea confiable y para ello no genere disparos indeseados y mucho menos omisiones de disparo; a su vez, es importante que dicho sistema sea selectivo, de manera que se pueda mantener la continuidad del suministro, desconectando la mínima porción de circuito para aislar la falla.

Para realizar la coordinación de los dispositivos de protección es necesario conocer sus curvas características, corriente contra tiempo, además de las corrientes de falla máximas que percibirán los mismos.

En el caso de estudio se utilizó el software (*ETAP DEMO*, 2014) para realizar la coordinación de protecciones, puesto que éste incluye las curvas características de los dispositivos comerciales más reconocidos; en dicho programa se simularon fallas en las secciones más importantes de la microrred bajo diversas condiciones, para lo cual se obtuvo la curva de selectividad, la secuencia y tiempo de disparo. Los puntos en los cuales se realizó la simulación se muestran en la **Tabla 27**.

Tabla 27.
Caracterización de las fallas simuladas

UBICACIÓN	TIPO DE FALLA	TIPO DE OPERACIÓN
Barraje 1	L-L-L	Normal
Barraje 2	L-L-L	Normal
Barraje 2	L-L-L	Contingencia
Barraje de generación	L-L-L	Normal
Barraje de carga industrial (Trapiche)	L-L-L	Normal
Barraje de carga residencia (Casa principal)	L-L-L	Normal

Teniendo en cuenta que se utilizó la versión demo del software, no fue posible incluir los ejecutables de la simulación; sin embargo, los resultados de estas se muestran en el **Apéndice Q**.

5.4 Sistema de puesta a tierra y protección contra rayos

Toda instalación eléctrica debe contemplar en su diseño sistemas de protección que permitan realizar el despeje de fallas en el menor tiempo posible causadas por sobrecorrientes, debido a maniobras de operación y fallas en la red, o sobretensiones que se puedan presentar en redes eléctricas, cableado de comunicación y equipos, por impacto directo o acoplamiento capacitivo de descargas atmosféricas; así mismo, limitar las tensiones que dichas descargas generen y por supuesto, mantener estable la tensión a tierra durante su operación normal. Los sistemas encargados de tal función son el sistema de puesta a tierra y el sistema de apantallamiento o sistema integral de protección contra rayos (SIPRA) que contempla como parte fundamental un sistema de puesta a tierra propio, el cual debe estar interconectado equipotencialmente con el fin de evitar elevación de potenciales entre las dos puestas a tierra y cumplir con los máximos valores permitidos en parámetros como tensiones de paso, tensiones de contacto y transferencias aplicadas en caso de falla a tierra, los cuales surgen a partir de valores tolerables para el ser humano.

El diseño del sistema de puesta a tierra para cada componente de la microrred es independiente y estará ajustada a la potencia consumida en cada punto en el que se encuentran ubicadas las instalaciones de uso final, así como a la potencia que se produce en cada punto de generación distribuida, sin dejar de lado la conexión a tierra del sistema distribución que interconecta la microrred. En razón a que la resistencia de puesta a tierra es un indicador que limita directamente la máxima elevación de potencial y controla las tensiones transferidas, pueden tomarse como referencia los siguientes valores máximos de RPT adoptados de la norma (*RETIE*, 2013) mostrados en la **Tabla 28**.

Tabla 28.

Valores de referencia para valores para resistencia de puesta a tierra

APLICACIÓN	VALORES DE MÁXIMOS DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA
Estructuras y torrecillas metálicas de líneas o redes con cable de guarda	20 [Ω]
Subestación de alta y extra alta tensión.	1 [Ω]
Subestación de media tensión.	10 [Ω]
Protección contra Rayos.	10 [Ω]
Punto neutro de acometida en baja tensión	25 [Ω]
Redes para equipos electrónicos o sensibles	10 [Ω]

Nota. Adaptado del anexo general del RETIE resolución 9 0708 de agosto 30 de 2013.

En cuestión de apantallamiento, vale la pena conocer a modo de contexto que la descarga atmosférica o más comúnmente conocida como rayo es un fenómeno meteorológico de origen natural. De acuerdo con investigaciones científicas realizadas en Colombia en las últimas décadas, lideradas por la Universidad Nacional de Colombia y en cabeza del investigador Horacio Torres Sánchez, se concluye que los parámetros del rayo son variables espacial y temporalmente. Colombia por estar situada en zona de influencia intertropical, presenta una de las mayores actividades de descargas atmosféricas en el planeta, y mucho más específicamente en la zona para la cual se plantea el diseño propuesto; de allí la importancia de una adecuada protección contra dicho fenómeno, pues si bien los métodos desarrollados a nivel mundial se pueden aplicar, algunos parámetros del rayo son particulares para esta zona; dichos parámetros se encuentran enmarcados en un rango fijo de condiciones máximas y mínimas que no se pueden exceder en el momento que ocurra la descarga, una adecuada evaluación de riesgo determina el Nivel de Protección (NPR) y a su vez los componentes con los cuales se diseña el (SIPRA). La evaluación del nivel de riesgo por rayos también debe considerar la posibilidad de pérdidas de vidas humanas, pérdida del

suministro de energía y otros servicios esenciales, pérdida o graves daños de bienes, pérdida cultural y las medidas de protección que mitiguen el riesgo; por tanto, el diseño del (SIPRA) para el presente diseño debe basarse en procedimientos establecidos en normas técnicas acreditadas como la (*Norma Técnica Colombiana, 2008*).

Por otro lado, es importante aclarar que la puesta a tierra para el sistema de apantallamiento debe cumplir con los requisitos que le apliquen del (*RETIE, 2013*), especialmente en cuanto a materiales e interconexión. La configuración debe hacerse con electrodos horizontales (contrapesos), verticales o una combinación de ambos. Un componente fundamental del SIPRA es el supresor de picos, para el diseño se proponen DPS tipo uno para la protección del sistema de distribución, barrajes, puntos de conexión de los sistemas de generación y los puntos de conexión de cargas, los cuales protegen impactos directos con magnitud superior a 100 kA 2,5 MJ/ Ω , (Duran Jaimes, s. f.)

6. Conclusiones

Se realizó un análisis de la demanda de energía existente y proyectada. A nivel industrial se hizo trabajo de campo en el cual se recolectaron datos de los procesos de producción y características de los equipos involucrados en los proyectos productivos; asimismo, la demanda residencial se determinó a partir de la normativa propuesta por el operador de red más cercano. Cabe resaltar que se debe realizar un estudio más exhaustivo mediante el uso de equipos de medición de manera que la construcción de la curva de demanda sea precisa.

Se determinó el potencial energético del recurso hídrico, solar fotovoltaico y biomasa. Para determinar el potencial hídrico se realizaron mediciones del caudal de la fuente seleccionada para lo cual se utilizó el método empírico del flotador, que presenta un bajo grado de precisión, siendo los valores obtenidos consistentes con los datos existentes de proyectos previamente desarrollados.

Es necesario realizar un estudio de caudal multianual con equipos de medición que permitan obtener un perfil de potencial más confiable y que garantice su continuidad durante el ciclo de vida del proyecto. Teniendo en cuenta la discontinuidad que se encontró en el caudal, se seleccionó un sistema de velocidad variable, similar a los utilizados en aerogeneradores, como encargado de realizar la transformación de energía mecánica a eléctrica, puesto que éste permite aprovechar el recurso hídrico de la forma más eficiente. Para determinar el potencial del recurso solar se utilizó el perfil típico de una estación meteorológica con características similares a las de la zona, además de datos proporcionados por la NASA. Por otra parte, se determinó el potencial de biomasa mediante un inventario del recurso primario disponible; a pesar de contar con suficiente materia prima, la recolección de la misma representa una dificultad logística no solventable por parte de la administración de “La Bufalera”, razón por la cual, dicho sistema se excluyó del diseño.

A partir del proceso de dimensionamiento se pudo determinar que existe el potencial energético suficiente para solventar la demanda de energía; sin embargo, es necesario trasladar temporalmente la energía excedente de los momentos de mayor generación a los puntos de máxima demanda; con ese fin, fue dimensionado un sistema de almacenamiento que consiste en arreglos de baterías, el cual debido a su estabilidad y característica de compensación de flujos de energía, es seleccionado como alimentador de la barra slack; esta propuesta se soporta en la preexistencia de un grupo electrógeno con la capacidad de suplir el 100% de la carga en cualquier instante y cuya entrada en operación es planteada como medida de contingencia.

Se diseñó la red de distribución con base en la normativa del operador de red más cercano para interconectar los puntos de generación distribuida con los puntos de demanda, contemplando que si en el futuro la red llega a la finca, sea más factible su interconexión al sistema; para este diseño fue necesario realizar un análisis de los puntos críticos de la microrred, teniendo en cuenta que el

sentido de los flujos de energía de ésta varían dependiendo de las condiciones de operación. Adicionalmente se realizó un diseño convencional de las instalaciones de uso final residenciales y comerciales que no se encuentran implementadas en la actualidad. Los diseños planteados son conceptuales, en estos no se especifican detalles como: obras civiles, herrajería, postería, barrajes y todos los accesorios necesarios para la interconexión de los mismos.

Es importante resaltar que a pesar de que se tenía como objetivo seleccionar equipos que permitieran garantizar un control jerárquico secundario, esto no fue necesario puesto que la complejidad del sistema no lo demanda, razón por la cual los equipos de control seleccionados proporcionan un nivel de control primario.

El sistema de protecciones eléctricas se diseñó para las diversas fallas que se pueden presentar en cada uno de los modos de operación de la microrred; este diseño se verificó mediante la coordinación de protecciones asistida por software. Se resalta la necesidad de realizar un estudio detallado del sistema de apantallamiento y puesta a tierra, teniendo en cuenta el alto nivel cerámico de la zona.

Fue posible realizar el diseño conceptual de una microrred para solventar las necesidades de energía eléctrica existentes en la finca “La Bufalera”; sin embargo, es crucial realizar, en una próxima investigación, un diseño detallado que incluya cálculos mecánicos, obras civiles y selección de accesorios eléctricos que permita determinar la viabilidad financiera del proyecto. Se debe tener en cuenta como alternativa la posibilidad de trasladar el punto de conexión más cercano a la red (aproximadamente 3 km), tendido que debe ser asumido por la administración de la finca con sus respectivos costos de mantenimiento y consumo.

Referencias Bibliográficas

- 10kw viento solar controlador de carga para generador de viento con batería solares, cargador solar, clickcells, reguladores, baterías, kits solares y aerogeneradores empresa de fabricación y velocidad función de protección PWM controlador MPPT. (s. f.). Alibaba. Recuperado 15 de noviembre de 2019, de <https://spanish.alibaba.com/product-detail/10kw-solar-wind-charge-controller-for-wind-generator-with-battery-solar-wind-speed-protection-function-pwm-mppt-controller-60735657898.html?spm=a2700.galleryofferlist.0.0.41305d946QmiNY>
- Alberto Mejia, J. C. (2011). Diseño de una turbina hidráulica basada en el tornillo de arquímedes. Universidad de El Salvador.
- Atlas Climatológico, Radiación y viento. (2018). IDEAM. <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasClimatologico.html>
- Balaguera, L. F. R., & Ojeda, D. F. B. (2017). Potencial energético de la biomasa residual pecuaria del departamento de cundinamarca – colombia. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Batería gel de 200 Ah. (s. f.). Ecosol. Recuperado 10 de octubre de 2019, de <http://ecosol.co/ecosol/index.php/bater%C3%ADa-de-gel-de-200ah,-descarga-profunda-detail?tmpl=component&format=pdf>
- Cable ecológico semiaislado. (s. f.). Nexans. Recuperado 15 de marzo de 2020, de https://www.nexans.co/eservice/Colombia-es_CO/pdf-family_25213/Cable_Ecol_gico_Semiaislado.pdf
- Catálogo transformadores de distribución. (s. f.). Rymel. Recuperado 12 de marzo de 2020, de <http://www.rymel.com.co/CatalogoRymel.pdf>

Código de medida (N.º 038; p. 65). (2014). Comisión de regulación de energía y gas (CREG).

<http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/0131f064219>

[2a5a205257cd800728c5e/\\$FILE/Creg038-2014.pdf](http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/0131f0642192a5a205257cd800728c5e/$FILE/Creg038-2014.pdf)

Código Eléctrico Colombiano (p. 1020). (1998). Icontec.

de Alaminos, J., Alcor, E., Asensio, M., Bernardó, R., Fernández, L., & Gómez, E. (2014). Estudio

sobre las Microrredes y su aplicación a proyectos de electrificación de zonas rurales

aisladas (p. 124) [Académico]. Energía Sin Fronteras.

Duran Jaimes, P. (s. f.). Supresor de picos eléctrico. eBooks, electropol. Recuperado 17 de marzo

de 2020, de [https://www.electropol.com.co/blog/serie-e-books-supresor-de-picos-](https://www.electropol.com.co/blog/serie-e-books-supresor-de-picos-electrico-todo-lo-que-necesitas-saber/)

[electrico-todo-lo-que-necesitas-saber/](https://www.electropol.com.co/blog/serie-e-books-supresor-de-picos-electrico-todo-lo-que-necesitas-saber/)

Erinofiard, Nuramal, A., Bismantolo, P., Date, A., Akbarzadeh, A., Mainil, A. K., & Suryono, A.

F. (2017). Experimental Study of Screw Turbine Performance based on Different Angle of

Inclination. Energy Procedia, 110, 8-13. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.094>

Actualización de la adenda modificatoria a la norma para cálculo y diseño de sistemas de

distribución de la Electrificadora De Santander S.A ESP., 19 (2014).

Estados Unidos, & Agencia para el Desarrollo Internacional. (2017). Programa de energía limpia

para Colombia: 2012-2017 (p. 356). USAID.

ETAP DEMO (Versión 12.6.0). (2014). [Microsoft Windows]. ETAP®. <https://etap.com>

Fernández Piegari, M. (2010). Abastecimiento Sustentable De Energía A Regiones Rurales

Aisladas. Análisis De Generación De Energía Hidroeléctrica De Paso Utilizando Un

Tornillo De Arquímedes. Instituto Tecnológico de Buenos Aires.

Ficha técnica medidor básico MT-174. (s. f.). Inelca. Recuperado 29 de abril de 2020, de

<http://inelca.com.co/wp-content/uploads/2016/10/CATALOGO-MT-174.pdf>

Filedist. (2012). [Microsoft Windows]. Censolar. <https://www.censolar.org/>

Garzón Hidalgo, J. D., & Saavedra Montes, A. J. (2017). Una metodología de diseño de micro redes para zonas no interconectadas de Colombia. *TecnoLógicas*, 20(39), 39-53. <https://doi.org/10.22430/22565337.687>

Generador de turbina hidráulica de 10kW y 60 rpm, generador de imán permanente trifásico CA. (s. f.). Alibaba. Recuperado 15 de noviembre de 2019, de https://spanish.alibaba.com/product-detail/10kw-60rpm-low-rpm-hydro-turbine-generator-three-phase-ac-permanent-magnet-generator-60677907372.html?spm=a2700.md_es_ES.deiletai6.4.5a695e9dR4gpio

Google Earth Pro (Versión 7.3). (2020). [Microsoft Windows]. Google. <https://www.google.com/intl/es/earth/>

IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems. (s. f.). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2003.94285>

IEEE Standard for the Specification of Microgrid Controllers. (2020). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2018.8340204>

Inversor/cargador Quattro. (s. f.). Victron energy. Recuperado 15 de octubre de 2019, de <https://www.victronenergy.com/es/upload/documents/Datasheet-Quattro-3kVA-15kVA-ES.pdf>

Jia, L., Zhu, Y., & Wang, Y. (2015). Architecture design for new AC-DC hybrid micro-grid. 2015 IEEE First International Conference on DC Microgrids (ICDCM), 113-118. <https://doi.org/10.1109/ICDCM.2015.7152020>

- López, J. M. R., & Barrios, P. P. V. (2012). Diseño de una microred de baja tensión para el laboratorio de integración energética del parque tecnológico de Guatiguará. Universidad Industrial de Santander.
- Lubitz, W. D., Lyons, M., & Simmons, S. (2014). Performance Model of Archimedes Screw Hydro Turbines with Variable Fill Level. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(10), 04014050. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000922](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000922)
- Manna, D., & Goswami, S. K. (2017). *Micro-Grid Operation and Control*. 7.
- MATLAB (2017b). (2019). [Java]. MathWorks. https://es.mathworks.com/?s_tid=gn_logo
- Mirsaeidi, S., Mat Said, D., Wazir Mustafa, Mohd., Hafiz Habibuddin, Mohd., & Ghaffari, K. (2014). Progress and problems in micro-grid protection schemes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, 834-839. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.044>
- Munteanu, I., Bratcu, A. I., Cutululis, N.-A., & Ceangă, E. (2008). *Optimal Control of Wind Energy Systems*. Springer London. <https://doi.org/10.1007/978-1-84800-080-3>
- Norma Técnica Colombiana. (2008). ICONTEC.
- Normas para el cálculo y diseño de sistemas de distribución (Norma N.º 3; Número 3, p. 181). (2005). ESSA.
- Nuernbergk, D. M. (2012). Entwurfsfluss für Wasserkraftschnecken. 22.
- Panel Solar 350 Watts Seraphim Half Cell. (s. f.). Solartex. Recuperado 7 de octubre de 2019, de https://www.solartex.co/tienda/wp-content/uploads/2019/06/Panel_blade_Seraphim_Mono_340wp-355wpHalfcell.pdf
- Perea, E., Oyarzabal, J. M., & Rodríguez, R. (2008). Definition, evolution, applications and barriers for deployment of microgrids in the energy sector. *E & i Elektrotechnik Und Informationstechnik*, 125(12), 432-437. <https://doi.org/10.1007/s00502-008-0595-z>

- Pérez Fernández, P. (2017). Descripción E Infraestructura De Una Microrred Para Un Entorno Residencial. Universidad de Valladolid.
- Planas Fullaondo, E. (2012). Aportaciones al diseño del control jerárquico de microrredes eléctricas [Doctoral]. Universidad del País Vasco.
- Quiroz Marchant, H., & de la Cerda, C. (s. f.). Generación de Energía Eléctrica. En Curso de Formación Especializada en Biogás para Profesionales (p. 28).
- Ramírez Castaño, S. (s. f.). Redes de Distribución de Energía.
- Ramírez Castaño, S. (2003). Protección de sistemas eléctricos (Primera, Primera) [Computer software].
- Raza, A., Xu, D., Mian, M. S., & Ahmed, J. (2013). A micro hydro power plant for distributed generation using municipal water waste with archimedes screw. INMIC, 66-71. <https://doi.org/10.1109/INMIC.2013.6731326>
- Reglamento técnico de instalaciones eléctricas (RETIIE). (2013).
- Ritz Atro. (2005). Archimedean screw pumps. <http://www.schleich-burckhardt.de/issue/>
- Rohmer, J., Sturtzer, G., Knittel, D., Flieller, D., & Renaud, J. (2015). Dynamic model of small hydro plant using archimedes screw. 2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), 987-992. <https://doi.org/10.1109/ICIT.2015.7125226>
- Rorres, C. (2000). The Turn of the Screw: Optimal Design of an Archimedes Screw. Journal of Hydraulic Engineering, 126(1), 72-80. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2000\)126:1\(72\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2000)126:1(72))
- Simmons y Lubitz—2017—Archimedes screw generators for sustainable energy.pdf. (s. f.).
- Tres fase Ginlong inversor puro de la onda sinusoidal del 10kW en la red de la turbina de viento con certificado UL. (s. f.). Alibaba. Recuperado 15 de noviembre de 2019, de

https://spanish.alibaba.com/product-detail/three-phase-ginlong-pure-sine-wave-inverter-10kw-on-grid-wind-turbine-inverter-with-ul-certificate-60755246036.html?spm=a2700.md_es_ES.deiletai6.4.368f178c1uwlho

Typical Archimedean Screw hydro turbine efficiency curve. (2017, marzo 13). Renewable First.

<https://www.renewablesfirst.co.uk/hydropower/hydropower-learning-centre/archimedean-screw-hydro-turbine/attachment/fdc-3/>

Vaccarone, S. (2016). Modellizzazione Di Sistemi Off-Grid Per L'elettrificazione Di Processi Produttivi In Zone Rurali: Analisi energetico-economica e dimensionamento della filiera casearia di Puerto Matilde, Colombia. Politecnico di Milano.

Vargas, A. I. C., & Segura, J. D. L. (2017). Diseño E Implementación De Una Microrred En La Universidad Distrital Francisco José De Caldas Sede De Ingeniería. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Vega De Kuyper, J. C., & Ramirez Morales, S. (2014). Fuentes de energía, renovables y no renovables. Aplicaciones. Alfaomega.

Wahyudi, B., Faizin, A., & Soeparman, S. (2013). Increasing Efficiency of Overshot Waterwheel with Overflow Keeper Double Nozzle (OKDN) by Using Hydraulic Ram System. Applied Mechanics and Materials, 330, 209-213.

<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.330.209>

Zaman, A., & Khan, T. (2012). Design of a Water Wheel For a Low Head Micro Hydropower System. 7.

Apéndices

Apéndice A. Caracterización de la demanda

Este apéndice se encuentra adjunto en el CD y puede visualizarlos en base de datos de la biblioteca UIS.

Apéndice B. Cálculo caudal

Este apéndice se encuentra adjunto en el CD y puede visualizarlos en base de datos de la biblioteca UIS.

Apéndice C. Generación

Este apéndice se encuentra adjunto en el CD y puede visualizarlos en base de datos de la biblioteca UIS.

Apéndice D. Dimensionamiento

Este apéndice se encuentra adjunto en el CD y puede visualizarlos en base de datos de la biblioteca UIS.

Apéndice E. Caracterización de la demanda seca

Este apéndice se encuentra adjunto en el CD y puede visualizarlos en base de datos de la biblioteca UIS.

Apéndice F. Caracterización de la demanda lluvia

Este apéndice se encuentra adjunto en el CD y puede visualizarlos en base de datos de la biblioteca UIS.

Apéndice G. Generación seca

Este apéndice se encuentra adjunto en el CD y puede visualizarlos en base de datos de la biblioteca UIS.

Apéndice H. Generación lluvia

Este apéndice se encuentra adjunto en el CD y puede visualizarlos en base de datos de la biblioteca UIS.

Apéndice I. Dimensionamiento seca

Este apéndice se encuentra adjunto en el CD y puede visualizarlos en base de datos de la biblioteca UIS.

Apéndice J. Dimensionamiento lluvia

Este apéndice se encuentra adjunto en el CD y puede visualizarlos en base de datos de la biblioteca UIS.

Apéndice K. Código modelado hidrotornillo

Este apéndice se encuentra adjunto en el CD y puede visualizarlos en base de datos de la biblioteca UIS.

Apéndice L. Catálogos equipos seleccionados

L1. Catálogo Turbina sistema hidroeléctrico.

El catálogo de la turbina fue obtenido de (Ritz Atro, 2005).

Selection table

This table gives a rough idea of the attainable capacities in relation to diameter and angle of installation. The above figures are meant as a planning guide only. Intermediate angles between 30° and 40° are possible. Exact values for any specific project have to be

determined individually since the output of the screw pump is related to the diameter of the helix and centre tube, inclination, also number and pitch of Helices.

μ	30°	H ₂	35°	H ₂	38°	H ₂
[mm]	Q [l/s]	SP - TP [m]	Q [l/s]	SP - TP [m]	Q [l/s]	SP - TP [m]
400	27	3,4	22	3,8	19	4,2
500	46	3,65	38	4,2	33	4,5
600	69	4,4	57	5,05	45	5,4
700	103	4,4	85	5,05	73	5,4
800	138	4,15	114	4,8	93	5,1
900	183	5,65	151	6,5	131	6,95
1000	239	5,4	197	6,2	170	6,65
1100	276	6,9	227	7,9	194	8,5
1200	347	6,9	286	7,9	248	8,5
1300	432	6,65	356	7,6	309	8,2
1400	524	6,65	431	7,6	372	8,2
1500	606	6,65	499	7,6	431	8,2
1600	704	6,4	581	7,35	502	7,9
1700	808	7,65	666	8,8	579	9,4
1800	947	7,4	779	8,5	673	9,1
1900	1074	7,4	884	8,5	763	9,1
2000	1160	7,4	957	8,5	826	9,1
2100	1320	7,5	1087	9,1	937	9,7
2200	1498	7,5	1236	9,1	1067	9,7
2300	1635	7,4	1349	8,5	1167	9,1
2400	1848	8,9	1521	10,2	1314	11,0
2500	2010	8,9	1645	10,2	1426	11,0
2600	2153	8,9	1774	10,2	1531	11,0
2700	2421	9,4	1995	10,8	1728	11,6
2800	2640	9,4	2172	10,8	1875	11,6
2900	2860	9,15	2354	10,5	2029	11,3
3000	3065	9,15	2525	10,5	2179	11,3

L2. Catálogo Generador sistema hidroeléctrico.

El catálogo de generador eléctrico fue tomado de (*Generador de turbina hidráulica de 10kW y 60 rpm, generador de imán permanente trifásico CA, s. f.*)



Modelo	GDF-280
Potencia nominal	10kW
Nominal velocidad de rotación	60 rpm
Tensión nominal	220VAC
A par	23.8N.M
Par nominal	1615.5N.M
Wending método	Y
Tipo de generador	Imán permanente AC
Número de la fase	Tres fase
Peso	680 KG
Clasificación de grados	IP54
Generador de material de la carcasa	De acero

L3. Catálogo Controlador sistema hidroeléctrico.

El catálogo del controlador para el sistema hidroeléctrico fue tomado de (*10kw viento solar controlador de carga para generador de viento con batería solares, cargador solar, clickcells, reguladores, baterías, kits solares y aerogeneradores empresa de fabricación y velocidad función de protección PWM controlador MPPT, s. f.*)



Especificación del controlador híbrido solar/eólica de 10KW

Modelo	WWS100-120	WWS100-220	WWS100-240
Voltaje nominal de la batería	120 V	220 V	220 V
Potencia nominal de entrada de turbina de viento	10KW	10KW	10KW
Potencia de entrada de turbina eólica máxima	15KW	15KW	15KW
Turbina de viento de freno actual	84A	46A	42A
Energía de entrada solar clasificada	3KW	3KW	3KW
Cargo de cierre de tensión	145 V	266 V	290 V
Modo de visualización	LCD		
Genial el modo	Ventilador		
Corriente de reposo	Menos que 20mA		
Inversa protección de la batería	Dispositivo de protección anti-conexión inversa en el interior del controlador.		
Circuito abierto de protección	El controlador no se desmagnará si la batería está en circuito abierto.		
Protección Solar anticarga	La batería no carga la tabla PV al revés.		
Protección Solar anti-reversa	El controlador no se dañará cuando el PV esté conectado al reverso.		
De freno Manual	Generador de viento dejar de girar o desacelerar el giro		
Protección contra rayos	Protección contra rayos en el interior del controlador.		
Clase de protección	IP20 (Interior)		
Resistencia de aislamiento	Resistencia entre la entrada CC/ca y la carcasa: más de 50 Mu		
Los parámetros del sistema			
Rango de temperatura ambiente y humedad	-20 ~ + 55°C/35 ~ 85% RH (sin condensación)		
Altitud	A menos de 4000 m		
Dimensiones (largo x ancho x Alto)	Controlador: 440 × 300 × 170mm; caja de descarga: 520 × 430 × 675mm		
Peso neto	Controlador: 9 kg; caja de carga de descarga: 45 kg		
Para servir mejor a nuestros clientes. Nuestra empresa puede ajustar la configuración de los parámetros según los requisitos del cliente.			

L4. Catálogo Inversor sistema hidroeléctrico.

El catálogo del inversor para el sistema hidroeléctrico fue tomado de (*Tres fase Ginlong inversor puro de la onda sinusoidal del 10kW en la red de la turbina de viento con certificado UL, s. f.*).



Detalles rápidos

Lugar del origen:	Shandong, China	Marca:	GINLONG
Número de Modelo:	GCI	Potencia de salida:	3kW 5kW 10kW
Voltaje de entrada:	30-400 V (ajustable)	Voltaje de salida:	180-270Vac (ajustable)
Tipo:	Inversores DC/AC	Tipo de salida:	Dual
Corriente de salida:	Ajustable	Frecuencia de sali...	50/60Hz
Talla:	339*565*164	Peso:	30 kg
Protección de pol...	Sí	AC shor protecció...	Sí
Salida de CA prote...	Sí	Protección contra ...	Sí
Suelo de monitori...	Sí	Monitorización de ...	Sí
Antiisla protección:	Sí	Protección de la t...	Sí
Integrado DC inter...	Opcion	Mppt la eficiencia:	> 99.9%

Modelo	GCI-3K-2G-W	GCI-5K-2G-W	GCI-10K-W
Fuente de energía	Energía de Viento		
Potencia de salida	3kW	5kW	10kW
Max poder transitorio	3.3kW	5.5kW	11kW
Voltaje de entrada máx.	600V		1000V
El modo MPPT	Seguimiento de curva de potencia para el viento		
MPPT rango de funcionamiento	30 ~ 540Vdc		30 ~ 810Vdc
Corriente de entrada máx. Cr	20A	25A	30A
Número de cuerdas MPPT/Max por MPPT	1/1		
El consumo interno	<6W (sin viento)		

L5. Catálogo paneles fotovoltaicos.

El catálogo de los paneles fotovoltaicos fue tomado de (*Panel Solar 350 Watts Seraphim Half Cell*, s. f.)



-HV SRP-XXX-BMA : Tensión máxima del sistema 1000VDC
 SRP-XXX-BMA-HV : Tensión máxima del sistema 1500VDC

Parámetro de rendimiento eléctrico

Modelo del módulo	SRP-340-BMA SRP-340-BMA-HV	SRP-345-BMA SRP-345-BMA-HV	SRP-350-BMA SRP-350-BMA-HV	SRP-355-BMA SRP-355-BMA-HV
	STC	STC	STC	STC
Potencia máxima -P _{mp} (W)	340	345	350	355
Tensión del circuito abierto -V _{oc} (V)	46.0	46.3	46.6	46.9
Corriente de cortocircuito -I _{sc} (A)	9.32	9.37	9.42	9.47
Tensión en la potencia máxima -V _{mp} (V)	38.4	38.7	39.0	39.3
Corriente en la potencia máxima -I _{mp} (A)	8.86	8.92	8.98	9.03
Eficiencia del módulo -η _m (%)	17.17	17.42	17.68	17.93
Tolerancia de potencia (W)	(0,+4.99)			
Tensión máxima del sistema(V)	1000 VDC / 1500 VDC			
Corriente nominal máximo de fusión (A)	20A			

STC: fuerza solar de 1000W/m², temperatura del módulo de 25°C, calidad de la atmósfera de 1.5, tolerancia de pruebas de potencia: ±3%

Característica de temperatura

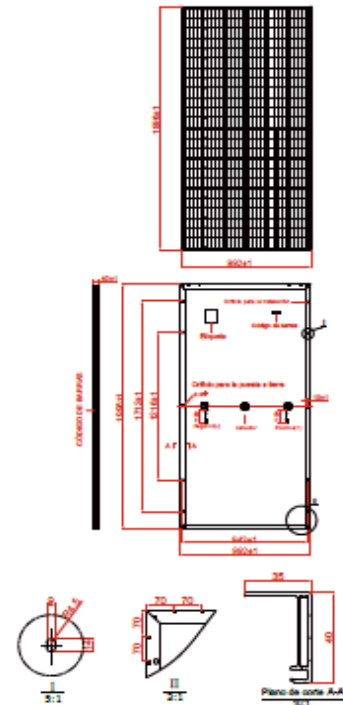
Coefficiente de temperatura na potencia máx.	-0.38 %/°C
Coefficiente de temperatura de voltaje de circuito abierto	-0.28 %/°C
Coefficiente de temperatura de corriente de curto-circuito	+0.05 %/°C
Temperatura de trabalho	-40 ~ +85 °C
Temperatura nominal da batería de trabalho	45±2 °C

Parámetro estructural

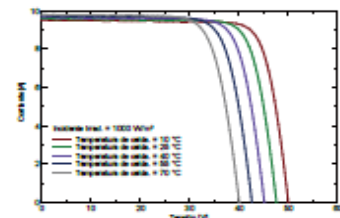
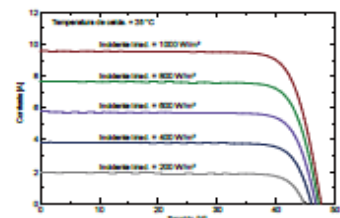
Dimensión del módulo	1996x 992x 40 mm
Peso	22.5kg
Celda	Monocrystal
Vidrio	3.2mm Revestimiento de vidrio templado, con bajo contenido de hierro
Marco	Aleación de aluminio anodizado
Caja de conexión	IP67
Conductor de salida	4.0 mm ² , Longitud: 1100mm
Conector	Compartido MC4
Carga mecánica	5400 Pa

Forma de embalaje

	1996x 992x 40 mm	
Contenedor	20'GP	40'GP
Cantidad por pallet	27	27
Cantidad de pallet por contenedor	10	22
Cantidad por contenedor	270	594



I-V Curva (SRP-355-BMA(-HV))



L6. Catálogo inversor sistema fotovoltaico.

El catálogo correspondiente al inversor del sistema fotovoltaico es el correspondiente al inversor del sistema hidroeléctrico y fue tomado de (*Tres fase Ginlong inversor puro de la onda sinusoidal del 10kW en la red de la turbina de viento con certificado UL, s. f.*)

L7. Catálogo de baterías.


El catálogo de las baterías fue tomado de (*Batería gel de 200 Ah, s. f.*)

EPBLUE®

DG Series

Maintenance-free Sealed Lead Acid Battery

DG Series Batteries For Solar Powered Systems Application.



1. Brief Introduction for DG Series Batteries

The EPBLUE® DG Series Maintenance-free Sealed Lead Acid Battery should be used for solar systems, street lights and related storage energy fields, using fumed silicon dioxide electrolyte, via high-speed mixing and vacuum liquid injection equipment into battery, evenly distributed, no layering and leakage. Capacity is large, heat-resistant property is good and maintenance free, gas recombination efficiency is higher than 95%, superior cycle performance and deep discharge recovery, long service life. In the course of normal float use, capacity is stable and decay rates is low, suitable for use in hot and harsh environment.

2. Construction for DG Series Batteries

Component	Raw material
Positive Plate	Lead dioxide
Negative Plate	Lead
Container & Cover	ABS UL94HB/VD
Safety Valve	Rubber
Terminal	Copper /F34/ Lead / F16
Separator	Fiberglass
Electrolyte	Fumed Silicon Dioxide Electrolyte

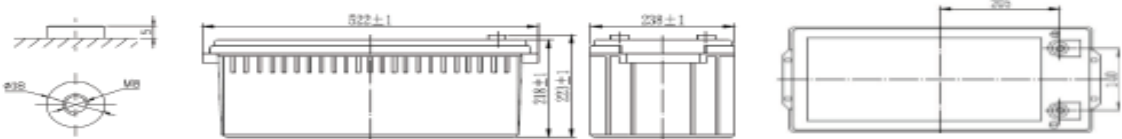
3. Specifications

Nominal Voltage	12 Volt		
Nominal Capacity (20HR)	200 Ah		
Dimension	Length	522 mm	20.6 in
	Width	238 mm	9.4 in
	Height	218 mm	8.6 in
	Total Height (with terminals)	223 mm	8.8 in
Weight	Approx.	61 kg	134 lbs

4. Characteristics

Rated Capacity 25°C (77°F)	C ₂₀ 1.80V/Cell	200 Ah
	C ₁₀ 1.80V/Cell	186 Ah
	C ₅ 1.80V/Cell	168 Ah
	C ₁ 1.70V/Cell	120 Ah
Capacity Affected by Temperature (20 HR)	40°C (104°F)	103%
	25°C (77°F)	100%
	0°C (32°F)	86%
Internal Resistance	3.2 mΩ	
Max. Discharge Current 25°C (77°F)	2000 A (3S)	
Nominal Operating Temperature Range	25 ± 3°C (77 ± 3°F)	
Operating Temperature Range	Discharge: -15 ~ 60°C (5 ~ 140°F)	
	Charge: 0 ~ 50°C (32 ~ 122°F)	
	Storage: -15 ~ 60°C (5 ~ 140°F)	
Cycle Use	Initial charging current less than 0.3CA. Voltage 14.40V ~ 14.70V at 25°C (77°F) temperature coefficient -13mV/°C.	
Standby Use	No limit on initial charging current, Voltage 13.50V ~ 13.80V at 25°C (77°F) temperature coefficient -10mV/°C.	
Self Discharge	The EPBLUE® DG Series batteries may be stored for up to 6 months at 25°C (77°F), and then a freshening charge is required. For higher temperatures the time interval will be shorter.	

5. Physical Dimensions: mm



6. Constant Current Discharge (Amperes) at 25°C

F.V/Time	5Min	15Min	30Min	1Hr	2Hr	3Hr	5Hr	8Hr	10Hr	20Hr
9.60V	476.4	273.6	183.40	116.60	70.20	50.79	34.42	23.31	19.36	10.61
10.0V	462.6	268.0	181.80	116.10	69.67	50.39	34.22	23.12	19.17	10.42
10.2V	448.9	263.8	180.70	115.00	69.15	50.20	34.02	22.90	18.98	10.22
10.5V	407.8	254.1	177.90	113.90	68.62	50.01	33.61	22.75	18.80	10.00
10.8V	372.4	237.0	171.70	110.00	67.39	48.65	32.79	21.84	18.20	9.50
11.1V	321.6	215.0	162.40	104.50	64.40	46.50	31.38	20.91	17.66	8.94

7. Constant Power Discharge (Watts) at 25°C

F.V/Time	5Min	15Min	30Min	1Hr	2Hr	3Hr	5Hr	8Hr	10Hr	20Hr
9.60V	4927	3020	2091	1347	827.4	605.90	410.60	278.40	231.90	127.20
10.0V	4830	2962	2083	1344	823.1	604.80	409.60	277.00	229.00	125.00
10.2V	4779	2928	2072	1334	818.1	601.90	408.20	275.20	227.80	122.70
10.5V	4398	2826	2044	1322	812.2	599.60	405.30	272.90	225.60	120.40
10.8V	4052	2643	1978	1284	801.8	583.30	395.40	262.10	218.50	113.90
11.1V	3600	2406	1876	1229	772.0	558.10	376.50	251.00	211.90	107.20

L8. Catálogo controlador-inversor de carga.

El catálogo del controlador de carga de las baterías fue tomado de (*Inversor/cargador Quattro*, s. f.).

Inversor/cargador Quattro
 3kVA - 15kVA compatible con baterías de Lítio-Ion www.victronenergy.com



Quattro
48/5000/70-100/100

Dos entradas CA con conmutador de transferencia integrado
 El Quattro puede conectarse a dos fuentes de alimentación CA independientes, por ejemplo a la toma de puerto o a un generador, o a dos generadores. Se conectará automáticamente a la fuente de alimentación activa.

Dos salidas CA
 La salida principal dispone de la funcionalidad "no-break" (sin interrupción). El Quattro se encarga del suministro a las cargas conectadas en caso de apagón o de desconexión de la toma de puerto/generador. Esto ocurre tan rápidamente (menos de 20 milisegundos) que los ordenadores y demás equipos electrónicos continúan funcionando sin interrupción.
 La segunda salida sólo está activa cuando una de las entradas del Quattro tiene alimentación CA. A esta salida se pueden conectar aparatos que no deberían descargar la batería, como un calentador de agua, por ejemplo.

Potencia prácticamente ilimitada gracias al funcionamiento en paralelo
 Hasta 6 unidades Quattro pueden funcionar en paralelo. Seis unidades 48/10000/140, por ejemplo, darán una potencia de salida de 48kW / 60kVA y una capacidad de carga de 840 amperios.

Capacidad de funcionamiento trifásico
 Se pueden configurar tres unidades para salida trifásica. Pero eso no es todo: hasta 6 grupos de tres unidades pueden conectarse en paralelo para lograr una potencia del inversor de 144 kW/180 kVA y más de 2500 A de capacidad de carga.

PowerControl - En caso de potencia limitada del generador, de la toma de puerto o de la red
 El Quattro es un cargador de baterías muy potente. Por lo tanto, usará mucha corriente del generador o de la toma de puerto (hasta 16 A por cada Quattro de 5 kVA a 230 VCA). Se puede establecer un límite de corriente para cada una de las entradas CA. Entonces, el Quattro tendrá en cuenta las demás cargas CA y utilizará la corriente sobrante para la carga de baterías, evitando así sobrecargar el generador o la red eléctrica.

PowerAssist – Refuerzo de la potencia del generador o de la toma de puerto
 Esta función lleva el principio de PowerControl a otra dimensión, permitiendo que Quattro complemente la capacidad de la fuente alternativa. Cuando se requiera un pico de potencia durante un corto espacio de tiempo, como pasa a menudo, el Quattro compensará inmediatamente la posible falta de potencia de la corriente de la red o del generador con potencia de la batería. Cuando se reduce la carga, la potencia sobrante se utiliza para recargar la batería.

Energía solar: Potencia CA disponible incluso durante un apagón
 El Quattro puede utilizarse en sistemas FV, conectados a la red eléctrica o no, y en otros sistemas eléctricos alternativos.
 Hay disponible software de detección de falta de suministro.

Configuración del sistema

- En el caso de una aplicación autónoma, si ha de cambiarse la configuración, se puede hacer en cuestión de minutos mediante un procedimiento de configuración de los conmutadores DIP.
- Las aplicaciones en paralelo o trifásicas pueden configurarse con el software VE.Bus Quick Configure y VE.Bus System Configurator.
- Las aplicaciones no conectadas a la red, que interactúan con la red y de autoconsumo que impliquen inversores conectados a la red y/o cargadores solares MPPT pueden configurarse con Asistentes (software específico para aplicaciones concretas).

Seguimiento y control in situ
 Hay varias opciones disponibles: Monitor de baterías, panel Multi Control, Color Control GX y otros dispositivos, smartphone o tableta (Bluetooth Smart), portátil u ordenador (USB o RS232).

Seguimiento y control a distancia
 Color Control GX y otros dispositivos.
 Los datos se pueden almacenar y mostrar gratuitamente en la web VRM (Victron Remote Management).

Configuración a distancia
 Se puede acceder a los datos y cambiar los ajustes de los sistemas con Color Control GX y otros dispositivos si está conectado a Ethernet.



Quattro
48/15000/200-100/100

MultiPlus	12 voltios 24 voltios 48 voltios	C 12/800/35 C 24/ 800/16	C 12/1200/50 C 24/1200/25	C 12/1600/70 C 24/1600/40	C 12/2000/80 C 24/2000/50	12/3000/120 24/3000/70 48/3000/35	24/5000/120 48/5000/70
PowerControl		Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
PowerAssist		Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Conmutador de transferencia (A)		16	16	16	30	16 ó 50	100
INVERSOR							
Rango de tensión de entrada (VCC)	9,5 – 17V 19 – 33V 38 – 66V						
Salida	Tensión de salida: 230 VAC ± 2% Frecuencia: 50 Hz ± 0,1% (1)						
Potencia cont. de salida a 25°C (VA) (3)	800	1200	1600	2000	3000	5000	
Potencia cont. de salida a 25°C (W)	700	1000	1300	1600	2400	4000	
Potencia cont. de salida a 40°C (W)	650	900	1200	1400	2200	3700	
Potencia cont. de salida a 65°C (W)	400	600	800	1000	1700	3000	
Pico de potencia (W)	1600	2400	3000	4000	6000	10,000	
Eficacia máxima (%)	92 / 94	93 / 94	93 / 94	93 / 94	93 / 94 / 95	94 / 95	
Consumo en vacío (W)	8 / 10	8 / 10	8 / 10	9 / 11	20 / 20 / 25	30 / 35	
Consumo en vacío en modo de ahorro (W)	5 / 8	5 / 8	5 / 8	7 / 9	15 / 15 / 20	25 / 30	
Consumo en vacío en modo de búsqueda (W)	2 / 3	2 / 3	2 / 3	3 / 4	8 / 10 / 12	10 / 15	
CARGADOR							
Entrada CA	Rango de tensión de entrada: 187-265 VCA Frecuencia de entrada: 45 – 65 Hz Factor de potencia: 1						
Tensión de carga de 'absorción' (V CC)	14,4 / 28,8 / 57,6						
Tensión de carga de "flotación" (V CC)	13,8 / 27,6 / 55,2						
Modo de almacenamiento (VCC)	13,2 / 26,4 / 52,8						
Corriente de carga batería auxiliar (A) (4)	35 / 16	50 / 25	70 / 40	80 / 50	120 / 70 / 35	120 / 70	
Corriente de carga de la batería de arranque (A)	4 (solo modelos de 12 y 24V)						
Sensor de temperatura de la batería	Sí						
GENERAL							
Salida auxiliar (5)	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	Sí (16A)	Sí (50A)	
Relé programable (6)	Sí						
Protección (2)	a – g						
Puerto de comunicación VE.Bus	Para funcionamiento paralelo y trifásico, supervisión remota e integración del sistema						
Puerto de comunicaciones de uso general	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	Sí	Sí	
On/Off remoto	Sí						
Características comunes	Rango de temp. de trabajo: -40 a + 65°C (refrigerado por aire) Humedad (sin condensación): máx 95%						
CARCASA							
Características comunes	Material y color: aluminio (azul RAL 5012) Categoría de protección: IP 21						
Conexión de la batería	cables de batería de 1,5 metros			Pernos M8	Cuatro pernos M8 (2 conexiones positivas y 2 negativas)		
Conexión 230 V CA	Conector G-ST18i			Abrazadera de resorte	Bornes de tornillo de 13 mm ² (6 AWG)	Pernos M6	
Peso (kg)	10	10	10	12	18	30	
Dimensiones (al x an x p en mm.)	375x214x110			520x255x125	362x258x218	444x328x240	
ESTÁNDARES							
Seguridad	EN-IEC 60335-1, EN-IEC 60335-2-29, IEC 62109-1						
Emisiones / Inmunidad	EN 55014-1, EN 55014-2, EN-IEC 61000-3-2, EN-IEC 61000-3-3, IEC 61000-6-1, IEC 61000-6-2, IEC 61000-6-3						
Vehículos de carretera	Modelos de 12 y 24V: ECE R10-4						
Anti-isla	Visite nuestra página web						
<p>1) Puede ajustarse a 60 Hz; 120 V 60 Hz si se solicita</p> <p>2) Claves de protección:</p> <p>a) cortocircuito de salida</p> <p>b) sobrecarga</p> <p>c) tensión de la batería demastado alta</p> <p>d) tensión de la batería demastado baja</p> <p>h) temperatura demastado alta</p> <p>f) 230 VCA en la salida del Inversor</p> <p>g) ondulación de la tensión de entrada demastado alta</p> <p>3) Carga no lineal, factor de cresta 3:1</p> <p>4) A 25 ° C de temperatura ambiente</p> <p>5) Se desconecta si no hay fuente CA externa disponible</p> <p>6) Relé programable que puede configurarse, entre otros, en alarma general, subtensión CC o señal de arranque/parada del generador</p> <p>Capacidad nominal CA 230V/4A</p> <p>Capacidad nominal CC 4A hasta 35VCC, 1A hasta 60VCC</p>							

L9. Catálogo de conductores para baja tensión.

El catálogo de los conductores de baja tensión para el sistema de distribución fue tomado de
(*Conductores de aluminio aislado, s. f.*).

THW aluminio
THW aluminum

Calibre	Construcción			Espesor de aislamiento		Diámetro exterior		Masa total		Capacidad de corriente
	N° hilos	Diámetro de cada hilo								
Size	Stranding			Insulation thickness		Overall diameter		Total mass		Ampacity
AWG or kcmil	N° wires	Diameter of wire								
		mm	mils	mm	mils	mm	in	kg/km	lb/kft	A*
12	1	2,05	80,79	0,76	30	3,57	0,141	19	12,73	20
10	1	2,59	101,9	0,76	30	4,11	0,162	26	17,55	30
8	1	3,26	128,5	1,14	45	5,54	0,218	46	30,8	40
6	7	1,55	61,2	1,52	60	7,70	0,303	83	56,09	50
4	7	1,96	77,2	1,52	60	8,92	0,351	116	77,67	65
2	7	2,47	97,4	1,52	60	10,5	0,412	164	110,2	90
1	19	1,69	66,4	2,03	80	12,5	0,492	220	147,8	100
1/0	19	1,89	74,5	2,03	80	13,5	0,532	262	175,8	120
2/0	19	2,13	83,7	2,03	80	14,7	0,578	313	203,1	135
3/0	19	2,39	94	2,03	80	16,0	0,63	376	252,6	155
4/0	19	2,68	105,5	2,03	80	17,5	0,691	454	305,1	180
250	37	2,09	82,2	2,41	95	20,4	0,765	549	369	205
300	37	2,29	90	2,41	95	20,8	0,82	637	427,7	230
350	37	2,47	97,3	2,41	95	22,1	0,871	723	485,9	250
400	37	2,64	104	2,41	95	23,3	0,918	810	544,4	270
500	37	2,91	116,2	2,41	95	25,5	1,00	977	656,4	310
600	61	2,52	99,2	2,79	110	28,3	1,11	1184	795,9	340
700	61	2,72	107,1	2,79	110	30,1	1,18	1351	907,8	375
750	61	2,82	110,9	2,79	110	30,9	1,22	1434	963,7	385
800	61	2,91	114,5	2,79	110	31,8	1,25	1519	1021	395
900	61	3,09	121,5	2,79	110	33,4	1,31	1681	1130	425
1000	61	3,25	128	2,79	110	34,8	1,37	1842	1238	445

* Capacidad de corriente permitida en conductores aislados, 600 V, 75 °C: no más de tres conductores que transportan corriente en canaleta, cable o enterrado directo, con base en una temperatura ambiente de 30 °C.

* Allowed ampacity of insulated conductors, 600 V, 75 °C: no more than three current-carrying conductors in raceway, cable, or direct buried, based on ambient temperature of 30 °C.

Nota: La información que corresponde al conductor se encuentra en la referencia AAC.

Note: The information regarding the conductor can be found at AAC reference.

L10. Catálogo de conductores para media tensión.

El catálogo de los conductores para media tensión del sistema de distribución fue tomado de
(*Cable ecológico semiaislado, s. f.*).

Cable Ecológico Semiaislado

Contacto
Contactos
ventas.colombia@nexans.com

Conductor ACSR con capa semiconductora en XLPE, y cubierta exterior en XLPE-TK.

DESCRIPCIÓN**Aplicación**

Líneas aéreas de distribución de energía eléctrica, en zonas arborizadas.
Ofrecen mayor confiabilidad de operación y compatibilidad con el medio ambiente.

Construcción

Conductor
Alambres de aluminio 1350-H19 dispuestos helicoidalmente sobre un núcleo de acero galvanizado ACSR.

Semiconductora
Poliétileno Reticulado (XLPE).

Cubierta Exterior
Poliétileno Reticulado resistente a las descargas superficiales, a la abrasión y a la intemperie (XLPE-TK).

Normas Aplicables

- NTC 5909
- ASTM B232

Certificado
RETIE y NORMA 04885

Temperatura Operación
90°C

Tensión de Operación
15KV ó 35KV.

Opcional

- Otros calibres están disponibles bajo pedido.

**NORMA**

Nacional ASTM B 232;
NTC 5909

Cable Ecológico Semiaislado

Contacto
Contactos
ventas.colombia@nexans.com

CARACTERÍSTICAS

Características de uso	
Resistencia a la intemperie	Sí
Temperatura máxima operativa	90 °C

TABLA DE CARACTERÍSTICAS

Ref. Nexans	Nombre	Ope. volt. [kV]	Diam. Conductor [mm]	N° Hilos de Acero	N° de Hilos de Aluminio	Espesor promedio de la chaqueta [mm]	Diam. Ext. [mm]	Peso aprox. [kg/km]	Máx. DC Resist. Cond. 20°C [Ohm/km]	Intensidad admisible al aire libre [A]
10036718	2AWG	15	7,59	1	6	3,82	16,51	301	0,8527	150
10025594	1/0AWG	15	9,57	1	6	3,82	18,49	411	0,5357	200
10036735	2/0AWG	15	10,74	1	6	3,82	19,66	485	0,4256	235
10037013	4/0AWG	15	13,54	1	6	3,82	22,47	691	0,2676	310
10037054	266,8KCMIL	15	14,47	1	18	3,82	23,39	693	0,2124	360
10038173	266,8KCMIL	15	15,48	7	26	3,82	24,15	812	0,209	360
10037015	1/0AWG	35	9,57	1	6	7,63	26,07	658	0,5357	200
10025597	2/0AWG	35	10,74	1	6	7,63	27,24	745	0,4256	230
10025598	4/0AWG	35	13,54	1	6	7,63	30,05	982	0,2676	310
10025715	266,8KCMIL	35	14,47	1	18	7,63	30,97	994	0,2124	360
10037791	266,8KCMIL	35	15,48	7	26	7,63	31,97	1133	0,209	360
10037761	336,4KCMIL	35	16,24	1	18	7,63	32,74	1152	0,1683	415
10033553	636KCMIL	35	22,34	1	18	7,63	39,12	1822	0,089	620
10034607	715,5KCMIL	35	25,34	7	26	7,63	42,12	2329	0,1032	667

CONDICIONES DE PRUEBA

-Capacidad de corriente de conductores sencillos aislados de aluminio al aire, para temperaturas de los conductores de 90°C y temperatura ambiente de 40°C, de acuerdo a la NTC 2050, Tabla 310-70

-Los datos indicados en la tabla están sujetos a tolerancia normales de fabricación

L11. Catálogo de transformadores para distribución.

El catálogo de los transformadores del sistema de distribución fue tomado de (*Catálogo transformadores de distribución, s. f.*).

Transformadores

Transformadores Autoprotegidos



Transformadores monofásicos y trifásicos inmersos en aceite mineral con corrientes secundarias de hasta 1600 A y BIL máximo de 150 KV, para ser utilizados en líneas de energía con niveles de tensión desde 2,4 KV hasta 34,5 KV, en los que se incorporan elementos de protección contra sobretensiones, sobrecargas y cortocircuitos externos; al igual que fusibles inmersos en aceite en media tensión para aislarlos de la red en caso de fallas internas.

Transformadores trifásicos disponibles en los siguientes rangos de potencia:

- Potencias desde 15KVA hasta 500KVA, con tensión secundaria de 220/127 V.
- Potencias de hasta 1000KVA, con tensión secundaria de 440/254 V.
- Transformadores monofásicos disponibles en los siguientes rangos de potencia:
- Potencias desde 5 KVA hasta 167,5KVA, con tensión secundaria de 240/120 V.
- Potencias hasta 333 KVA, con tensión secundaria de 480/240.
- Fabricados según las normas ANSIC57.12.00, IEC-76 y GTC148.











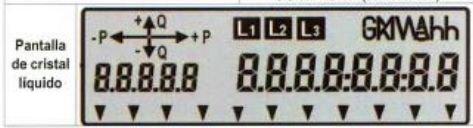
L12. Catálogo de medidores.

El catálogo de los medidores fue tomado de (*Ficha técnica medidor básico MT-174, s. f.*).

MT174 Medidor polifásico multifuncional

Repaso del tipo		MT174-D2 DIN	MT174-T1 DIN
Red	Baja tensión	•	•
Tipo de conexión	1F-2H	•	
	2F-3H	•	
	3F-4H	•	•
Comunicación	RS 485	•	•
	Interfaz óptico	•	•
Opciones entrada-salida	Salida S0	•	•
	Salida OPTOMOS	•	•
	Entrada tarifa (1 o 2)	•	•

Especificaciones técnicas		MT174-D2 DIN	MT174-T1 DIN
Tensión nominal	Un	3x120/208 V	
Rango de tensión		0,8 - 1,15 Un	
Corriente	Corriente base In	5 A	1 A
	Corriente máxima Imax	120 A	6 A
Clase de Exactitud	Energía activa	Clase 1 (IEC 62053-21 NTC 4052)	
	Energía reactiva	Clase 2 (IEC 62053-23 NTC 4569)	
	Energía aparente	Clase 2	
Reloj tiempo real	Precisión	Mejor que ± 3 min/año a 23°C	
	Alimentación de respaldo	Pila Li: 5 años operac. hasta 20 años	
Rango temp. IEC 62052-11	Operación	-40°C...+60°C, extend. -40°C...+70°C	
	Almacenamiento	-40°C ... +80°C	
Protección ingreso polvo y agua		IP54	
Consumo		0.6 W / 10 VA (sin RS485)	
		0.8 W / 10 VA (con RS 485)	



Funcionalidades básicas:

Características de medición

- Medición de "energía" en dos direcciones.
- Energías y demandas Activa, Reactiva y Aparente en redes 3F-4H y 2F-3H.
- Mediciones por fase y trifásicas.
- Cantidades de medición: Tensiones por fase, corrientes por fase, factores de potencia por fase, frecuencia.
- Medición de "energía" en dos direcciones.
- Medición de potencias instantáneas.

Funcionalidades tarifarias:

- Planes tarifarios (TOU) para la medición de energía activa y demanda máxima (hasta 4 tarifas, 10 estaciones, 10 programas semanales, 10 definiciones diarias, 10 conmutaciones dentro de programas tarifarios diarios, 46 festivos).

Perfiles de carga:

- 2 Registros de perfil de carga hasta 8 canales.
- Posibilidad de configurar el período del registro en 5, 10, 15, 30, 60 minutos y 24h.

Comunicación:

- Conformidad con IEC 1107.
- Dos interfaces de comunicación:
 - Puerto óptico.
 - RS 485.

Reloj de tiempo real (RTC):

- Conformidad con la norma IEC 62054-21.
- RTC con calendario basado en cristal de cuarzo de 32 kHz.
- Precisión del RTC: mejor que ± 3 minutos / año, reserva de operación: 5 años, expectativa del tiempo de vida de la pila de Litio: 20 años.
- Contador del tiempo transcurrido de la operación del RTCV.
- Pila de Litio habilita los datos en pantalla LCD cuando el medidor se encuentra en el estado de no-energizado.

Funcionalidades tarifarias:

- Pantalla LCD.
- Detección de la apertura de la tapa cubrebornes.
- Detector de campo magnético externo.
- Medición fotovoltaica.
- Canales de comunicación con seguridad.
- Indicación de batería baja.
- Entradas / Salidas.

Apéndice M. Localización sistema de distribución

Este apéndice se encuentra adjunto en el CD y puede visualizarlos en base de datos de la biblioteca UIS.

Apéndice N. Diagrama unifilar de la microrred y plano del sistema de distribución

Este apéndice se encuentra adjunto en el CD y puede visualizarlos en base de datos de la biblioteca UIS.

Apéndice O. Memorias de cálculo de instalaciones de uso final y sistema de distribución

Este apéndice se encuentra adjunto en el CD y puede visualizarlos en base de datos de la biblioteca UIS.

Apéndice P. Plano instalaciones de uso final

Este apéndice se encuentra adjunto en el CD y puede visualizarlos en base de datos de la biblioteca UIS

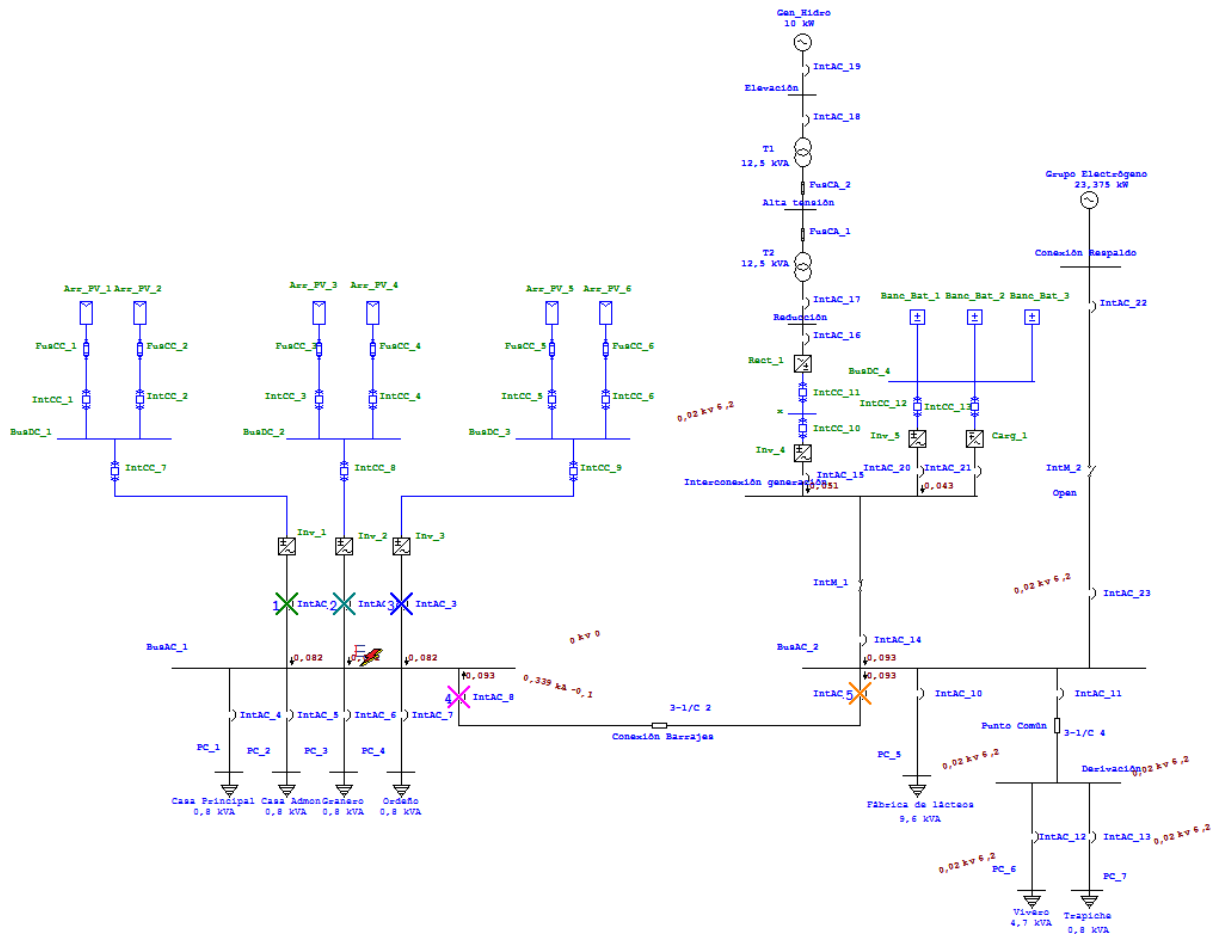
Apéndice Q. Simulación coordinación de protecciones

Las simulaciones se realizaron en el software (ETAP DEMO, 2014), de las cuales se extrajeron los resultados siguientes.

S1. Falla en el barraje AC 1

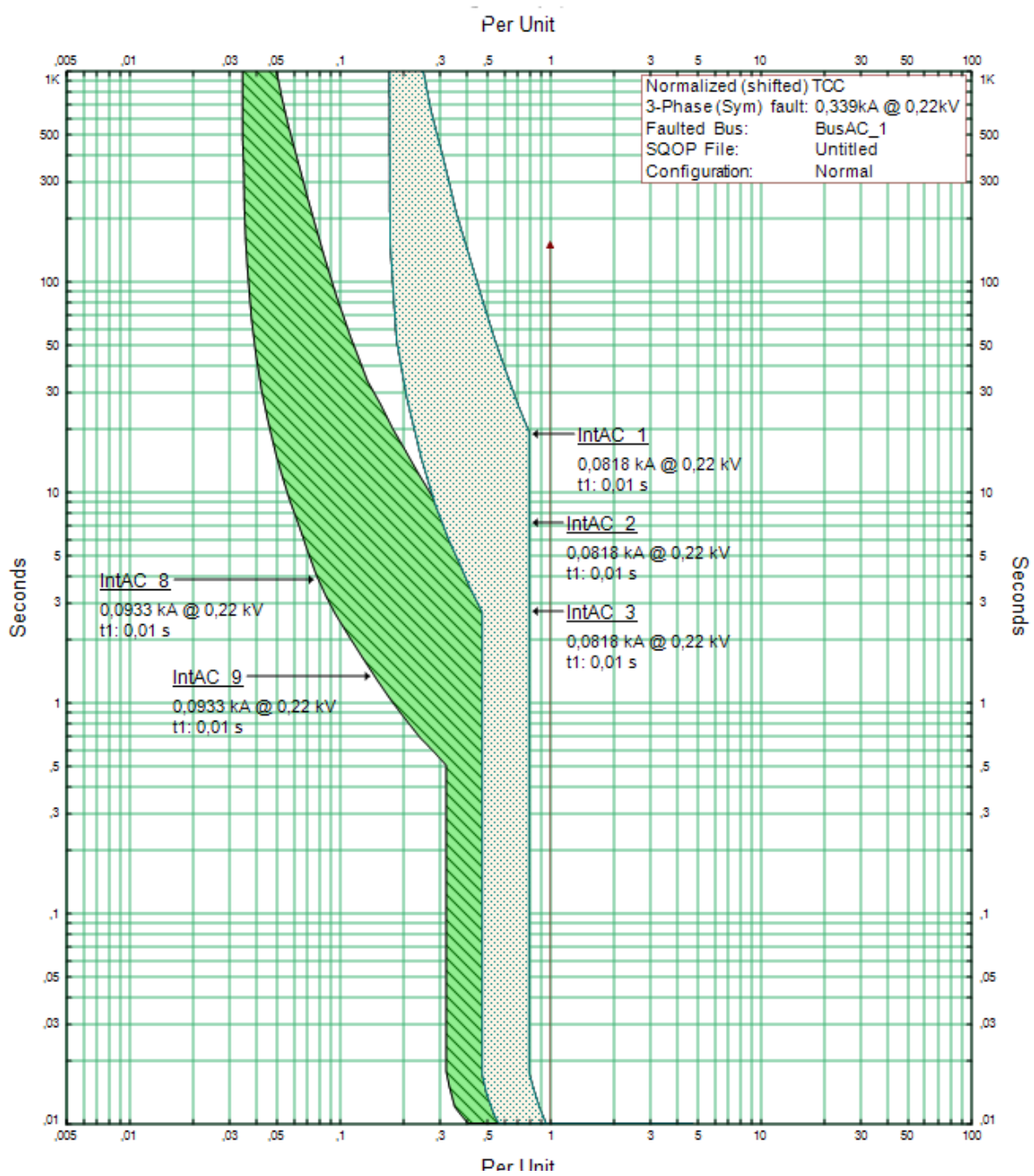
En la **Figura 55** se presenta la secuencia de disparo de las protecciones eléctricas cuando se presenta una falla trifásica (cortocircuito) en el barraje 1, en condiciones de operación normal.

Figura 55
Secuencia de disparo falla barraje AC 1



La curva de selectividad de las protecciones mostradas se relaciona en la **Figura 56**, la cual se muestra a continuación, junto con el valor de la corriente de falla asociado.

Figura 56
Curva de selectividad barraje AC 1



Por último, en la **Tabla 29** se muestran los tiempos de disparo de cada una de las protecciones concernientes a la falla en mención.

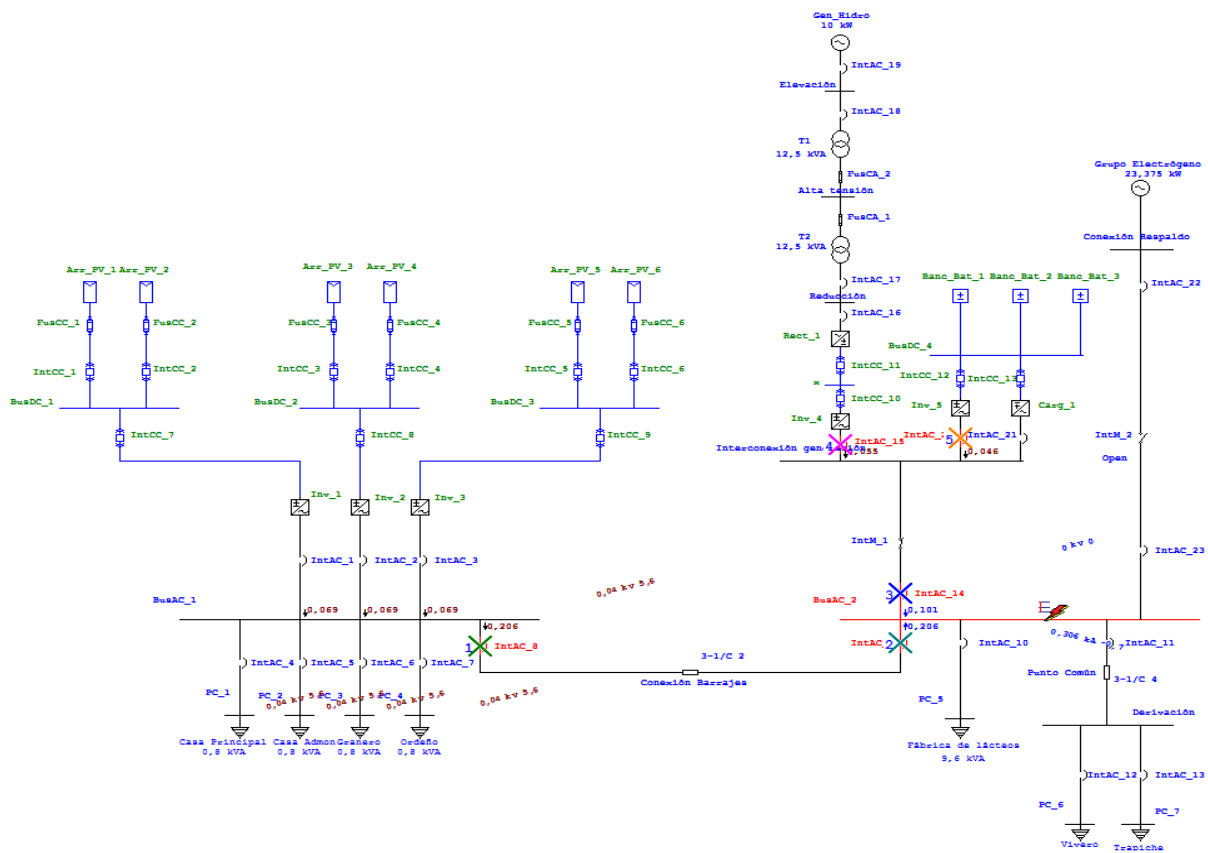
Tabla 29.
Tiempos de disparo de las protecciones eléctricas falla barraje AC 1

FALLA BUS 1				
TIEMPO (ms)	ID	If (kA)	t1 (ms)	t2 (ms)
10	IntAC_1	0,354	10	-
10	IntAC_2	0,369	10	-
10	IntAC_3	0,369	10	-
10	IntAC_8	0,082	10	-
10	IntAC_9	0,082	10	-

S2. Falla en el barraje AC 2.

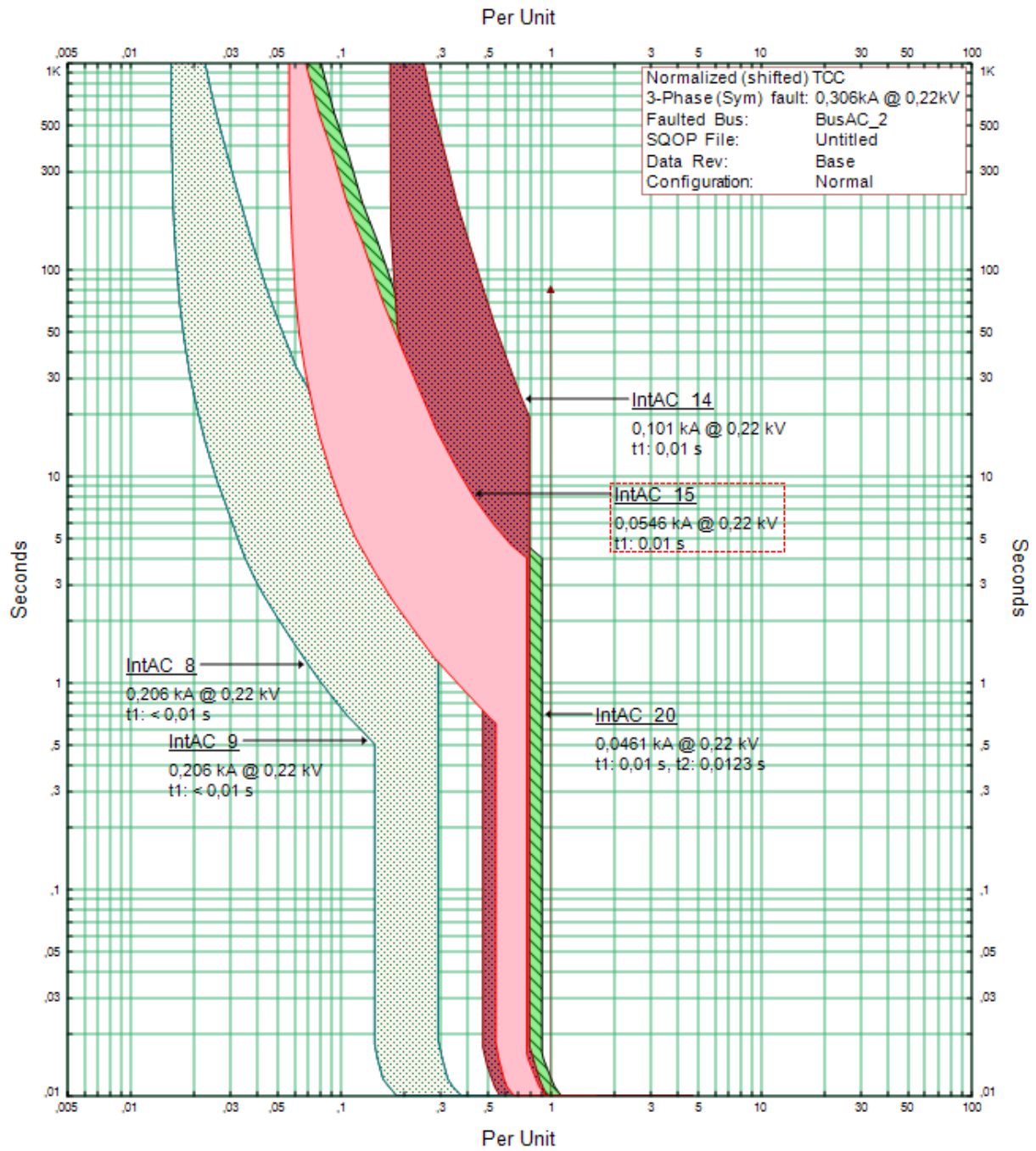
En la **Figura 57** se presenta la secuencia de disparo de las protecciones eléctricas cuando se presenta una falla trifásica (cortocircuito) en el barraje 2, en condiciones de operación normal.

Figura 57
Secuencia de disparo falla barraje AC 2 en condiciones de operación normales



La curva de selectividad de las protecciones mostradas se relaciona en la **Figura 58**, la cual se muestra a continuación, junto con el valor de la corriente de falla asociado.

Figura 58
 Curva de selectividad barraje AC 2 en condición de operación normal



Finalmente, en la **Tabla 30** se muestran los tiempos de disparo de cada una de las protecciones concernientes a la falla en mención.

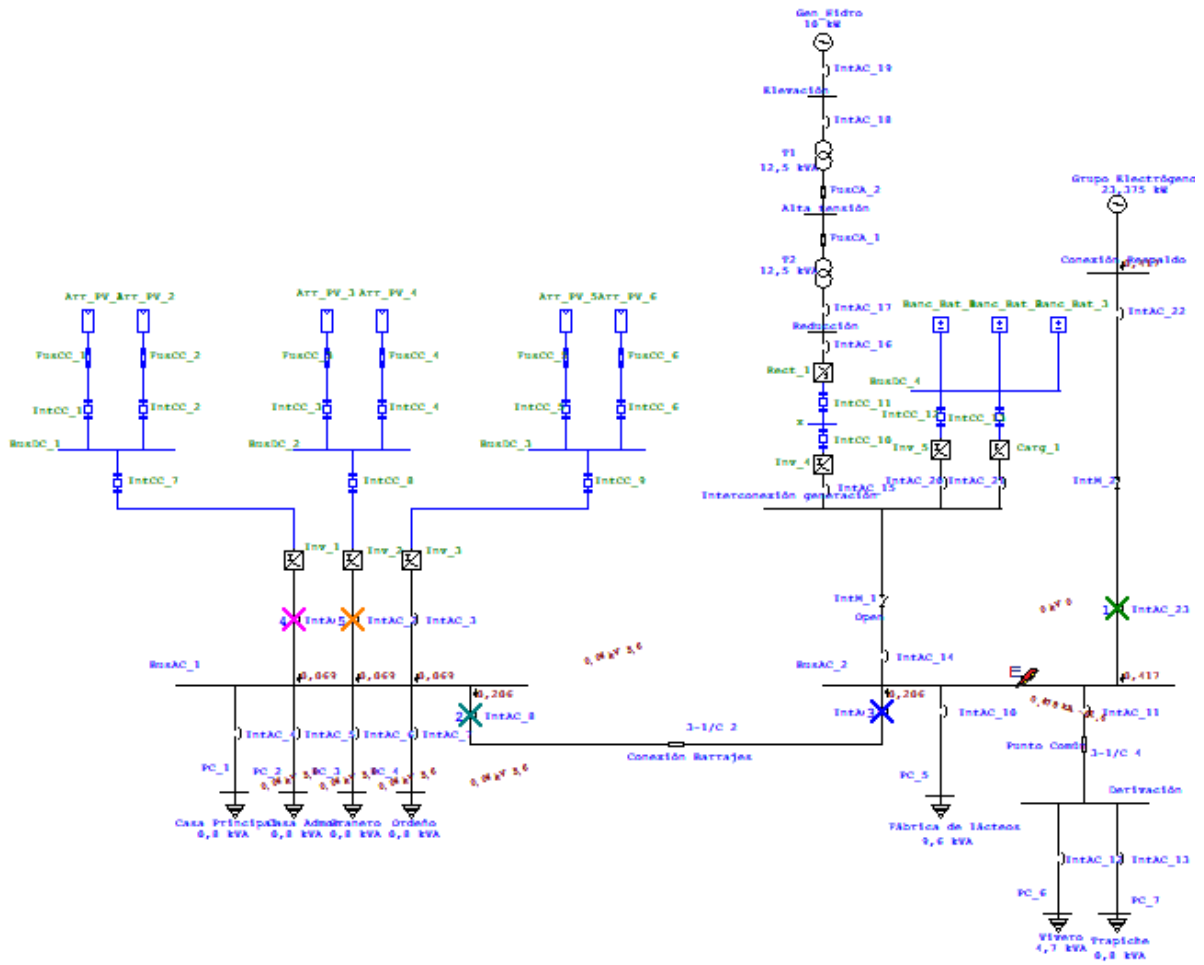
Tabla 30.
Tiempos de disparo de las protecciones eléctricas falla barraje AC 2 en condiciones de operación normales

FALLA BUS 2				
TIEMPO (ms)	ID	If (kA)	t1 (ms)	t2 (ms)
10	IntAC_8	0,206	10	-
10	IntAC_9	0,206	10	-
10	IntAC_14	0,101	10	-
10	IntAC_15	0,055	10	-
12,3	IntAC_20	0,046	10	12,3

S3. Falla en el barraje AC 2 con respaldo.

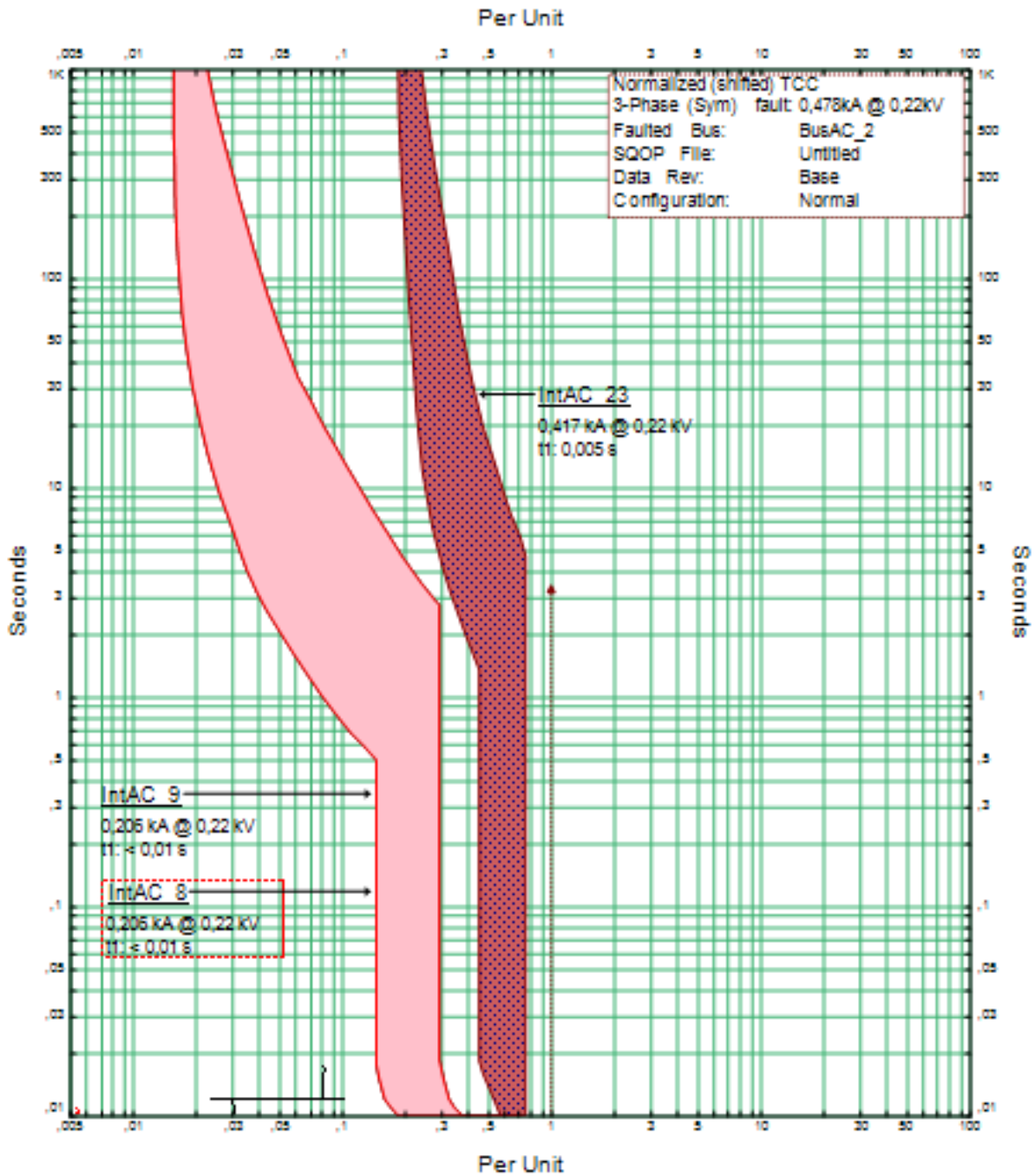
En la **Figura 59** se presenta la secuencia de disparo de las protecciones eléctricas cuando se presenta una falla trifásica (cortocircuito) en el barraje 2, cuando el sistema está trabajando en una contingencia, lo cual significa que se encuentra operando el respaldo que para el caso de estudio es un grupo electrógeno.

Figura 59
 Secuencia de disparo falla barraje AC 2 en condiciones de operación contingente



La curva de selectividad de las protecciones mostradas se relaciona en la **Figura 60**, la cual se muestra a continuación, junto con el valor de la corriente de falla asociado.

Figura 60
Curva de selectividad barraje AC 2 en condición de operación contingente



Por último, en la **Tabla 31** se muestran los tiempos de disparo de cada una de las protecciones concernientes a la falla en mención.

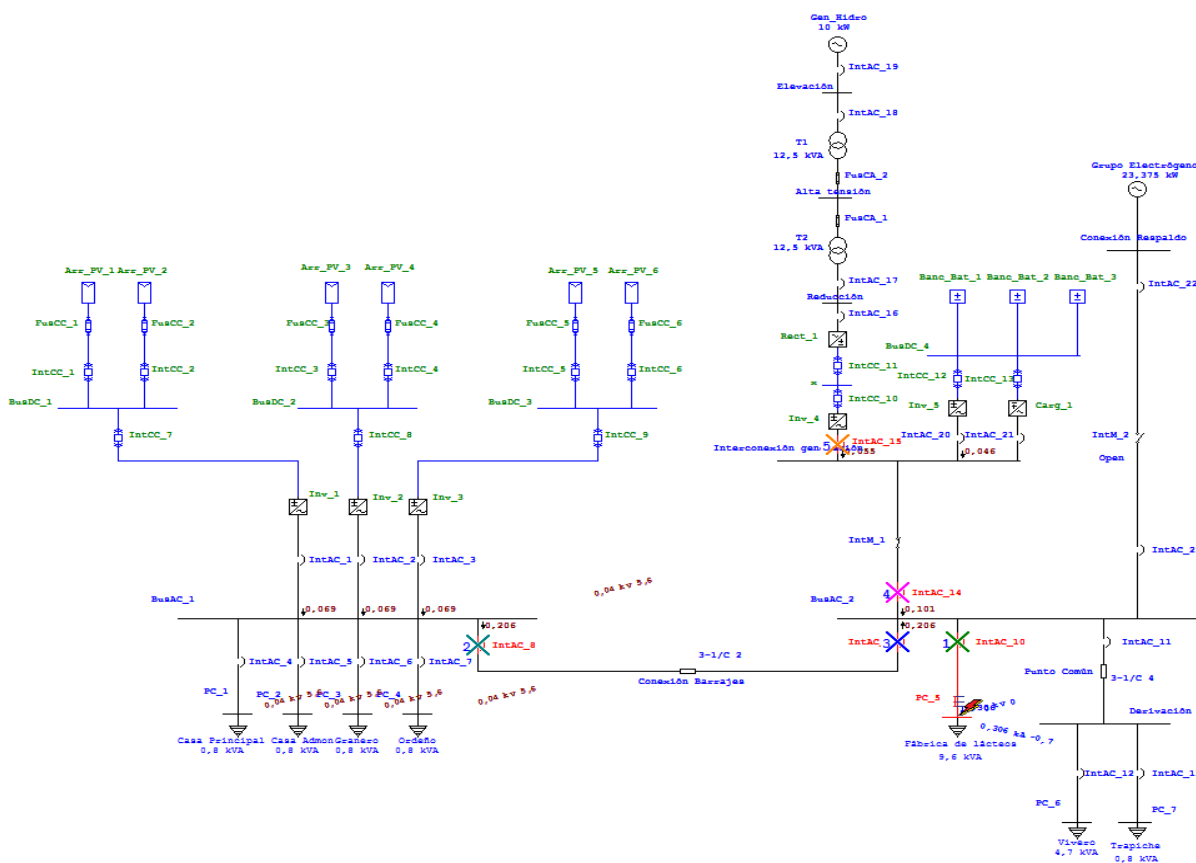
Tabla 31.
Tiempos de disparo de las protecciones eléctricas falla barraje AC 2 en condiciones de operación contingente

FALLA BUS 2 CON RESPALDO				
TIEMPO (ms)	ID	If (kA)	t1 (ms)	t2 (ms)
5	IntAC_23	0,417	5	-
10	IntAC_8	0,206	10	-
10	IntAC_9	0,206	10	-
14,4	IntAC_14	0,101	10	14,4
14,4	IntAC_15	0,055	10	14,4

S4. Falla en el barraje AC de carga industrial (fábrica de lácteos)

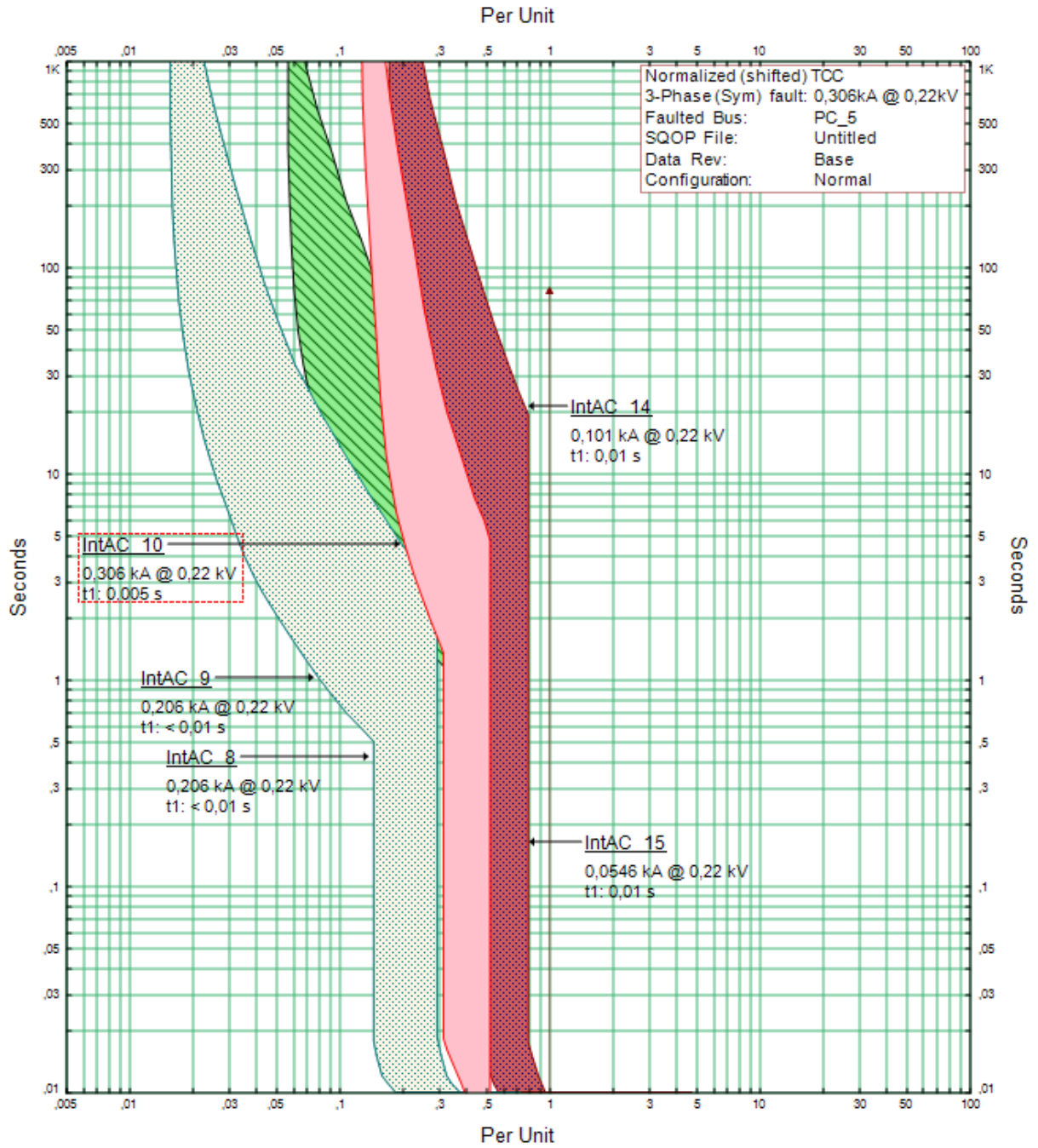
En la **Figura 61** se presenta la secuencia de disparo de las protecciones eléctricas cuando se presenta una falla trifásica (cortocircuito) en el barraje de carga industrial (fábrica de lácteos), en condiciones de operación normal.

Figura 61
Secuencia de disparo falla barraje AC de carga industrial (fábrica de lácteos)



La curva de selectividad de las protecciones mostradas se relaciona en la **Figura 62**, la cual se muestra a continuación, junto con el valor de la corriente de falla asociado.

Figura 62
Curva de selectividad barraje AC de carga industrial (fábrica de lácteos)



Por último, en la **Tabla 32** se muestran los tiempos de disparo de cada una de las protecciones concernientes a la falla en mención.

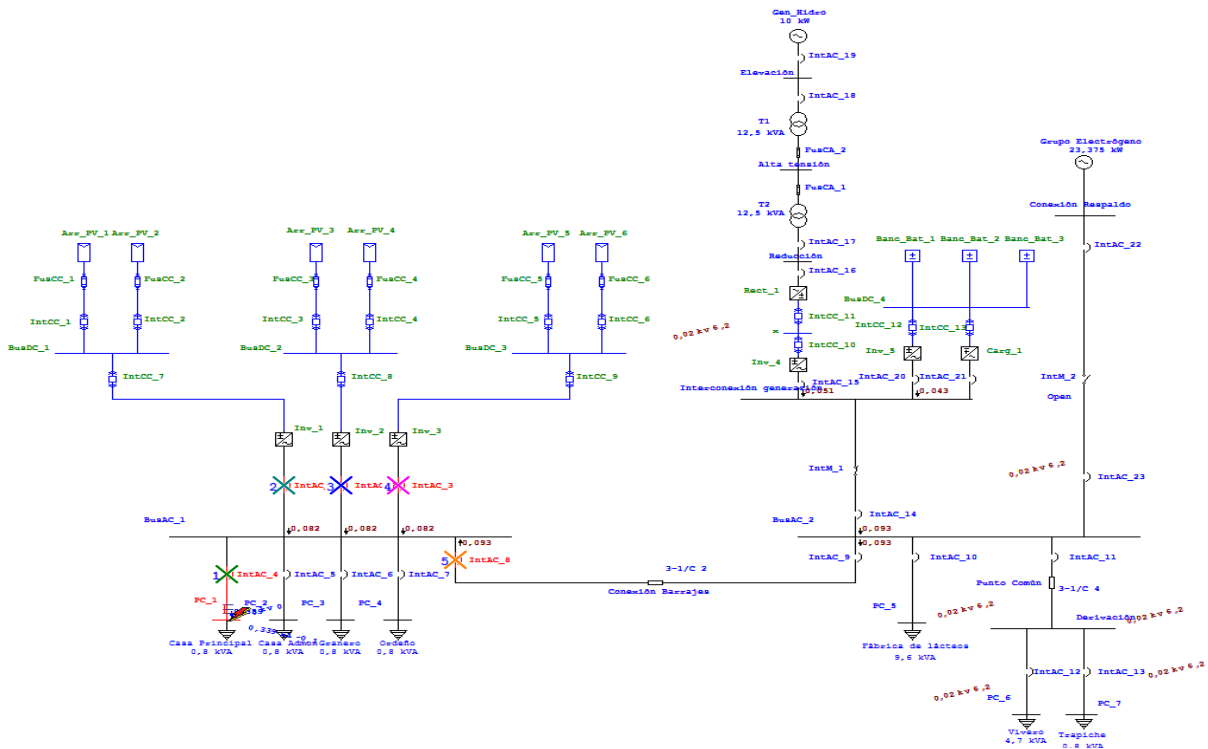
Tabla 32.
Tiempos de disparo de las protecciones eléctricas falla barraje AC de carga industrial (fábrica de lácteos)

FALLA CARGA FÁBRICA LÁCTEOS				
TIEMPO (ms)	ID	If (kA)	t1 (ms)	t2 (ms)
5	IntAC_10	0,306	5	-
10	IntAC_8	0,206	10	-
10	IntAC_9	0,206	10	-
10	IntAC_14	0,101	10	-
10	IntAC_15	0,055	10	-

S5. Falla en el barraje AC de carga residencial (casa principal)

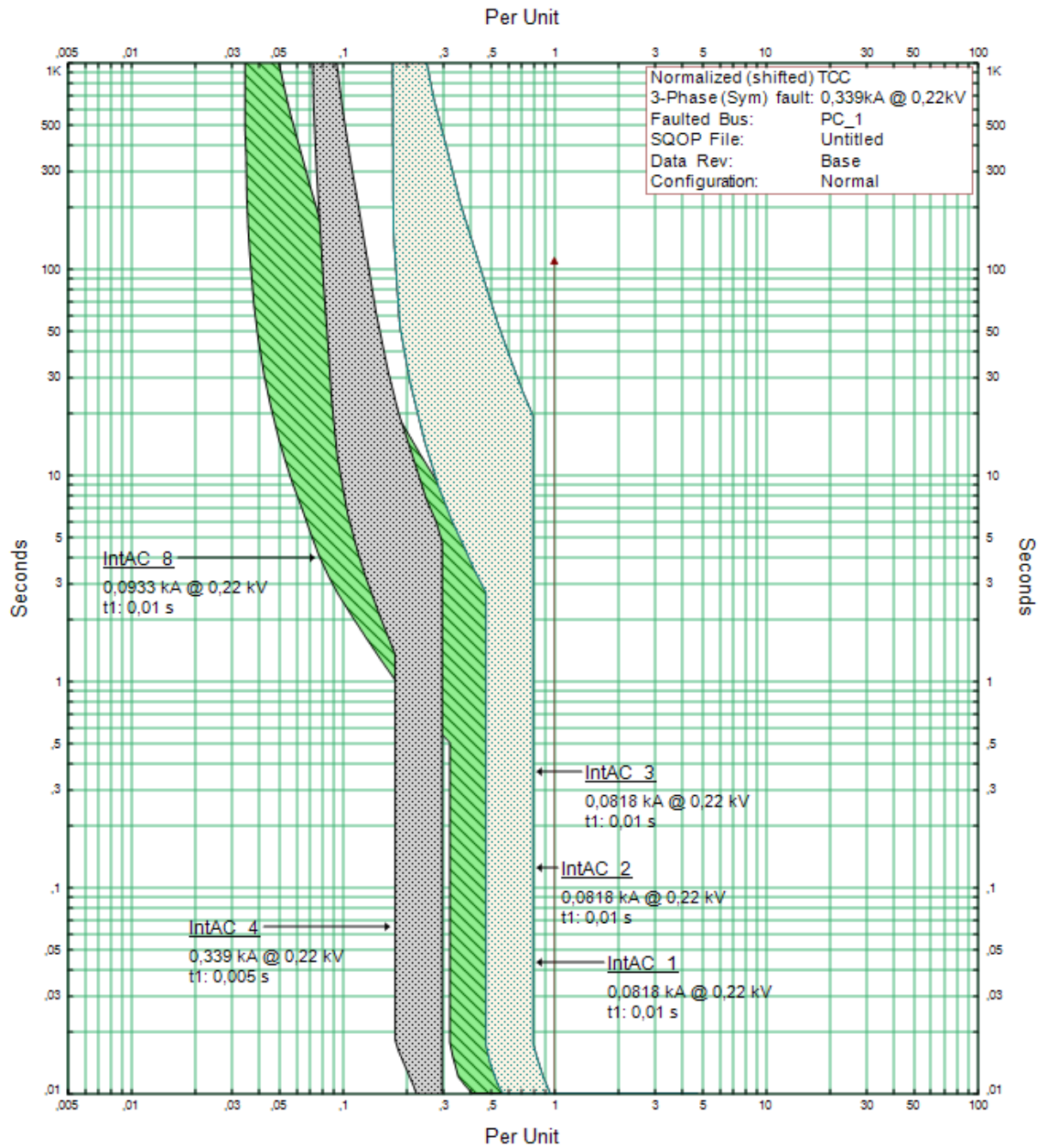
En la **Figura 63** se presenta la secuencia de disparo de las protecciones eléctricas cuando se presenta una falla trifásica (cortocircuito) en el barraje de carga residencial (casa principal), en condiciones de operación normal.

Figura 63
Secuencia de disparo falla barraje AC de carga residencia (casa principal)



La curva de selectividad de las protecciones mostradas se relaciona en la **Figura 64**, la cual se muestra a continuación, junto con el valor de la corriente de falla asociado.

Figura 64
 Curva de selectividad barraje AC de carga residencial (casa principal)



Para finalizar, en la **Tabla 33** se muestran los tiempos de disparo de cada una de las protecciones concernientes a la falla en mención.

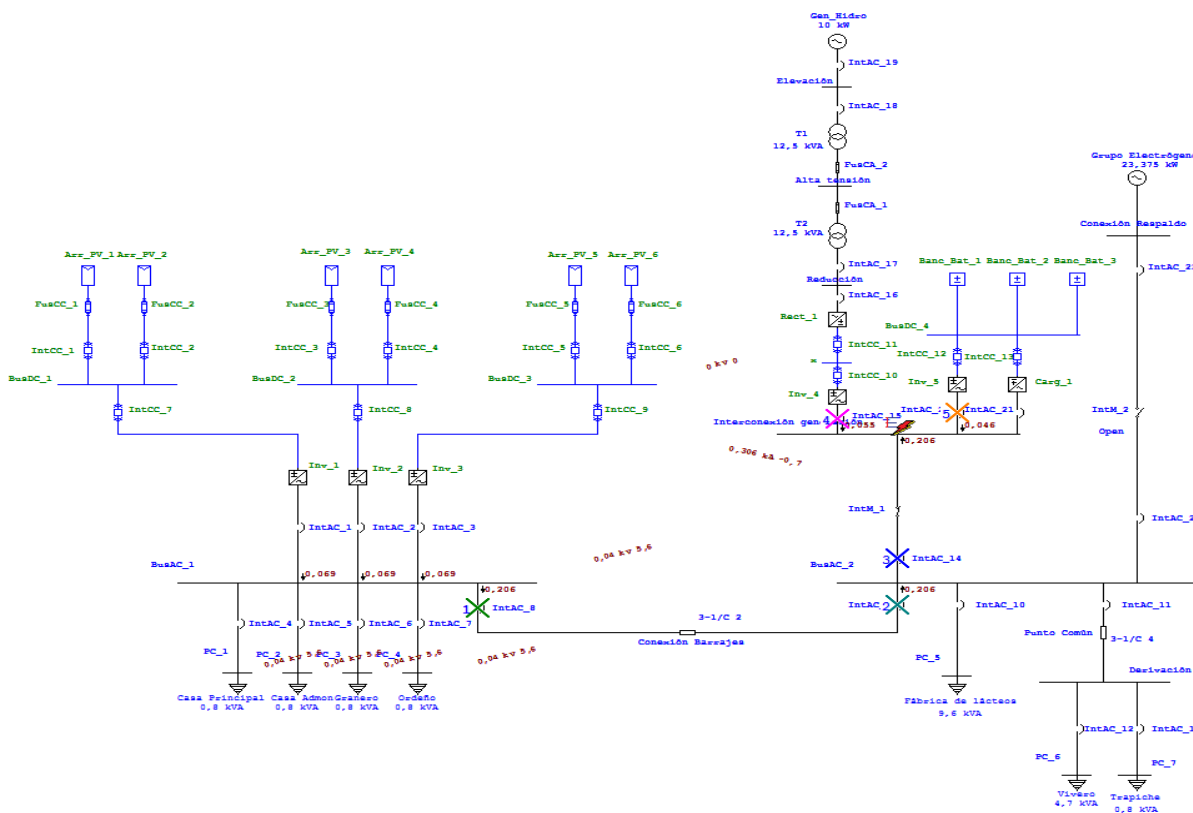
Tabla 33.
Tiempos de disparo de las protecciones eléctricas falla barraje AC de carga residencial (casa principal)

FALLA CARGA (CASA PRINCIPAL)				
TIEMPO (ms)	ID	If (kA)	t1 (ms)	t2 (ms)
5	IntAC_4	0,339	5	-
10	IntAC_1	0,082	10	-
10	IntAC_2	0,082	10	-
10	IntAC_3	0,082	10	-
10	IntAC_8	0,093	10	-

S6. Falla en el barraje AC de generación

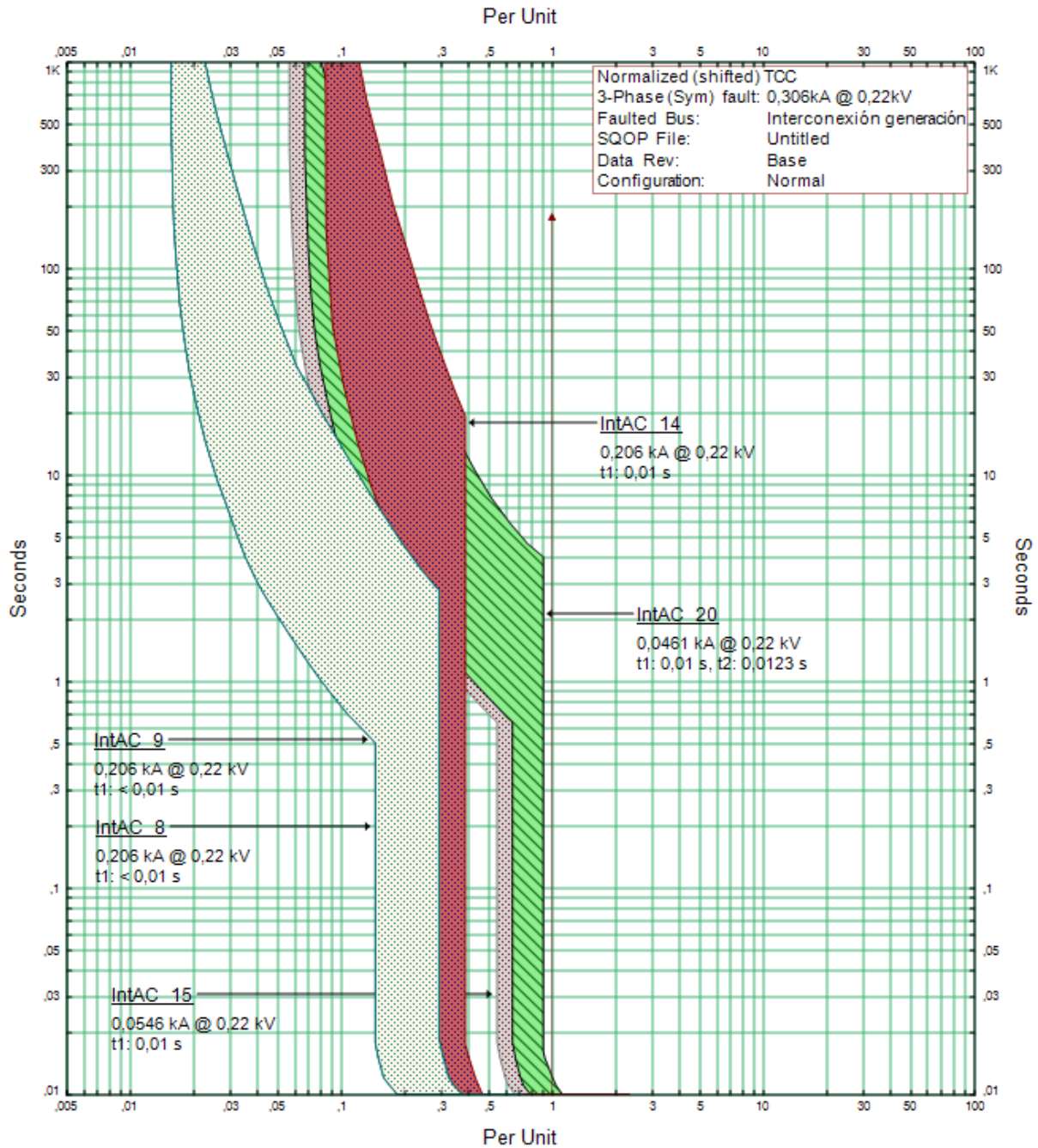
En la **Figura 65** se presenta la secuencia de disparo de las protecciones eléctricas cuando se presenta una falla trifásica (cortocircuito) en el barraje en el cual se encuentran conectados el sistema de generación hidroeléctrica y el sistema de acumulación, en condiciones de operación normal.

Figura 65
Secuencia de disparo falla barraje AC de generación



La curva de selectividad de las protecciones mostradas se relaciona en la **Figura 66**, la cual se muestra a continuación, junto con el valor de la corriente de falla asociado.

Figura 66
 Curva de selectividad barraje AC de generación



Finalmente, en la **Tabla 34** se muestran los tiempos de disparo de cada una de las protecciones concernientes a la falla en mención.

Tabla 34.
Tiempos de disparo de las protecciones eléctricas falla barraje AC de generación

FALLA BUS GENERACIÓN				
TIEMPO (ms)	ID	If (kA)	t1 (ms)	t2 (ms)
10	IntAC_8	0,206	10	-
10	IntAC_9	0,206	10	-
10	IntAC_14	0,206	10	-
10	IntAC_15	0,055	10	-
12,3	IntAC_20	0,046	10	12,3