



Diseño y simulación de una estrategia de gestión energética de una Microrred aislada

Luzuriaga Velasco, José Arturo

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera De Ingeniería en Electrónica, Automatización y Control

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero en Electrónica Automatización y Control

Dr. Arcos Avilés, Diego Gustavo, PhD.

Agosto de 2020

URKUND

Document Information

Analyzed document Tesis Luzuriaga_Velasco_José_Arturo_URKUND.docx (D78402177)
Submitted 8/31/2020 2:09:00 PM
Submitted by
Submitter email dgarcos@espe.edu.ec
Similarity 5%
Analysis address dgarcos.espe@analysis.orkund.com

Sources included in the report

SA	Análisis de la energía solar térmica y fotovoltaica para la comunidad de Limoncito.pdf Document Análisis de la energía solar térmica y fotovoltaica para la comunidad de Limoncito.pdf (D13565063)	 3
SA	Geovanny Martinez.docx Document Geovanny Martinez.docx (D77678765)	 9
SA	1A_BEDOYA_WALLACE_LUIS_ALEJANDRO_MAESTRIA_2019.docx Document 1A_BEDOYA_WALLACE_LUIS_ALEJANDRO_MAESTRIA_2019.docx (D55794468)	 5



Dr. Diego Arcos Avilés, PhD.
CC: 171087944-4



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA y TELECOMUNICACIONES

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

Certificación

Certifico que el trabajo de titulación, "**Diseño y simulación de una estrategia de gestión energética de una Microrred aislada**" fue realizado por el señor **Luzuriaga Velasco, José Arturo** el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, agosto del 2020

Firma:

.....
Arcos Avilés Diego Gustavo

C.C.: 171087944-4



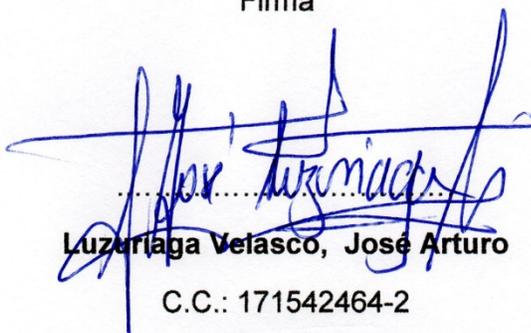
DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELÉTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
CARRERA DE ELECTRÓNICA AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

Responsabilidad de autoría

Yo, **Luzuriaga Velasco, José Arturo**, con cédula de ciudadanía n° 1715424642, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Diseño y simulación de una estrategia de gestión energética de una Microrred aislada**, es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, agosto de 2020

Firma



Luzuriaga Velasco, José Arturo
C.C.: 171542464-2



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

Autorización de publicación

Yo, **Luzuriaga Velasco, José Arturo**, con cédula de ciudadanía n° 1715424642, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Diseño y simulación de una estrategia de gestión energética de una Microrred aislada** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, Agosto de 2020

Firma

.....
Luzuriaga Velasco, José Arturo
C.C.: 171542464-2

Dedicatoria

Dedico este trabajo a la memoria de mi padre, cuyas últimas palabras dirigidas a mi persona fueron de aliento mientras salía camino a la ESPE, los primeros días de pre politécnico. Luego de todos los problemas que he sorteado a lo largo de la carrera de Ingeniería, su recuerdo me ha ayudado a perseverar.

Dedico el trabajo realizado a toda mi familia, siempre atenta y dispuesta a apoyarme en la adversidad.

Dedico mi esfuerzo a todos los profesores que me han impartido clases, su sabiduría me hizo crecer como persona.

Dedico mi esfuerzo a todos los compañeros que tuvieron la paciencia para compartir aula conmigo.

Luzuriaga V. José Arturo

Agradecimientos

Gracias a todos los compañeros y profesores que se encontraron conmigo a lo largo de la Carrera. Cada uno tenemos una misión en la viña del señor, y el encontrarnos en el camino no es mera coincidencia.

Gracias a mi familia por enseñarme a ser mejor persona. Gracias a mi padre por su cariño y por su esfuerzo.

Gracias al Dr. Diego Arcos por compartir su sabiduría y conocimientos conmigo.

Luzuriaga V. José Arturo

CONTENIDO

Diseño y simulación de una estrategia de gestión energética de una microrred aislada.....	1
Certificado de autenticidad Urkund	2
Certificación.....	3
Responsabilidad de autoría	4
Autorización de publicación	5
Dedicatoria	6
Agradecimientos	7
Resumen.....	14
Abstract	15
Capítulo I	19
Marco Teórico	19
Antecedentes.....	19
Experiencias en Soluciones Interconectadas	21
Experiencias en Soluciones Descentralizadas	22
Justificación e Importancia	23
Alcance del Proyecto.....	25
Objetivos	26
Objetivo General	26
Objetivos Específicos	26
Capítulo II	28
Marco Teórico	28
Microrredes.....	28
Recursos Distribuidos	29
Generación Distribuida (DG)	29
Elementos de Almacenamiento de Energía (ESS)	30
Batería de Plomo Ácido	32
Batería de Níquel Cadmio	32
Batería de Iones de Litio:.....	33
Baterías de Sulfuro de Sodio	34
Baterías de Flujo.....	34

Formación de Red	35
Protección de la Microrred.....	37
Protección Amperimétrica.....	38
Protección Cronicométrica	38
Protección Diferencial	39
Protección Direccional.....	39
Protección de Mínima Impedancia	39
Puesta a Tierra de la Microrred	39
Comunicaciones de la Microrred	41
Control de Armónicos.....	43
Control y Operación de la Microrred	43
Capítulo III	47
Metodología	47
Caracterización de Una Microrred Aislada para Una Locación en Territorio Ecuatoriano.....	47
Emplazamiento Seleccionado.....	48
Esquema Planteado de la Microrred.....	49
Evaluación con Datos Históricos Horarios Recientes en el Emplazamiento Seleccionado.....	50
Modelamiento de Recursos Distribuidos	52
Modelamiento del Panel Solar	53
Modelamiento del Colector Térmico.....	54
Modelamiento del Estimador de Temperatura y Tanque de Almacenamiento.....	56
Estimador del Estado de Carga de la Batería (SOC)	57
Modelamiento del Generador Electrógeno.....	58
Formación de Red con Máquina Síncrona.....	58
Control P-Q.....	61
Consumo de Combustible	62
Emisiones de CO ₂	63
Modelamiento del Perfil de Carga	64
Modelamiento del Consumo del Refrigerador (FR).....	64
Metodología del Modelamiento del Perfil de Carga Térmica	64
Metodología del Modelamiento del Perfil de Carga Eléctrica	65

	10
Capítulo IV	68
Resultados	68
Topología de la Microrred.....	68
Gestión Energética Termoeléctrica	69
Gestión Energética del Lado de la Carga.....	71
Resultados de la Simulación	79
Simulación de la Gestión Termoeléctrica de la Microrred.....	79
Simulación del Sistema Eléctrico Antes de Aplicar el DSM.....	81
Dimensionamiento del Recurso Fotovoltaico.....	84
Dimensionamiento del ESS.....	85
Simulación del DSM	85
Simulación de las Variables de la Microrred	88
Simulación del Consumo de Combustible y de Emisiones de Gases Contaminantes	91
Escenario 1: Microrred Aislada Híbrida con DSM.....	91
Escenario 2: Microrred Aislada Híbrida sin DSM.....	92
Escenario 3: Electrificación con Generador Electrónico y Sin DSM	94
Capítulo V	100
Discusión	100
Conclusiones y Recomendaciones	100
Conclusiones	100
Recomendaciones	102
BIBLIOGRAFÍA	104

Índice de tablas

Tabla 1: <i>Definición de variables y acrónimos.....</i>	16
Tabla 2: <i>Parámetros de obtención de los datos de simulación de cargas.....</i>	65
Tabla 3: <i>Definición de los modos de operación del DSM.....</i>	73
Tabla 4: <i>Definición de habilitación de cargas de acuerdo al modo de operación.....</i>	74

Índice de figuras

Figura 1: <i>Clasificación de los tipos de almacenamiento de energía por su tecnología.</i>	31
Figura 2: <i>Tipos de señales en la microrred según la fuente de generación.</i>	38
Figura 3: <i>Principales esquemas de conexión a tierra (ECT).</i>	41
Figura 4: <i>Protocolos de comunicación según la norma IEC 61850.</i>	42
Figura 5: <i>Definición de las zonas de frecuencia y voltaje estable.</i>	45
Figura 6: <i>Control jerárquico de tres estados.</i>	46
Figura 7: <i>Definición de los tipos de irradiación solar.</i>	48
Figura 8: <i>Insolación promedio diaria por mes de la localidad seleccionada.</i>	49
Figura 9: <i>Disposición de los recursos distribuidos del sistema planteado.</i>	50
Figura 10: <i>Horas Pico Sol de 2011 a 2015.</i>	51
Figura 11: <i>Horas Pico Sol 2016 a 2019.</i>	52
Figura 12: <i>Modelamiento del Panel Fotovoltaico.</i>	53
Figura 13: <i>Modelamiento del Colector Térmico.</i>	55
Figura 14: <i>Diagrama de bloques del Estimador del Estado de Carga de la Batería.</i>	58
Figura 15: <i>Modelo de bloques del proceso de formación de red con control por pendiente.</i>	60
Figura 16: <i>Modelo de bloques del sistema de control de excitación.</i>	62
Figura 17: <i>Perfil de carga eléctrica consolidado de las dos casas.</i>	66
Figura 18: <i>Promedio horario del perfil de carga eléctrica total anual por mes del año.</i>	67
Figura 19: <i>Topología de la microrred termoeléctrica aislada.</i>	68
Figura 20: <i>Gestión termoeléctrica del sistema eléctrico de respaldo (Booster).</i>	71
Figura 21: <i>Estratificación del tipo de cargas eléctricas.</i>	74
Figura 22: <i>Modelo de bloques de la lógica de activación de la variable DSM_{min} para el día d.</i>	76
Figura 23: <i>Diagrama de bloques del subproceso bal.</i>	78
Figura 24: <i>Resultado de la simulación de la Gestión Termoeléctrica.</i>	79
Figura 25: <i>Resultado de la simulación de la Gestión Termoeléctrica de dos semanas del año.</i>	80
Figura 26: <i>Resultado de la simulación de la Gestión Termoeléctrica de dos días del año.</i>	81
Figura 27: <i>Resultado de la simulación del consumo eléctrico del sistema Booster.</i>	81
Figura 28: <i>Evolución de los indicadores PSH y PSH_{SMA-15} para el año en evaluación.</i>	82
Figura 29: <i>Indicadores $Load$ y $Load_{SMA-15}$.</i>	83
Figura 30: <i>Simulación del indicador de balance energético bal.</i>	84
Figura 31: <i>Simulación de la aplicación del DSM.</i>	86
Figura 32: <i>Simulación semanal del DSM.</i>	87
Figura 33: <i>Simulación intradía del DSM.</i>	88
Figura 34: <i>Simulación anual de la microrred con DSM.</i>	89
Figura 35: <i>Simulación semanal de la Microrred con DSM.</i>	90
Figura 36: <i>Simulación intradía de la Microrred con DSM.</i>	91
Figura 37: <i>Simulación del uso de combustible y emisiones de CO_2 de la microrred con DSM.</i>	92

Figura 38: <i>Perfil de carga de la microrred sin la aplicación del DSM.....</i>	93
Figura 39: <i>Simulación del uso de combustible fósil y emisiones de CO₂ de la Microrred sin DSM.....</i>	94
Figura 40: <i>Simulación del calentamiento del ACS sin colectores térmicos.....</i>	95
Figura 41: <i>Simulación semanal del calentamiento del ACS sin colectores térmicos.....</i>	96
Figura 42: <i>Simulación intradía del calentamiento del ACS sin colectores térmicos.....</i>	97
Figura 43: <i>Perfil de carga del calentador eléctrico sin apoyo de colectores térmicos.....</i>	98
Figura 44: <i>Perfil de carga para la alimentación eléctrica sin DSM.....</i>	98
Figura 45: <i>Simulación del uso de combustible y emisiones de CO₂ con 2 Grupos Electrógenos.....</i>	99

Resumen

En el presente trabajo se desarrolló el diseño y la simulación de una estrategia de gestión energética de una Microrred Termoeléctrica del lado de la carga con datos meteorológicos de una locación en el territorio Ecuatoriano, para alimentar a 2 viviendas. Los datos meteorológicos actualizados se obtuvieron del sitio web Solcast™ de manera gratuita, con el registro del correo electrónico institucional de la Universidad, bajo la premisa de que deben ser usados para fines de investigación y desarrollo. Por otro lado, el perfil de irradiación de los años recientes de la locación ubicada en el cantón Palanda, Zamora Chinchipe fue corroborado con los datos del atlas solar ecuatoriano desarrollado por NREL. La metodología utilizada para la simulación fue la investigación de modelos matemáticos ya desarrollados y probados de los recursos distribuidos, componentes de la Microrred. Se investigaron valores comerciales de los recursos distribuidos aplicables a la Topología diseñada.

Se desarrolló un script de generación de perfil de carga de acuerdo a hábitos de consumo con una distribución aleatoria uniforme, con el cual se obtuvo el perfil de carga que se aplicó en la simulación del DSM. Además, se aplicó una fórmula que utiliza valores promediados de carga e irradiación solar para definir la previsión del nivel de balance energético, se usó la definición de media móvil simple.

Se consiguieron los objetivos planteados y la simulación arrojó datos comparativos de importancia entre el funcionamiento de la Microrred Aislada con DSM en comparación con la alimentación del perfil de carga únicamente con generadores electrógenos.

Palabras clave

- **MICRORRED AISLADA**
- **GESTIÓN ENERGÉTICA DEL LADO DE LA CARGA**
- **CONSUMO DE COMBUSTIBLE**

Abstract

In the present work, the design and simulation of a demand-side (DSM) energy management strategy for a Micro-Electric Thermoelectric Microgrid was developed with meteorological data from a location in the Ecuadorian, to feed two homes.

The updated meteorological data was obtained from the Solcast TM website free of charge, with the registration of the institutional email of the University, under the premise that it should be used for research and development purposes.

The irradiation profile of the recent years of the location located in Palanda, Zamora Chinchipe was corroborated with the data from the Ecuadorian solar atlas by NREL.

The methodology used for the simulation was the investigation of mathematical models already developed and tested of the distributed resources, components of the Microgrid.

Commercial values of distributed resources applicable to the designed topology were investigated.

A load profile generation script was developed according to consumption habits with a uniform random distribution, with which the load profile that was applied in the DSM simulation was obtained.

A formula that uses averaged values of load and solar irradiation was applied to define the energy balance level forecast, using the definition of simple moving average.

The objectives set were achieved and the simulation yielded important comparative data between the operations of DSM Stand-Alone Microgrid compared with to feeding the load profile only with fuel based generators.

Keywords

- **OFF-GRID STAND-ALONE MICROGRID**
- **DSM (DEMAND SIDE MANAGEMENT)**
- **FUEL CONSUMPTION**

Tabla 1.

Definición de variables y acrónimos

Variable	Descripción	Unidades
PSH	Horas pico sol.	[h]
R_B	Radiación base a nivel del suelo en condiciones estándar	$[W \cdot m^{-2}]$
R_i	Radiación incidente a la hora i del día	$[W \cdot m^{-2}]$
P_{PV}	Potencia fotovoltaica	[W]
P_{STC}	Potencia fotovoltaica máxima en condiciones estándar	[W]
GHI	Radiación solar horizontal global	$[W \cdot m^{-2}]$
EBH	Radiación solar horizontal difusa	$[W \cdot m^{-2}]$
DHI	Radiación solar horizontal directa	$[W \cdot m^{-2}]$
G_{STC}	Radiación solar horizontal global en condiciones estándar	$[W \cdot m^{-2}]$
γ	Coeficiente de rendimiento de potencia en función de la temperatura	[%]
T_C	Temperatura de la celda	[°C]
T_{STC}	Temperatura en condiciones de medición estándar	[°C]
T_{amb}	Temperatura ambiente	[K]
$NOCT$	Temperatura nominal de operación de celda	[°C]
η_{col}	Eficiencia instantánea de colector térmico	
Q_{col}	Cantidad de calor útil incidente en el líquido calo portador	[W]
A_a	Área de apertura del colector	m^2
q_{col}	Es la cantidad de calor útil incidente en el líquido calo portador por cada m^2 de área de apertura	$[W \cdot m^{-2}]$
η_0	Eficiencia óptica del colector térmico	
a_1	Coeficiente lineal de pérdidas térmicas del colector térmico	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$
a_2	Coeficiente cuadrático de pérdidas térmicas del colector térmico	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-2}]$
ACS	Agua caliente sanitaria	
T_{ACS}	Temperatura de ACS en K	[K]
$T_{ACS,C}$	Temperatura de ACS en °C	[°C]
$T_{amb,C}$	Temperatura ambiente en °C	[°C]
Q_{LOSS}	Tasa de pérdida de energía en el tanque de almacenamiento de ACS	[°C]
L	Longitud del tanque	[m]
k_T	Conductividad térmica del tanque de almacenamiento	$[W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}]$
R_1	Radio interno del tanque de almacenamiento	[m]
R_2	Radio externo del tanque de almacenamiento	[m]
ρ_W	Densidad del agua	$[g \cdot l^{-1}]$
C_p	Calor específico del agua	$[J \cdot g^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}]$

Variable	Descripción	Unidades
V	Capacidad volumétrica del tanque	$[m^3]$
z	Operador de la transformada z	.
T_s	Período de muestreo	$[h]$
SOC	Estado de carga de la batería	$[\%]$
SOC_{min}	Límite inferior de descarga de batería	$[\%]$
$SOC_{máx}$	Límite superior de carga de batería	$[\%]$
$\Delta SOC(n)$	Variación del SOC en el intervalo n – ésimo	$[\%]$
η_b	Eficiencia instantánea de la batería	
P_{BATT}	Potencia de la batería	$[W]$
DOD	Profundidad de descarga de la batería	$[\%]$
P	Potencia	$[W]$
T	Torque	$[N \cdot m]$
ω_r	Velocidad de rotación	$[rad \cdot s^{-1}]$
J	Momento de inercia	$[kg \cdot m^2]$
P_{nom}	Potencia nominal de la máquina síncrona	$[W]$
EC	Energía cinética	$[kg \cdot m^2 \cdot rad^2]$
H	Constante de inercia	$[W \cdot s \cdot VA^{-1}]$
E	Fuerza electromotriz	$[V]$
N	Número de vueltas de bobinado	
φ	Flujo magnético	$[Wb]$
s	Operador de Laplace	
D	Coefficiente de amortiguamiento	$[W \cdot s \cdot VA^{-1}]$
T_m	Torque mecánico	$[N \cdot m]$
T_e	Torque eléctrico	$[N \cdot m]$
δ	Ángulo del eje magnético bajo carga	$[rad]$
K	Ganancia proporcional del gobernador de combustible	
R	Ganancia proporcional de control por pendiente	
ω_0	Velocidad de rotación de referencia	$[rad \cdot s^{-1}]$
φ_d	Flujo magnético producido por el eje directo	$[Wb]$
$G(s)$	Función de transferencia entre voltaje de salida en bornes y voltaje de campo	
E_{fd}	Voltaje de campo	$[V]$
L_d	Inductancia del arrollamiento del eje directo	$[H]$
i_d	Corriente del arrollamiento del eje directo	$[A]$
L_q	Inductancia del arrollamiento del eje de cuadratura	$[H]$
i_q	Corriente del arrollamiento del eje en cuadratura	$[A]$
$E(s)$	Función de transferencia de la excitatriz	
$H(s)$	Función de transferencia de los elementos de realimentación, acondicionamiento y filtrado de la variable de proceso para el control $V - Q$	
V_{ref}	Voltaje de referencia para el regulador $V - Q$	$[V]$
V_{prop}	Voltaje acondicionado proporcional a variable de proceso del regulador $V - Q$	$[V]$
V_{error}	Señal de error para regulador $V - Q$	$[V]$
V	Voltaje en bornes del bobinado de estator	$[V]$

Variable	Descripción	Unidades
P_T	Presión de trabajo	[bar]
A_T	Área de trabajo del pistón	[cm ²]
L_T	Carrera del pistón	[cm]
J_f	Potencia de fricción	[W]
J_{neta}	Potencia neta	[W]
F_{sfc}	Flujo específico de combustible	[l · h · kW ⁻¹]
$J_{I,(4T)}$	Potencia indicada para motor de combustión a 4 tiempos	[W]
F	Flujo de combustible consumido	[l]
P_{DG}	Potencia eléctrica de origen renovable	[W]
$L1, \dots L6$	Potencia eléctrica de cada una de las luminarias de la casa tipo.	[W]
CE	Potencia de consumo de la cocina eléctrica	[W]
FR	Potencia de consumo del refrigerador	[W]
$P_{E,C1}$	Potencia eléctrica de carga de la casa 1	[W]
$P_{E,C2}$	Potencia eléctrica de carga de la casa 1	[W]
P_{GEN}	Potencia entregada por el generador electrógeno	[W]
$Q_{G,T}$	Potencia térmica de gasto total	[W]
$PSH_{SMA15}(d)$	Media móvil de 15 días de las horas pico de sol para el día d	[W · m ⁻²]
$Load(d)$	Consumo energético total diario para el día d	[W – h]
$Load_{SMA15}(d)$	Media móvil de 15 días de consumo energético total diario para el día d	[W – h]
$bal(d)$	Indicador de balance energético	
P_{net}	Potencia fotovoltaica de suma cero	[W]
P_{BOOST}	Potencia de consumo eléctrico del calentador de ACS de respaldo	[W]
$P_{BATT,c}$	Potencia de carga de la batería	[W]
$P_{BATT,d}$	Potencia de descarga de la batería	[W]
$P_{pérdidas}$	Potencial fotovoltaico no aprovechado	[W]
P_{GEN}	Potencia eléctrica entregada por el generador	[W]
BOOSTER	Calentador eléctrico de respaldo de ACS	
i_{BOOST}	Variable lógica de activación del calentador de respaldo	
EN	Acrónimo de enable (activado)	
DIS	Acrónimo de disable (desactivado)	
REP	Acrónimo de reprogramación	
DSM_{min}	Variable lógica de control del nivel de carga	
Q_{ST}	Variable de balance térmico	[W]
DSM	Demand Side Management	

Capítulo I

Marco Teórico

Antecedentes

La energía es un pilar básico en el desarrollo del tipo de vida actual, proveniente del vocablo griego “enérgia” (fuerza o capacidad de acción). La palabra energía significa fuerza activa considerada como la aptitud de una sustancia, cuerpo o sistema para efectuar trabajo (Testo Argentina S.A., 2018). La energía puede provenir de una forma u otra, pero no puede crearse ni destruirse. En términos ingenieriles se cataloga como la medida de cambio impartido a un sistema, puede transferirse mecánicamente a un objeto cuando una fuerza trabaja sobre éste (Bueche *et al.*, 2008).

Casi todas las fuentes de energía en el planeta tienen su procedencia del sol, que en términos simples, provee potencia en forma de irradiación a través del tiempo a sistemas que la acumulan y preservan en la naturaleza (Instituto Nacional de Tecnologías Educativas y de Formación del Profesorado, s.f.).

Para el aprovechamiento del potencial energético presente en la naturaleza, se requiere de técnicas desarrolladas a través de los tiempos dependientes del tipo de energía primaria que se pretende explotar. La fuente más versátil, por la posibilidad de ser transportado, almacenado y por su capacidad energética por unidad de volumen ha sido el petróleo, sin embargo para su formación fue necesario gran cantidad de tiempo, al considerar el aspecto limitado de sus reservas, y el tiempo que se requeriría para volver a abastecer las reservas mundiales, esta fuente de energía fósil es considerada en la práctica no renovable, sin mencionar a los subproductos contaminantes generados en su procesamiento y uso.

Una fuente de energía renovable posee un ciclo de regeneración rápido que puede ser gestionado de manera práctica sin limitaciones de existencias de reserva de materia prima tan imperiosas como las de los combustibles fósiles.

Por primera vez, el Plan Maestro de electrificación del Ecuador presentado en mayo del 2017 es acompañado de un Plan Nacional de Eficiencia Energética. Con el objetivo de esbozar acciones y estrategias necesarias para encaminar a nuestro sistema eléctrico hacia una evolución adecuada enmarcada dentro de un enfoque de eficiencia energética. (Samaniego, 2017)

La expedición del Plan Nacional de desarrollo “Toda una Vida”, compromete a la dinámica de los objetivos institucionales, concordante con la necesidad de fortalecer e innovar la visión de corto, mediano y largo plazo, tendientes a un cambio sustancial y sustentable de la matriz de producción nacional con el aporte básico de los sectores estratégicos, generadores del progreso y del desarrollo.

A abril del 2019, la Energía Total a nivel nacional es de 27 615 GW/h de los cuales, 23 819 GW/h (86.25 %) corresponden a centrales con fuentes de energía renovable y 3 686 GW/h (13.35%) a centrales con fuentes de energía no renovable (Agencia de Regulación y Control de la Electricidad, 2019).

A pesar de los esfuerzos a nivel nacional sobre el cambio de la matriz productiva y a su vez la matriz energética, la participación de la generación de energía eléctrica a partir de energía primaria no renovable es considerable. Presentándose esta participación de la energía no renovable, como una oportunidad para plantear soluciones que aporten a la disminución del consumo de energías primarias no renovables.

Los países que abordan el reto de proveer energía eléctrica a los sectores más pobres y de difícil acceso de la red eléctrica convencional de su población, afrontan

varias problemáticas. Una de las cuales es la generación de políticas públicas que impulsen las iniciativas de electrificación rural. La naturaleza no almacenable de la energía transmitida por un tendido eléctrico hace que el análisis de costos previo a la evaluación de factibilidad de proyectos nuevos, sea más exhaustiva (Alonso, 2005) .

Desde el punto de vista de la generación de la energía eléctrica de un sistema convencional, se deben tomar en cuenta varias etapas que conforman el sistema que hace posible que la energía eléctrica llegue hasta la acometida de la vivienda o punto de consumo. Las etapas principales son la generación, transmisión, distribución, comercialización, cada una con sus requerimientos de infraestructura, recursos humanos, flujo financiero, etc. Por lo que las compañías eléctricas existentes tienen la práctica habitual de servir a emplazamientos de población con una densidad considerable, económicamente activa, y de consumo constante.

Experiencias existentes a nivel mundial han sido un hito en la realización de proyectos de electrificación rural exitosos, y han logrado resolver los retos presentados. Entre las principales se destacan las soluciones interconectadas y las soluciones descentralizadas.

Experiencias en Soluciones Interconectadas

México, Túnez y Tailandia alcanzaron una cobertura casi universal en los últimos 20 a 30 años, con un enfoque innovador en las estrategias de electrificación de las compañías públicas. En México, la compañía nacional se dividió en compañías regionales durante el tiempo en el que se estaba de desarrollo de la electrificación. El gobierno proporcionaba subvenciones a las compañías eléctricas regionales de acuerdo a los requerimientos de las comunidades para la ampliación de la red eléctrica en su comunidad, esto ayudó a bajar el costo de instalación para las empresas; una vez

conectadas las comunidades son proveídas de electricidad como parte de la responsabilidad de las compañías eléctricas.

Túnez, posee una única compañía nacional. El gobierno desarrolló una forma única de otorgar subvenciones a la compañía nacional, lo que incentiva la electrificación rural, dinero que provino directamente del presupuesto nacional, en base a los requerimientos de proyección de electrificación rural. Al igual que en México, una vez creada la nueva capacidad instalada, la empresa es responsable de proporcionar electricidad como parte de sus obligaciones comerciales.

En Tailandia se recurrió a un sistema de subsidio cruzado entre las dos empresas de distribución existentes en el país: La Autoridad Metropolitana de Electricidad, la empresa de distribución que presta servicios en Bangkok y la Autoridad Provincial de Electricidad (PEA), que distribuye electricidad a todas las zonas rurales del país; este subsidio cruzado asciende a un valor anual entre 200-300 millones de dólares. Actualmente más del 99% de los hogares rurales de Tailandia tienen electricidad; Los hogares restantes que residen en áreas extremadamente remotas, están provistos por sistemas solares domésticos.

Experiencias en Soluciones Descentralizadas

La empresa privada puede participar en el desarrollo de soluciones descentralizadas, por la versatilidad de las opciones de generación eléctrica disponibles, sin embargo, la experiencia ha demostrado que la empresa privada requiere de subvenciones por parte del sector público para poder impulsar los planes de electrificación rural. Las empresas públicas de distribución de electricidad en Chile que ofertan la energía a las capitales de los distritos fueron subdivididas y vendidas a inversionistas privados en la década de 1980, la estrategia fue la competencia entre dichas empresas privatizadas junto a compañías eléctricas cooperativas compitan por

dar servicio a las áreas sin servicio, sin resultados positivos. En la década de 1990 el gobierno central de Chile asignó un fondo de electrificación para impulsar la ampliación de la capacidad instalada de distribución hacia los sectores rurales.

Justificación e Importancia

Las políticas de electrificación a sectores geográfica y económicamente más desfavorecidos enfrentan retos importantes. El modelo de abastecimiento típico sigue un diseño generalizado que pretende el aprovechamiento de emplazamientos naturales con una considerable energía potencial, o la generación no renovable a gran o mediana escala, desde la cual, por motivos de optimización de costos se concentra la generación eléctrica para ser transmitida y distribuida hacia los centros de consumo.

El diseño convencional de una solución de ampliación de la cobertura eléctrica pasa por la búsqueda de un emplazamiento de generación eléctrica a base de fuentes primarias renovables o no, con alto potencial energético. La evaluación de las capacidades de transmisión y costo del tendido necesariamente pasan por la consideración de precios unitarios de transmisión, que por lo general no son rentables para emplazamientos de consumo alejados. Sin mencionar la infraestructura de distribución, el personal y la logística necesarias que representan costos fijos, que vuelven aún menos viable los proyectos de electrificación rural. Por lo que, según (Barnes, 2011, p.260) “La extensión de la red debe perseguirse como una opción de menor costo en áreas más densamente pobladas y económicamente avanzadas”.

Se deben adoptar tecnologías offgrid (desconectado de la red pública) acoplada a soluciones de aprovechamiento de energías renovables con la posible inclusión (de ser necesario) de pequeños sistemas de generación a base de fuentes combustibles, para satisfacer las necesidades básicas de consumo de electricidad para los emplazamientos donde la extensión de la red resulta inviable.

La Comisión Europea con su proyecto Euro-Solar destinó capital con fines sociales sin ánimo de lucro para la electrificación de Infocentros para estimular en varias poblaciones rurales alejadas el aprendizaje de tecnologías de la Información y dotar de energía para fines de cuidado de la salud. Sin embargo, luego de años de operación se obtuvieron importantes conclusiones recopiladas por la Célula Nacional de Coordinación (CNC) encargada de implementar el Programa. Entre otros se tiene las siguientes experiencias:

- Un enfoque demasiado centrado en los aspectos de suministros y obras y menos sobre los aspectos humanos y sociales.
- Se confeccionaron recetas pre configuradas a la hora de implementar los aspectos técnicos de los Infocentros no siempre adaptadas al contexto de cada localidad.
- Se realizaron programas de capacitación para las comunidades y comités de gestión, sin embargo, la implementación técnica fue realizada por una empresa contratista privada que solo se enfocó en la instalación, en la práctica no se dio el seguimiento y la gestión energética para los diferentes perfiles de consumo.

Como resultado de estas experiencias, el modelamiento, dimensionamiento y gestión energética de un sistema fotovoltaico offgrid es crucial para poder evaluar distintos tipos de perfiles de consumo, potenciar los sistemas propuestos, evaluar su eficiencia y proyectarlo para su uso en centros de consumo donde la variabilidad de la carga y dependencia de la radiación solar es crítica.

Este proyecto forma parte del proyecto de investigación 2019-EXT-003 titulado: "Integration of academic expertise from the South (Ecuador and Vietnam) into energy-related education and research at KU Leuven - FIIW" y 2020-EXT-007 (VLIR-USO Project number EC2020SIN322A101) titulado "MIRA-ESTE: Specific, innovate Microgrid solutions (accounting for environmental, social, technological and economic aspects) for

isolated rural áreas of Ecuador”. Aprobados por la Universidad mediante Orden de rectorado No.2020-002-ESPE-a-1 del 07 de enero de 2020 y No.2020-111-ESPE-a-1 del 21 de mayo de 2020, respectivamente.

Alcance del Proyecto

Presentación comprensiva de las Microrredes, hitos importantes en su desarrollo, historia, base de funcionamiento y contexto. Para el desarrollo del presente proyecto se introduce desarrollos recientes en el estado del arte del almacenamiento de energía distribuido, y celdas fotovoltaicas.

Planteamiento de un centro de consumo consistente en una residencia tipo, con una carga de consumo máximo de 5kW de energía eléctrica, que posee un colector térmico para calentar agua sanitaria, complementada por una caldera eléctrica. Se considerará a la residencia imposibilitada de acceder a las líneas de distribución de energía eléctrica pública. Selección del emplazamiento dentro del territorio ecuatoriano para el uso de los datos de irradiación solar disponibles en Entidades que analicen y almacenen datos históricos de irradiación solar del emplazamiento seleccionado en el territorio nacional.

Modelamiento de los componentes de una Microrred aislada con generación distribuida constituida por un generador electrógeno, un generador fotovoltaico, convertidores de potencia y formación de red necesarios, y los componentes que conforman el centro de carga residencial con los que se evaluará el desempeño del sistema

Diseño de una estrategia de gestión energética de la potencia de consumo desde el lado de la carga, de acuerdo a la potencia disponible, energía almacenada y previsión de consumo.

Elaboración de un script de simulación en Matlab® de perfiles de carga e irradiación solar como entradas, que generará como salida los datos de energía fotovoltaica utilizada directamente en cargas, energía fotovoltaica no utilizada y almacenada en baterías, energía generada por el generador a base de combustible fósil de acuerdo a los requerimientos del sistema, cantidad de CO_2 no liberada al ambiente gracias al reemplazo de la generación térmica por la generación a base de energía fotovoltaica.

Análisis de Viabilidad Económica para un escenario hipotético de 20 años de funcionamiento, la vida útil promedio de un sistema de generación fotovoltaica, en relación a su contraparte de generación netamente a base de combustible fósil.

Objetivos

Objetivo General

Diseño y simulación de una estrategia gestión de energética de la potencia de consumo de una microrred aislada, mediante el uso de datos de potencia disponible energía almacenada y previsión de consumo, para evaluar el desempeño del controlador en el mejoramiento del perfil de potencia, la capacidad de mantener al centro de consumo sin interrupciones de energía eléctrica y su viabilidad económica.

Objetivos Específicos

- Estudiar los sistemas fotovoltaicos y bancos de baterías su funcionamiento y limitaciones.
- Modelar los componentes de la carga residencial, y del sistema Híbrido de generación.
- Dimensionar los componentes de generación fotovoltaica.
- Diseñar la estrategia de gestión energética para el emplazamiento de consumo.
- Elaboración del entorno de simulación en Matlab®.

- Realizar una memoria técnica y manual de usuario del entorno de simulación.
- Presentar las simulaciones del sistema propuesto.

Capítulo II

Marco Teórico

Microrredes

Una microrred es un sistema singular de energía, controlable e independiente que comprende como elementos principales los dispositivos de generación distribuida, elementos de almacenamiento de energía y controladores. Por la disposición de los elementos que conforman la Microrred es de considerar sus propiedades de generación autónoma, controlabilidad, estabilidad, autonomía energética, entre otras.

Características que merecen un estudio detallado y definido dentro de la capacidad de conexión a la red convencional, aptitud de intercambio bidireccional de energía, e incluso funcionamiento aislado.

El concepto de Microrred es presentado por primera vez en el año 2001 en el ámbito académico en la Universidad de Wisconsin-Madison, por el profesor R.H. Lasseter, quien postulaba ciertas características que debe ésta debe cumplir para poder ser catalogada como una microrred, dichas características son:

- Grupo de cargas y micro recursos que operan como una entidad única.
- Capacidad de Proporcionar energía y Calor a su entorno Local.
- Puede ser catalogada como una celda en la pirámide de automatización, para el control de energía en relación con la macrorred o red pública
- Puede diseñarse para satisfacer las necesidades específicas del usuario.
- Cuentan con micro fuentes de energía con capacidad de hasta 100kW.

Como se menciona en (Fusheng *et al.*, 2016), las Microrredes están en auge en lo que a su desarrollo confiere y su definición varía en algunas naciones de acuerdo a las necesidades que éstos sistemas solventan, dentro de las realidades de cada país. Naciones como Estados Unidos, Japón y China, principales desarrolladores de

tecnologías descentralizadas, utilizan actualmente criterios con ciertas diferencias a la hora de catalogar a sus sistemas respectivos como una microrred.

Hitos importantes en el desarrollo de su estado del arte, se han presentado en la corta historia de las Microrredes, como se expone en (Fusheng *et al.*, 2016); Estados Unidos, Japón y China han tenido un desarrollo no homogéneo en la estandarización de las Microrredes, lo que se refleja en la lista de estándares que cada país maneja al momento de definir a una microrred, base de funcionamiento, y contexto de uso.

Recursos Distribuidos

Los recursos distribuidos se refieren a aquellos sistemas combinados de generación distribuida y equipo de almacenamiento de energía. En otras palabras $RD=GD+ES$ (Recursos Distribuidos=generación Distribuida + Elementos de almacenamiento de energía) (Fusheng *et al.*, 2016)

Un sistema de energía distribuida debe cumplir con criterios básicos de diseño como son:

- Uso de energía integral y eficiente
- Procura de la estabilidad y seguridad en la red.
- Pequeña capacidad y pequeño uso de un área física.
- Pequeña distancia de transmisión desde la generación hasta el punto de consumo.
- Respetuoso con el medio ambiente.

En otras palabras, una microrred está compuesta de recursos distribuidos, los cuales carecen de las propiedades de control y automatización, que convertirían a tal grupo de recursos distribuidos en una microrred. De manera genérica se denomina recurso distribuido, a un generador distribuido o a un elemento de almacenamiento de energía.

Generación Distribuida (DG)

Se refiere a cualquier sistema pequeño de generación de energía eléctrica independiente de la red tradicional de distribución eléctrica, que se encuentran en el lado del usuario, que cumple la función de satisfacer la demanda de los usuarios finales.

Se incluye:

- Generador Eólico.
- Panel Fotovoltaico.
- Motor de combustión interna.
- Pequeña central Hidroeléctrica.
- Celda de Combustible.
- Aprovechamiento de Residuos.
- Biomasa.
- Geotérmica.
- Oceánica.
- Mareomotriz.

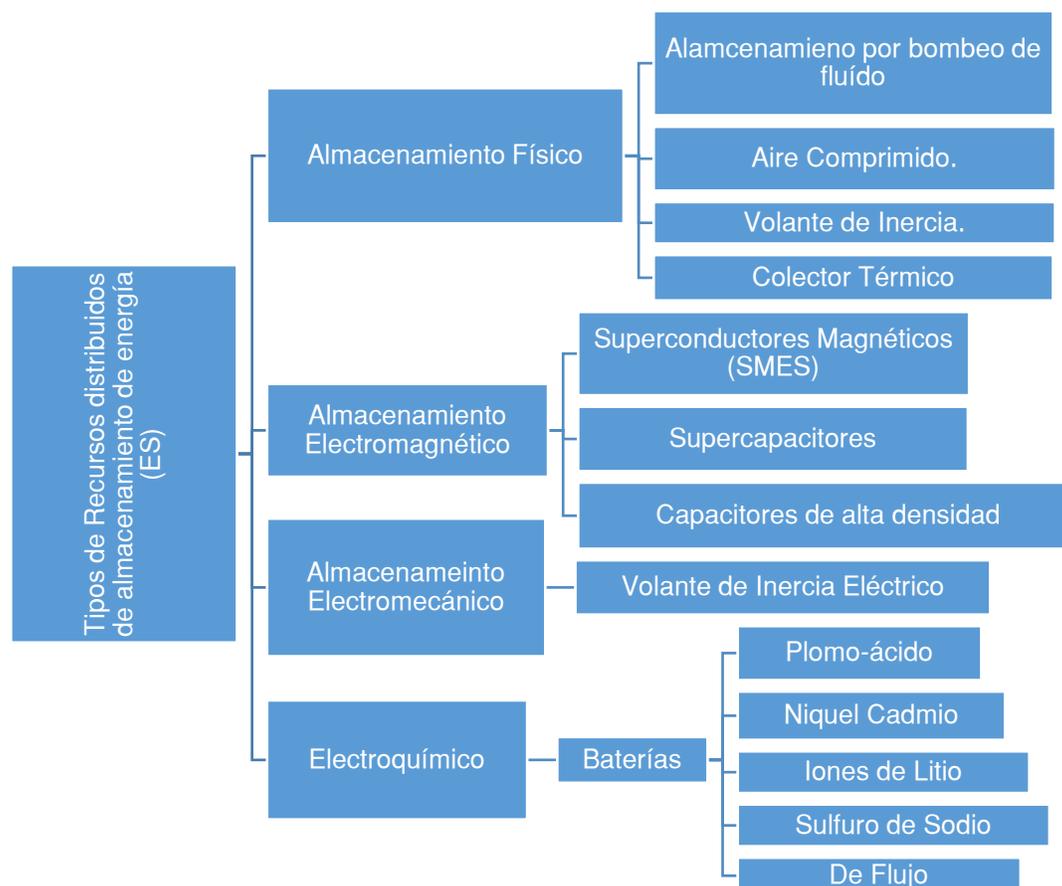
Elementos de Almacenamiento de Energía (ESS)

El almacenamiento de energía ejerce un papel importante para que la microrred cumpla con la particularidad de ser sostenible y tener la capacidad de abastecer las necesidades del usuario únicamente con los recursos de generación distribuida. La incertidumbre, variabilidad y desbalance energético que se puede presentar entre carga y generación distribuida se resuelve con los elementos de almacenamiento de energía.

Existen varios tipos de tecnología de almacenamiento de energía, se basan en medios de almacenamiento físico químico, electromagnético, electromecánico y de cambio de fase (Fusheng *et al.*, 2016). Los tipos de almacenamiento de energía más representativos se presentan en la Figura 1.

Figura 1

Clasificación de los tipos de almacenamiento de energía por su tecnología.



El funcionamiento de las baterías está basado en la pila electroquímica. Cada pila se compone de dos electrodos, cada uno constituido físicamente con potencial positivo y negativo respecto el uno del otro y que al estar sumergidos en un elemento líquido llamado electrolito, generan una diferencia de potencial entre dichos electrodos y una corriente eléctrica al mantener en circuito cerrado los mencionados elementos. Una batería contiene varias pilas colocados en compartimentos separados para aumentar el

potencial eléctrico disponible, optimizando el espacio que va a ocupar cada celda en la que está contenida individualmente cada pila.

Batería de Plomo Ácido

Su electrodo positivo está hecho de plomo, recubierto con óxido de plomo, el electrodo negativo es plomo poroso. El electrolito usado es el ácido sulfúrico, de ésta descripción su nombre de plomo-ácido. Sus principales características son:

- Corta vida útil.
- Potencia específica baja.
- Bajo precio y costo de Mantenimiento.
- No apto para trabajar a altas temperaturas.

Se utiliza principalmente para:

- Cierre de Interruptores automáticos, durante el funcionamiento del sistema.
- Fuente de alimentación independiente para protección de relés.
- Para motores de arranque.
- Sistema de respaldo de emergencia para iluminación.

Batería de Níquel Cadmio

Su cátodo está compuesto de hidróxido de Níquel, y el ánodo de un compuesto de Cadmio. El medio electrolito está formado de hidróxido de potasio. Sus principales características son:

- Larga Vida Útil
- Baja necesidad de mantenimiento.
- Alta energía y potencia específica (45-80 Wh/Kg), en relación con las de plomo ácido.

- Admiten sobrecargas, se las puede seguir brindando de energía, pero sin continuar con la carga.
- Por la generación de desechos fue prohibida en la Unión Europea.
- Mayor Coste de Adquisición.

Sus aplicaciones principales son:

- Equipo Biomédico.
- Cámaras profesionales de Video.
- Herramientas de potencia.

Batería de Iones de Litio:

Están conformadas de Iones de Litio, y de Polímeros de Litio. Se utilizan diversos materiales para su construcción, como el óxido de cobalto-litio, óxido de Cobalto-Manganeso, Litio Ferros fato. Actualmente se encuentra en desarrollo la batería de Litio-Azufre, que se espera alcance una densidad de carga de 400Wh/kg. Sus principales características son:

- Alta densidad de energía (250 Wh/kg aprox.).
- Vida útil de entre 2000 y 3000 ciclos de carga con una Profundidad de Descarga media saludable de hasta el 70%.
- Los valores de vida útil y Profundidad de Descarga son sensibles a la temperatura a la que está expuesta la batería.
- Es la tecnología de mayor crecimiento en el mercado.

Sus principales aplicaciones son:

- Electrónica de Consumo.
- Coches Eléctricos.
- Módulos Fotovoltaicos.

- Módulos de generación Eólica.

Baterías de Sulfuro de Sodio

Compuesta de sal fundida a partir de Sodio y Azufre, actualmente se utiliza una opción de con iones de sodio, con sulfuro de cobre en el electrodo, para ampliar la ciclicidad de las baterías. Sus principales características son:

- Alta densidad de energía
- Más compactas (ocupan 1/5 del tamaño de las de plomo ácido).
- Facilita el diseño modular.
- Actualmente constituye la tecnología con la que se ha construido el recurso distribuido de almacenamiento más grande del mundo, en Abu Dhabi (108 MW / 648 MWh) (Benedicto, 2020).

Es una tecnología prometedora para todo tipo de usos en los que comercial y técnicamente sea viable. Además de que se proyecta será usado en grandes instalaciones de energías renovables.

Baterías de Flujo

Su composición difiere físicamente de otras tecnologías en que sus electrodos son elementos disueltos en líquidos contenidos en el sistema y separados por una membrana. Los líquidos que contienen cada uno un tipo de material disuelto, se mantienen confinados en sus respectivos espacios, el intercambio de iones se produce a través de la membrana. Sus principales características son:

- Larga Vida Útil.
- Potencia Nominal independiente de la Capacidad Nominal.
- Su capacidad puede aumentarse, con la adición de electrolitos o al aumentar su concentración.

- Por la forma en que se almacenan los elementos puede tomar la forma deseada según las especificaciones de diseño.

Es una tecnología con gran proyección para su uso en aplicaciones de energía renovable, para mejorar la estabilidad del sistema, flexibilidad en el cambio de cargas en el sistema, mantener el suministro en caso de falla eléctrica.

Formación de Red

El principio de formación de red para energía renovable depende de la electrónica de potencia presente en los equipos que acoplan los diferentes buses de energía con la línea de corriente alterna, éstos carecen de una característica importante, que sí tienen los generadores síncronos, como es la inercia, representada matemáticamente con la constante de inercia en los diferentes modelos y tipos de generadores síncronos presentes en el mercado.

La inercia de red es una característica presente en las redes de distribución convencional o de potencia infinita, este tipo de redes se caracterizan por tener un alto nivel de potencia en relación con cualquier perturbación local que pudiere presentar un único generador local, para el caso de una red interconectada. Ante perturbaciones, la inercia de red aporta con una cantidad de energía mecánicamente almacenada en forma de movimiento rotacional en los rotores que se encuentren en servicio. Esta energía latente que se mantiene almacenada mientras el sistema se encuentre en funcionamiento, evita que perturbaciones de cualquier índole, trasgredan instantáneamente la señal de red, la cual se pueda ver afectada en su forma o frecuencia (Rodríguez, 2014).

Los convertidores de potencia de CC/CC y CC/CA son la base del acoplamiento de la salida de los generadores de energía renovable a una microrred. En función a su

principio de funcionamiento tienen una dinámica diferente a la presentada en la generación tradicional mediante máquinas síncronas.

El enfoque comúnmente utilizado es el de una baja penetración de potencia inyectada de energías renovables con relación a la potencia entregada por sus pares síncronos, debido a la estabilidad instantánea que presentan gracias a la inercia de red que se advirtió anteriormente. Sin embargo para Microrredes con una configuración aislada, como se menciona en (Matevosyan *et. al*, 2019) una alta penetración de las energías renovables es el reto a alcanzar para que el diseño procure la incorporación significativa de dicho tipo de energía en relación con cualquier recurso distribuido con funcionamiento a base de energías no renovables.

Con el creciente mercado de las energías renovables, los integradores, tienen el reto de precautelar los principios de formación de red de los recursos distribuidos presentes, para Microrredes ya instaladas, y de las tecnologías disponibles en el mercado para cada tipo de solución nueva que se requiera. A medida que las fuentes de energía basadas en inversores (IBPS), reemplazan a los generadores síncronos, los cambios dinámicos se vuelven más rápidos, lo que da como resultado que los controladores de inversor rápido rígidos no puedan adaptarse al sistema (Matevosyan *et. al*, 2019), en otras palabras si existen más de un controlador con la configuración de formador de red, se puede presentar una competencia de sincronización entre ellos, situación que lleva al sistema a la inestabilidad.

Actualmente para mantener una operación a niveles de seguridad de sincronía, algunas áreas con generación síncrona en el mundo (por ejemplo: Irlanda, Texas y Australia del Sur) limitan a menudo la producción de energía renovable (IBPS), o requieren una cantidad mínima de generadores síncronos que deben ejecutarse (Matevosyan *et. al*, 2019).

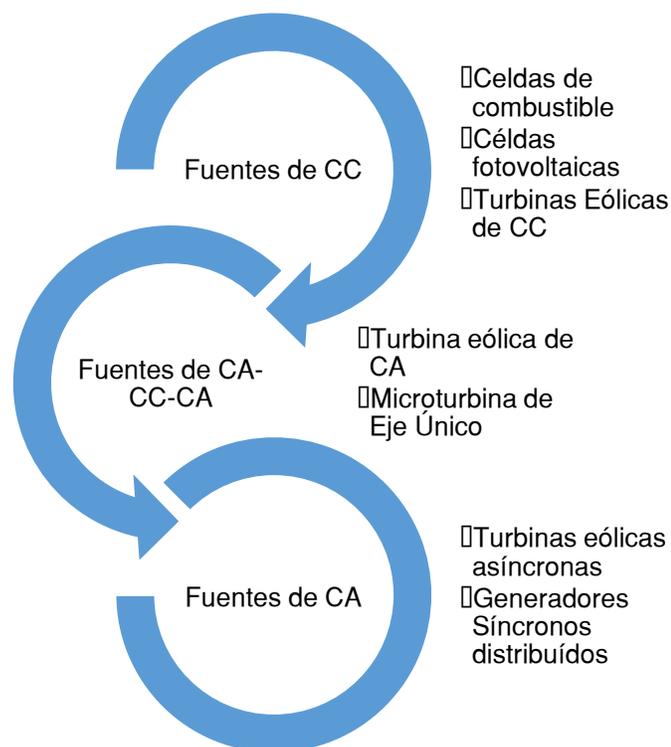
En su contraparte, los desarrollos tecnológicos enfocados en maximizar la penetración de la generación de energía basada en inversores, persiguen el concepto de tecnología IBPS de formación de rejilla (grid-forming inverters) como un controlador IBPS alternativo de mayor robustez (GFM-IBPS). Sin embargo esta tecnología aún se encuentra en desarrollo y depende de las características de consumo y generación de cada proyecto (Matevosyan *et. al*, 2019). Otro hito a mencionar es el modelo de una fuente inversora para microrred, basada en el modelo transitorio de electricidad máquina-generador de generador síncrono, conocido como generador síncrono virtual (Fusheng *et al.*, 2016).

Protección de la Microrred

De la misma forma que un sistema de electrificación tradicional, un microrred requiere protecciones para que pueda operar de manera segura con la consigna de cuidar la integridad personal de los usuarios y de los efectos materiales que se pudieren poner en riesgo ante una operación inadecuada de los componentes de la microrred. Hay que denotar los diferentes tipos de fuentes de generación que se pueden presentar en una microrred según el tipo de señal, de acuerdo lo que se muestra en la Figura 2.

Figura 2.

Tipos de señales en la microrred según la fuente de generación.



Durante el funcionamiento del sistema pueden presentarse diversas perturbaciones que sacan al sistema de su desenvolvimiento dentro de los límites nominales, para protecciones contra sobrecarga, cortocircuito corriente de fuga, etc. Deben entrar en funcionamiento, en esos casos la o las protecciones de la microrred.

Protección Amperimétrica

Un elemento de protección contra sobre corrientes o cortocircuito como el seccionador magneto térmico y / o fusibles deben ser usados en lazos de conexión unidireccional de energía según su diseño, en puntos en donde no converjan puntos de conexión común de varias fuentes de energía.

Protección Cronométrica

Elementos que brindan protección temporizada, variable o no según el diseño, para efectos de sectorizar fallas en redes con múltiples fuentes de energía.

Protección Diferencial

Detecta corrientes de fuga entre los terminales de alimentación de una carga de acuerdo a un umbral máximo de corriente de fuga nominal. Principalmente utilizado para prevenir fugas a masa o a tierra.

Protección Direccional

Empleado en lazos donde convergen varias fuentes de energía, como por ejemplo los buses de DC o puntos de conexión común de AC de las Microrredes. Pueden diferenciar el nivel de corriente en cada sentido de conducción eléctrica, capacidad de discriminar entre una sobre corriente en carga y sobre corriente en el punto común de Conexión.

Una configuración de protección direccional cronométrica permite realizar un diseño de protecciones eléctricas que faciliten la sectorización de las fallas, y la identificación de problemas. Este tipo de configuración impide que todo el sistema salga de funcionamiento innecesariamente por una falla local, y que se produzcan fallas de redundancia cíclica en el restablecimiento de conexiones luego de una falla generalizada.

Protección de Mínima Impedancia

Enfocados para la protección de sistemas de generación contra fallas a tierra. Ante la premisa de que en una microrred el uso óptimo de los recursos energéticos es crucial para su desempeño, la protección contra fallas a tierra es necesaria.

Puesta a Tierra de la Microrred

Es una medida de protección utilizada en todo tipo de instalaciones eléctricas, las Microrredes no pueden ser la excepción. Hay dos tipos, puesta a tierra funcional, y puesta a tierra protectora. En el primer tipo están la puesta a tierra en funcionamiento, conexión a tierra lógica, conexión a tierra de señal, y conexión a tierra de pantalla. La conexión a tierra protectora significa poner a tierra una parte del equipo, mediante un dispositivo de puesta a tierra para garantizar la seguridad del personal y del equipo (Fusheng *et al.*, 2016, p. 125). En la Figura 3 se definen los Esquemas de conexión a tierra típicamente utilizados para los efectos descritos.

Los Esquemas de Conexión a Tierra, antiguamente conocidos como regímenes de Neutro, establecen la manera de interconectar el neutro del secundario del transformador con la tierra y su relación con la conexión de las masas de los equipos receptores en la instalación eléctrica. Si bien para el caso de la microrred aislada que se estudia en el presente proyecto, no se podría referir al régimen de neutro según su definición tradicional debido a que la instalación no recibe energía desde un transformador de red, se debe considerar el esquema de conexión a tierra que se utilizará en el proyecto para evitar desbalances energéticos innecesarios así como pérdidas indebidas por incompatibilidad entre ECT de los diferentes generadores distribuidos, y sobre todo riesgos eléctricos para la integridad de los ocupantes y sus enseres.

Al definir el ECT del proyecto se pueden considerar las protecciones que habrá que instalar debido a la configuración elegida, así como posibles mecanismos de monitoreo de variables de la microrred para prevenir posibles fugas a tierra que se pudieren presentar. Según la Norma Ecuatoriana de la Construcción el ECT en una instalación de baja tensión debe ser TN-C-S.

Figura 3

Principales esquemas de conexión a tierra (ECT).



Comunicaciones de la Microrred

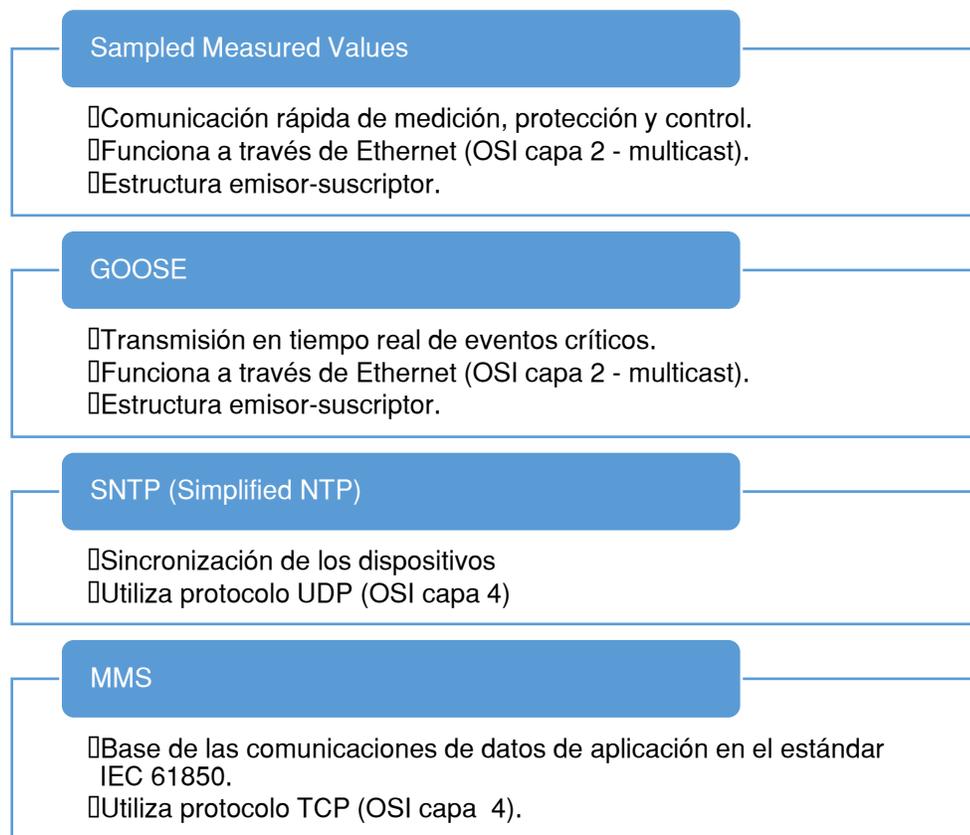
Un sistema aislado requerirá en la medida de la complejidad de su diseño y de sus especificaciones de control un conjunto de protocolos de comunicación que sirven a los diferentes niveles de control de acuerdo a la naturaleza de los datos que distribuya. Como se menciona en (Fusheng *et al.*, 2016, p. 115-124) el estándar IEC 61850 define una serie de protocolos de comunicación ente distintos dispositivos de subestaciones eléctricas, este protocolo es idóneo para su uso en la comunicación de Microrredes. La Figura 4 presenta los protocolos de comunicación definidos en la norma IEC 61850.

La comunicación de una microrred debe tener alta velocidad, capacidad de transmisión de datos bidireccional, banda ancha suficiente para los requerimientos de

control, y sistemas automáticos con el afán de perseguir una flexibilidad de acceso a múltiples servicios de comunicación en formato “plug and play” (Fusheng *et al.*, 2016, p. 115).

Figura 4.

Protocolos de comunicación según la norma IEC 61850.



La Ciberseguridad en las redes de comunicación de subestaciones, como se menciona en (Instituto Nacional de Ciberseguridad [INCIBE], s.f.), se torna de gran importancia, incidentes como BlackEnergy¹ y CrashOverride² (malware con un módulo específico para comunicaciones IEC 61850) dejan claro que la sofisticación en las

¹ Originariamente creaba botnets para ataques DDoS. Ha pasado de ser troyano a convertirse en una Amenaza Persistente Avanzada (APT - Advanced Persistent Threat) (INCIBE, s.f.).

² Malware modular proyectado a ataques en organizaciones que utilizan los protocolos IEC101, IEC104, IEC61850 y OPC (INCIBE, s.f.).

operaciones de transmisión, distribución y gestión eléctrica conllevan riesgos colaterales de seguridad informática en su operación, conocer de estos tópicos y hasta profesionalizarse en Ciberseguridad, toma cada vez mayor relevancia.

Control de Armónicos

La incorporación de fuentes renovables a una microrred presenta un tópico a considerar en la etapa de diseño, el control de armónicos, de acuerdo (Fusheng *et al.*, 2016), “armónicos en la microrred provienen de dos fuentes: los armónicos de fondo producidos por el sistema de alimentación conectado con la microrred, y los armónicos producidos por las cargas y equipos no lineales (incluidos los inversores) de la microrred” (p.137).

“El control y gestión de las señales armónicas ha demostrado el mejoramiento de la calidad de la energía” (Fusheng *et al.*, 2016, p. 137), “se disminuyen pérdidas en calor y alteraciones no deseadas” (ABB Drives, 2017).

La estrategia utilizada para atenuación de armónicos presentes en la red, determinadas por un analizador de red con el afán de minimizar el índice THD, es el uso de filtros pasivos o activos. Existe gran variedad de modelos de este tipo de soluciones, de acuerdo a las consideraciones derivadas de la evaluación mediante el uso del analizador de red.

Control y Operación de la Microrred

En los apartados anteriores se presentó los componentes más relevantes que se deben considerar en el desarrollo de proyectos relacionados con Microrredes, se explica su base de funcionamiento; se pretende introducir al lector sobre la importancia de establecer una jerarquía de diseño en base a la norma ISA- 95, sobre la cual se define la pirámide de automatización (Guerrero, Vásquez, García, & Castilla, 2011) .

El control de una microrred aislada es más exigente que el de una microrred con interconexión a una red rígida, envuelve control en estado estable, control dinámico y control transitorio (Fusheng *et al.*, 2016).

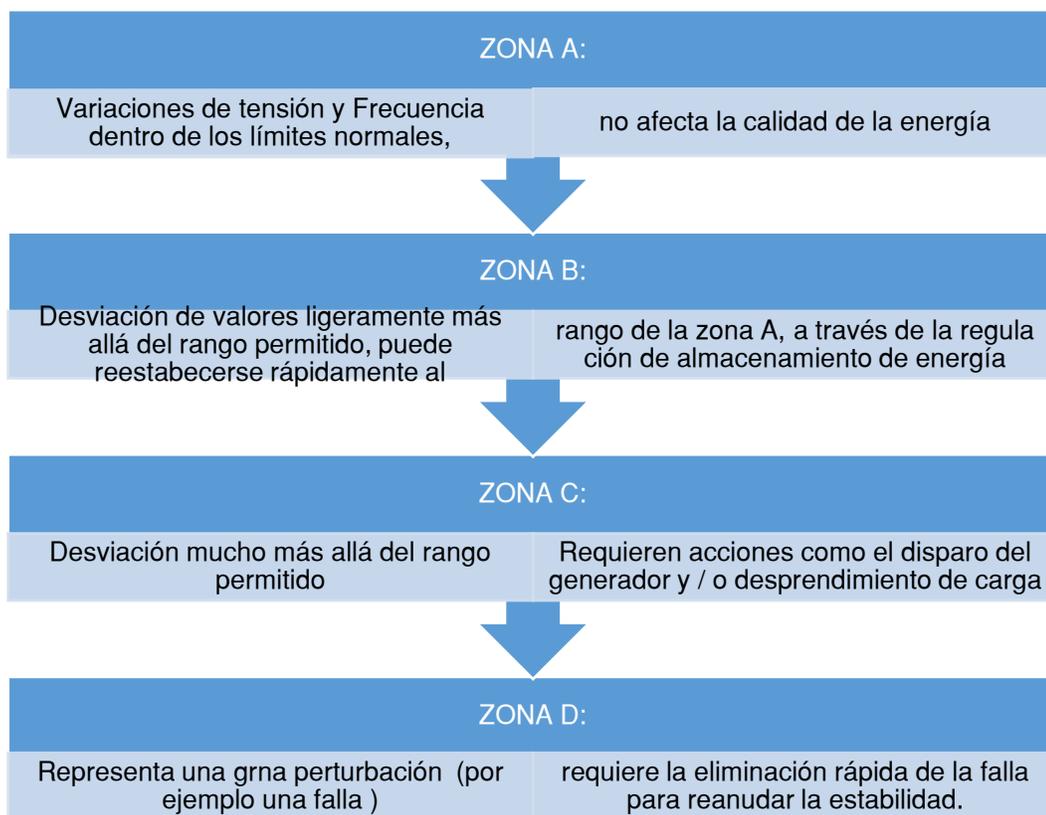
Abarcar todos los retos de control que se presentan en la ejecución de una microrred aislada requiere un enfoque segmentado escalable e integrable para tanto para el diseñador, integradores, operadores, etc. Levantar el procedimiento de diseño desde una sola perspectiva sin una jerarquía de control, vuelve a la microrred inviable y hasta anti técnica, se presenta a partir de esta necesidad la definición de jerarquías de control.

El Control Jerárquico divide a los retos de diseño en tres capas principales para simplificarlo y estandarizarlo dentro de lo posible, a partir del estándar ANSI / ISA-95, o ISA-95, al cual se le conoce comúnmente como el estándar que tiene como objetivo la facilitación de la incorporación de las funciones MES, ERP y los sistemas de control en empresas productivas (Salinas, 2020).

El campo de acción de los diferentes niveles del control jerárquico puede ser dividido en zonas, las cuales se presentan en la Figura 5, según el grado de afectación de determinada perturbación.

Figura 5.

Definición de las zonas de frecuencia y voltaje estable



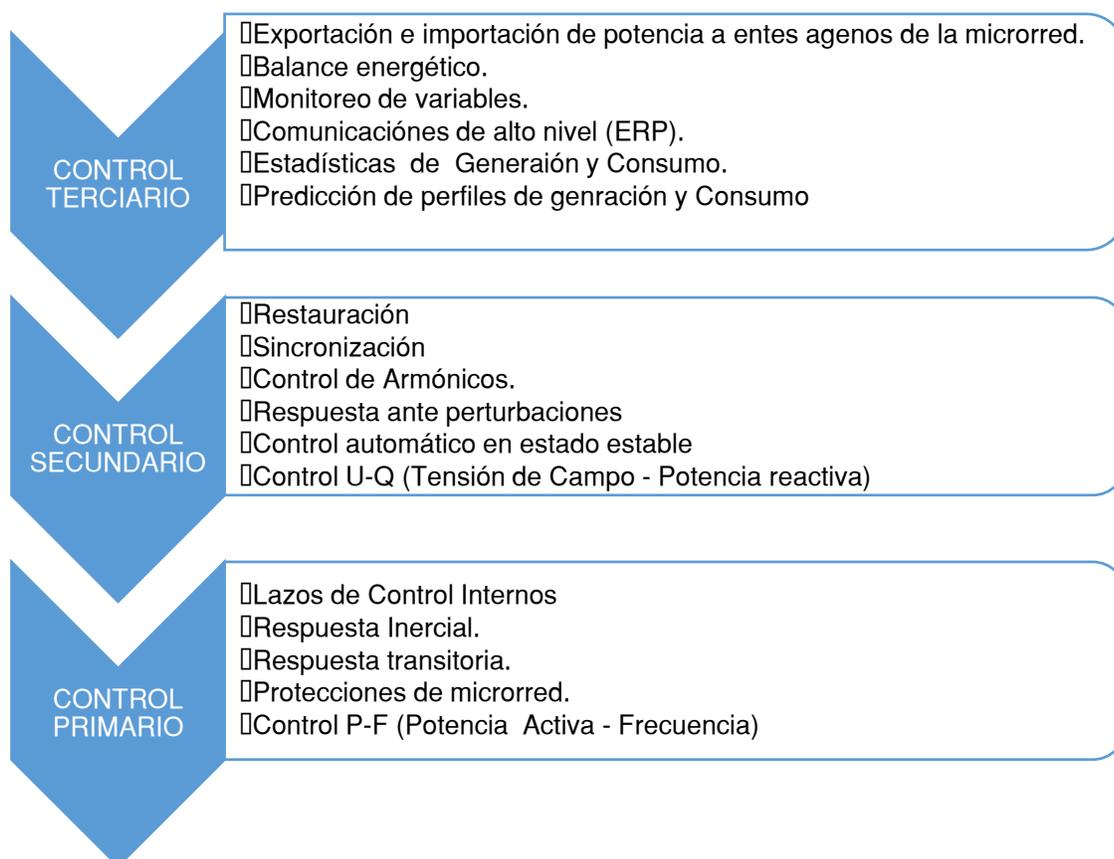
Nota. Un perfil de funcionamiento nominal se localiza en la zona A, con valores de voltaje y frecuencia sin perturbaciones o con un grado de perturbación que puede ser manejado por los lazos de control definidos en el nivel primario de la Jerarquía de control, mientras más se alejen dichos valores de la zona A, los elementos de control que conforman los subsiguientes niveles compensan dicha perturbación.

De acuerdo a (Guerrero, Vásquez, García, & Castilla, 2011), los niveles de control primario, secundario y terciario son los que se catalogan en la Figura 6, que compensan perturbaciones de acuerdo al grado de separación de los valores nominales de la zona A definida en la Figura 5. El integrador define los niveles de las variables en cada jerarquía de control según los requerimientos de diseño, capacidades de los

recursos distribuidos, y límites de cada una de las etapas de la microrred de los otros niveles jerárquicos de control.

Figura 6.

Control jerárquico de tres estados



El ingreso a las zonas de operación C y D requieren de acciones de control marginales que escapan a los límites normales de control automático ya sea por saturación de los elementos constitutivos, falta de potencia disponible para cubrir el requerimiento, fallas de aislamiento, entre otros. Para una transferencia ordenada de la potencia disponible en los recursos distribuidos y la red fija en caso de haber, se requiere de seguir un conjunto de pasos secuenciales bien definidos, que se catalogan como una estrategia de gestión energética.

Capítulo III

Metodología

Caracterización de Una Microrred Aislada para Una Locación en Territorio Ecuatoriano

Frente a la necesidad de contar con una referencia documental de carácter técnico que cumpla con el requerimiento gubernamental de incentivar el uso de energías limpias que promuevan el desarrollo con especial enfoque en las zonas rurales, se ha motivado en una institución como el CONELEC (Consejo nacional de Electricidad), la generación de un documento como el Atlas Solar del Ecuador con fines de generación eléctrica, que fue elaborado, en la edición que se hará referencia en el presente proyecto, por la Corporación para la Investigación Energética, CIE.

La información levantada en el Atlas Solar del Ecuador con fines de generación eléctrica fue producida por el NREL (National Renewable Energy Laboratory) de los Estados Unidos. NREL es un laboratorio nacional del Departamento de Energía, Oficina de Eficiencia Energética, operado por la Alianza para la Sustentabilidad Energética, del país mencionado.

El modelo CRS (Climatological Solar Radiation Model), permite conocer la insolación diaria total sobre una superficie horizontal con una resolución de 40 km x 40 km con alcance mundial, sus resultados han sido validados a través de medición de datos en estaciones, el error que se ha verificado en las mediciones de campo en dichas estaciones es del 10% (Corporación para la Inversigación Energética [CIE], 2008).

Las fichas de insolación solar que se muestran en el Atlas Solar del Ecuador con fines de generación eléctrica, presentan la insolación (global, difusa y directa) diaria promedio durante cada mes del año para todo el territorio Ecuatoriano. La información

disponible, fue levantada en el período determinado entre el 1 de Enero de 1985 y el 31 de Diciembre de 1991, y fue publicado en Julio del 2006.

Como se define en (Solcast, 2019) los tipos de irradiación solar que pueden ser captadas con fines de generación eléctrica se caracterizan en la Figura 7.

Figura 7.

Definición de los tipos de irradiación solar

Global Horizontal Irradiance (GHI):	□ Suma total de la irradiancia recibida en una superficie horizontal de los componentes horizontales de la irradiancia directa (haz) y difusa. Unidad de medida W/m^2
Direct (Beam) Horizontal Irradiance (EBH)	□ Componente horizontal de la irradiancia normal directa. Unidad de medida W/m^2
Direct Normal Irradiance (DNI)	□ Irradiancia solar que llega en una línea directa desde el sol, medida en una superficie sostenida perpendicular al sol. Unidad de medida W/m^2
Diffuse Horizontal Irradiance (DHI)	□ El componente horizontal de la irradiancia difusa (irradiancia dispersada por la atmósfera). Unidad de medida W/m^2

Los datos que se considerarán para el dimensionamiento en las siguientes páginas, corresponde a la irradiación global diaria promedio de cada uno de los meses del año, información contenida en el Atlas Solar mencionado y que se tabulará según la locación a elegir.

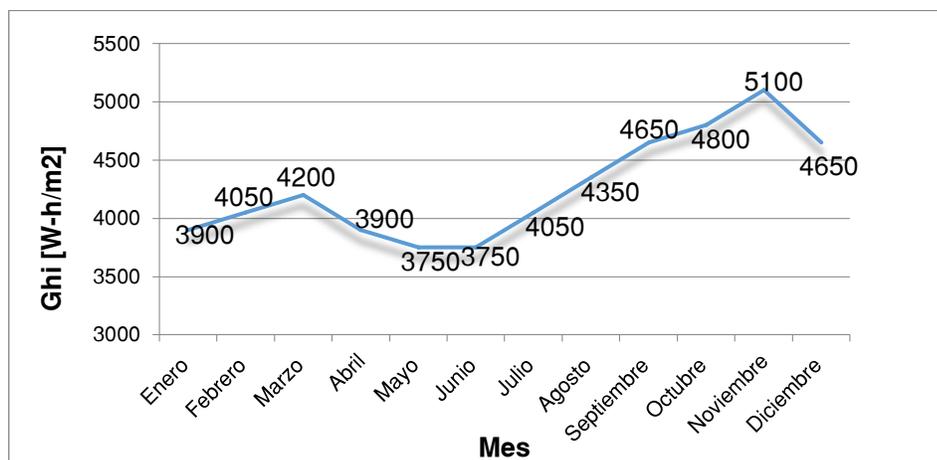
Emplazamiento Seleccionado

EERSSA, Empresa Eléctrica Regional del Sur, ha efectuado la instalación de sistemas fotovoltaicos individuales en algunos cantones de la provincia de Zamora Chinchipe como por ejemplo Palanda, Chinchipe y Yacuambi los cuales no tenían acceso a la electricidad, dichas locaciones se han considerado inviables para la extensión de la red fija, al menos a corto plazo (Sánchez, 2018).

Se presenta en la Figura 8, los datos de Insolación Global obtenidos a partir de lecturas visuales de las isohelias que localizan al cantón Palanda, el emplazamiento seleccionado, de cada uno de los mapas de insolación global pertenecientes a cada uno de los meses del año, según el Atlas Solar del Ecuador con fines de generación eléctrica.

Figura 8.

Insolación promedio diaria por mes de la localidad seleccionada



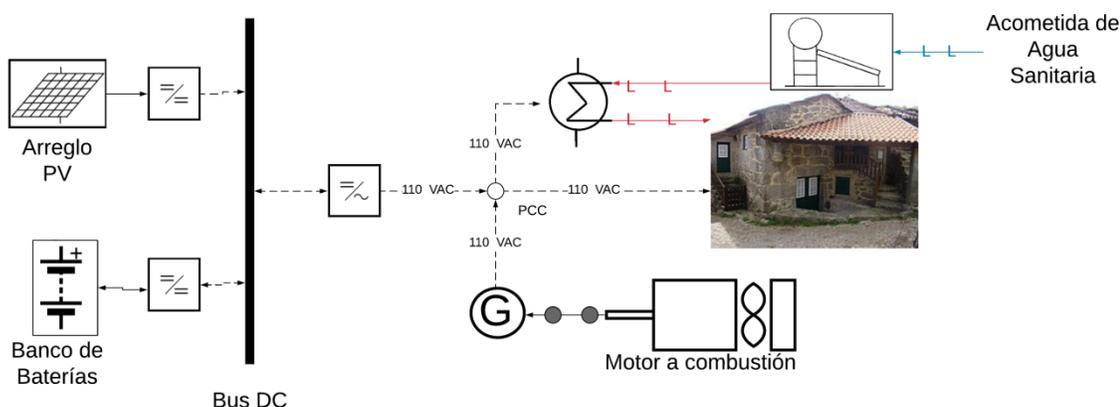
Nota. Para efectos de simulación y dimensionamiento de los sistemas distribuidos se considera a la locación seleccionada, situada en las coordenadas terrestres -4.652208 de latitud y -79.130863 de longitud en el cantón Palanda, provincia de Zamora Chinchipe.

Esquema Planteado de la Microrred

El esquema planteado de la disposición de los recursos distribuidos a considerarse en el presente proyecto es el que se muestra en la Figura 9.

Figura 9.

Disposición de los recursos distribuidos del sistema planteado



Nota. La electrificación residencial estará a cargo de un arreglo fotovoltaico, un banco de baterías. El sistema de agua caliente sanitaria (ACS) funcionará a base de un arreglo de colectores térmicos, el ACS se complementará por un calefactor eléctrico de agua que entraría a funcionar cuando la cantidad de ACS disponible en el colector no sea suficiente. El generador a combustible surtirá de la fuerza y potencia necesaria de acuerdo al planteamiento de diseño.

Evaluación con Datos Históricos Horarios Recientes en el Emplazamiento

Seleccionado

En los sistemas conectados a la red, valores con una resolución mayor, que pueden diferir de los valores reales, tienen un efecto relativamente menor en la evaluación energética de las instalaciones fotovoltaicas. Sin embargo para las soluciones Off-grid network, Stand-alone, es necesario utilizar datos de radiación solar con una resolución de 1 hora o menos, junto con los correspondientes valores de temperatura ambiente (Kavadias & Karamanou, 2019).

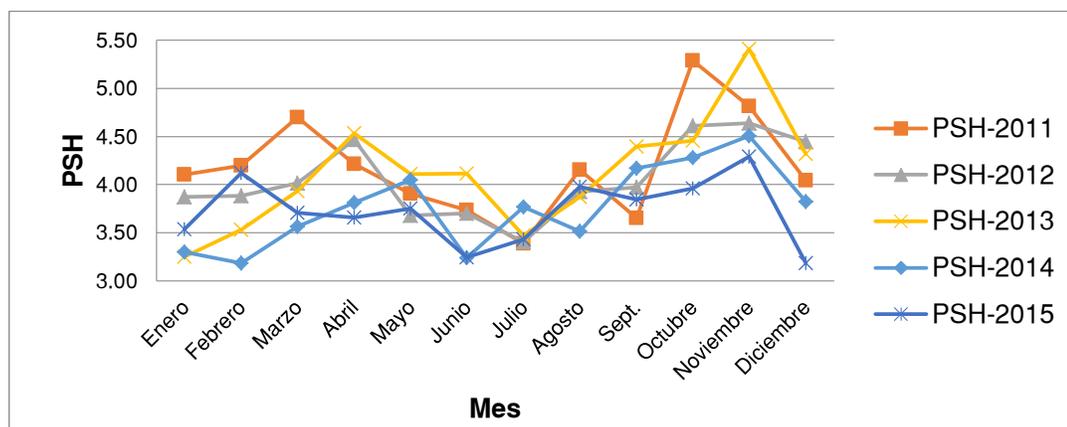
El proyecto Solcast® formado a principios del 2016, es una agrupación de varios expertos en el campo de las energías renovables, enfocados en la medición, registro, provisión de datos y previsiones meteorológicas con fines de aprovechamiento de energía solar por todo el mundo. Gracias a su enfoque, entre otros, de ayuda a desarrolladores e investigadores en el tema, se obtuvo los datos para la locación seleccionada en el cantón Palanda, provincia de Zamora Chinchipe con una resolución de 1 hora para 10 años a partir del 30 de marzo del 2010 al 27 de abril del 2020, para la evaluación del presente proyecto con datos reales e históricos de temperatura ambiente e insolación solar (Solcast, 2019).

Como se indica en (Rey *et al.*, 2019, p. 341), el potencial solar se calcula, para fines de evaluación energética, con el indicador PSH (horas pico de sol), que es el equivalente a horas de radiación base a nivel del suelo (1000 W/m^2) que incide en la superficie fotovoltaica útil de acuerdo a la radiación real. El PSH (Indicador Horas Pico Sol) se define en la expresión (1).

La Figura 10 muestra los valores mensuales de PSH para los años 2011 a 2015 correspondientes al emplazamiento seleccionado.

Figura 10.

Horas Pico Sol de 2011 a 2015

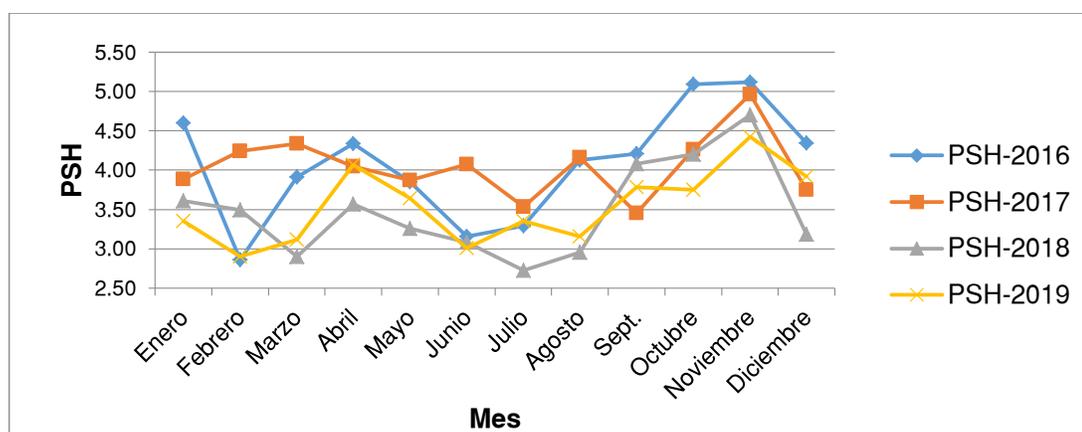


La Figura 11 muestra los valores mensuales de PSH para los años 2011 a 2015 correspondientes al emplazamiento seleccionado

Como se puede apreciar la tendencia se mantiene de acuerdo a los valores del Atlas Solar con fines de generación eléctrica del Ecuador, a diferencia de que los datos en las Figura 10 y Figura 11 corresponden a años más recientes.

Figura 11.

Horas Pico Sol 2016 a 2019



$$PSH = \frac{1}{R_B} \sum_{i=1}^{24} R_i \quad (1)$$

Siendo R_B la radiación base a nivel del suelo en condiciones estándar en $[W \cdot m^{-2}]$, R_i radiación incidente a la hora i del día en $[W \cdot m^{-2}]$.

Modelamiento de Recursos Distribuidos

El modelamiento de las fuentes y la carga de consumo puede tener varios enfoques, como lo indican (Rey *et al.*, 2019,p.342), el dimensionamiento se establece en escenarios de simulación de varias horas, días o meses; y utiliza baja exactitud de los datos de entrada al sistema, es así que, “se recomienda usar modelos simples de bajo costo computacional, como modelos analíticos o basados en datos”. Por otra parte los

modelos de mayor rigurosidad y alto costo computacional se utilizan en estudios de análisis de estabilidad.

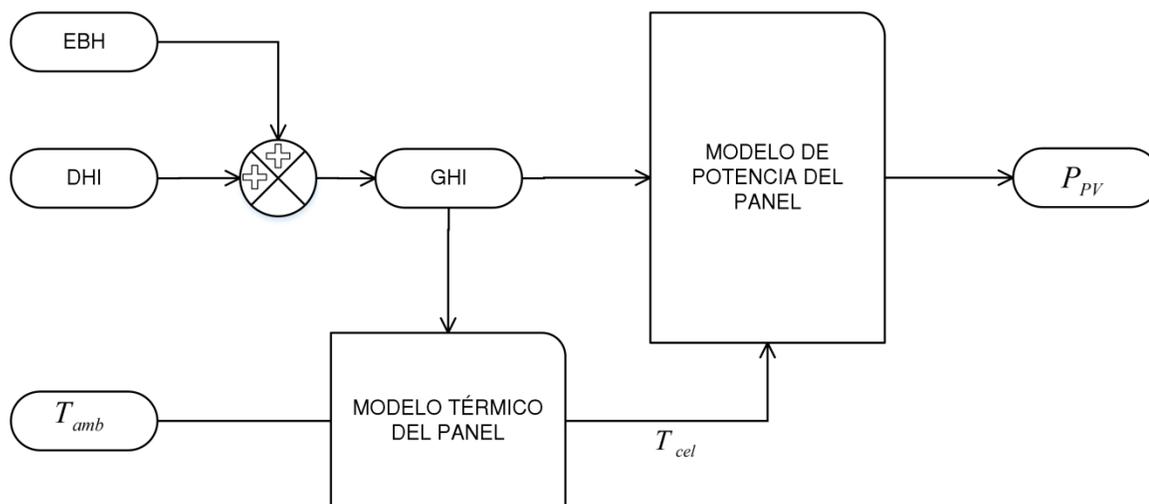
“El dimensionamiento de las fuentes de energía de Microrredes no requiere un estudio profundo de las interacciones entre sus subsistemas” (Rey *et al.*, 2019,p.342).

Modelamiento del Panel Solar

La celda fotovoltaica es un elemento transductor de energía que convierte la irradiación solar en energía eléctrica. Su funcionamiento depende de la cantidad de irradiación solar que recibe, la temperatura ambiente presente, y otros valores intrínsecos según los cuales se efectúa el modelamiento, según el grado de precisión que se requiera. Un módulo fotovoltaico es el conjunto de varias células solares interconectadas, encapsuladas en una unidad. La Figura 12 muestra el modelo de bloques del proceso fotovoltaico de generación de potencia eléctrica.

Figura 12.

Modelamiento del Panel Fotovoltaico



Como se menciona en (Arcos *et al.*, 2016), La potencia de salida del panel fotovoltaico, puede ser calculada mediante la expresión (2). La temperatura de celda puede ser evaluada según la expresión (3).

$$P_{PV} = \frac{P_{STC} \cdot GHI}{G_{STC}} \cdot [1 + \gamma \cdot (T_C - T_{STC})] \quad (2)$$

$$T_C = (T_{amb} - 273) + \frac{GHI}{800} \cdot (NOCT - 20) \quad (3)$$

Siendo P_{PV} la potencia fotovoltaica en $[W]$, P_{STC} la potencia del panel fotovoltaico en condiciones estándar de medición en $[W]$, GHI la irradiación global horizontal en $[W \cdot m^{-2}]$, γ el factor de rendimiento de potencia fotovoltaica dependiente de la temperatura en $[\% \cdot ^\circ C^{-1}]$, T_C la temperatura en la celda fotovoltaica en $[^\circ C]$, T_{STC} la temperatura en condiciones estándar de medición en $[^\circ C]$, T_{amb} la temperatura ambiente en $[K]$, G_{STC} la irradiación solar en condiciones estándar en $[W \cdot m^{-2}]$, $NOCT$ la temperatura nominal de operación de la celda en $[^\circ C]$.

Modelamiento del Colector Térmico

La energía eléctrica consumida en una residencia típica puede llegar a ser utilizada mayoritariamente en transformación de calor, cuando su sistema de calefacción y / o de calentamiento de agua funcionan únicamente a base de energía eléctrica éste hecho causa un impacto considerable en el perfil de carga. La incorporación de un colector térmico solar contribuye a la eficiencia energética del hogar.

Los tipos de colectores térmicos más relevantes en el uso doméstico son el colector flexible no vidriado, colector de placa plana y el colector de tubos de Vacío.

El valor instantáneo de eficiencia η es la relación entre el calor útil entregado y la Irradiación incidente horizontal, la caracterización de la eficiencia de un colector vidriado según la metodología de prueba en estado estable se define según las expresiones (4) y (5) (Horta *et al.*, 2008).

$$\eta = \frac{Q_{col}}{A_a GHI} = \frac{q_{col}}{GHI} \quad (4)$$

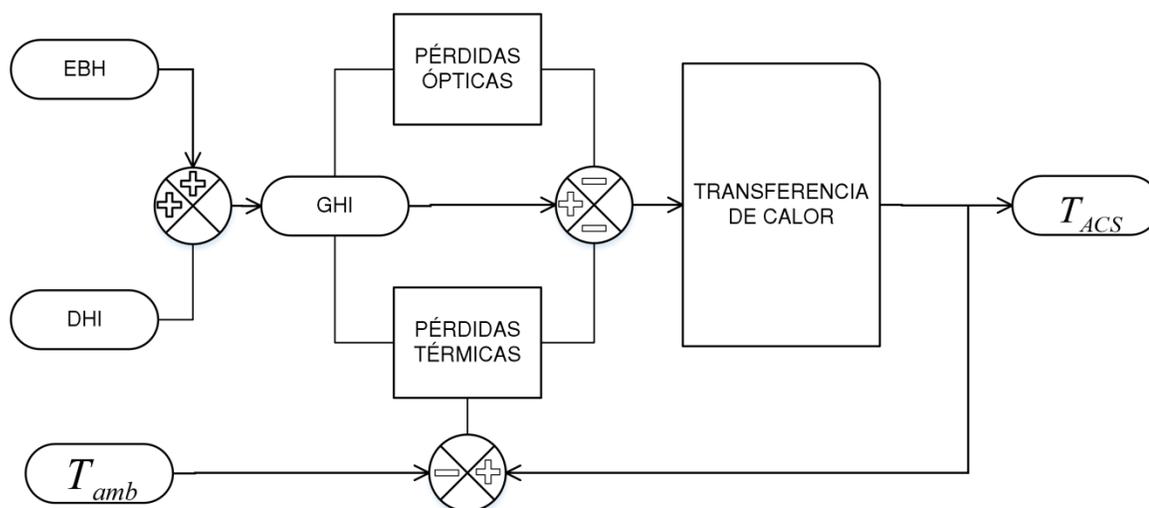
$$\eta = \eta_0 - a_1 \frac{(T_{ACS} - T_{amb})}{GHI} - a_2 \frac{(T_{ACS} - T_{amb})^2}{GHI} \quad (5)$$

Siendo η la eficiencia instantánea del colector, η_0 la eficiencia óptica del colector térmico, a_1 coeficiente lineal de pérdidas térmicas del colector térmico en $[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$, a_2 coeficiente cuadrático de pérdidas térmicas del colector en $[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-2}]$, T_{ACS} temperatura de agua caliente en $[K]$, Q_{col} cantidad de calor útil incidente en el líquido calo portador en $[W]$, q_{col} la cantidad de calor útil incidente en el líquido calo portador por cada m^2 de área de apertura $[W \cdot m^{-2}]$, A_a el área de apertura en $[m^2]$.

La Figura 13 muestra el proceso de transferencia de calor al líquido calo portador en un colector térmico.

Figura 13.

Modelamiento del Colector Térmico



El área total de un captador se mide entre sus límites exteriores de la carcasa, este valor se utiliza para consideraciones de instalación mecánica. El área de apertura es la superficie visible o abierta para la radiación solar, por lo general coincide con el área transparente visible. El área del absorbedor es la suma de las superficies que

absorben la radiación solar y las tuberías internas de distribución. El valor a utilizar en las fórmulas es el área de apertura, dato que debe ser aportado por el fabricante según la norma de homologación UNE-EN-12975 (Usurbilgo Lanbide Eskola [ULE], 2017).

Modelamiento del Estimador de Temperatura y Tanque de Almacenamiento

La tasa de pérdida de energía en el tanque de almacenamiento se calcula mediante la expresión (6), la incidencia térmica en el agua almacenada se calcula mediante la expresión (7) (Arcos *et al.*, 2017).

$$Q_{LOSS}(n) = \frac{2\pi \cdot L \cdot k_T}{\ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right)} \cdot [T_{ACS}(n) - T_{amb}(n)] \quad (6)$$

$$Q_{ST}(n) = \rho_W \cdot C_P \cdot V \cdot \Delta T_{ACS}(n) \quad (7)$$

Si se asumen las pérdidas térmicas como constantes durante el período de muestreo T_s , la temperatura actual del agua en el tanque de almacenamiento se calcula mediante la expresión (8).

$$T_{ACS}(n) = T_{ACS}(n-1) + \frac{T_s}{\rho_W \cdot C_P \cdot V} \cdot Q_{ST}(n) \quad (8)$$

Siendo ρ_W la densidad del agua en $[kg \cdot m^{-3}]$, C_P calor específico del agua en $[kJ \cdot g^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}]$, V el volumen del depósito de ACS en $[m^3]$, Q_{ST} variable de balance térmico en $[W]$, Q_{LOSS} es el ratio de energía térmica perdida en el ambiente en $[W]$, L la longitud del tanque de almacenamiento de ACS en $[m]$, k_T la constante de conductividad térmica del tanque en $[W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}]$, R_1 el radio exterior del tanque en $[m]$, R_2 el radio interior del tanque en $[m]$,

El acumulador puede tener una disposición horizontal o vertical en función de la posición del eje mayor. La temperatura del agua tiene una distribución bastante homogénea en un tanque dispuesto horizontalmente, es decir hay poca estratificación, mientras que en el tanque dispuesto verticalmente, se logran altas temperaturas heterogéneas, mucho mayores en la parte superior del acumulador, y bajas

temperaturas en la parte inferior. La disposición vertical debe emplearse por cuestiones de espacio, lo normal es la disposición horizontal (Martínez *et al.*, 2013).

Estimador del Estado de Carga de la Batería (SOC)

Como se verifica en (Arcos *et al.*, 2016), el estimador del estado de carga de la batería presenta la energía almacenada en el ESS con respecto a la capacidad nominal. El proceso de estimación del estado de carga de la batería se define en la expresión (9), la variación del SOC se define en la expresión (10). Los límites seguros de operación de la batería se definen en las expresiones (11) y (12).

$$SOC(n) = \Delta SOC - SOC(n - 1) \quad (9)$$

$$\Delta SOC(n) = \left(\frac{\eta_b}{C_{Batt}} \right) \cdot P_{BATT}(n - 1) \cdot T_s \cdot 100\% \quad (10)$$

$$SOC_{min} \leq SOC(n) \leq SOC_{m\acute{a}x} \quad (11)$$

$$SOC_{min} = (1 - DOD) \cdot SOC_{m\acute{a}x} \quad (12)$$

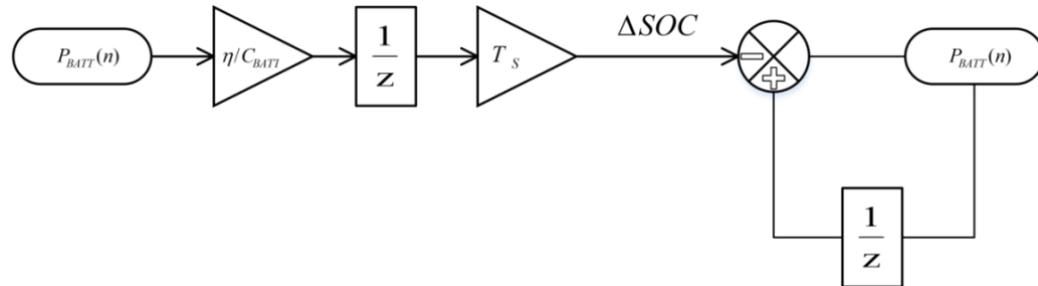
Siendo SOC el estado de carga de la batería en [%], ΔSOC variación del estado de carga de la batería en [%], DOD la profundidad de descarga de la batería en [%], SOC_{min} el límite inferior del SOC de descarga de la batería en [%], $SOC_{m\acute{a}x}$ el límite superior del SOC de carga de la batería en [%], z el operador de la transformada z .

La Figura 14 muestra e diagrama de bloques del modelamiento del estimador del estado de carga de la batería de acuerdo a las expresiones mencionadas.

EL indicador SOC es muy importante para salvaguardar la salud del ESS, al evaluar su estado de operación dentro de los límites seguros y no pasar el DOD indicado, de acuerdo a la estimación de vida útil deseada por el integrador.

Figura 14.

Diagrama de bloques del Estimador del Estado de Carga de la Batería



Nota. Adaptado de “Energy management strategy for a grid-tied residential Microgrid based on Fuzzy Logic and power forecasting” (p. 4103), por Arcos *et al.*, 2016, *IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, with permission, from D. Arcos-Aviles.

Modelamiento del Generador Electrónico

El generador a gasolina es un sistema totalmente controlado en cuanto a voltaje, frecuencia y potencia que entrega, con sus componentes de control ubicados en los niveles primario y secundario de la jerarquía de control, el generador compensa cualquier perturbación en el balance de potencia electromecánica que se presente en su rotor para entregar la potencia que necesite la carga en tiempo real.

El generador es una máquina electromecánica que aprovecha la energía contenida en el combustible fósil y la transforma en energía rotacional. La potencia de fricción, que no se refleja directamente en la potencia eléctrica entregada, pero es necesaria para su funcionamiento, es componente en el consumo de combustible (De Felipe, s.f.).

Formación de Red con Máquina Síncrona

La ecuación que relaciona la potencia mecánica, el torque y la velocidad de rotación de un sólido rígido en rotación está definida en la expresión (13). La relación

entre la energía cinética y la velocidad de rotación está dada en la expresión (14) (Bueche *et al.*, 2008). Para motores y generadores síncronos se define una constante constructiva, que tiene relación con su dinámica de comportamiento, la constante de Inercia se define en la expresión (15) (Rodríguez, 2014) (Galindo *et al.*, 2010).

$$P = T\omega \quad (13)$$

$$EC = \frac{1}{2}J\omega^2 \quad (14)$$

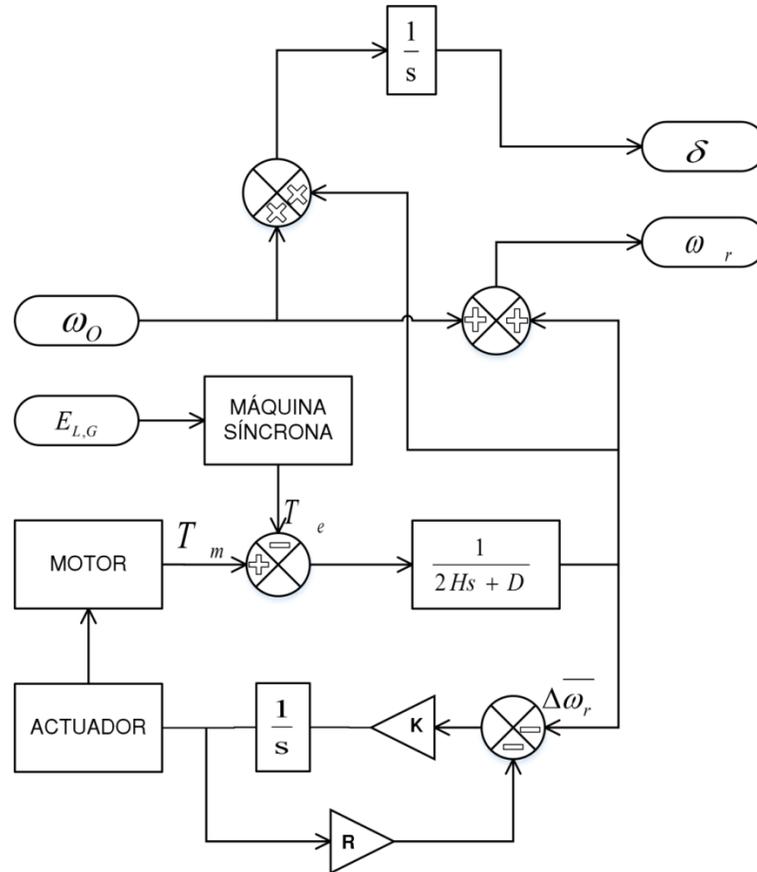
$$H = \frac{EC}{P_{nominal}} \quad (15)$$

Siendo P potencia en [W], T el torque en [$N \cdot m$], ω la velocidad angular en [$rad \cdot s^{-1}$], EC la energía cinética en [$kg \cdot m^2 \cdot rad^2$], J el momento de inercia en [$kg \cdot m^2$], H la constante de inercia del motor en $W \cdot s \cdot VA^{-1}$, $P_{nominal}$ la potencia nominal de la máquina síncrona en [W].

Las ecuaciones de la dinámica de rotación del generador se definen en las expresiones (17), (18) y (19) (Kundur, 1994, p. 135). La Figura 15 muestra el proceso de formación de red por medio del generador electrógeno con control por pendiente.

Figura 15.

Modelo de bloques del proceso de formación de red con control por pendiente



De acuerdo a la ley de Faraday, la fuerza electromotriz inducida por un campo magnético variable viene dado por la expresión (16). Dentro de las características constructivas de la máquina síncrona, se constituye un devanado inductor y uno de inducido donde se genera la potencia eléctrica, el movimiento giratorio del campo magnético inductor generalmente construido en el rotor proporciona un campo magnético senoidal visto desde cada uno de los devanados del estator, los cuales están separados 120° mecánicos entre sí.

$$E = N \frac{d\phi}{dt} \quad (16)$$

Siendo E la fuerza electromotriz en [V], N el número de vueltas de la espira, ϕ el flujo magnético en [Wb], dt la diferencial del tiempo en s.

La relación entre tensión de excitación y el flujo magnético incidente en el devanado del estator se define en las expresiones (20) y (21) (Kundur, 1994, p. 139).

$$\Delta\overline{\omega}_r = \frac{1}{2Hs+D} (T_m - T_e) \quad (17)$$

$$\delta = \frac{1}{s} \cdot \omega_0 \cdot \Delta\overline{\omega}_r \quad (18)$$

$$\Delta\overline{\omega}_r = \omega - \omega_0 \quad (19)$$

$$\Delta\phi_d(s) = G(s)e_{fd}(s) - L_d(s) i_d(s) \quad (20)$$

$$\Delta\phi_q(s) = L_q(s)\Delta i_q(s) \quad (21)$$

Siendo $\Delta\overline{\omega}_r$ la variación en la velocidad de rotación del eje de la máquina síncrona en [$rad \cdot s^{-1}$], s el operador de Laplace, T_m torque mecánico en [$N \cdot m$], T_e torque mecánico en [$N \cdot m$], D la constante de amortiguamiento, δ el ángulo del eje magnético bajo carga en [rad], ω_0 la velocidad de rotación de sincronismo en [$rad \cdot s^{-1}$], ω la velocidad de rotación actual en [$rad \cdot s^{-1}$], $\Delta\phi_d$ variación del flujo magnético producido por el eje directo en [Wb], $\Delta\phi_q$ variación del flujo magnético producido por el eje de cuadratura en [Wb], $G(s)$ función de transferencia entre voltaje de salida en bornes y voltaje de campo, $e_{fd}(s)$ voltaje de campo en [V], L_d inductancia del arrollamiento del eje directo en [H], L_q Inductancia del eje de cuadratura en [H], i_d corriente en el enrollado del eje directo en [A], i_q corriente en el enrollado del eje de cuadratura en [A] .

Control P-Q

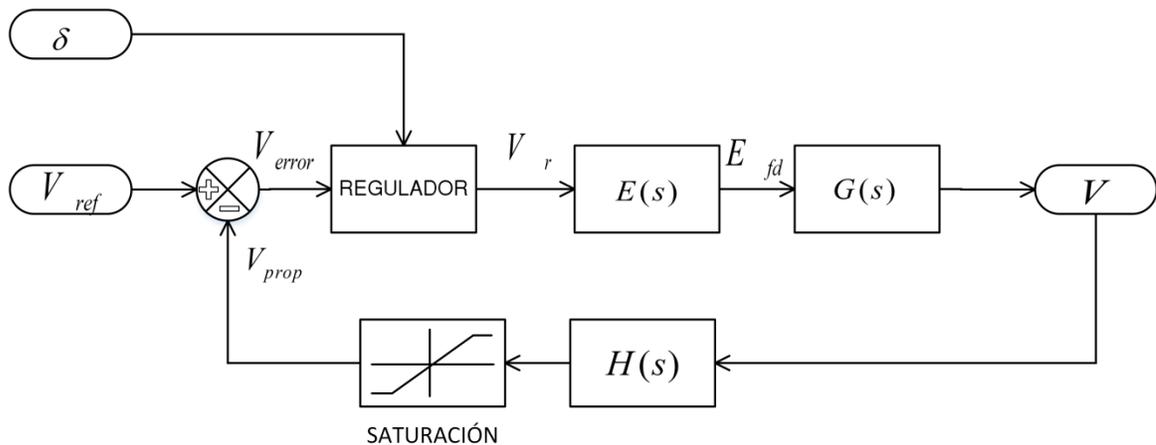
Las expresiones (20) y (21) indican que los valores efectivos de inductancia en los enrollamientos del rotor, son variables en el tiempo, debido a una influencia mutua entre ellas y en relación a los campos magnéticos del estator. La aportación de cada

uno de los campos magnéticos efectivos de los enrollados de campo, producen una resultante que conforma el eje magnético del rotor bajo carga, cuyo ángulo variable define la potencia reactiva que aporta el generador a la red. La estrategia de control del ángulo del eje magnético, es la variación del voltaje aplicado al enrollado inductor.

La Figura 16 muestra el modelo de bloques del control de potencia reactiva del generador eléctrico.

Figura 16.

Modelo de bloques del sistema de control de excitación



Las características constructivas del bobinado de rotor, desprenden límites a los cuales debe regirse el dominio de variación del voltaje de campo. Los elementos de retroalimentación de la Figura 16 además de detectar el voltaje de salida en terminales del generador, lo rectifican, estabilizan y filtran. El controlador regulador también recibe valores referenciales de limitación y protección de la operación del generador, según el diseño comercial.

Consumo de Combustible

El eje de acoplamiento entre el generador síncrono y el motor a combustión transfiere potencia mecánica desde el motor hacia el generador, en respuesta al torque mecánico producido por la reacción electromecánica ante la carga eléctrica aplicada. La

potencia indicada de un motor a 4 tiempos se define en la expresión (22). La relación entre potencia indicada, potencia de fricción y potencia efectiva se define en la expresión (23). El consumo específico de combustible se define en la expresión (24) (De Felipe, s.f.).

$$J_{I,(4T)} = \frac{P_T \cdot A_T \cdot L_T \cdot N \cdot n}{1200} \quad (22)$$

$$J_{I,(4T)} = J_f + J_{neta} \quad (23)$$

$$F_{sfc} = \frac{m_f}{J_{neta}} \quad (24)$$

Siendo $J_{I,(4T)}$ la potencia indicada para un motor a combustión a 4 tiempos en $[W]$, P_T la presión de trabajo en $[bar]$, A_T el área de trabajo del pistón en $[cm^2]$, L_T carrera del pistón en $[cm]$, N es la velocidad angular en $[RPM]$, n el número de pistones, J_f la potencia de fricción en $[W]$, J_{neta} la potencia neta en $[W]$, F_{sfc} el consumo específico de combustible en $l \cdot h \cdot kW^{-1}$, m_f la masa del combustible consumido en $[kg]$.

Al usar las expresiones (22) y (24) con los datos constructivos del motor a combustión del generador, se obtiene una recta que define la función de cálculo del flujo de combustible que se compone del consumo de combustible por fricción y por potencia efectiva entregada según la relación expresada en la expresión (23). El Flujo de combustible consumido en función del tiempo de operación y potencia efectiva entregada al generador, para el modelo Honda EG5000CL se define en la expresión (25).

$$F(n) = 0.3655 \left[\frac{ltrs}{kW-h} \right] (1.075kW + \overline{J_{neta}(n)}) \cdot T_{s(h)} \quad (25)$$

Siendo $T_{s(h)}$ el tiempo de muestreo en horas.

Emisiones de CO₂

Como se menciona en (EL TIEMPO PREVISTO S.L.U. [Eltiempo.es], 2020), el factor de cálculo para la previsión de emisiones contaminantes de dióxido de carbono por litro de gasolina consumido es $2.196 \text{ [kg l}^{-1}\text{] CO}_2$.

Modelamiento del Perfil de Carga

Para el desarrollo del perfil de carga a evaluar, se propone alimentar 2 casas de acuerdo a las cargas y hábitos de consumo presentados en la Tabla 2.

Modelamiento del Consumo del Refrigerador (FR)

Como se puede verificar en (Laguerre, 2010), el ciclo de mantenimiento de frío en un refrigerador doméstico bajo de la estrategia de control ON-OFF, es variable, principalmente dependiente de la carga de alimentos almacenados, el aislamiento térmico de las paredes del refrigerador, el número de compresores, la potencia del o los compresores y la frecuencia de apertura de la puerta.

Para un refrigerador doméstico de un solo compresor de 120 [W] , con carga promedio de alimentos, de medidas $185 \text{ [cm]} \times 60 \text{ [cm]} \times 60 \text{ [cm]}$, set point de temperatura de $+4^\circ\text{C}$. El período del ciclo de variación de temperatura interna del refrigerador es de 60 minutos con un ciclo de trabajo del compresor de 15 minutos aproximadamente (Laguerre, 2010, p. 455).

Metodología del Modelamiento del Perfil de Carga Térmica

Como se enuncia en (WSCERTICALIA, 2020), como dato orientativo, el consumo por persona es de 28 litros /día de ACS para un criterio de demanda residencial. El consumo calorífico es dependiente de muchas variables aleatorias que dificultan su modelamiento si no se realizan simplificaciones.

Para el presente trabajo se considerará que el consumo de ACS es equivalente a $0.016 \text{ [l} \cdot \text{s}^{-1}\text{]} a 50^\circ\text{C}$ por 30 minutos. Al aplicar la expresión (7), tasa de potencia equivalente al consumo de agua caliente es de 2000 [W] .

Se aplicarán horarios fijos de consumo. Para la casa 1 todos los días a las 6 y a las 12 horas; y para la casa 2 todos los días a las 8 y a las 21 horas.

Metodología del Modelamiento del Perfil de Carga Eléctrica

En la Tabla 2 se presenta los parámetros bajo los cuales se aplica un algoritmo de generación aleatoria de potencia de consumo por cada carga de cada casa tipo, que puede definirse por los hábitos de consumo de los habitantes en cada vivienda.

Tabla 2.

Parámetros de obtención de los datos de simulación de cargas

Variable	Frecuencia	Intervalo de inicio	Duración	Potencia
L1	2 veces al día	Entre las 5 y 6hrs, entre las 17 y 18hrs	mañana: de 2 a 3 hrs tarde: de 2 a 4 hrs	60 [W]
L2	2 veces al día	Entre las 5 y 6hrs, entre las 17 y 19hrs	mañana: de 2 a 3 hrs tarde: de 2 a 4 hrs	30 [W]
L3	1 vez al día	Entre las 9 y 13hrs	2 horas	30 [W]
L4	2 veces al día	Entre las 5 y 7 hrs, entre las 17 y 19hrs	mañana: de 2 a 3 hrs tarde: de 2 a 4 hrs	30 [W]
L5	2 veces al día	Entre las 5 y 7 hrs, entre las 17 y 19hrs	mañana: de 2 a 3 hrs tarde: de 2 a 4 hrs	30 [W]
L6	1 vez al día	18hrs	12 hrs	80 [W]
CE	2 veces al día	Entre las 5 y 6 hrs, entre las 11 y 13 hrs	mañana: de 1 a 2 hrs tarde: de 1 a 2 hrs	1800 [W]
	Cada hora			
FR	con 25% de duty cycle	Continuo	15 minutos	120 [W]

Nota. Todas las variables correspondientes al perfil de carga que dependen de los hábitos de consumo fueron generadas como variables aleatorias uniformemente

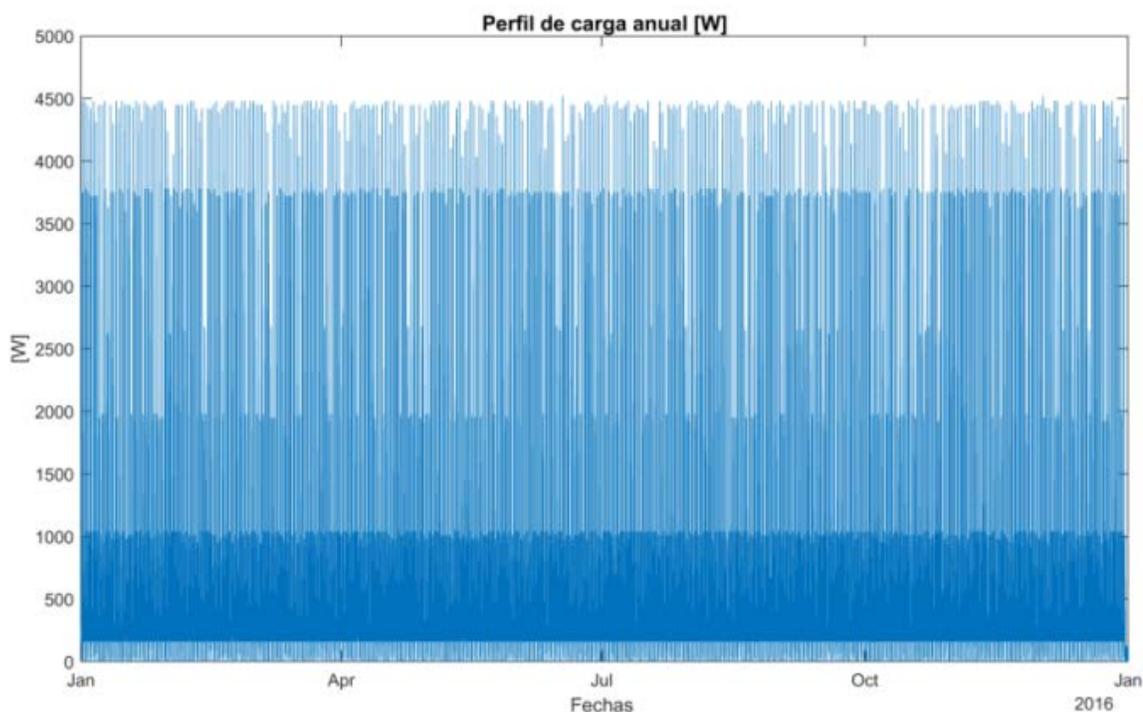
distribuidas, a excepción de L2, L6 y FR. Se presupone que en cada casa hay una de cada variable descrita en la Tabla 2.

Siendo L1, L2, L3, L4, L5 y L6 las variables correspondientes al consumo de potencia eléctrica de cada una de las luminarias de la casa tipo; CE la variable correspondiente al consumo de la cocina eléctrica; FR la variable correspondiente al consumo de potencia de la refrigeradora. Según las consideraciones para la casa tipo.

La Figura 17 muestra el perfil de carga consolidado de las dos casas a electrificar. Contiene el perfil de carga generado mediante el algoritmo de generación de datos aleatorios programado de acuerdo a las especificaciones descritas en la Tabla 2.

Figura 17.

Perfil de carga eléctrica consolidado de las dos casas

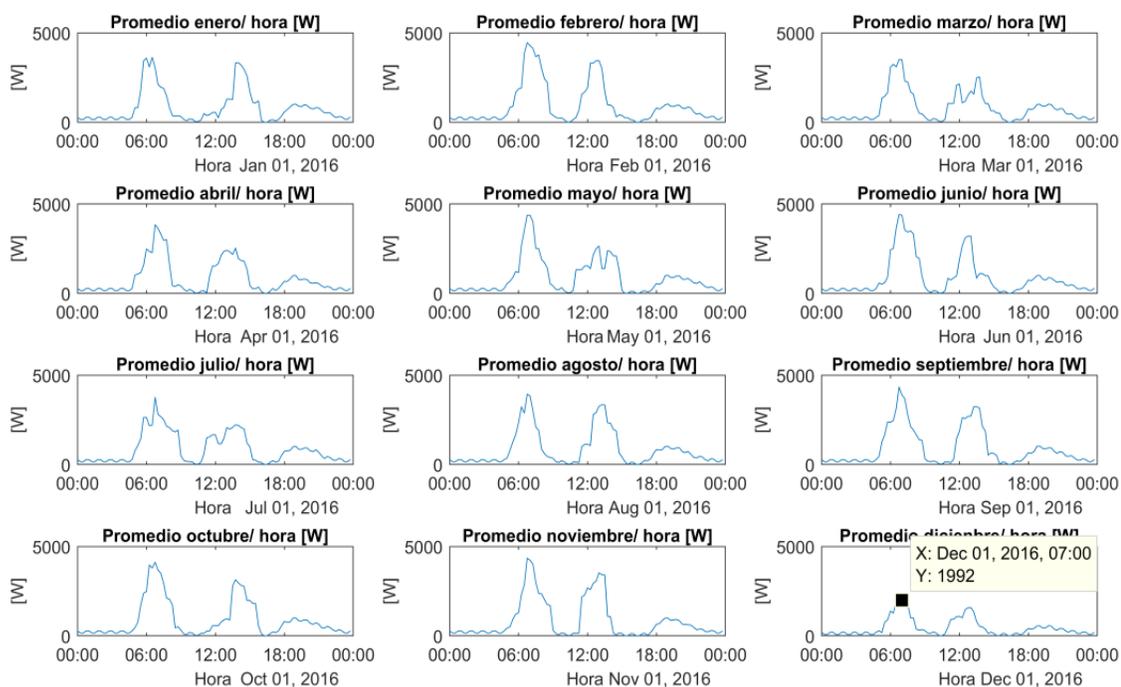


Nota. Como se puede advertir, la potencia eléctrica que se destinará para el calentamiento de ACS no está incluida en el perfil presentado.

En la Figura 18 se presenta el perfil de carga diario promedio de cada mes del año, de acuerdo a los datos presentados en la Figura 17.

Figura 18.

Promedio horario del perfil de carga eléctrica total anual por mes del año



Como se puede verificar en la Figura 18, se denota los puntos centrales de consumo de acuerdo a la descripción verbal de hábitos de consumo descritas en la Tabla 2. Mediante una breve descripción de los hábitos de consumo, como la frecuencia de uso, horario y duración de consumo, se puede generar un perfil de dichas cargas, como opción para una instalación donde no se cuente de una auditoría eléctrica.

Capítulo IV

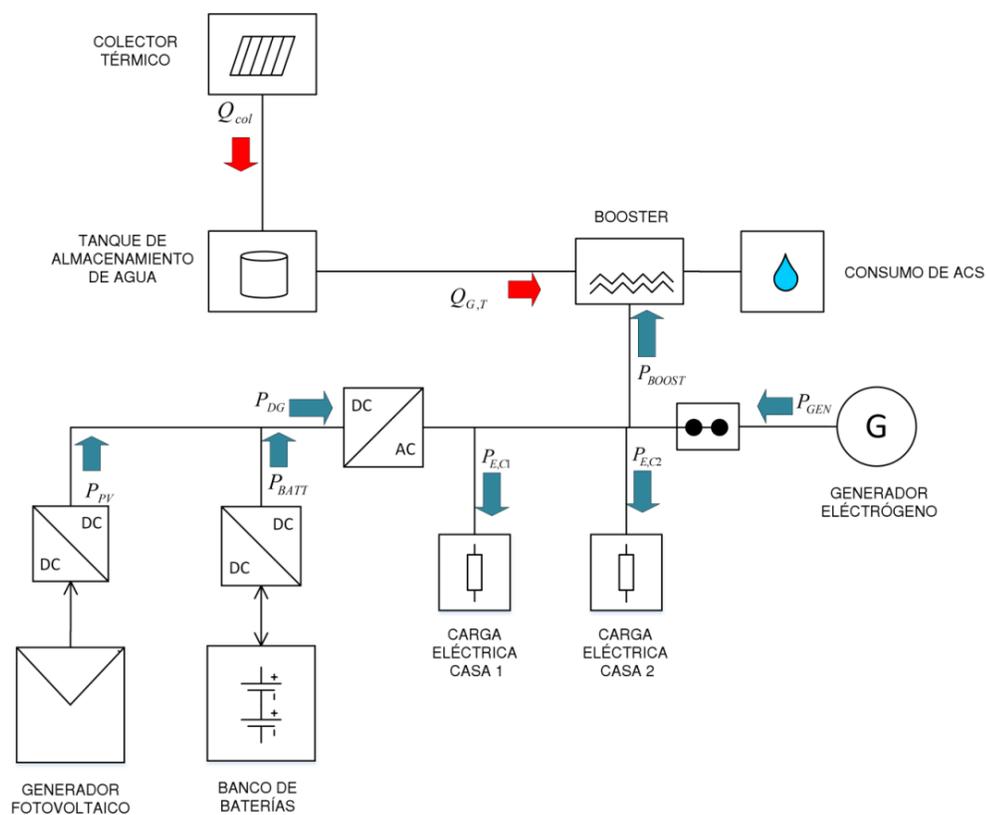
Resultados

Topología de la Microrred

El propósito de la estrategia de gestión energética para el escenario considerado en el territorio nacional, es desarrollar un sistema de compensación de los desbalances energéticos producto de las necesidades y características propias de la locación; con el uso de los recursos tecnológicos y de programación disponibles para minimizar el consumo de combustibles fósiles, para presentar una solución económicamente viable, funcional, y socio ambientalmente amigable. La Figura 19 muestra la topología de la Microrred termoeléctrica aislada.

Figura 19.

Topología de la microrred termoeléctrica aislada



Nota. Siendo Q_{col} la potencia térmica efectiva entregada por el colector térmico en [W], $Q_{G,T}(n)$ tasa de potencia equivalente al consumo de agua caliente [W], P_{BOOST} la potencia eléctrica del sistema de calentamiento de ACS de respaldo de ACS [W], $P_{E,C1}$ la potencia eléctrica de carga de la casa 1 en [W], $P_{E,C2}$ la potencia eléctrica de carga de la casa 2 en [W], P_{GEN} la potencia entregada por el generador eléctrico en [W], P_{DG} la potencia eléctrica de origen renovable en [W], P_{BATT} potencia de la batería en [W], P_{PV} potencia fotovoltaica en [W].

Gestión Energética Termoeléctrica

La expresión (26) muestra el balance energético en el conjunto termo solar (Arcos, *et al.*, 2017).

$$Q_{ST}(n) = Q_{col}(n) + Q_{BOOST}(n) - Q_{LOSS}(n) - Q_{G,T}(n) \quad (26)$$

Siendo Q_{ST} la potencia calorífica incidente en el recipiente de almacenamiento en [W], Q_{LOSS} la potencia térmica liberada al ambiente desde el tanque de almacenamiento en [W].

Como se verifica en (Endless Solar®, 2016), una válvula de regulación de temperatura de clasificación solar debe ser instalada antes del ingreso de ACS a accesorios sanitarios.

La válvula de regulación de temperatura mantiene la temperatura del ACS que ingresa a los accesorios hasta los 50°C, por su clasificación solar soporta hasta los 99°C de temperatura de entrada (Endless Solar®, 2016).

El sistema de recirculación mantiene el líquido calo portador en circulación mientras un sensor de temperatura diferencial detecte que la temperatura en el colector es mayor que en el fondo del tanque de almacenamiento. El límite superior de calentamiento es de 75 [°C] en el fondo del tanque de almacenamiento, cuando el

sistema de recirculación se detiene para limitar el calentamiento del agua (Endless Solar®, 2016).

El sistema Boost, eléctrico o a gas, respalda el calentamiento del ACS cuando el recurso solar no es suficiente (Endless Solar®, 2016).

Las instalaciones de ACS con tanque de almacenamiento son un hábitat adecuado para la formación de la bacteria que produce la legionelosis, por lo que debe garantizarse que la temperatura del depósito se mantenga en los 60[°C], para evitar la formación de dicha bacteria.

Como se menciona en (iAgua, 2020) a 55 [°C] la legionella muere entre 5 y 6 horas, a 60 [°C] muere dentro de media hora, y a 68[°C] la bacteria muere dentro de los 2 minutos.

En la Figura 20 se muestra la gestión del sistema Booster de calentamiento de respaldo del ACS del depósito, de acuerdo a los criterios descritos anteriormente.

La gestión del sistema de respaldo buscará mantener la temperatura del depósito de acuerdo a los niveles sanitarios aceptables para evitar la proliferación de la bacteria que produce la legionelosis.

El colector solar brindará la energía captada en su área de apertura según su rendimiento térmico y óptico hasta la limitante del controlador del sistema de recirculación de 75 [°C].

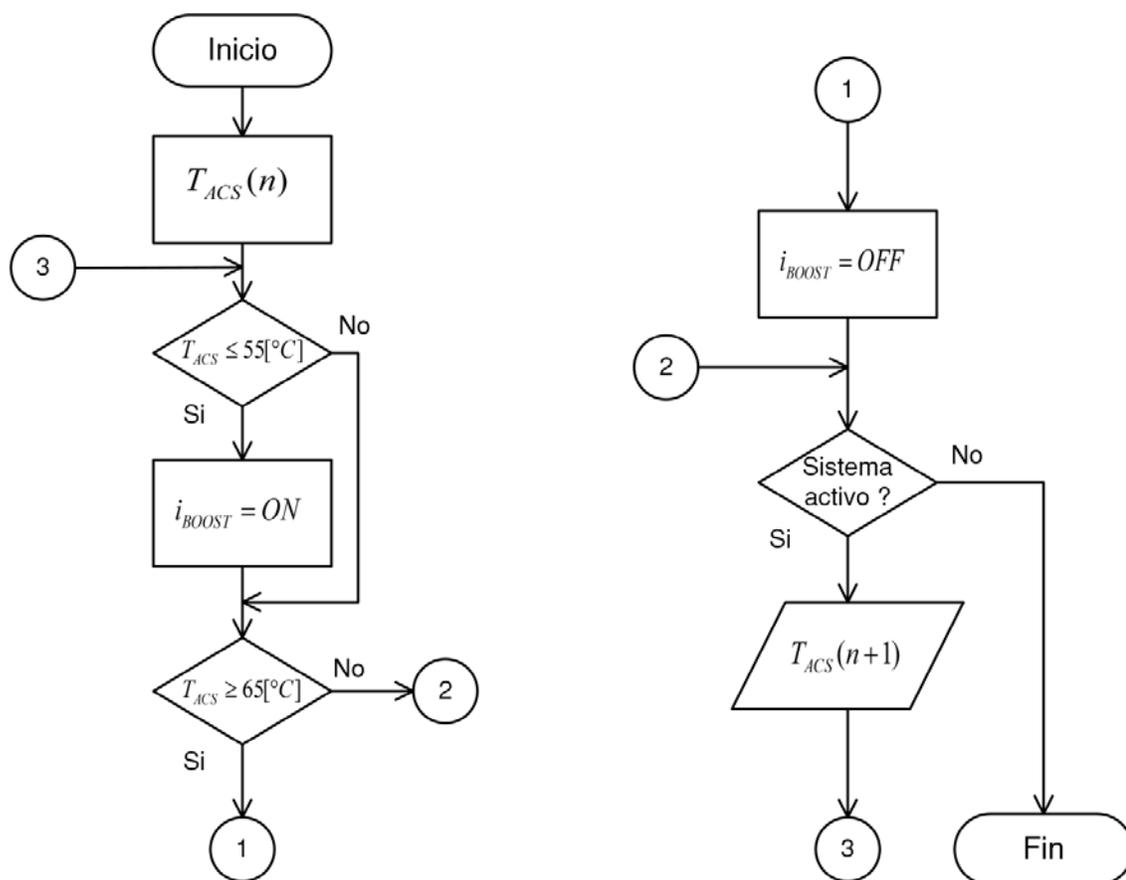
Para temperaturas menores a 55 [°C] en el depósito, se activará el sistema de calentamiento de respaldo (Booster) de 2 [kW] (Arcos, *et al.*, 2017), que se mantendrá en un control ON-OFF dentro de los límites inferior de 55 [°C] y superior de 60 [°C].

La temperatura del ACS que se provee a los accesorios de consumo llega pre-delimitada por la válvula reguladora de temperatura de grado solar (Solar Tempering Valve) a 50 [°C].

A través del mezclador propio de cada accesorio de cada casa es posible regular en último término la temperatura a la cual cada usuario lo requiera.

Figura 20.

Gestión termoeléctrica del sistema eléctrico de respaldo (Booster)



Nota. Siendo T_{ACS} la temperatura del ACS en la parte baja del depósito en $[^\circ\text{C}]$, i_{BOOST} la variable lógica de activación del sistema eléctrico de calentamiento de ACS de respaldo, n el número de muestra tomada en el instante $n \cdot T_s$ [min], T_s el tiempo de muestreo en [minutos].

Gestión Energética del Lado de la Carga

El concepto de gestión de carga consiste en adecuar el perfil de carga de una residencia de acuerdo a los objetivos de diseño (Khoury, 2016).

Para el presente caso, una Microrred aislada presenta particularidades como la limitante en la potencia instalada disponible, el tipo de fuentes de energía, los horarios de consumo, costo de implementación, entre otros.

Como se ha podido verificar el tratamiento para la obtención del ACS ocupa gran cantidad del recurso energético, obtener ACS mediante el recurso eléctrico es ineficiente para el presente caso, porque distorsiona el perfil de carga. El uso del recurso termo-solar resulta beneficioso y óptimo tanto para la disminución de emisión de gases de efecto invernadero como para suavizar el perfil de carga a niveles más homogéneos de acuerdo a las otras cargas de la residencia.

Se propone un sistema híbrido de electrificación para las dos viviendas, con generación fotovoltaica del 40% del nivel de carga, restricción de operación de baterías de hasta el 50% del SOC.

El DSM actuará de acuerdo a los niveles de los promedios móviles del PSH y del consumo energético diario, para la restricción del uso de cargas de acuerdo a su ponderación de importancia y activación atemporal para evitar la concentración del uso de cargas significativas al mismo tiempo y la selección del nivel de penetración renovable, mediante lo cual se espera suavizar el perfil de carga de la vivienda con una previsión energética fotovoltaica mediante la relación de las medias móviles mencionadas.

En las expresiones 27 y 28 se presenta las definiciones de los valores de media móvil de PSH y consumo diario.

$$PSH_{SMA-15}(d) = \frac{PSH(d-1)+PSH(d-2)+\dots+PSH(d-15)}{15} \quad (27)$$

$$Load_{SMA-15}(d) = \frac{Load(d-1)+Load(d-2)+\dots+Load(d-15)}{15} \quad (28)$$

Siendo $PSH(d)$ las horas pico sol para el día d en $[h]$, $PSH_{SMA15}(d)$ la media móvil de 15 días de las horas pico de sol para el día d en $[h]$, $Load(d)$ el consumo energético total diario para el día d en $[W - h]$, $Load_{SMA15}(d)$ la media móvil de 15 días de consumo energético total diario para el día d en $[W - h]$ ³.

La Tabla 3 define los modos de operación de la estrategia DSM de acuerdo a los requerimientos de la carga térmica de respaldo de ACS y la activación de la variable de mínimo consumo DSM_{min} .

Tabla 3.

Definición de los modos de operación del DSM

		DSM_{min}	
		ON	OFF
i_{BOOST}	ON	Modo 4	Modo 2
	OFF	Modo 3	Modo 1

Nota. Siendo i_{BOOST} la variable lógica de activación del calentador de respaldo.

Como se puede verificar la aparición de una nueva variable DSM_{min} que define el modo de operación del DSM de acuerdo a los niveles de insolación y consumo promedio de los últimos 15 días de acuerdo a las expresiones (27) y (28). La Tabla 4 define la matriz de decisión de habilitación de las cargas, de acuerdo a las entradas al DSM.

La estrategia procurará mantener en funcionamiento las cargas de acuerdo a su jerarquía definida en la Figura 21. Por ejemplo, cargas Indispensables son aquellas que no sufrirán desconexión por el DSM, las cargas reprogramables son aquellas que no se pueden mantener en el horario definido, sino que se reprograman para no coincidir con su par de la otra casa, y la carga accesoria es aquella de la que se puede prescindir libremente.

³ SMA: Simple Moving Average

Tabla 4.

Definición de habilitación de cargas de acuerdo al modo de operación

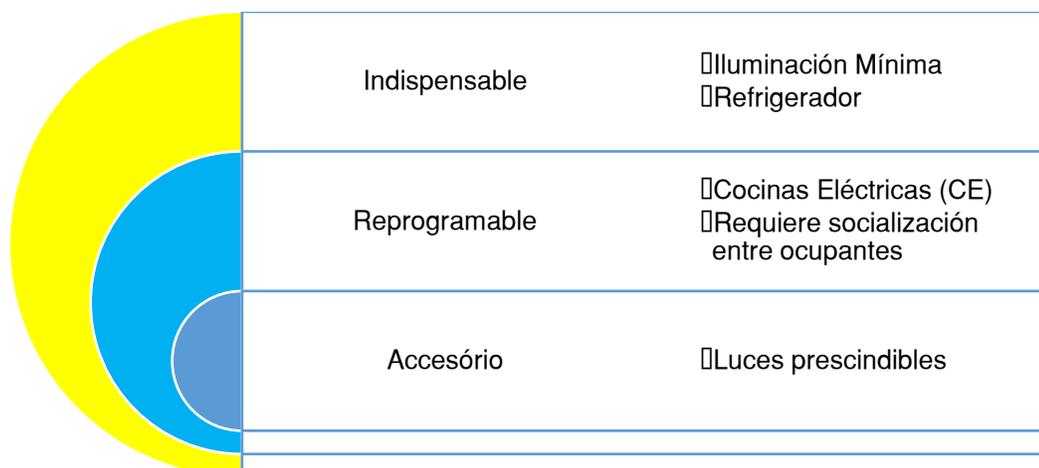
Especificación de carga		Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4
Casa 1	L1	EN	EN	EN	DIS
Casa 1	L2	EN	EN	EN	EN
Casa 1	L3	EN	EN	EN	DIS
Casa 1	L4	EN	EN	EN	EN
Casa 1	L5	EN	EN	EN	EN
Casa 1	L6	EN	EN	EN	EN
Casa 1	CE	EN	REP	EN	REP
Casa 1	FR	EN	EN	EN	EN
Casa 2	L1	EN	EN	EN	DIS
Casa 2	L2	EN	EN	EN	EN
Casa 2	L3	EN	EN	EN	DIS
Casa 2	L4	EN	EN	EN	EN
Casa 2	L5	EN	EN	EN	EN
Casa 2	L6	EN	EN	EN	EN
Casa 2	CE	EN	REP	REP	REP
Casa 2	FR	EN	EN	EN	EN
Casa 1 y 2	Q_BOOST	EN	EN	EN	EN

Nota. Siendo EN el acrónimo de enable (activado), DIS acrónimo de disable (desactivado), y REP acrónimo de reprogramación.

En la Figura 21 se muestra la definición de la estratificación de cargas de acuerdo a su importancia y funcionalidad.

Figura 21.

Estratificación del tipo de cargas eléctricas



La Figura 22 muestra el proceso de decisión para la activación de la variable de consumo mínimo DSM_{min} .

La expresión 29 determina la variable bal (indicador de balance) para la decisión de activación de la variable DSM_{min} .

$$bal(d) = \frac{0.4 \cdot Load_{SMA-15}(d) - PSH_{SMA-15}(d) \cdot P_{STC} \cdot N_p}{PSH_{SMA-15}(d) \cdot P_{STC} \cdot N_p} \quad (29)$$

Siendo $bal(d)$ el indicador de balance energético relativo determinado en el día d , P_{STC} potencia fotovoltaica de panel en condiciones estándar [W], N_p Número de paneles fotovoltaicos.

Como se puede verificar el proceso realiza evaluaciones con resolución de 1 día (24 horas), en el código de simulación se planteará que el muestreo se realice a las 0 horas. El propósito de una resolución de 1 día es, definir para cada día, el tipo de funcionamiento del DSM, con el objetivo de que los ocupantes de las dos casas socialicen y coordinen sus actividades de acuerdo a las posibilidades de generación que el sistema informe.

El indicador de balance energético bal se plantea como una forma de evaluar la simetría entre el nivel energético de consumo diario a satisfacer con fuentes renovables y la capacidad solar diaria del emplazamiento. Debido a la variabilidad de los datos considerados se opta por utilizar la media móvil tanto del consumo energético diario como la media móvil de el nivel de insolación evaluado mediante el concepto de horas pico sol (PSH).

EL nivel de activación de la variable DSM_{min} que define el consumo mínimo de energía es para cuando el indicador $bal(d)$ supere el valor de 0.2, y el nivel de desactivación de la variable DSM_{min} será para cuando el indicador $bal(d)$ decaiga por debajo de -0.2 .

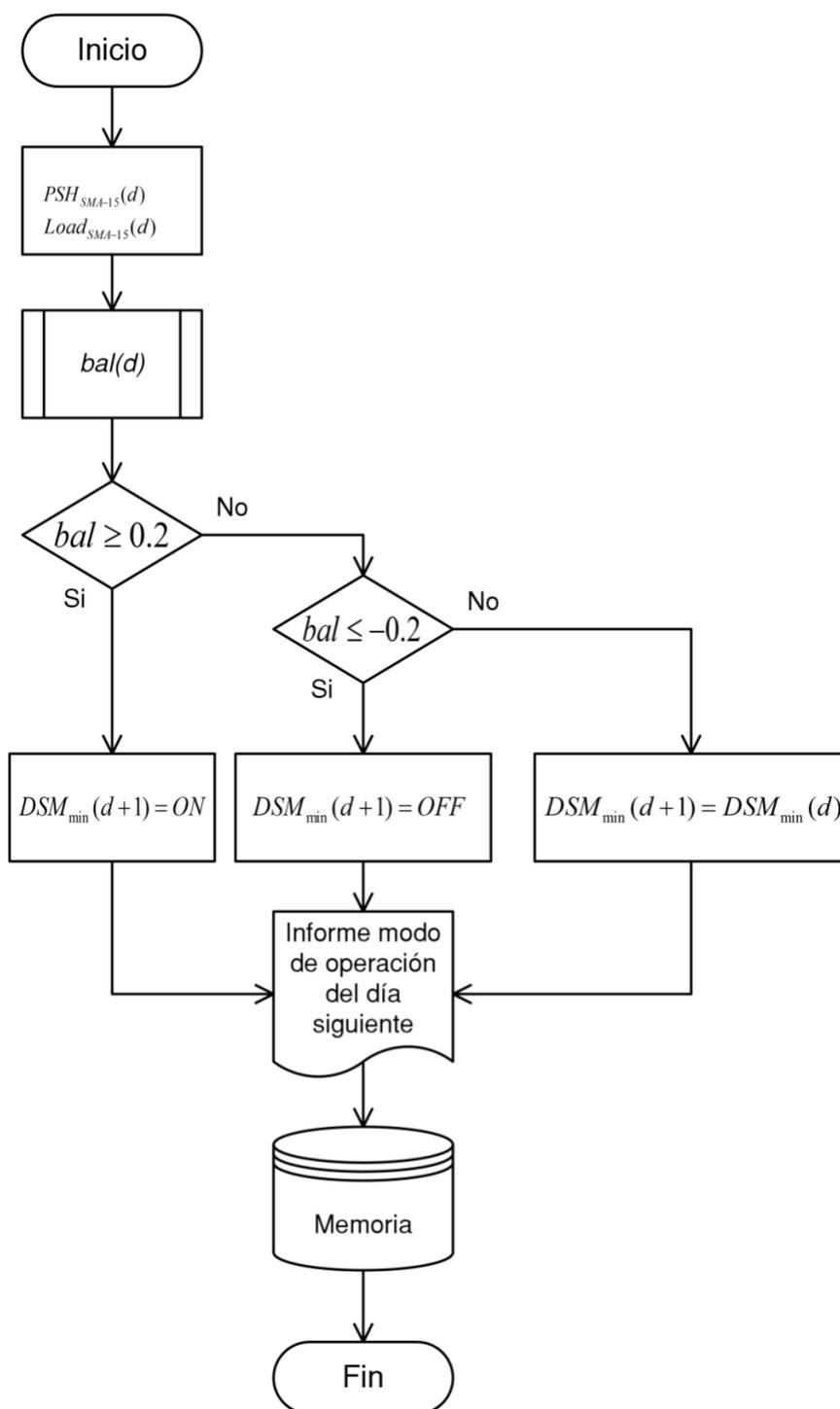
El nivel de referencia deseado es $bal(d) = 0$, que indica que hay un balance entre las capacidades de generación fotovoltaica y el porcentaje de consumo promedio diario planteado de los últimos 15 días, evaluado para cada día considerado en la simulación.

El efecto directo de la aplicación de la estrategia de gestión energética es el rizado del perfil de consumo en las fechas de baja insolación, además de mejorar el desempeño de las baterías reflejado en el SOC, y sobre todo evitar cortes repentinos debido a la naturaleza del emplazamiento aislado.

El resultado de la operación del proceso $bal(d)$, se alimenta al DSM como insumo de decisión para definir si se puede cambiar a una operación más holgada o restringida.

Figura 22

Modelo de bloques de la lógica de activación de la variable DSM_{min} para el día d



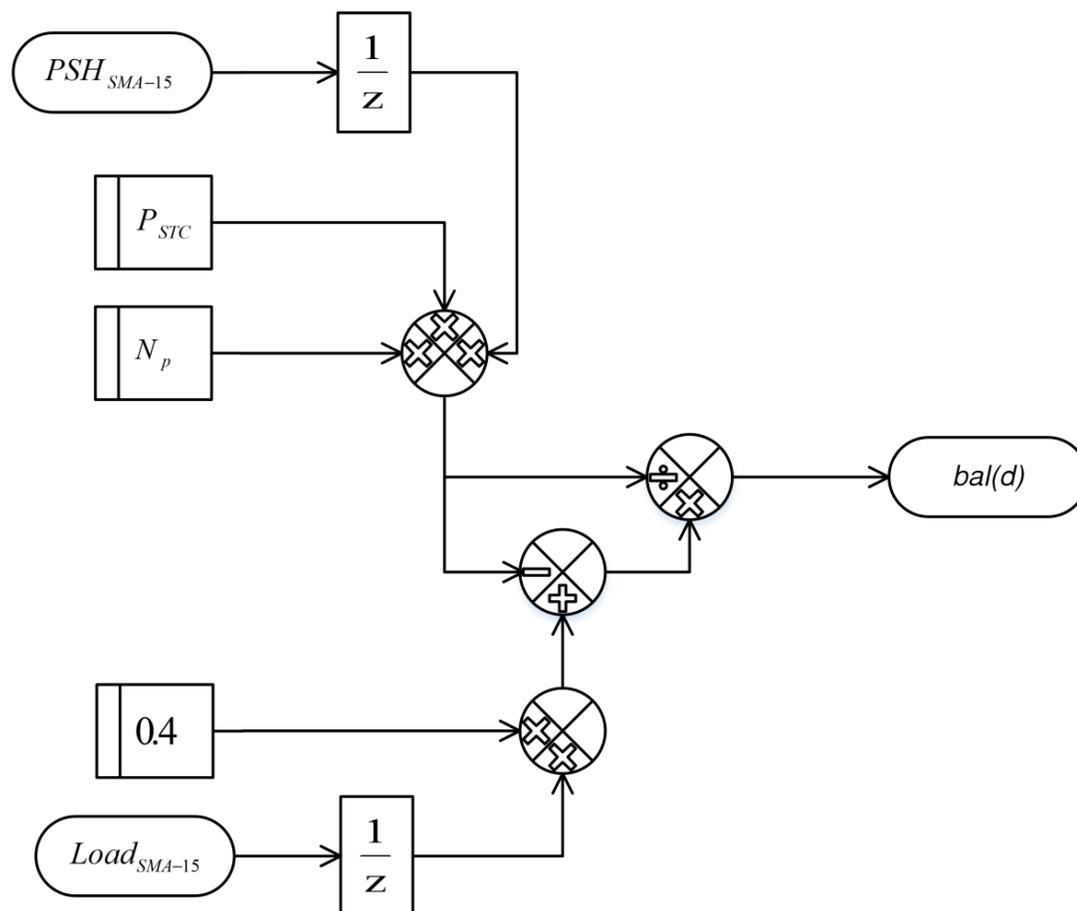
Como se verifica el proceso de decisión para el día siguiente ($d + 1$) tiene tres alternativas: funcionamiento con consumo eléctrico restringido $DSM_{min} = ON$, funcionamiento con consumo eléctrico no restringido $DSM_{min} = OFF$, y un tercer estado

para un umbral no definido que es la mantención del valor de la variable DSM_{min} del día actual, para el día siguiente, sea cual sea su valor.

La Figura 23 presenta el diagrama de bloques del subproceso bal perteneciente al proceso principal para el cálculo de la variable de decisión DSM_{min} .

Figura 23.

Diagrama de bloques del subproceso bal



Nota. Siendo z el operador de la transformada z , con resolución de muestreo de 1 día (24 horas).

Como se describió, se pretende alimentar de energía eléctrica a dos viviendas contiguas que están imposibilitadas en lo absoluto de acceso a la red de alimentación convencional.

Resultados de la Simulación

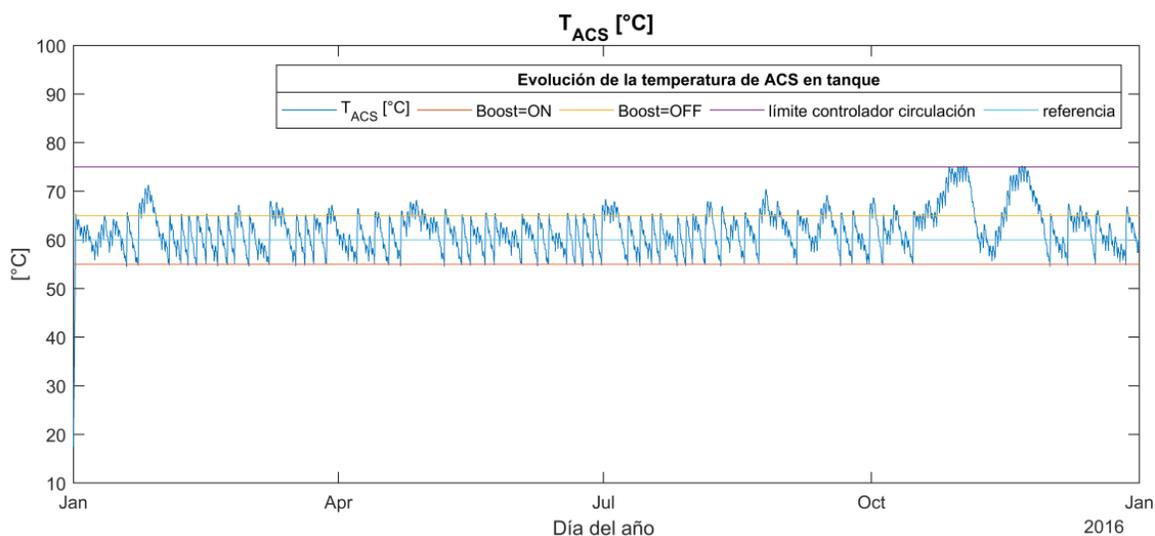
La evaluación del sistema propuesto requiere de la definición del contexto supuesto, sobre el cual el diseño pretende ser aplicado.

Simulación de la Gestión Termoeléctrica de la Microrred

La Figura 23 presenta el resultado de la simulación de la gestión energética termoeléctrica para un sistema de apoyo termosolar de 2 colectores y un tanque de 0.8 m^3 de almacenamiento de acuerdo a los datos de irradiación solar de la localidad de Palanda, Zamora Chinchipe, registrado en el año 2016 y el perfil de consumo de ACS definido en la etapa de modelamiento de cargas.

Figura 24.

Resultado de la simulación de la Gestión Termoeléctrica



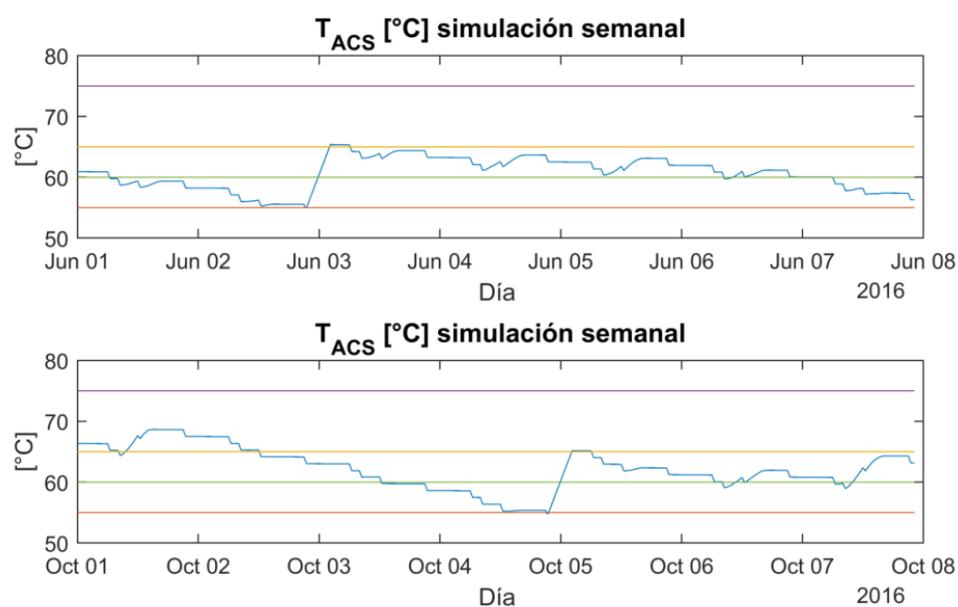
Nota. El colector de referencia es de la marca LCAZE, modelo SUN 600.20. Para el modelamiento del comportamiento del tanque de almacenamiento, se utilizan los datos de referencia mencionados en (Arcos, *et al.*, 2017), longitud del tanque $L = 2.14 \text{ [m]}$, la conductividad térmica del tanque de almacenamiento de agua $k_T = 2.4 \cdot 10^{-3} \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot$

$^{\circ}\text{C}^{-1}$], el radio interno $R_1 = 0.375$ [m], el radio externo $R_2 = 0.475$ [m] incluyendo una capa de aislamiento de 0.1 [m], capacidad volumétrica $V=0.8$ [m^3].

En la Figura 30 se presenta para mayor detalle la simulación de dos semanas dentro del año en evaluación.

Figura 25.

Resultado de la simulación de la Gestión Termoeléctrica de dos semanas del año

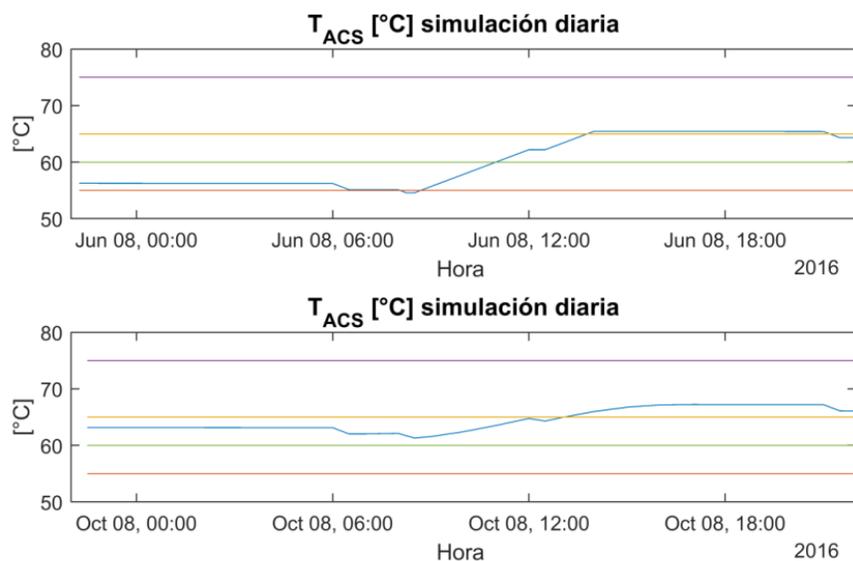


Como se puede observar, se seleccionaron dos períodos distintivos del año, los primeros días del mes con poca insolación en el año (junio) y los primeros días del mes con una insolación considerable en el año (octubre).

Para observar el comportamiento intradía del sistema de gestión termoeléctrica, la Figura 25 muestra la simulación diaria para dos días de los meses de junio y octubre respectivamente.

Figura 26.

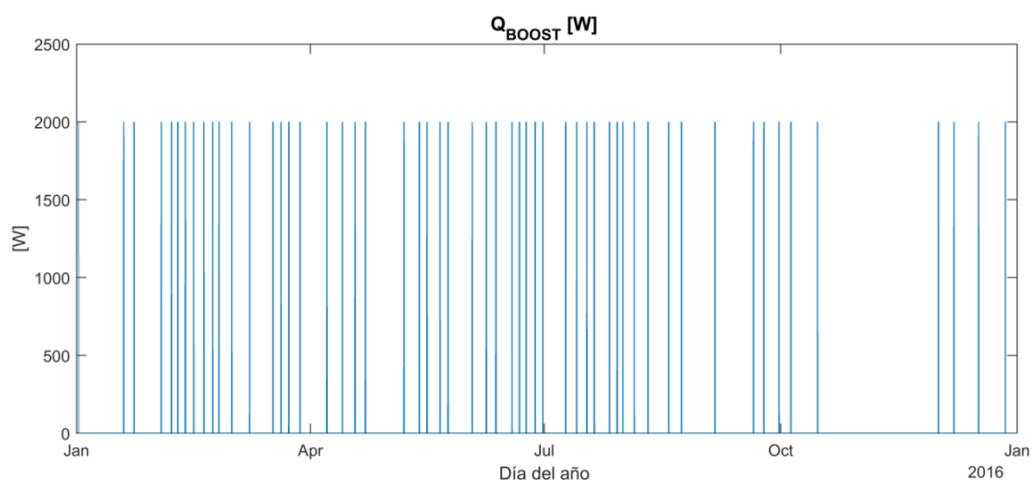
Resultado de la simulación de la Gestión Termoeléctrica de dos días del año



La Figura 26 muestra el resultado de la simulación del consumo eléctrico del sistema Boost de respaldo para el calentamiento de agua.

Figura 27.

Resultado de la simulación del consumo eléctrico del sistema Booster



Simulación del Sistema Eléctrico Antes de Aplicar el DSM

Como se describió, la estrategia de gestión energética del lado de la carga diseñada, depende de los valores de media móvil del PSH y de la energía consumida de cada día para evaluar si el recurso renovable es capaz de surtir con el 40% de la carga, según se diseñó.

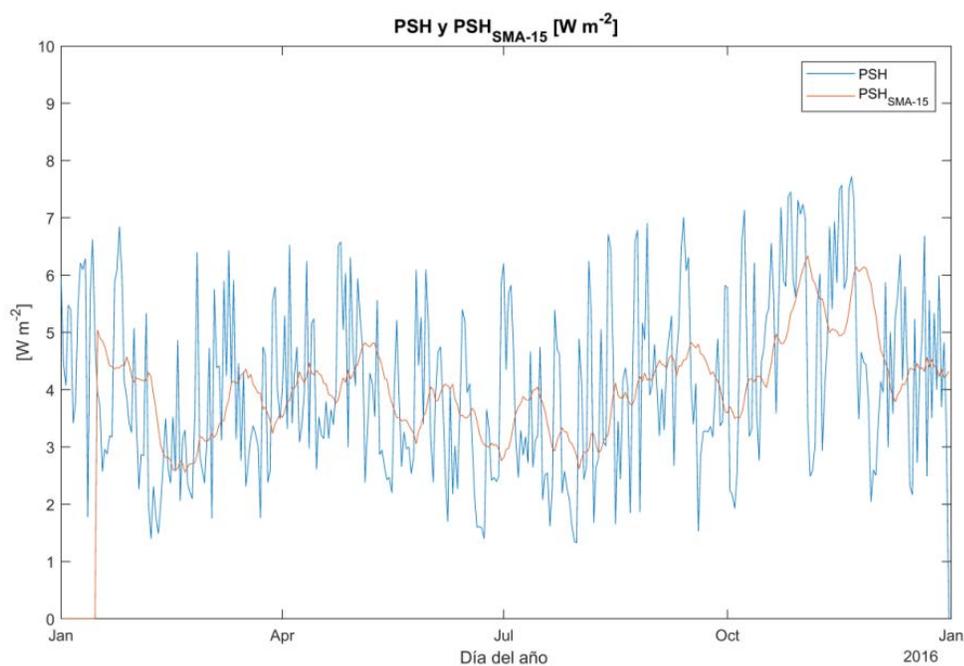
La Figura 27 muestra los valores de $PSH(d)$ y $PSH_{SMA-15}(d)$ en dos figuras superpuestas del año en evaluación.

. Como se puede verificar, para los primeros 15 días del año, debido a que no están definidos valores de consumo eléctrico diario suficientes para calcular el PSH_{SMA-15} , se dejan dichos valores como cero o no definidos.

El comportamiento de la curva promediada mediante la aplicación de la media móvil, es claramente más útil para su uso como insumo en la toma de decisiones dentro de la estrategia de gestión energética, que su contraparte no promediada.

Figura 28.

Evolución de los indicadores PSH y PSH_{SMA-15} para el año en evaluación



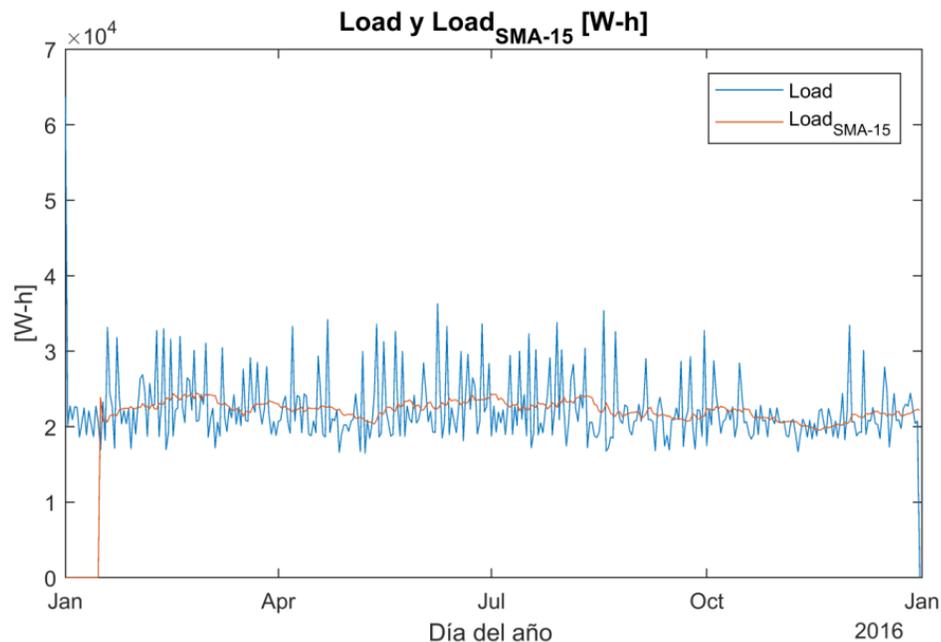
La Figura 28 muestra los valores de consumo energético diario $Load(d)$ y consumo energético diario promedio $Load_{SMA-15}(d)$ en dos figuras superpuestas del año en evaluación del perfil anual de carga eléctrica, obtenido mediante la metodología definida en el modelamiento de la carga.

La Figura 28 contiene el perfil de las cargas eléctricas sin la aplicación del DSM y adicionado el perfil de carga del sistema Boost de respaldo para calentamiento de ACS mostrado.

Mediante los datos obtenidos en el procedimiento de cálculo de los indicadores promediados PSH_{SMA-15} Y $Load_{SMA-15}$ se tienen los recursos necesarios para realizar el dimensionamiento.

Figura 29.

Indicadores $Load$ y $Load_{SMA-15}$



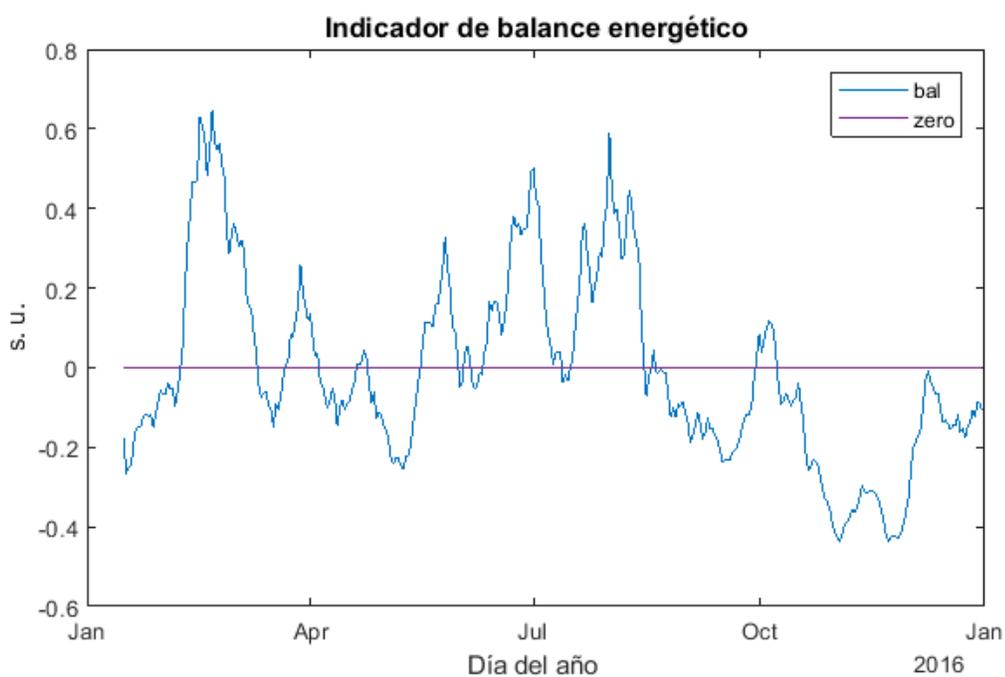
Nota. Como se puede verificar, para los primeros 15 días del año, debido a que no están definidos valores de consumo eléctrico diario suficientes para calcular el $Load_{SMA-15}$, se dejan dichos valores como cero o no definidos.

La Figura 29 muestra la evolución del indicador bal, sin la aplicación del DSM y la simulación con 10 paneles fotovoltaicos.

La Figura 29 podrá ser usada como referencia del mejoramiento del comportamiento de la microrred al aplicar la estrategia de gestión energética del lado de la carga.

Figura 30.

Simulación del indicador de balance energético bal



Dimensionamiento del Recurso Fotovoltaico

Con el uso de los datos de PSH_{SMA-15} y $Load_{SMA-15}$ se calcula el promedio anual, para realizar el dimensionamiento. El PSH anual promedio es de 4.056 [h] y el consumo diario promedio para el año en cuestión es 21.326×10^3 [W - h]. Dichos valores se calcularon tin considerar los valores nulos de los días con valor indeterminado.

El dimensionamiento parte del uso del valor promedio anual de PSH, los datos de especificación técnica del panel fotovoltaico marca Mitsubishi, modelo PV-MLU255HC, con $P_{max} = 255 [Wp]$ y $P_{STC} = 230.5 [W]$, y el 40% de la carga promedio diaria igual a $8.53 \times 10^3 [W - h]$. El número de paneles para los efectos descritos es de $9.12 \approx 9$, se plantea un dimensionamiento de 10 paneles fotovoltaicos.

La Figura 29 presenta los valores del indicador de balance energético definido en la expresión (29), correspondientes a los niveles de insolación y consumo energético de las Figuras 27 y 28.

Dimensionamiento del ESS

Para el recurso de almacenaje de energía se plantea una autonomía de 3 días, por lo que para el 40% del consumo promedio determinado se obtiene $25.591 \times 10^3 [W - h]$.

Se plantea un *DOD* de 50% para el mantenimiento de la operación de la batería dentro de niveles saludables para su vida útil.

La capacidad del arreglo de baterías queda definido en $52 \times 10^3 [W - h]$.

Simulación del DSM

La Figura 30 muestra el desenvolvimiento de la estrategia de gestión energética del lado de la carga planteada. Se puede comprobar el mejoramiento del desempeño del indicador bal.

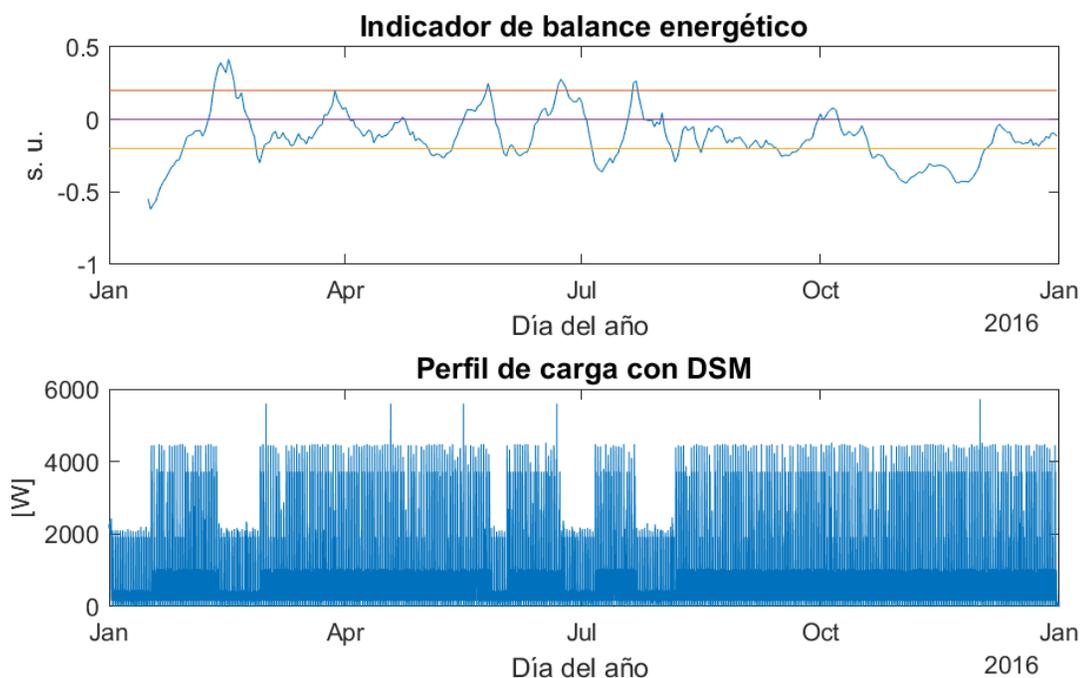
En la Figura 30 se puede apreciar la activación y desactivación del perfil de ahorro, según cuando el indicador bal alcanza los límites definidos de activación y desactivación respectivamente.

Los primeros días evaluados se alejan más de la referencia (peor desempeño) debido a que por default se inicializó la variable DSM_{min} como activada, para que el sistema comience en consumo de energía restringido hasta tener los datos necesarios

para el cálculo de los valores promediados, que como se mencionó son indeterminados los primeros 15 días de la simulación.

Figura 31.

Simulación de la aplicación del DSM



La Figura 31 muestra la simulación del desenvolvimiento de la estrategia de simulación energética para una semana del año en evaluación.

Como se puede verificar los niveles de potencia de consumo corresponden a fechas contiguas de suficiente irradiación solar.

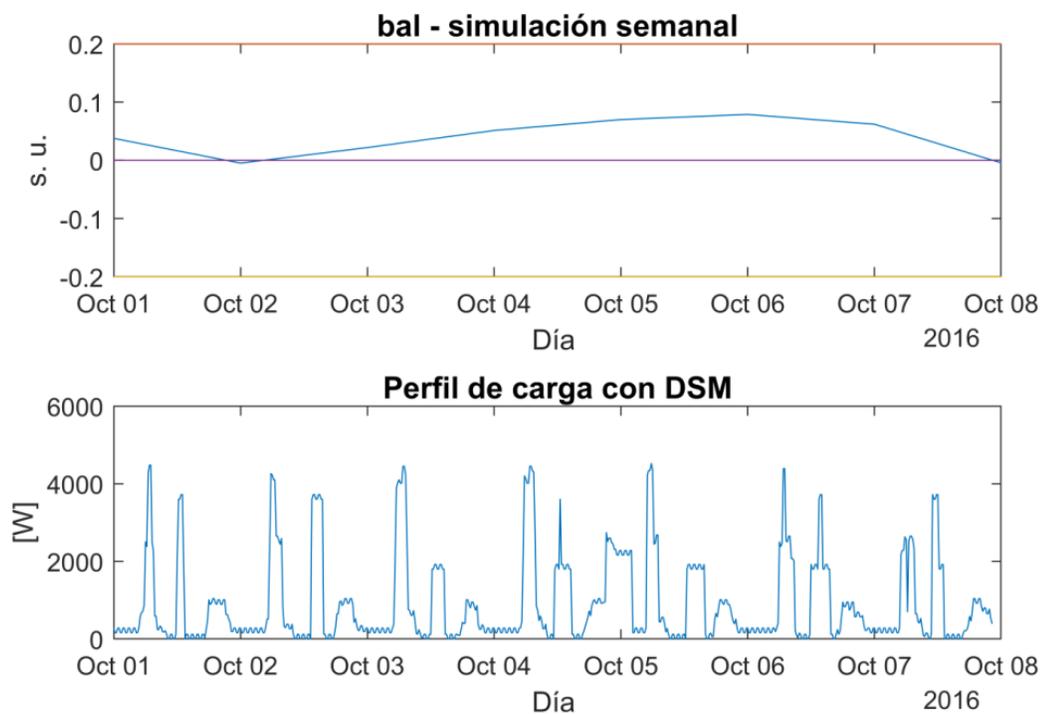
Como se habrá podido apreciar octubre es, para el emplazamiento seleccionado, el mes en el que se inicia un nivel más pronunciado de irradiación solar, por lo que se esperaría que el DSM habilite el consumo no restringido de las cargas.

Al comparar las gráficas que incluyen el indicador bal con y sin DSM se verifica que los picos de sobre consumo se suavizaron, a diferencia del pico de excedente de

potencia solar ya que no se agrega más carga que la que ya existe como capacidad de consumo instalada.

Figura 32.

Simulación semanal del DSM



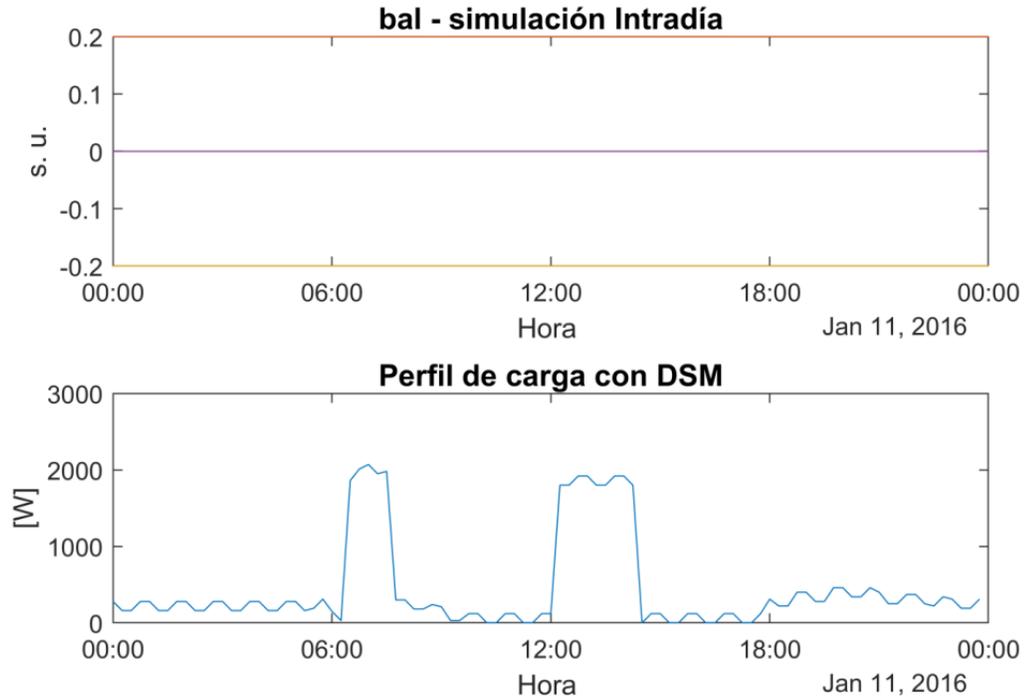
La Figura 32 muestra la simulación del desenvolvimiento de la estrategia de gestión energética del lado de la carga en un período de simulación intradía.

El período de simulación de la Figura 32 es el 10 de enero del año en evaluación.

Como se puede apreciar para ese día se encuentra activada la variable DSM_{min} , por lo que el consumo máximo del perfil de carga es menor a los 2000 [W], en concordancia con lo que se puede apreciar en la simulación anual del DSM.

Figura 33.

Simulación intradía del DSM



Simulación de las Variables de la Microrred

Las expresiones (30), (31), (32) y (33) representan el comportamiento de las variables de la Microrred.

$$P_{net} = P_{PV} - 0.4 \cdot P_{LOAD} \quad (30)$$

$$P_{LOAD} = P_{E,C1} + P_{E,C2} + P_{BOOST} \quad (31)$$

$$P_{DG} = P_{PV} - P_{BATT,c} + \eta_b \cdot P_{BATT,d} - P_{pérdidas} \quad (32)$$

$$P_{GEN} = P_{LOAD} - P_{DG} \quad (33)$$

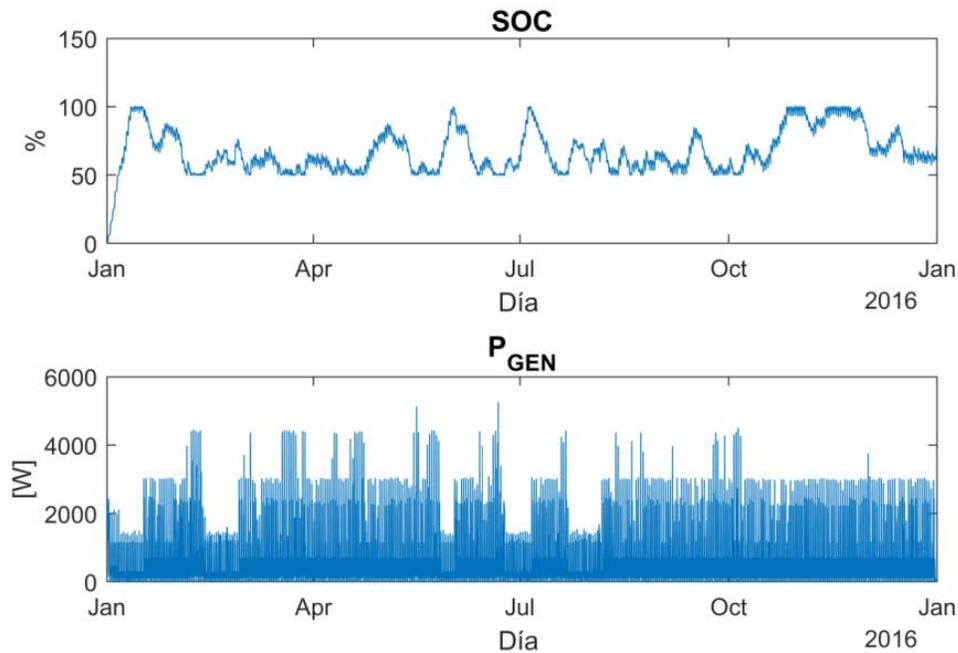
Siendo P_{net} la potencia neta correspondiente a la porción renovable en [W], P_{LOAD} la carga eléctrica total requerida a la microrred en [W], P_{GEN} la potencia eléctrica entregada por el generador en [W], $P_{BATT,c}$ la potencia de carga del ESS en [W],

$P_{BATT,d}$ la potencia de descarga del ESS en [W], $P_{pérdidas}$ la potencia fotovoltaica no aprovechada en [W], η_b la eficiencia instantánea de la batería.

La Figura 33 muestra la simulación del funcionamiento de la Microrred, se muestra el comportamiento del SOC y la potencia de generador eléctrico P_{GEN} , se puede observar como la exigencia de potencia al generador disminuye considerablemente con respecto al perfil de carga de la Figura 33.

Figura 34.

Simulación anual de la microrred con DSM



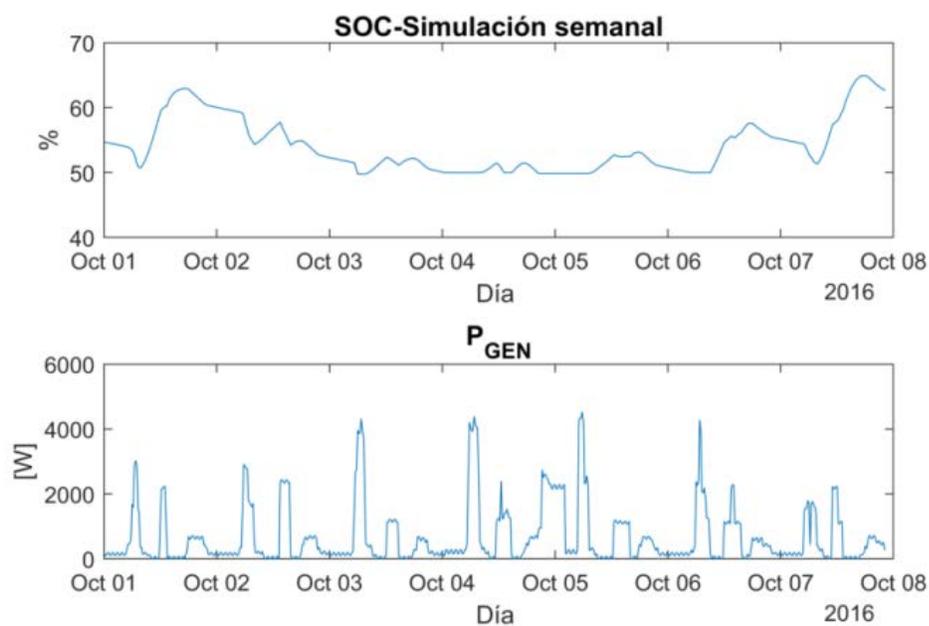
De acuerdo a las características del generador considerado en el modelamiento, Marca Honda EG5000CL, cuya potencia nominal es de 5500[W], el desempeño de la microrred es viable según las consideraciones descritas.

La Figura 34 muestra la simulación de la Microrred en la primera semana del mes de octubre del año en evaluación.

Al comparar la Figura 34 con la Figura 30, que presenta la carga total, en ese período específico del año, se puede corroborar la diferencia considerable en la parte de la carga que debe asumir el generador Electrónico.

Figura 35.

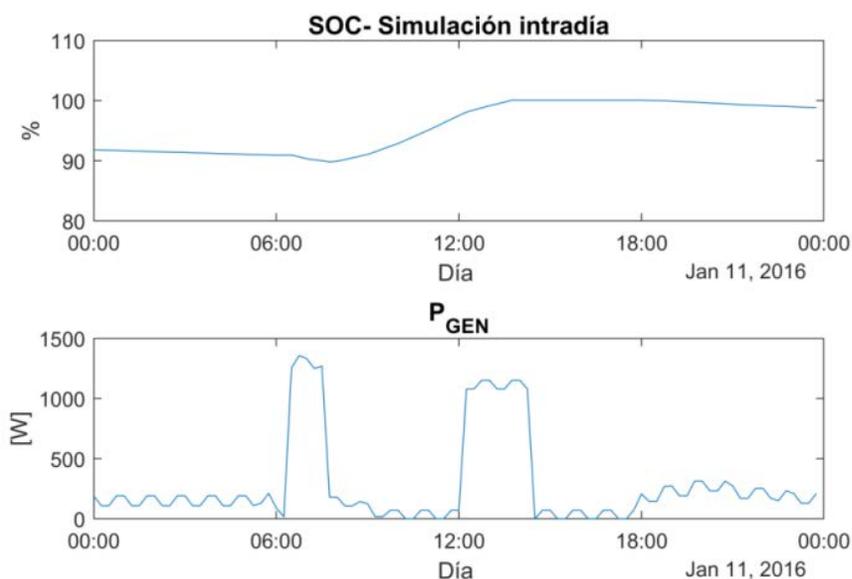
Simulación semanal de la Microrred con DSM



La Figura 35 muestra la simulación intradía de la Microrred en el 11 de enero del año en evaluación.

Figura 36.

Simulación intradía de la Microrred con DSM



Al comparar la Figura 35 con la Figura 31, que presenta la carga total, en ese período específico del año, se puede corroborar la diferencia considerable en la parte de la carga que debe asumir el generador Electrónico.

Simulación del Consumo de Combustible y de Emisiones de Gases

Contaminantes

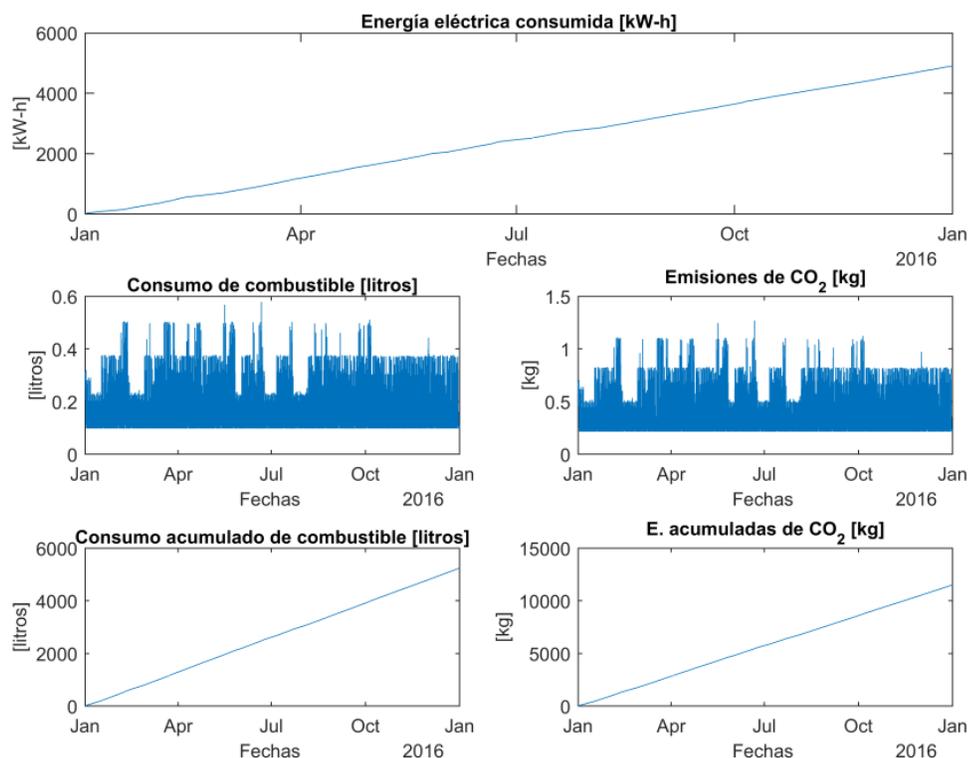
Como se ha podido destacar la aplicación del DSM y la incorporación de recursos de energía renovable mejoran el desempeño de la microrred en cuanto al uso del generador electrónico, con el fin de cuantificar las variables de consumo de combustible y emisión de gases de efecto invernadero se presentan las siguientes simulaciones.

Escenario 1: Microrred Aislada Híbrida con DSM

La Figura 36 muestra la evolución del consumo de combustible y de emisiones de gases de efecto invernadero de la Microrred planteada con la aplicación del DSM.

Figura 37.

Simulación del uso de combustible y emisiones de CO_2 de la microrred con DSM



La cantidad total de combustible consumido en el año, para éste escenario, calculada según los parámetros definidos en el capítulo de la metodología desarrollado en el presente trabajo, es de 5239 [l].

La cantidad total de emisiones de CO_2 acumulados en el año, para éste escenario, calculada según los parámetros definidos en el capítulo de la metodología desarrollado en el presente trabajo, es de 11507 [kg].

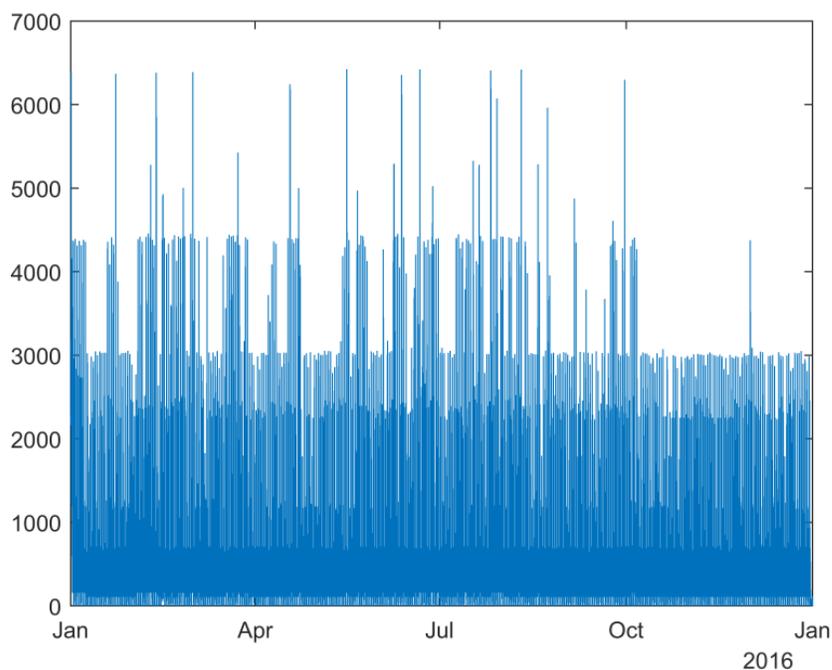
Escenario 2: Microrred Aislada Híbrida sin DSM

La Figura 37 muestra el perfil de carga de la Microrred sin la aplicación del DSM, se puede verificar que debido a los niveles de potencia requeridos se plantea la adición

de un segundo generador para que no exista una sobre exigencia a un solo generador eléctrico lo que ocasionaría apagones repentinos.

Figura 38.

Perfil de carga de la microrred sin la aplicación del DSM



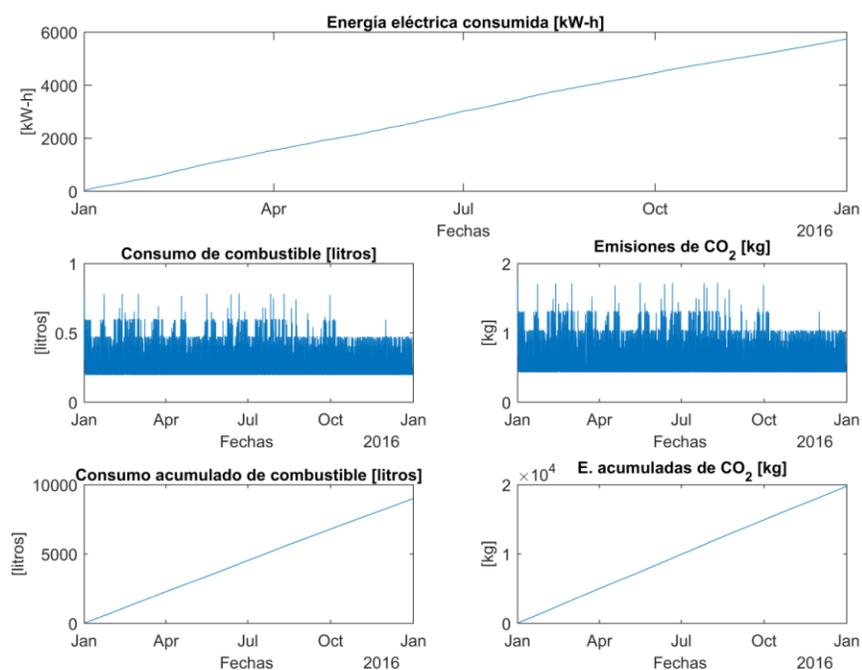
La Figura 38 muestra la evolución del consumo de combustible y de emisiones de gases de efecto invernadero de la Microrred planteada sin la aplicación del DSM.

La cantidad total de combustible consumido en el año , para éste escenario, calculada según los parámetros definidos en el capítulo de la metodología desarrollado en el presente trabajo, es de 8996 [l].

La cantidad total de emisiones de CO_2 acumulados en el año, para éste escenario, calculada según los parámetros definidos en el capítulo de la metodología desarrollado en el presente trabajo, es de 19756 [kg]

Figura 39.

Simulación del uso de combustible fósil y emisiones de CO₂ de la Microrred sin DSM



En comparación con el escenario 1 el aumento en el consumo de combustible y emisiones de gases de efecto invernadero es considerable, no solo por la desconexión de las cargas catalogadas como accesorias y reprogramación de las cargas catalogadas como reprogramables. Sino además, porque debido a la variabilidad que se muestra en el perfil de carga de la Figura 37 se planteó la incorporación de un segundo generador, y por consiguiente se duplica la cantidad de potencia de fricción en el modelo del generador.

Escenario 3: Electrificación con Generador Eléctrico y Sin DSM

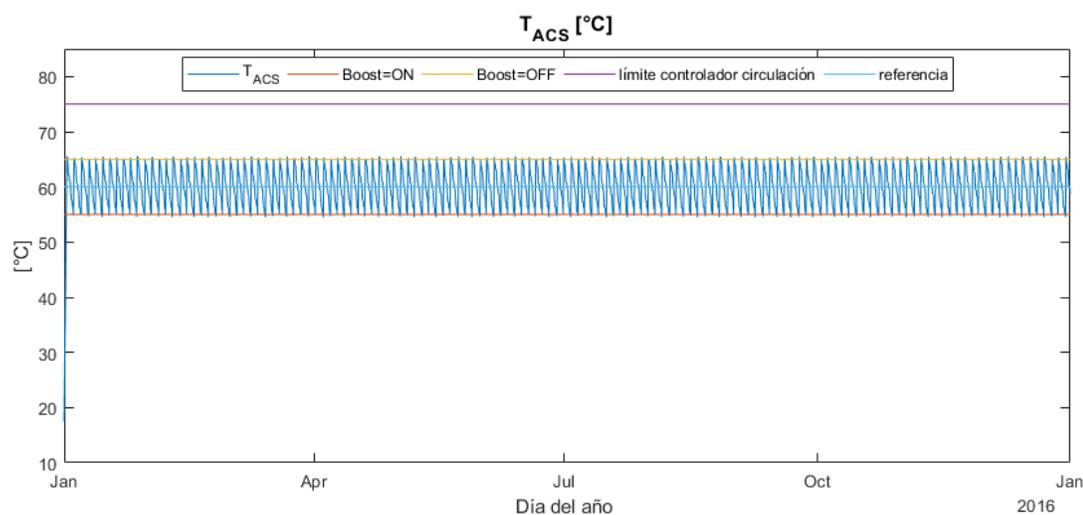
El espíritu del presente trabajo es la validación del aprovechamiento de las fuentes de energía renovable bajo criterios de manejo energético adecuado, para evaluar las bondades del sistema planteado, se presenta la simulación del mismo escenario pero

sin el aprovechamiento de fuentes renovables ni la aplicación de una estrategia de gestión energética.

La Figura 39 muestra la evolución de la temperatura del ACS en el depósito, de acuerdo al perfil de carga térmica planteado para el am plazamiento sin el aporte de energía captada por ningún colector solar. El ACS es calentada por un calentador eléctrico de $2[kW]$.

Figura 40.

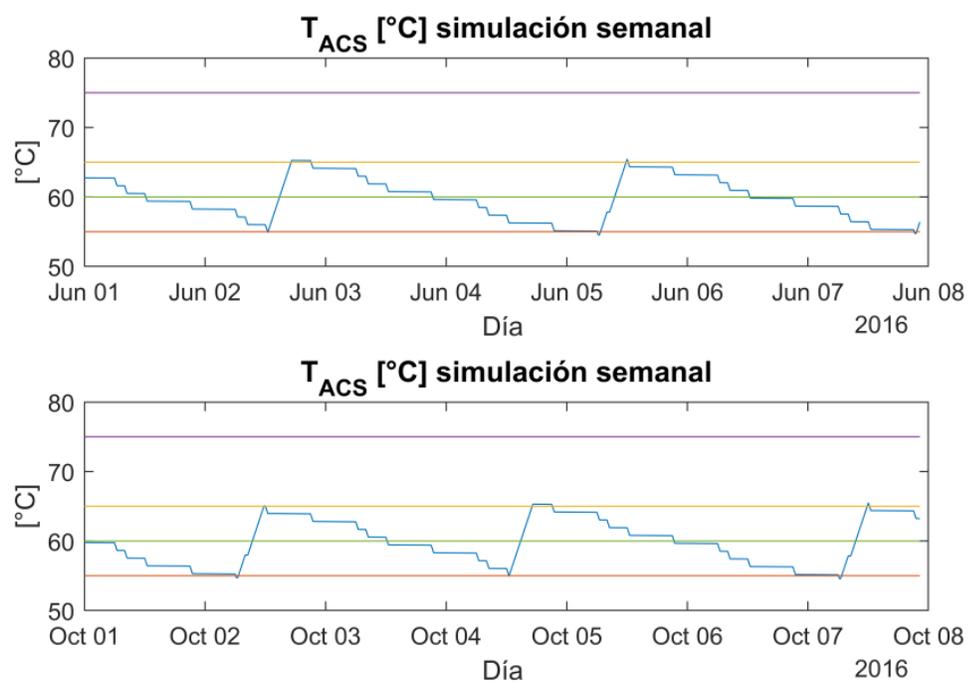
Simulación del calentamiento del ACS sin colectores térmicos



La Figura 40 muestra la simulación semanal del proceso de calentamiento de agua a base de energía eléctrica.

Figura 41.

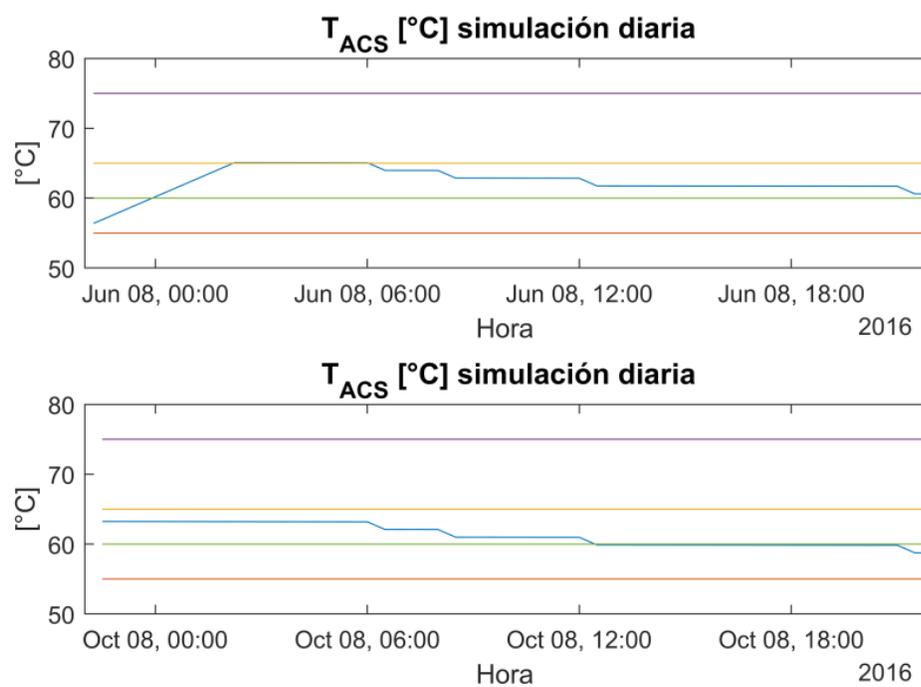
Simulación semanal del calentamiento del ACS sin colectores térmicos



La Figura 41 muestra la simulación intradía del proceso de calentamiento de agua a base de energía eléctrica.

Figura 42.

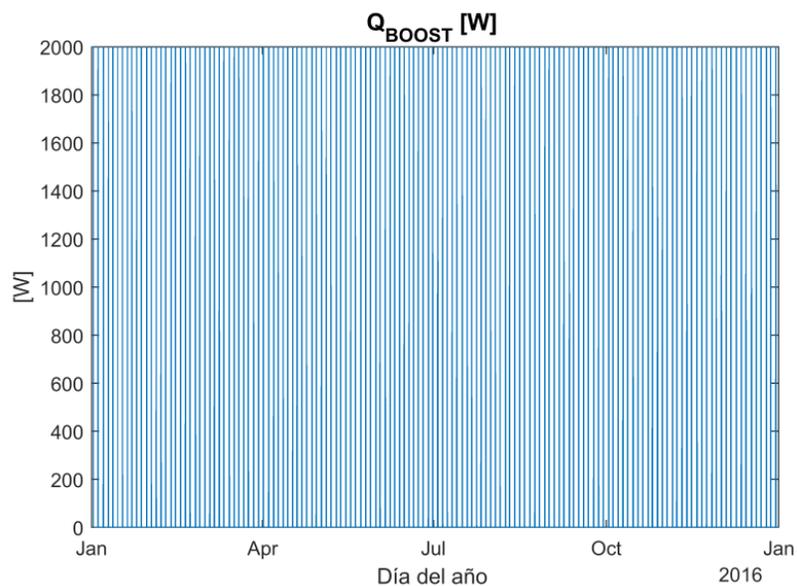
Simulación intradía del calentamiento del ACS sin colectores térmicos



La figura 42 muestra el perfil de carga del calentador eléctrico utilizado para ACS, que se produce sin el apoyo de colectores térmicos.

Figura 43.

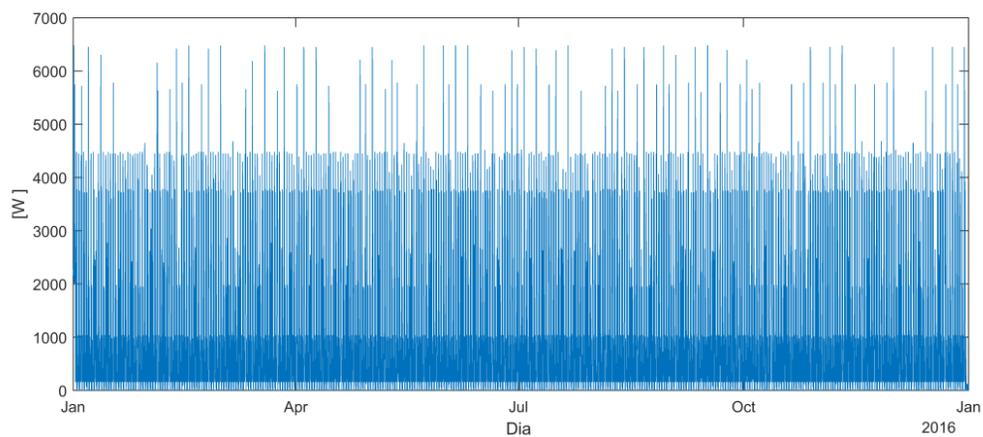
Perfil de carga del calentador eléctrico sin apoyo de colectores térmicos



La Figura 43 muestra el perfil de carga que deberá alimentar un sistema descrito como 100% electrógeno sin la aplicación de una estrategia de gestión energética del lado de la carga.

Figura 44.

Perfil de carga para la alimentación electrógena sin DSM



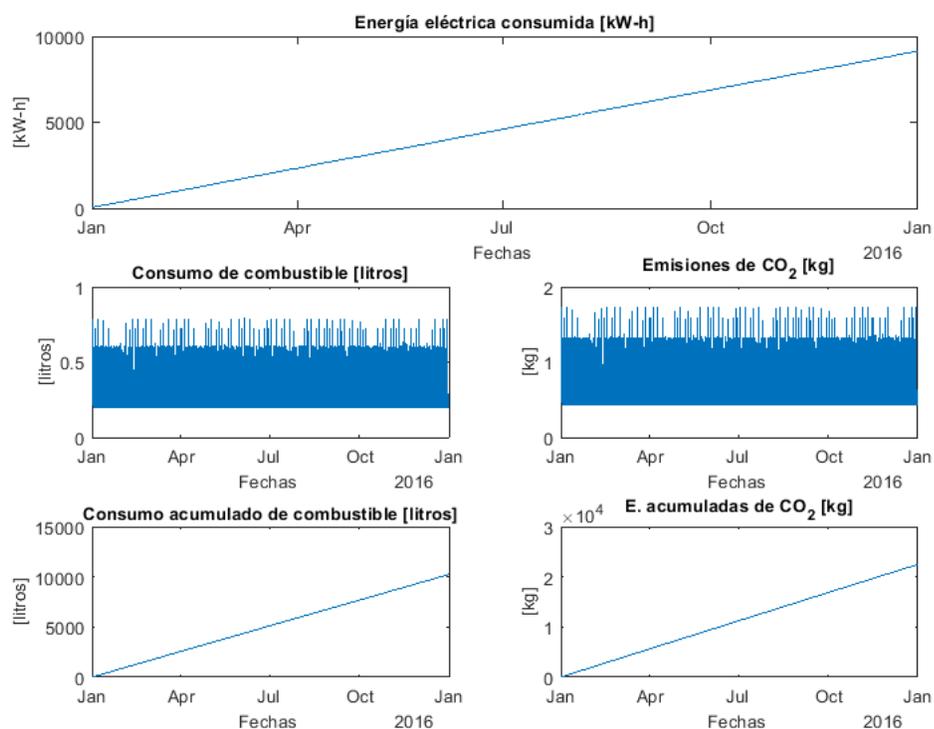
La Figura 44 muestra la evolución del consumo de combustible y de emisiones de gases de efecto invernadero del escenario en el que se electrifica el emplazamiento sólo con generador eléctrico.

La cantidad total de combustible consumido en el año, para éste escenario, calculada según los parámetros definidos en el capítulo de la metodología desarrollado en el presente trabajo, es de 10237 [l].

La cantidad total de emisiones de CO_2 acumulados en el año, para éste escenario, calculada según los parámetros definidos en el capítulo de la metodología desarrollado en el presente trabajo, es de 19756 [kg]

Figura 45.

Simulación del uso de combustible y emisiones de CO_2 con 2 Grupos Electrógenos



Capítulo V

Discusión

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

- Se desarrolla satisfactoriamente una DSM para una Microrred aislada.
- Se presenta la metodología que se siguió para la obtención de datos meteorológicos recientes de un emplazamiento en el territorio Ecuatoriano, se aprovechó el uso de herramientas tecnológicas disponibles en internet.
- Se aprovechó de la gratuidad de los datos meteorológicos de la plataforma Solcast™, obtenidos específicamente para fines de investigación.
- El desarrollo de la DSM aprovecha dos indicadores de tendencia calculados por medio de la definición de la media móvil simple (SMA), para evaluar la previsión de consumo y de irradiación solar.
- El centro de consumo se mantuvo durante todo el intervalo de simulación dentro de los límites nominales de operación de los recursos distribuidos sin exceder la capacidad de generación instalada.
- El perfil de carga fue suavizado para una operación más estable de la Microrred.
- Se demuestra la incapacidad de mantener la carga con 1 solo generador eléctrico, bajo los términos descritos en el presente trabajo, al retirar los recursos distribuidos renovables y sin el DSM. Para que el sistema sea 100% electrógeno, se demostró la necesidad de un segundo generador.
- Se demuestra la viabilidad de la Microrred en comparación a la opción 100% electrógena, tanto en calidad del perfil de intercambio energético, consumo de combustible, y emisiones de efecto invernadero.

- El presente trabajo comprende un estudio detallado de la composición de una Microrred.
- Se presenta el modelamiento matemático de los recursos distribuidos de la Microrred necesarios para la simulación de variables y evaluación de las capacidades de la estrategia de gestión energética propuesta.
- Se presenta una metodología técnica para el dimensionamiento de los recursos distribuidos de la Microrred.
- Se consiguió el desarrollo de la simulación del comportamiento y desempeño de sistema propuesto, con el uso de instrucciones simples ordenadas en scripts en el programa de simulación definido.
- No se requirió de programación orientada a objetos, eventos ni de mayor nivel.
- Se presentaron las simulaciones en gráficos bidimensionales simples del programa de simulación, con el sentido de hacerlas lo más intuitivas para el lector.
- Mantener una Microrred sobredimensionada para que pueda soportar variaciones bruscas no predecibles, la encarece. Y dimensionar la Microrred bajo supuestos y sin un elemento de supervisión y control, la vuelve incierta, ya que puede entrar en desactivaciones frecuentes por accionamiento de protecciones de sobretensión y hasta en desactivaciones cíclicas por accionamiento de protecciones temporizadas.
- El proceso de tratamiento de ACS, con calentadores eléctricos, presenta dimensiones que distorsionan la operación de la Microrred, con respecto al resto de cargas, tanto en el nivel de potencia, armónicos, protecciones y operatividad.
- La inclusión del recurso termo solar en la Microrred aprovecha la irradiación solar de manera directa y eficiente, ahorra el consumo de combustibles fósiles, y

minimiza el uso de la capacidad de almacenamiento de las baterías para el tratamiento de ACS.

- Ecuador posee un perfil de insolación intermensual que presta la capacidad para desarrollar proyectos con colectores térmicos y paneles fotovoltaicos capaces de ser rentables y estables en la provisión de energía para el consumo en Microrredes.
- La academia Ecuatoriana puede aportar significativamente en el desarrollo de Microrredes con enfoque de optimización de recursos instalados, gestión energética, seguimiento del punto de operación de los paneles solares, gestión de las baterías, etc.
- Es necesario el desarrollo de estudios para la definición de valores orientativos del consumo de agua caliente por persona y por tipo de localidad para la realidad nacional.

Recomendaciones

- Desarrollar otras metodologías de gestión energética del lado de la carga para Microrredes aisladas.
- Implementar la DSM aquí descrita.
- Recolectar más datos meteorológicos de locaciones de interés del territorio nacional según la metodología presentada en el presente trabajo.
- Socializar el uso de plataformas tecnológicas como Solcast™ para la obtención de datos históricos meteorológicos de importancia para el desarrollo de proyectos de investigación relacionados.
- Aprovechar las facilidades de datos meteorológicos en tiempo real y de forecasting disponibles en plataformas tecnológicas como Solcast™ para el

desarrollo de estrategias de gestión energética adaptativas conectadas a la API de dicha plataforma tecnológica.

- Investigar otras métricas de tendencia estocástica más avanzada que la SMA, como por ejemplo la EMA (Exponential Moving Average) o WMA (Weighted Moving Average), y combinaciones de las tres para el desarrollo de estrategias de gestión energética más sofisticadas.
- Realizar estudios de estabilidad de Microrredes aisladas.
- Realizar un análisis sobre los métodos de sincronización de generadores síncronos a redes de potencia infinita.
- Efectuar estudios sobre la precisión del modelamiento matemático de los recursos distribuidos con respecto al sistema real.
- Desarrollar el modelamiento dinámico de un colector solar.
- Realizar una Comparación de diferentes métodos de seguidor de punto máximo de potencia (MPPT – Maximum Power Point Tracking) en sistemas fotovoltaicos.
- Desarrollar modelamiento de baterías para estudios de estabilidad de diferentes tipos de composición química, que tengan mayor presencia en el mercado ecuatoriano.
- Efectuar proyectos de sincronización de fase y voltaje de recursos distribuidos.
- Desarrollar estudios de esquemas de comunicación entre entes presentes en una microrred aislada.
- Desarrollar una arquitectura de comunicación para una microrred aislada aplicable a la realidad Ecuatoriana, con los protocolos de comunicación desarrollados para subestaciones en la norma IEC 61850 y que cumpla con los preceptos mencionados en el capítulo 2 en el apartado comunicaciones de la Microrred.

- Realizar proyectos de seguridad informática en comunicaciones entre Microrredes, subestaciones y elementos de control que integren la dinámica de funcionamiento dentro de cada Microrred.

BIBLIOGRAFÍA

- ABB Drives. (28 de Septiembre de 2017). *Gestión y control de armónicos* [Archivo de Vídeo]. <https://www.youtube.com/watch?v=ueArxz8Mlk>
- Agencia de Regulación y Control de la Electricidad. (2019). *Balance Nacional de Energía Eléctrica*. <https://www.regulacionelectricidad.gob.ec/balance-nacional/>
- Alonso, M. (2005). *Sistemas Fotovoltaicos*. [Tesis de Maestría, Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, Escuela de Organización Industrial]. Madrid: CIEMAT.
- Arcos, D., Guinjoan, P., Marietta, P., Pascual, J., Marroyo, J., & Sanchis, P. (2016). Energy Management Strategy for a grid-tied Residential Microgrid based on Fuzzy Logic and Power Forecasting. *IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* (págs. 4103-4108). Florencia: IECON.
- Arcos, D., Sotomayor, D., Llanos, J., Guinjoan, F., Marietta, M., Pascual, J., y otros. (2017). Fuzzy energy management strategy based on Microgrid Energy Rate-of-Change applied to an electro-thermal residential microgrid. *2017 IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics*, 99-105.
- Asociación Española de Normalización, UNE. (2020). *UNE-EN 12975-1:2006*. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0038039>
- Barnes, D. (2011). Effective solutions for rural electrification in developing countries: Lessons from successful programs. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 260-264.
- Benedicto, E. (2020). *Batería de sodio y azufre en Abu Dhabi es el dispositivo de almacenamiento más grande del mundo*. <https://ecoinventos.com/bateria-sodio-azufre-abu-dhabi/>
- BLD Solar Europe. (s.f.). *Datasheet Photovoltaic Modules BLD Solar Europe*. <http://eprints.polsri.ac.id/4627/11/Solar%20Cell.pdf>
- Bueche, F., & Hecht, E. (2008). Trabajo, Energía y Potencia. En F. Bueche, & E. Hecht, *Física General* (págs. 63-72). México D.F.: Jorge Rodríguez Hernández.
- Castellano, F. (s.f.). *Sistemas solares Térmicos*. <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/5198/fichero/1.+Sistemas+solares+t%C3%A9rmicos.pdf>
- CIE. (Agosto de 2008). *Atlas Solar del Ecuador con fines de generación eléctrica*. <http://energia.org.ec/cie/>
- De Felipe, J. (s.f.). *Tema 5: Potencia – Rendimientos – Balance Térmico*. <https://url2.cl/d2zqi>
- Durgadevi, A., Arulselvi, S., & Natarajan, P. (2011). Photovoltaic modeling and its characteristics. *2011 International Conference on Emerging Trends in Electrical and Computer Technology*, 469-475.

- EL TIEMPO PREVISTO, S.L.U. (2020). *El tiempo.es*.
<https://noticias.eltiempo.es/calculadora-emisiones-de-co2-cuanto-emite-coche/>
- Endless Solar®. (2016). *Evacuated Tube Solar Hot Water System Installation Manual*. Melbourne, Endless Solar® Corporation Ltd.
- Fusheng, L., Ruisheng, L., & Fengquan, Z. (2016). *Microgrid Technology and Engineering Application*. Academic Press.
- Galindo, J., Palomares, M., & Martínez, O. (2010). *Determinación de la Constante de Inercia de Máquinas Síncronas de Laboratorio*. México, D.F.: Instituto Politécnico Nacional.
- González, J. (27 de Noviembre de 2018). *Curva de Carga o Demanda*.
<https://catedras.facet.unt.edu.ar/centraleselectricas/wp-content/uploads/sites/19/2014/10/Apunte-Curvas-de-Carga-y-Generaci%C3%B3n.pdf>
- Green Coast. (s.f.). *Best Solar Pool Heaters 2020: What Product is Best for You?*
<https://greencoast.org/best-solar-pool-heaters/>
- Guerrero, J. M., Vásquez, J. M., García, L., & Castilla, M. (2011). Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC Microgrids—A General Approach Toward Standardization. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 158-172.
- HOMER Energy. (2018). *battery round-trip efficiency*. <https://url2.cl/ZTfd5>
- Honda. (s.f.). *GX390*. <https://url2.cl/sSfi>
- iAgua. (2020). *El agua y la legionela*. <https://www.iagua.es/blogs/jose-luis-perez/agua-y-legionela>
- Iglesias, R., Lago, A., Nogueiras, C., Martínez-Peñalver, C., Marcos, J., Quintans, C., y otros. (2012). Modelado y Simulación de una Batería de Ion-Litio Comercial Multicelda. *SAAEI*, 464-469.
- INCIBE. (s.f.). *Estándar IEC 61850, todos para uno y uno para todos*. <https://www.incibecert.es/blog/estandar-iec-61850-todos-uno-y-uno-todos>
- Instituto Nacional de Tecnologías Educativas y de Formación del Profesorado. (s.f.). *Proyecto Newton*. <https://n9.cl/sz1y>
- Kavadias, K., & Karamanou, E. (2019). Meteorological input data effect on sizing stand-alone photovoltaic systems. *Energy Procedia*, 90-95.
- Khoury, J. (2016). *Sizing and operation optimization of a hybrid photovoltaic-battery backup system*. Neuville: Université de Cergy Pontoise.
- Kundur, P. (1994). *Power System Stability and Control*. Palo-Alto: McGraw-Hill/Interamericana Editores.
- Laguerre, O. (2010). Heat transfer and air flow in a domestic refrigerator. En M. Farid, *Mathematical Modelling of Food Processing* (págs. 446-473). Boca Raton: CRC Press.
- Lavín, A. (17 de Junio de 2020). *Cálculo y dimensionado de pequeña instalación aislada FOTOVOLTAICA* [Archivo de Vídeo]. https://youtu.be/Y8fB_rls5Jw
- Martínez, E. (2002). *Auditoría Energética Del Hospital General de Latacunga*. Latacunga: Escuela Politécnica del Ejército Sede Latacunga.
- Martínez, J., Franco, N., & Alonso, R. (2013). Volumen II: Aspectos Técnicos y Normativos. En U. d. Uruguay, *Manual Técnico de Energía Solar Térmica* (págs. 1-267). Montevideo: Facultad de Ingeniería, Universidad de la República Uruguay.

- Matevosyan, J., Badrzadeh, B., Prevost, T., Quitmann, E., Ramasubramanian, D., Urdal, H., y otros. (2019). Grid-Forming Inverters: Are They the Key for High Renewable Penetration? *IEEE Power & Energy Magazine*, 89-98.
- Rey, J., Vergara, P., Solano, J., & Ordóñez, G. (2019). Design and Optimal Sizing of Microgrids. En Z. Antonio, *Microgrids Design and Implementation* (págs. 337-367). Santander-Campinas: Springer.
- Rodríguez, M. (2014). *Máquinas Síncronas*.
https://personales.unican.es/rodrigma/primer/publicaciones.htm#Aspectos_Generales
- Salinas, J. L. (2020). *Estándar ISA 95: Integración de los Sistemas de Control Empresarial*. <https://www.isamex.org/intechmx/index.php/2017/09/26/estandar-isa-95-integracion-de-los-sistemas-de-control-empresarial/>
- Samaniego, A. (28 de Julio de 2017). *youtube.com*. Plan Maestro de Electricidad de Ecuador [Archivo de Vídeo]. <https://www.youtube.com/watch?v=KsRHRssPvvo>
- Sánchez, P. (2018). Ecuador electrifica con fotovoltaica zonas rurales de Zamora Chinchipe. *pv magazine Latin America*, 1-5.
- SANVISOLAR. (2020). *Evacuated Tube Collector type Solar Water Heater*.
<https://sanvirenewableindia.com/solar-water-heater-with-evacuated-tube-collector/>
- Serrano, E. (2016). El almacenamiento de electricidad distribuido: origen, estado del arte e implicaciones. *Cuaderno de Energia Vol. 49*, 125-131.
- SG Energías Renovables. (s.f.). *COLECTOR PLACA PLANA - Serie CSPJ*.
<http://sgenergia.com.ar/#!/producto/15/>
- Solcast. (2019). *Global solar irradiance data and PV system power output data*.
<https://solcast.com/>
- Testo Argentina S.A. (2018). *Energía y combustión*.
<http://www.academiatesto.com.ar/cms/energia-y-combustion>
- WSCERTICALIA. (2020). *Cómo calcular la demanda diaria de ACS para CE3X*.
<https://www.certicalia.com/blog/como-calcular-la-demanda-diarria-de-ac-s-para-ce3x>