



ANÁLISIS, DISEÑO Y SIMULACIÓN DE SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO
PARA SUMINISTRO ELÉCTRICO EN APOYO A PROGRAMA NUTRICIONAL EN
LA ESCUELA RURAL EL CARDONAL, TIBANÁ (BOYACÁ) – COLOMBIA.

ANDREA CATALINA ALVARADO FAJARDO

C.C. N. 1.049.610.018

UNIVERSIDAD LIBRE
FACULTAD DE INGENIERÍA
INSTITUTO DE POSGRADOS
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CON ÉNFASIS EN ENERGÍAS ALTERNATIVAS
BOGOTÁ, AGOSTO DE 2014



ANÁLISIS, DISEÑO Y SIMULACIÓN DE SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO
PARA SUMINISTRO ELÉCTRICO EN APOYO A PROGRAMA NUTRICIONAL EN
LA ESCUELA RURAL EL CARDONAL, TIBANÁ (BOYACÁ) – COLOMBIA.

ANDREA CATALINA ALVARADO FAJARDO

C.C. N. 1.049.610.018

Proyecto de grado para obtener el título de
MAGISTER EN INGENIERÍA CON ÉNFASIS EN ENERGÍAS ALTERNATIVAS

Director

ING. HERNÁN CARVAJAL OSORIO, PhD.

UNIVERSIDAD LIBRE
FACULTAD DE INGENIERÍA
INSTITUTO DE POSGRADOS
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CON ÉNFASIS EN ENERGÍAS ALTERNATIVAS
BOGOTÁ, AGOSTO DE 2014

Dedico este trabajo

A Dios por guiarme y permitirme alcanzar este nuevo logro

A mis padres y mi hermano por la paciencia y apoyo incondicional

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi gratitud por la confianza y el apoyo desinteresado que me han prestado durante estos años para el desarrollo de este trabajo

De la Facultad de Tecnología de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, al *Ing. John Alejandro Forero Casallas*, coordinador del proyecto curricular del programa de Tecnología e Ingeniería Mecánica y a quien se desempeñó en ese cargo hasta final de 2013 *Ing. Yisselle Indira Acuña Hereira*, por permitir el uso de la licencia educativa del software TRNSYS 17, para propósitos educativos en el desarrollo de este trabajo. Al *PhD(c). Camilo Andrés Arias Henao*, profesor del grupo de investigación en energías alternativas GIEAUD y a *Jorge Andrés Gaitán Triana*, por su conocimiento y apoyo sobre el software.

A la Universidad Libre de Colombia, especialmente a la *M.Sc. Gloria Amparo Molina Herrera*, Directora Instituto de Posgrados, al *Ing. Andrés Felipe López Vásquez*, Director Centro de Investigaciones y al *PhD. Andrés Felipe Suárez Escobar*, Director Nacional de Investigaciones, por generar los espacios para la creación de los convenios necesarios, facilitar el préstamo de los equipos de medición y el interés en el desarrollo de este trabajo. Al *PhD. Fredy Giovanni Mesa Rodríguez* y a la *Ing. Nayiver Rodríguez León* por su participación y aportes a esta tesis.

Al *PhD. Hernán Carvajal Osorio* por su guía, sugerencias, opiniones y todo el tiempo dedicado a este trabajo de grado y a mi formación como investigadora.

A la Alcaldía Municipal de Tibaná y a través de ésta a *Gerardo Enrique Sanabria Acevedo* y al Alcalde Sr. *Luis Alberto Casteblanco Quincos*, por el soporte logístico, necesario para el presente estudio. A la profesora *Luz Myriam Torres Tolosa* y los niños de la Escuela El Cardonal.

A mis compañeros *Ricardo, Ariel, Yurany, Álvaro M., Patricia, Álvaro T.* y especialmente a *Willy*, por dejar huella directa e indirectamente en mi formación.

CONTENIDO

RESUMEN	18
INTRODUCCIÓN	19
1. OBJETIVOS	28
1.1 GENERAL	28
1.2 ESPECÍFICOS	28
2. HIPÓTESIS	29
3. MARCO TEÓRICO	30
3.1 PROYECTOS DE ENERGÍA SOLAR EN INSTITUCIONES EDUCATIVAS	32
3.2 SOFTWARE PARA MODELACIÓN DE SISTEMAS SOLARES	36
3.2.1 Software TRNSYS	37
4. METODOLOGÍA	40
4.1 REGISTRO Y ANÁLISIS DE DATOS	40
4.2 CORRECCIÓN DE DATOS REGISTRADOS DE RADIACIÓN	44
4.3 DISEÑO DEL SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO	55
4.3.1 Estimación del consumo de energía eléctrica	57
4.3.2 Dimensionamiento del subsistema de generación	62
4.3.3 Dimensionamiento del subsistema de acumulación	65
4.3.4 Dimensionamiento del Regulador-Inversor	67
4.3.5 Generalidades del sistema solar fotovoltaico diseñado	67
4.3.6 Dimensionamiento del sistema de puesta a tierra	70
5. ANÁLISIS Y RESULTADOS OBTENIDOS CON TRNSYS	72
5.1 MODELO DESARROLLADO	72

5.1.1 Archivo climático.....	74
5.1.2 Matriz solar fotovoltaica.....	79
5.1.3 Banco de acumulación	89
5.1.4 Carga eléctrica	95
5.1.5 Regulador - Inversor.....	101
5.2 PERIODO DE BAJA RADIACIÓN	106
6. CONCLUSIONES	114
7. RECOMENDACIONES	117
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	119
ANEXOS.....	128
Anexo 1. Componentes de la estación meteorológica	128
Anexo 2. Hoja técnica y certificado de calibración del piranómetro	130
Anexo 3. Características eléctricas de la nevera	133
Anexo 4. Hoja Técnica Panel Solar SunTech 24 V – 175 W	134
Anexo 5. Hoja Técnica Batería CSPOWER/OEM 12 V – 300 Ah.....	136

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Energía solar instalada en Colombia	20
Figura 2. Ubicación del Municipio - Tibaná (Boyacá).....	21
Figura 3. Tibaná (Boyacá)	22
Figura 4. Cobertura de servicios públicos – Tibaná (Boyacá).....	23
Figura 5. Puesta a tierra – Escuela El Cardonal	24
Figura 6. Escuela rural El Cardonal	25
Figura 7. Distribución espacial – Escuela El Cardonal.....	25
Figura 8. Plan P.A.P.A. en el Departamento de Boyacá.....	26
Figura 9. Registro de condiciones climáticas - Niños Escuela El Cardonal	41
Figura 10. Registro de cambios climáticos por los niños - Escuela El Cardonal....	41
Figura 11. Estación meteorológica instalada en la Escuela El Cardonal	42
Figura 12. Radiación Solar promedio y máxima registradas - Estación meteorológica Davis, Vantage Pro 2 plus	44
Figura 13. Lectura de datos de radiación solar - Piranómetro KIPP & ZONEN, CMP3.....	45
Figura 14. Programa LabVIEW para almacenamiento de datos registrados por el piranómetro.....	45
Figura 15. Sensores de radiación - Estación meteorológica Davis Vantage Pro 2 plus y Piranómetro KIPP & ZONEN CMP3.	46
Figura 16. Registro de datos de radiación - Estación meteorológica Davis Vantage Pro 2 plus y Piranómetro KIPP & ZONEN CMP3.....	47
Figura 17. Relación de radiación - Estación meteorológica Davis Vantage Pro 2 plus y piranómetro KIPP & ZONEN CMP3.	48
Figura 18. Dispersión - Estación meteorológica Davis Vantage Pro 2 plus y Piranómetro KIPP & ZONEN CMP3.	50

Figura 19. Relación de radiación - Estación meteorológica, piranómetro y datos los corregidos.	51
Figura 20. Dispersión - Estación meteorológica y Valores ajustados	53
Figura 21. Promedio diario mensual de radiación solar – Escuela El Cardonal.....	53
Figura 22. Energía media diaria en cada mes – Escuela El Cardonal.....	55
Figura 23. Diagrama de bloques del sistema solar.....	56
Figura 24. Plano eléctrico del diseño propuesto	69
Figura 25. Diseño de puesta a tierra.....	71
Figura 26. Licencia educativa de TRNSYS 17.....	72
Figura 27. Modelo desarrollado en TRNSYS.....	73
Figura 28. Estado de carga del banco de baterías – Durante todo el año	74
Figura 29. Promedio mensual de radiación solar – Archivo climático.....	75
Figura 30. Promedio mensual de radiación solar –Escuela El Cardonal y Archivo climático.....	76
Figura 31. Dispersión - Escuela El Cardonal y Archivo climático.....	77
Figura 32. Radiación solar simulada durante 4 días – TYPE 109.....	78
Figura 33. Circuito equivalente del módulo solar – TYPE 94a.....	79
Figura 34. Comportamiento Voltaje y Corriente - TYPE 94a	85
Figura 35. Potencia generada por el arreglo fotovoltaico –TYPE94a	87
Figura 36. Estado de carga del banco de baterías – TYPE 47b.....	93
Figura 37. Voltajes de salida del banco de baterías – TYPE 47b.....	94
Figura 38. Potencia requerida - Horas de operación de la Escuela	98
Figura 39. Potencia requerida - Horas de bajo consumo.....	99
Figura 40. Perfil de consumo diario de potencia - TYPE 14h	100

Figura 41. Potencia del regulador-Inversor desde o hacia la batería – TYPE 48d	105
Figura 42. Potencia del regulador-Inversor hacia la carga – TYPE 48d	106
Figura 43. Periodo de menor radiación solar	107
Figura 44 Potencia generada por la matriz fotovoltaica - Periodo de menor radiación solar.....	109
Figura 45. Voltajes en la batería - Periodo de menor radiación solar	110
Figura 46. Estado de carga - Periodo de menor radiación solar.....	111
Figura 47. Potencia requerida por la carga y Potencia de la batería - Periodo de menor radiación solar	112

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Escuelas por país consideradas por el programa Luces para Aprender..	35
Tabla 2. Características de los sensores - Estación meteorológica Davis, Vantage Pro 2 plus.....	43
Tabla 3. Media de radiación solar del mesurando - respecto a los valores instantáneos del patrón.....	48
Tabla 4. Calibración inicial	49
Tabla 5. Calibración con valores ajustados	52
Tabla 6. Consumo eléctrico por áreas – Escuela El Cardonal.....	58
Tabla 7. Demanda en AC del sistema solar fotovoltaico.....	59
Tabla 8. Elementos del sistema solar diseñado.....	68
Tabla 9. Radiación solar máxima – Periodo de baja radiación	108

LISTA DE NOMENCLATURAS

- Corrección de datos de radiación

R	Coeficiente de correlación entre los datos de la estación meteorológica y el piranómetro
R^2	Coeficiente de determinación entre los datos de la estación meteorológica y el piranómetro
d	Dato de la estación meteorológica
DES	Dentro de las especificaciones del mensurando
σ	Desviación estándar
Err	Diferencia entre el dato de la estación meteorológica y la media del error absoluto del Piranómetro
Dato	Valor corregido de la estación meteorológica obtenido de la ecuación empírica
K	Factor de confianza
FES	Fuera de las especificaciones del mensurando
\bar{x}	Media de los valores registrados por el Piranómetro
Tol	Tolerancia de la estación meteorológica

- Diseño del sistema solar fotovoltaico

Q_B	Capacidad almacenada por las baterías
Q_T	Capacidad total del sistema de acumulación
E_T	Carga total diaria
E_{ac}	Carga total diaria en AC (corriente alterna)
E_{nev}	Consumo de energía diaria de la nevera
$I_{sc,ref}$	Corriente de corto circuito en condiciones de referencia
$I_{mp,ref}$	Corriente en el punto de máxima potencia en condiciones de referencia
I_{nev}	Corriente nominal de operación del refrigerador
E	Energía consumida
E_{bom}	Energía consumida por las bombillas

E_d	Energía diaria
E_{dc}	Energía total diaria equivalente en DC
F_{ac-dc}	Factor de inversión de AC a DC (corriente directa)
η_d	Factor de pérdidas asociadas al panel solar
F_S	Factor de seguridad por pérdidas
F_P	Factor del pico de carga de la nevera
HSP	Horas de sol pico
N_D	Número de días de autonomía
NP	Número de paneles solares fotovoltaicos en paralelo
P_{nev}	Potencia de la nevera
P_{bom}	Potencia de las bombillas
P_{ref}	Potencia del módulo solar fotovoltaico
P_{reg}	Potencia del Regulador - Inversor
P_{ac}	Potencia en AC
$P_{M,nev}$	Potencia máxima del refrigerador
$P_{ac,max}$	Potencia máxima en AC
Q_{max}	Profundidad de descarga máxima
t	Tiempo
$V_{oc,ref}$	Voltaje de circuito abierto en condiciones de referencia
V_{ref}	Voltaje de referencia del panel solar
V_{nom}	Voltaje nominal del sistema solar fotovoltaico
$V_{mp,ref}$	Voltaje en el punto de máxima potencia en condiciones de referencia
V_{nev}	Voltaje nominal de operación de la nevera

- Análisis y resultados obtenidos con TRNSYS

Matriz solar fotovoltaica

θ	Ángulo de incidencia de la radiación solar
A	Área del módulo fotovoltaico

ε_g	<i>Bandgap</i> del semiconductor
U_L	Coeficiente de pérdida de calor de la matriz
μ_{Isc}	Coeficiente de temperatura de la corriente de corto circuito
μ_{Voc}	Coeficiente de temperatura de la tensión de circuito abierto
k	Constante de Boltzmann
q	Constante de carga eléctrica del el electrón
$I_{sc,T}$	Corriente de corto circuito del arreglo fotovoltaico
$I_{sc,ref}$	Corriente de corto circuito en condiciones de referencia
I_L	Corriente de generación del panel
I_0	Corriente de saturación inversa del diodo
$I_{0,ref}$	Corriente de saturación inversa del diodo en condiciones de referencia
I	Corriente del módulo fotovoltaico
$I_{mp,ref}$	Corriente en el punto de máxima potencia a lo largo de la curva I-V, según las condiciones de referencia
I_{mp}	Corriente en el punto de máxima potencia de la matriz fotovoltaica
$I_{mp,80h}$	Corriente en el punto de máxima potencia de la matriz fotovoltaica, en la hora 80 de simulación
$I_{mp,84h}$	Corriente en el punto de máxima potencia de la matriz fotovoltaica, en la hora 84 de simulación
$I_{mp,T}$	Corriente en el punto máxima potencia de la matriz fotovoltaica
I_D	Corriente sobre el diodo
η_c	Eficiencia de conversión del módulo
$I_{L,ref}$	Fotocorriente del módulo en condiciones de referencia
$G_{T,beam}$	Haz de radiación incidente
β	La pendiente de la matriz fotovoltaica
N_s	Número de células individuales dentro el módulo
NP	Número de módulos en paralelo de la matriz fotovoltaica
NS	Número de paneles en serie de la matriz fotovoltaica
γ	Parámetro empírico de ajuste de la curva fotovoltaica
$P_{ref,T}$	Potencia del arreglo de paneles solares fotovoltaicos

$P_{mp,T}$	Potencia en el punto de máxima potencia de matriz fotovoltaica
$P_{A,80h}$	Potencia máxima generada de la matriz fotovoltaica, en la hora 80 de simulación
$P_{A,84h}$	Potencia máxima generada de la matriz fotovoltaica, en la hora 84 de simulación
$P_{max,80h}$	Potencia máxima teórica de la matriz fotovoltaica, en la hora 80 de simulación
$P_{max,84h}$	Potencia máxima teórica de la matriz fotovoltaica, en la hora 84 de simulación
$\tau\alpha$	Producto de transmitancia - absorptancia del módulo
$G_{T,diff}$	Radiación difusa
$G_{T,NOCT}$	Radiación incidente en condiciones NOCT
G_T	Radiación total incidente de en la matriz fotovoltaica
$G_{T,ref}$	Radiación total incidente en las condiciones de referencia
R_S	Resistencia en serie del módulo fotovoltaico
T	Temperatura absoluta
T_a	Temperatura ambiente
$T_{a,NOCT}$	Temperatura ambiente en condiciones NOCT
T_C	Temperatura del módulo
$T_{c,ref}$	Temperatura del módulo en condiciones de referencia
$T_{c,NOCT}$	Temperatura del módulo en condiciones NOCT
V_T	Tensión térmica
V_{oc}	Voltaje de circuito abierto de la matriz fotovoltaica
$V_{oc,80h}$	Voltaje de circuito abierto de la matriz fotovoltaica, en la hora 80 de simulación
$V_{oc,84h}$	Voltaje de circuito abierto de la matriz fotovoltaica, en la hora 84 de simulación
$V_{oc,ref}$	Voltaje de circuito abierto en condiciones de referencia
V	Voltaje de operación de la matriz fotovoltaica
$V_{mp,ref}$	Voltaje en el punto de máxima potencia a lo largo de la curva IV, según las condiciones de referencia
V_{mp}	Voltaje en el punto de máxima potencia de la matriz fotovoltaica

$V_{mp,80h}$	Voltaje en el punto de máxima potencia de la matriz fotovoltaica, en la hora 80 de simulación
$V_{mp,84h}$	Voltaje en el punto de máxima potencia de la matriz fotovoltaica, en la hora 84 de simulación

Banco de baterías

Q_m	Capacidad nominal de la celda
Q_T	Capacidad total del sistema de acumulación
I	Corriente en la batería
I_{max}	Corriente máxima por celda durante la carga
I_{min}	Corriente mínima por celda durante la descarga
eff_B	Eficiencia de carga de la batería
SOC	Estado de carga
Q	Estado de carga en cada instante de tiempo
F	Fracción del estado de carga
H	Fracción del estado de descarga
g_c	Mínimo valor de H en la carga de acuerdo a el voltaje, la corriente y el estado de carga
g_d	Mínimo valor de H en la descarga de acuerdo al voltaje, la corriente y el estado de carga
NP_B	Número de celdas conectadas en paralelo en el acumulador
NS_B	Número de celdas conectadas en serie en el acumulador
Q_c	Parámetro de la capacidad de carga
Q_d	Parámetro de la capacidad de descarga
m_d	Parámetro del tipo de celda que determina las características de corriente, voltaje y estado de carga durante la descarga
m_c	Parámetro del tipo de celda, que determina las características de corriente, voltaje y estado de carga durante la carga
r_{qd}	Resistencia interna de carga total en el ciclo de descarga
r_{qc}	Resistencia interna de carga total en el ciclo de carga
e_{qd}	Voltaje de circuito abierto en carga completa, extrapolado de la curva de V vs I , en estado de descarga

e_{qc}	Voltaje de circuito abierto en carga completa, extrapolado de la curva de V vs I , en estado de carga
C_Vc	Voltaje de corte en el ciclo de carga
D_Vc	Voltaje de corte en el ciclo de descarga
V	Voltaje de la batería
V_B	Voltaje máximo para cargar el acumulador
V_{max}	Voltaje máximo permitido en cada celda durante el modo de carga
V_n	Voltaje nominal de cada celda del acumulador

Carga eléctrica

C	Ciclos en cada fase
C_2	Ciclos en el periodo de bajo consumo en la Escuela
C_1	Ciclos en la fase de actividad escolar
E_1	Energía consumida durante el funcionamiento de la Escuela
E_2	Energía consumida en el periodo de bajo consumo de la Escuela
E_{Cn}	Energía consumida por la nevera en cada ciclo durante la fase de carga
E_n	Energía consumida por la nevera en función del de tiempo
P_D	Perfil de consumo de potencia diario
P_1	Potencia promedio en el periodo de actividad escolar
P_2	Potencia promedio en el periodo de bajo consumo en la Escuela
t_1	Tiempo de actividad escolar
t_2	Tiempo de bajo consumo en la Escuela
t_n	Tiempo de operación de cada ciclo

Regulador - Inversor

$P_{L, MAX}$	Capacidad de salida del inversor
I_A	Corriente de entrada del generador solar
I_{grid}	Corriente para la carga de la batería por parte de la red

eff_2	Eficiencia de inversión de AC – DC
eff	Eficiencia del regulador
eff_1	Eficiencia en el factor de inversión de DC – AC
F	Fracción del estado de carga
F_B	Límite de F , para que la batería pueda empezar a descargarse después de estar cargada
F_D	Límite inferior de F para la descarga de la batería
V_D	Límite inferior del voltaje de la batería durante la descarga
F_{grid}	Límite superior de F para la carga del acumulador mediante la red eléctrica
F_C	Límite superior de F , cuando la batería se está cargando
V_c	Límite superior de V , cuando la batería se está cargando
P_{VD}	Potencia correspondiente al límite inferior de la tensión del acumulador durante la descarga
P_{VC}	Potencia correspondiente al límite superior de tensión del acumulador durante la carga
P_I	Potencia de salida del inversor
P_A	Potencia del arreglo de paneles solares fotovoltaicos
P_D	Potencia demandada por la carga
P_B	Potencia desde o hacia la batería (+ carga, - descarga)
$P_{B,MAX}$	Potencia máxima de entrada (carga)
$P_{B,MIN}$	Potencia mínima de salida hacia la batería (descarga)
P_C	Taza de carga permitida de carga, cuando la batería está en el límite de voltaje V_c
BV	Voltaje del acumulador

RESUMEN

Se presentan las actividades investigativas desarrolladas para establecer las condiciones de la Escuela Rural El Cardonal, Tibaná, Boyacá, en cuanto a sus necesidades energéticas, en particular, para lograr el sostenimiento de las actividades escolares por medio del aprovechamiento del recurso solar en el sitio mediante un sistema fotovoltaico autónomo, apoyando además, un plan gubernamental de alimentación de los niños en formación escolar, para el caso, se escogió la Escuela en una zona rural típica, en situación social en desventaja debido a los escasos recursos de la región campesina que atiende.

Aunque existe una conexión al sistema eléctrico nacional, esta se encuentra en condiciones precarias que están afectando tanto el desempeño como el programa nutricional de los estudiantes, por la falta de electricidad para la refrigeración de los alimentos. Este proyecto consideró el diseño, posible instalación y seguimiento de una instalación fotovoltaica suficiente, que garantizase el suministro eléctrico de la Escuela. Ante el no cumplimiento de la etapa de construcción, por falta de recursos antes prometidos, y para un mejor aprovechamiento de este estudio, se desarrolló un modelo de simulación del sistema solar fotovoltaico por medio del *software* especializado TRNSYS. Este, además de facilitar la caracterización de la instalación, analiza el comportamiento de los equipos diseñados para las condiciones dadas, facilitando estudiar los resultados del sistema en modelación, y así, poder realizar previamente los ajustes que se consideren necesarios para una optimización del aprovechamiento de la operación del sistema fotovoltaico.

Ante la necesidad de conocer más precisamente el recurso solar de la zona, se registró *in situ* la radiación solar incidente, además de otros registros meteorológicos, durante más de un año, por medio de una estación meteorológica instalada con apoyo de la Universidad. Determinado el potencial solar, se diseñó el sistema fotovoltaico de acuerdo a los requerimientos de carga eléctrica de la Escuela, definiendo las características de operación de los dispositivos necesarios e introduciendo toda la información al programa de cómputo TRNSYS para simular su operación. De esta forma se generó el perfil de modelación que recrea las condiciones de funcionamiento del sistema y de la carga eléctrica, de acuerdo a la radiación solar incidente y exhibiendo el comportamiento que presentaría el modelo solar fotovoltaico proyectado.

De este modo se demostró la bondad del sistema solar para satisfacer los requerimientos eléctricos básicos de la Escuela, incluida la necesidad de refrigeración de alimentos para el plan nutricional de los niños, además proyectándose como un prototipo que puede ser empleando para situaciones similares y en otros estudios de aplicación de la energía solar.

INTRODUCCIÓN

La Organización de Naciones Unidas considera el acceso a servicios energéticos de calidad como elemento fundamental para la reducción de la pobreza, precisando que pese a las altas tasas de urbanización en América Latina y el Caribe casi 30 millones de personas aún carecen de energía eléctrica, y de estas, 21,4 millones son pobres (el 71%), demostrando que la ausencia de servicios eléctricos se relaciona de manera directa con la pobreza (CEPAL *et al*, 2009).

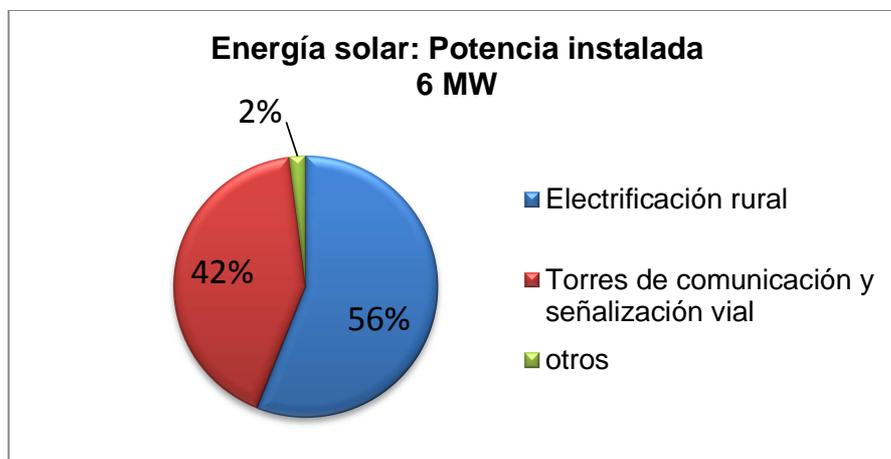
Alrededor del mundo se ha demostrado el potencial de los sistemas de energía solar en proyectos de electrificación rural, especialmente para servicios sociales y comunales, la agricultura y otras actividades productivas capaces de repercutir significativamente en el desarrollo rural, gracias a la constante disminución de sus precios, así como por la experiencia obtenida en su aplicación para otros sectores (Van, 2000). Además son muy convenientes para zonas rurales, donde la demanda de energía es dispersa y la conexión a la red es a menudo más costosa (UPME, 2005).

Hoy en día, dada la necesidad de incrementar significativamente la componente de energías renovables en la canasta energética para contrarrestar la excesiva dependencia de los combustibles fósiles y combatir el cambio climático, se están construyendo, principalmente en los países desarrollados, centrales solares de importante tamaño, a la par de su incremento en usos residenciales y comerciales. De esta forma, la producción de celdas solares ha entrado en fabricación a gran escala industrial, con precios en caída. En Colombia, la abundancia y facilidad de otros recursos energéticos, principalmente la hidroelectricidad y el gas natural, hacen no competitivos a las diferentes energías alternativas no convencionales como la solar y otras energías renovables. Condiciones más de carácter social y de desarrollo de regiones, son las que impulsan programas de energización racional con fuentes solares y de biomasa, mediante subsidios gubernamentales.

Colombia cuenta con importantes recursos de energía solar debido a su ubicación en la zona ecuatorial, pero posee en la región andina, una compleja topografía donde las condiciones climáticas varían en solo kilómetros. La radiación media diaria en el país es de 4,5 kWh/m², siendo el área con el mejor recurso solar, la Península de la Guajira con 6,0 kWh/m².

Para el 2005 en el territorio nacional existían instalados 6,0 MW de energía solar, el 56 % distribuido en aplicaciones rurales, el 42 % en señalización vial y torres de comunicación, y el restante 2 % en otro tipo de estudios (UPME, 2005), como se puede observar en la Figura 1.

Figura 1. Energía solar instalada en Colombia



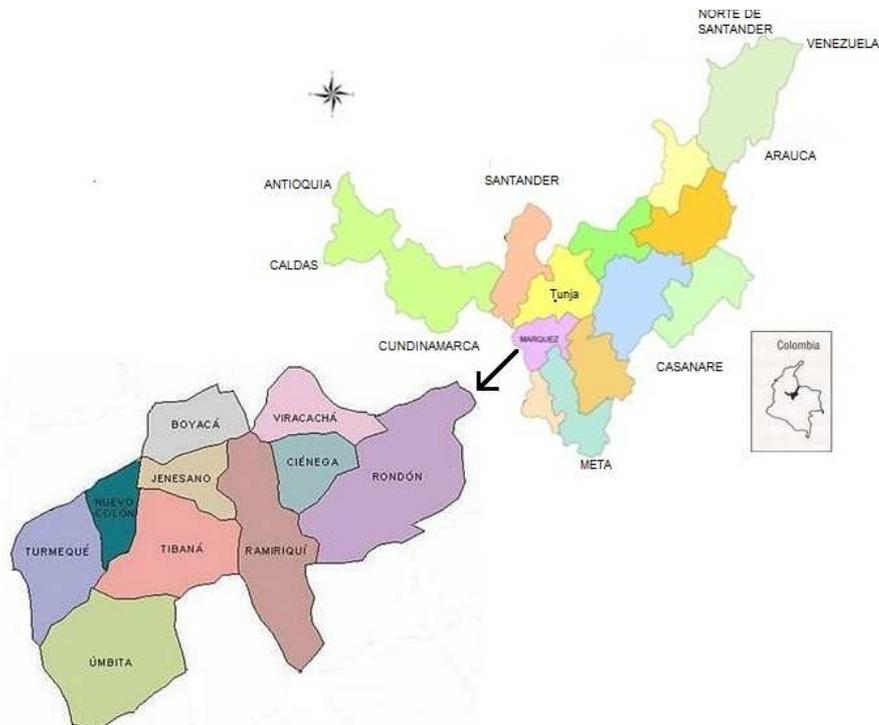
Fuente: Elaboración propia, con información de la UPME, (2005)

En el Departamento de Boyacá son escasos los estudios sobre energías alternativas, debido principalmente a que existen cuatro termoeléctricas y una hidroeléctrica, con las cuales se obtiene no solo suficiencia eléctrica para la región sino que distribuye al resto del País a través del sistema interconectado. En cuanto al potencial para energía eólica se ha analizado el sector de Gachaneca y se ha definido en potencial eólico en Tunja (Álvarez, 2013). La energía geotérmica, fue contextualizada por parte del Instituto Colombiano de Energía Eléctrica y la Organización Latinoamericana de Energía, los cuales identificaron a Paipa como una de las tres áreas del País con posible potencial geotérmico (Pérez y Osorio, 2002) actualmente sin profundizar con más estudios.

Teniendo en cuenta que existen varias poblaciones con serios problemas eléctricos, el IPSE (Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las zonas no interconectadas) ha desarrollado dos proyectos en la zona no interconectada de los Municipios de Labranzagrande, Pisba y Paya. El primero denominado *Construcción interconexión eléctrica Municipios de la libertad, interconexión entre la subestación el Morro en Yopal*, el cual generó 9 455 beneficiarios; y el segundo llamado *Acometidas e instalaciones Internas*, auxilia a 1 160 personas (Alta Consejería Presidencial para las Regiones y la Participación Ciudadana, 2011).

El presente estudio se desarrolla en el Municipio de Tibaná (Figura 2), ubicado en la provincia de Márquez, Departamento de Boyacá, a una altura promedio de 2 115 msnm y con una temperatura media de 16 °C. Limita por el Norte con Jenesano, por el Este con Ramiriquí, por el Sur con Umbita y por el Oeste con Turmequé y Nuevo Colón. (Tibaná, 2014).

Figura 2. Ubicación del Municipio - Tibaná (Boyacá)



Fuente: Elaboración propia

Tibaná (Figura 3) cuenta con una población de 10 371 habitantes en una extensión de 12 176 km² (Tibaná, 2014), comprendida por el área urbana y las 16 veredas que integran su zona rural. La actividad económica del Municipio es principalmente agrícola, produciendo manzana, ciruela, pera, durazno, curuba, tomate de árbol lulo, feijoa, arveja, frijol, maíz, cebolla, tomate, arracacha y haba (Tibaná, 2011).

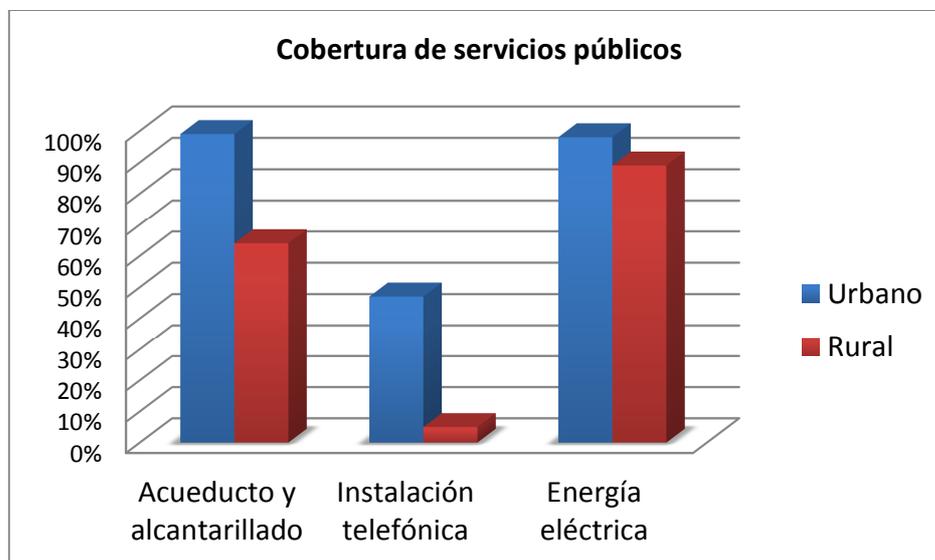
Figura 3. Tibaná (Boyacá)



Fuente: obtenido de http://www.tibana-boyaca.gov.co/sitio.shtml?scrl=161&apc=mGxx-3-&scr_161_Go=2 {26 junio de 2011}

En el Municipio, como se puede ver en la Figura 4, la cobertura de los servicios públicos básicos no es total, pues el servicio de acueducto y alcantarillado cubre un 64% del área rural y un 99% del área urbana, la instalación telefónica es del 5% en el sector rural y el 47% en urbano, y la energía eléctrica abarca el 98% del espacio urbano y un 89% del rural (Tibaná, 2011).

Figura 4. Cobertura de servicios públicos – Tibaná (Boyacá)



Fuente: Elaboración propia con información de (Tibaná, 2011).

Dentro de la población con acceso a la red eléctrica, existen sectores en los cuales el servicio es defectuoso, la Escuela El Cardonal ubicada en la vereda Ruche, cuenta con acceso a esta, pero presenta inconvenientes en la continuidad del servicio, el daño no es permanente pero se prolonga por muchas horas, al punto en que se ha llegado a un máximo de 10 días (según lo indicado por la maestra), en los cuales se afecta la ejecución de las actividades cotidianas y el programa de nutrición desarrollado en la institución.

La EBSA (Empresa de energía de Boyacá S.A. E.S.P.) tiene interconectada la mayor parte del Departamento a la red eléctrica nacional, pero las fallas en sectores alejados se hacen difíciles de solucionar tanto por acceso como por costos. En la Escuela El Cardonal, las instalaciones no están en las condiciones adecuadas, los conductores de la acometida aérea no son continuos, entre el punto de conexión a la red y los bornes del medidor, se evidencian claramente puntos de interrupción en el aislante del cableado, haciéndolo vulnerable a la acción de la intemperie y acentuando el problema de fluctuaciones en el servicio y cortes frecuentes del suministro.

Así mismo, la distancia entre el transformador - reductor de la zona y la acometida es muy grande, lo cual aumenta las pérdidas en el cableado, y debido a la poca población del sector, se hace inviable desde el punto de vista económico la instalación de otro o el cambio del mismo. Adicionalmente en la Escuela existe una puesta a tierra descubierta, la cual, en el caso que deba disipar y conducir corrientes de falla como las de un rayo, ocasionaría graves incidentes (Figura 5).

Figura 5. Puesta a tierra – Escuela El Cardonal



Fuente: Elaboración propia

Mejorar dichas condiciones de alta deficiencia en el servicio eléctrico se ha vuelto muy difícil por los elevados costos involucrados, hasta el punto de que la Alcaldía llegó a considerar cerrar esta Escuela, con serio perjuicio a la comunidad rural de la zona que no tiene otra alternativa a su alcance. Esto llevó a considerar la solución con energía solar, pues la estimación de los costos de un sistema solar básico indicó valores relativamente no muy altos, dada la baja demanda eléctrica de la Escuela.

La Escuela Rural El Cardonal (Figura 6), está localizada en la vereda Ruche a una altura de 2 700 msnm. Cuenta con una población flotante de 18 individuos, constituida por una docente, una persona encargada de la cocina y 16 niños a quienes se les prestan servicios de educación básica primaria.

Figura 6. Escuela rural El Cardonal



Fuente: Elaboración propia

Los espacios físicos de la Escuela están conformados por: un baño exterior, un salón de clases y una habitación para la docente, dentro de la cual está instalada la nevera y en espacios contiguos, la cocina y un segundo baño; adicionalmente, en la parte trasera existen dos pequeños lugares que funcionan como bodegas (Figura 7).

Figura 7. Distribución espacial – Escuela El Cardonal



Fuente: Elaboración propia mediante el software AutoCAD

La demanda eléctrica de la Escuela es empleada principalmente para el funcionamiento de la nevera, los computadores y la iluminación. Las fallas en el servicio eléctrico tiene serias consecuencias, donde no solamente se afecta la continuidad de las actividades académicas, sino también está poniendo en grave riesgo la salud de los estudiantes, a quienes se les suministra una alimentación complementaria, debido a que la gran mayoría de los niños no reciben en sus hogares una adecuada nutrición por las condiciones de extrema pobreza de sus familias.

La Escuela El Cardonal está incluida en el plan P.A.P.A. (Plan Alimentario Para Aprender), el cual consiste en unas onces a media mañana y una pequeña bandeja de almuerzo antes de salir de la Escuela, durante 157 días del calendario escolar (Figura 8). Se desarrolla en las instituciones educativas oficiales del Departamento de Boyacá, cuyos estudiantes se encuentran en condiciones de extrema vulnerabilidad y pobreza. Este proyecto se ejecuta mediante fondos de las Alcaldías municipales, la Gobernación de Boyacá y el ICBF (Instituto Colombiano de Bienestar Familiar), (Gobernación de Boyacá, 2009).

Figura 8. Plan P.A.P.A. en el Departamento de Boyacá



Fuente: http://www.eltiempo.com/colombia/boyaca/ARTICULO-WEB-NEW_NOTA_INTERIOR-13602355.html {5 marzo de 2014}

Debido a que muchos de los alimentos necesitan refrigeración, estos comienzan a deteriorarse durante el tiempo en que la Escuela El Cardonal no tiene servicio eléctrico. Para evitarlo, sumergen los víveres perecederos en baldes con agua, pero con el pasar de las horas, inevitablemente la comida comienza sufrir daños y expira a los pocos días. Motivo por el cual en este proyecto la conservación de los

alimentos prima sobre la iluminación y los computadores, ya que afecta la continuidad de las actividades y lo más importante el bienestar de los niños.

La FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) ha establecido que para el medio rural, el primer uso que se le debe dar a la energía es para la cocción de alimentos y la provisión de abrigo, el segundo como insumo de producción y posteriormente como material para el consumo de otros bienes y servicios como iluminación, aparatos, etc. (FAO, 1983). En este caso, es indispensable mantener los víveres en buen estado para poder cocinarlos y posteriormente consumirlos.

Se considera una fuente de electricidad adicional, como la energía solar, que sea confiable, de fácil instalación, muy bajo mantenimiento, larga duración y que aproveche los recursos del lugar de forma responsable con el medio ambiente, como forma de solventar los problemas con la continuidad del servicio eléctrico y así garantizar la calidad de alimentos que reciben los niños.

Este proyecto no busca dar solución general al problema eléctrico de la Escuela El Cardonal, sino mostrar que mediante un sistema eléctrico solar fotovoltaico se podría dar continuidad al desarrollo normal de las actividades en la Escuela, especialmente para la conservación de los alimentos siguiendo las recomendaciones dadas por la FAO, así mismo, que este modelo puede ser replicado a lugares en condiciones similares de radiación solar y carga eléctrica.

El proyecto tuvo la intención inicial de hacer la adquisición, instalación y puesta en funcionamiento del sistema solar, contando con recursos ofrecidos por la Alcaldía Municipal de Tibaná, lo cual finalmente no se consiguió por razones presupuestales de dicha Entidad. En vista de esto, se prefirió hacer una simulación completa por medio del programa de cómputo TRNSYS.

Con este *software* se recrearon las condiciones de funcionamiento para cada uno de los elementos empleados en el sistema solar fotovoltaico y los requerimientos eléctricos de la carga, facilitando el estudio del comportamiento del modelo, realizando ajustes necesarios para la optimización en la operación de la instalación solar y verificando la bondad del programa en el tipo de estudio para la implementación de un sistema fotovoltaico efectivo.

Se hicieron mediciones de radiación solar *in situ*, con resultados que fueron empleados para los cálculos de diseño del sistema solar que sería instalado por la Alcaldía de Tibaná. Para el modelado en el *software* TRNSYS, se emplea la combinación de bases de datos mundiales sobre radiación solar, como la GEBA (Global Energy Balance Archive) y la Organización Meteorológica Mundial (WMO/OMM), habiendo sido utilizadas en este proyecto como aproximación para el estudio del sistema.

1. OBJETIVOS

1.1 GENERAL

Verificar mediante un modelo computarizado de sistema solar fotovoltaico la satisfacción de las necesidades eléctricas básicas de la Escuela Rural El Cardonal, Municipio Tibaná (Boyacá), para la conservación de alimentos en apoyo a plan nutricional para los estudiantes.

1.2 ESPECÍFICOS

- Determinar el potencial solar en la Escuela El Cardonal registrando los valores de radiación directamente en la zona de estudio y establecer las condiciones meteorológicas en el sector.
- Diseñar un sistema solar fotovoltaico de acuerdo a las características de radiación y los requerimientos eléctricos de la Escuela El Cardonal, para lograr condiciones óptimas de refrigeración para los víveres del plan nutricional de los alumnos.
- Comprobar el diseño del sistema solar fotovoltaico a través de su modelado con el *software* TRNSYS, para verificar la efectividad del modelo ante diferentes condiciones de radiación.

2. HIPÓTESIS

El modelo computarizado de un sistema solar fotovoltaico da la posibilidad de constatar la eficacia de este, para satisfacer los requerimientos eléctricos indispensables de la Escuela El Cardonal, permitiendo la continuidad del plan nutricional y las actividades escolares, independientemente de las deficiencias del servicio eléctrico externo.

3. MARCO TEÓRICO

Las energías alternativas renovables son aquellas que a diferencia de las convencionales, usan como fuente de generación recursos que la naturaleza suministra de fuentes prácticamente inagotables en relación al tiempo de vida del hombre en el planeta. Se producen de manera continua y tienen su origen en los procesos ambientales y atmosféricos naturales: el sol, el viento, el curso de agua, la descomposición de la materia orgánica, el movimiento de las olas en la superficie del mar y el calor interior de la tierra. Principalmente están clasificadas en: solar fotovoltaica, solar térmica, eólica, geotérmica, biomasa, mareomotriz, undimotriz, biomásica y de hidrógeno (Hernández, 2006).

La producción de electricidad mediante fuentes alternativas es un punto fundamental en el desarrollo energético sostenible mundial, ya que su uso puede asegurar el suministro de energía a mediano y largo plazo en condiciones medioambientales aceptables sin agotamiento de los recursos para generaciones futuras (Gutiérrez, 2002).

El efecto fotovoltaico fue descubierto por el físico francés Edmond Becquerel en 1839, al observar que ciertos materiales producían pequeñas cantidades de corriente eléctrica al exponerlos a la luz. Cincuenta años después Willoughby Smith descubrió el efecto fotovoltaico en sólidos y posteriormente W. Adams y R. Day produjeron la primera célula fotovoltaica de selenio; sin embargo el fenómeno es explicado a principios del siglo XX por Albert Einstein, basando su concepto de fotoelectricidad en los trabajos previos formulados por Max Planck (González, 2009).

La comercialización de células semiconductoras de silicio surge entre 1955 y 1975 con fines espaciales y militares, dando lugar a la evolución de los procesos de fabricación y el tratamiento de los materiales, en ese momento con una eficiencia alrededor del 10 % y con un costo muy elevado. Solamente a partir de 1975 la tecnología fotovoltaica es empleada en la industria y en mínima parte en el ámbito doméstico; para el 2007, el rendimiento de la célula en el mejor de los casos alcanza el 30 %, pero su precio, aunque está bajando considerablemente, sigue siendo elevado (Gonzales, 2009).

La distribución temporal de energía solar varía en relación a la insolación máxima diaria y a la atenuación generada por la atmósfera que atraviesa. En promedio el 47 % de la radiación incidente sobre la atmósfera terrestre alcanza la superficie del planeta, distribuida en un 31 % de manera directa y un 16 % de forma dispersa; el restante 53 %, es reflejado hacia el espacio exterior o absorbido en la atmósfera (Joachín, 2008). La irradiación calculada arriba de la atmósfera alcanza el valor de 1 360 Watt por metro cuadrado ($1,360 \text{ kW/m}^2$), valor denominado constante solar, mientras en la superficie terrestre se asume un valor estándar de

1 000 W/m² en incidencia perpendicular a la superficie a mediodía y con cielo totalmente despejado.

La energía solar se considera una de las energías menos contaminantes desde el punto de vista ambiental, además de fácil instalación y mantenimiento, puede ser descentralizada y ubicarse en el lugar de consumo, donde no produce emisiones de ningún tipo, sin embargo durante su producción se dan pasos de cuidado especial por su alto potencial de contaminación. Dadas sus características benéficas y su actual desarrollo tecnológico, así como una importante reducción en sus costos, hace que aumente la cantidad de posibles usuarios, asumiendo un papel fundamental dentro del marco de las energías renovables (Gutiérrez, 2002).

La energía solar fotovoltaica dependiendo del tipo de aplicación, costos y rendimientos esperados, utiliza distintos materiales como el silicio amorfo, silicio cristalino, el telurio de cadmio o CIGS, aunque se sigue investigando en materiales y configuraciones que aumenten el rendimiento de la célula (González, 2009). Consiste en la conversión directa de la energía solar en energía eléctrica mediante células fotovoltaicas, estas, son láminas semiconductoras de silicio dopado, con la propiedad que al incidir radiación solar sobre ellas, se produce una diferencia de potencial (en la junta del semiconductor tipo *p* con el tipo *n*), que genera una corriente de electrones, que se aprovecha en forma de electricidad en un circuito externo o carga (Hernández, 2006).

La corriente continua DC, generada por los módulos fotovoltaicos se transforma en corriente alterna AC, a través de un inversor y puede ser inyectada a la red (obteniendo una retribución económica), o de forma aislada para generar pequeñas cantidades de electricidad en zonas alejadas de la red de transporte y auto-consumida de manera directa, por ejemplo para sacar agua de un pozo mediante un motor eléctrico, o siendo almacenada en acumuladores para usarse posteriormente en iluminación y aparatos eléctricos (Hernández, 2006).

Los sistemas aislados al no estar conectados a la red eléctrica, están equipados con baterías de acumulación para la energía producida, en relación a que a menudo la demanda de energía se concentra en las horas de la tarde y nocturnas (Martínez, 2011).

Generalmente un sistema solar fotovoltaico está compuesto por paneles solares, acumuladores, regulador de carga, inversor, convertidor y controlador para conexión a red eléctrica y resistencias de pérdidas (Guasch, 2003). Su diseño consiste en encontrar el ángulo de inclinación óptimo de los módulos fotovoltaicos, el área del conjunto de módulos, la capacidad de las baterías que mejor se adaptan a la demanda eléctrica y la distribución de radiación solar en el sitio (Zanesco *et al*, 2004).

En Colombia, por su cercanía al Ecuador terrestre, el diseño requiere ángulos pequeños y no se ve muy afectado por la variación de la duración de la luz diurna. Se utiliza, para el primer parámetro un ángulo (mirando al sur) igual a los grados de latitud del sitio, y para el segundo valor se toma generalmente el promedio de 12 horas diarias de luz solar.

3.1 PROYECTOS DE ENERGÍA SOLAR EN INSTITUCIONES EDUCATIVAS

Los sistemas solares fotovoltaicos están teniendo gran acogida en colegios e institutos que quieren reducir su huella de carbono, generar espacios de conocimiento, creación de nuevas ideas y reducir los costos de electricidad principalmente por el hecho de que su jornada usualmente es diurna. Estos motivos justifican para dichas instituciones los costos más altos de la instalación solar.

Además de estas entidades, existen escuelas en las áreas rurales especialmente en los países en vía de desarrollo, que no cuentan con energía eléctrica y para las cuales, el acceso a esta, generaría grandes beneficios para los niños que se educan en ellas. En la mayoría de los casos, con costos subsidiados o pagados por el Gobierno local con un espíritu social dentro de planes de reducción de la pobreza y mejorar la educación, especialmente en las zonas más necesitadas.

Dentro de los programas de energía solar fotovoltaica desarrollados en el mundo, cuya generación está dirigida a instituciones educativas, se destacan:

- El *proyecto nacional de escuelas solares de Australia*, el cual busca reducir el impacto del cambio climático, mediante sistemas de energía solar y recolección de aguas lluvia. Adicionalmente los proyectos pueden incluir pequeñas turbinas de viento, hidroeléctricas de poca capacidad, sistemas solares de agua caliente y eficiencia energética en iluminación, ventiladores de techo, sensores, temporizadores y termostatos, puertas automáticas y tragaluces, entre otros (Department of Industry, 2013).
- El proyecto desarrollado por Ministerio de Educación de Malasia tiene como objetivo electrificar los salones de clase, el laboratorio de computación, la caseta de vigilancia y la sala de maestros, de las instituciones rurales que no cuentan con conexión a la red eléctrica. Seleccionó 78 escuelas rurales en las cuales se han instalado sistemas híbridos, de energía solar fotovoltaica con sistemas tradicionales de generación diésel, para reducir el uso de este combustible fósil (Muhaimin, 2010).
- El programa desarrollado por Energy Alternatives Africa y Horn Relief, en Puntland (anteriormente parte de Somalia) en la *Escuela internado Buraan*

Rural Institute, implementó varios sistemas solares fotovoltaicos integrados, con el fin de abastecer electricidad a los equipos eléctricos y la iluminación (Hankins, 2001).

- La *red de escuelas solares*, es un programa generado por Greenpeace, el cual inicio en Palma de Mallorca (España) en 1997, actualmente cuenta con 450 instituciones entre guarderías, colegios, institutos y universidades (Green Peace, 2011). Busca promover aspectos pedagógicos entre las comunidades académicas, además de reportar beneficios ambientales y económicos (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente de España, 2013).
- La empresa canadiense Solar BC en colaboración con la Provincia de Columbia Británica, WildBC y la Conservación del Hábitat del Fondo Fiduciario de Canadá, ha desarrollado el plan de *Escuelas Solares - Solar BC* en Canadá, el cual busca ayudar a los educadores a integrar el aprendizaje sobre la energía solar. Se han desarrollado 40 programas para la instalación de agua caliente solar en las escuelas y 17 para el emplazamiento de energía fotovoltaica cada una con capacidad de 2,5 kW (SolarBC, 2013).
- El proyecto *California School Boards Association* fue creado por la empresa SunPower, en distritos escolares y centros de experimentación de California (USA). Busca mediante la energía solar fotovoltaica reducir los costos eléctricos, ayudando a las escuelas a ahorrar dinero y a tomar el control de su futuro energético (CSBA, 2013).
- PG&E (Pacific Gas and Electric Company) bajo el programa *Solar schools PG&E* ha desarrollado en 125 escuelas de USA, planes educativos sobre energía solar y proyectos para hacer escuelas verdes; los cuales ha estado enfocados a reducir el uso de energía, ahorrar dinero y ayudar a los estudiantes a entender la energía renovable, además motiva a los alumnos a que presenten ideas innovadoras (Visión hispana, 2011).
- El proyecto denominado FotHON, desarrollado en Honduras por el CZER (Centro Zamorano de Energía Renovable) de la Universidad de Zamorano y el ISF-Cantabria, ha instalado sistemas solares fotovoltaicos en 5 escuelas rurales de educación primaria, beneficiado a 353 estudiantes y a más de 1 200 personas de forma indirecta. Se considera que esta ventaja otorga a los profesores mejores herramientas en el proceso de enseñanza, permitiendo a los alumnos un aprendizaje dinámico (Universia, 2011).
- El programa *Solares - Escuelas con energía*, desarrollado en Argentina, busca plantear soluciones mediante sistemas solares fotovoltaicos, a las instituciones educativas de las pequeñas poblaciones rurales que no tienen suministro eléctrico de la red distribuida (E. T. Cornelio Saavedra, 2011).

- *Energías Renovables en Mercados Eléctricos Rurales (PERMER)*, es un proyecto desarrollado en algunos municipios de Argentina, donde hogares y escuelas rurales se dotan con módulos fotovoltaicos, donde de una manera sostenible, ayuden a contribuir con la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (Russo, 2009).
- La Fundación Energía sin Fronteras con la colaboración de la Fundación Ingenieros ICAI para el Desarrollo, generaron la *Electrificación de escuelas públicas rurales de Chalaco (Perú) con energía solar fotovoltaica*. Los sistemas instalados suministran energía para la iluminación de los centros educativos, permitiendo el uso de material audiovisual en la enseñanza (televisor y DVD), la alfabetización de adultos y las reuniones de la comunidad en horario nocturno (Horno, 2007).
- *Luz no saber*, es un programa desarrollado en el Sur-Oriente del estado de Mina Gerais (Brasil), a través de la colaboración del gobierno estatal y del federal, diseñado dentro del programa de electrificación rural a gran escala denominado *Luz para todos - MG*. El enfoque de este proyecto es suministrar electricidad y agua potable, mediante sistemas solares fotovoltaicos, a 1 200 escuelas rurales remotas, que para el 2003 todavía no tuvieran acceso a electricidad (Diniz, 2006).

Se basa en el programa *Luz Ningún Programa Saber* desarrollado entre los años de 1995 y 2005, en el que se beneficiaron cerca de 1,000 escuelas rurales con electricidad y agua potable. Y en *Luz Solar School Program* (proyecto finalizado en 2002), donde fueron instalados 170 sistemas fotovoltaicos en escuelas rurales del Noreste de Mina Gerais en municipios con alto nivel de analfabetismo (Diniz, 2006).

- El programa denominado *Luces para Aprender*, desarrollado por la OEI (Organización de estados Iberoamericanos para la Educación, la Ciencia y la Cultura), espera contribuir a la implementación de energía solar y acceso a computadores e internet en 62 404 escuelas rurales de España y América latina (Tabla 1), donde se estima que sus alumnos hacen parte de las aproximadamente 1 400 millones de personas sin acceso a electricidad (OEI, 2012).

Tabla 1. Escuelas por país consideradas por el programa Luces para Aprender

País	N° de escuelas consideradas
Bolivia	1 000
Brasil	11 468
Colombia	4 455
Costa Rica	218
Ecuador	500
El Salvador	300
Guatemala	1 243
Honduras	7 304
México	18 000
Nicaragua	4 850
Panamá	921
Paraguay	595
Perú	10 000
Uruguay	100
República Dominicana	1 450
Total	62 404

Fuente: Elaboración propia con información de (OEI, 2012)

Debido a este alto número de instituciones sin energía eléctrica, con dicho proyecto se busca una educación pública de calidad, que genere equilibrio social a las comunidades rurales (principalmente indígenas y afroamericanas) que no han tenido acceso a los avances tecnológicos (OEI, 2012), con el fin de favorecer su desarrollo educativo, extendiendo el horario pedagógico y de esta manera facilitando la formación continua para superar el analfabetismo (Energías Renovables, 2012).

Dentro de este plan, en Colombia hasta el momento se han desarrollado seis programas piloto en escuelas rurales de Chocó, mediante recursos de la OEI, el IPSE, el Ministerio de Educación, el Ministerio de Minas y el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (Luces para aprender, 2012).

- La *Universidad Tecnológica del Chocó* (UTCH), ha desarrollado un prototipo experimental solar fotovoltaico autónomo puesto a funcionar en sus instalaciones en el Municipio de Quibdó (Chocó), el cual fue diseñado y dimensionado para suministrar potencia eléctrica DC y AC, con una capacidad

de generación de 1,0 kWp, proyectada a en escuelas rurales, centros de salud y en viviendas unifamiliares (Murillo *et al*, 2006).

- En *Isla Fuerte* (Bolívar), el IPSE (Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las zonas no interconectadas) ha implementado un proyecto de investigación de generación de energía eléctrica mediante seguidores solares fotovoltaicos conectados a una red eléctrica aislada, con los cuales se cubre la demanda eléctrica del colegio y el puesto de salud. (Ministerio de Minas y Energía, 2010)

3.2 SOFTWARE PARA MODELACIÓN DE SISTEMAS SOLARES

Mediante el modelado se puede evaluar como sería el desempeño de un sistema en condiciones similares a las reales, además, con la posibilidad de modificar los distintos parámetros y variables que intervienen, lo que permite analizar el comportamiento del sistema ante diversos escenarios.

Entre los programas desarrollados para simular sistemas solares destacados por su amplio rango de aplicaciones (Lalwani, 2010), se encuentran:

- RetScreen, programa elaborado por el gobierno canadiense; que permite generar un análisis de producción de energía, reducción de emisiones y viabilidad financiera (Lalwani, 2010).
- HOMER, diseñado por el National Renewable Energy Laboratory, es un simulador para generación distribuida, con o sin conexión a la red. Los algoritmos de HOMER permiten la evaluación de los costos de la tecnología deseada, así como de la posibilidad de emplear otros procesos (Lalwani, 2010).
- INSEL, diseñado por la compañía alemana del mismo nombre, posee un lenguaje de programación gráfica, proporcionando bloques de simulación para el modelado de datos meteorológicos y componentes de energía tanto eléctrica como térmica (Lalwani, 2010).
- SAM (Solar Advisor Model) desarrollado por el National Renewable Energy Laboratory, analiza las tecnologías solares, hace predicciones de rendimiento y de costo estimado de energía para proyectos on-grid en base a los costos de instalación, funcionamiento y los parámetros de diseño especificados como entradas (Blair *et al*, 2014).

- PVsyst, elaborado por el Institute of Environmental Sciences (ISE) – University of Geneva (Suiza), es un modelo para la simulación de sistemas conectados a la red, sistemas autónomos y aplicaciones DC-grid. Además este sistema tiene la ventaja de manejar su interfaz en inglés, francés, alemán, español e italiano (Lalwani, 2010).
- Solar Pro, creado por Laplace System Co., Ltd (Japón), analiza el efecto de sombras en cualquier objeto, permite hacer ensayos de la curva I-V de los módulos, calcula la cantidad de electricidad generada respecto a la ubicación de la ceda solar (latitud y longitud) y las condiciones de la atmósfera, adicionalmente genera un análisis financiero del sistema (Lalwani, 2010).
- PV DesignPro, elaborado por Maui Solar Energy Software Corporation, Haiku, USA. Simula el funcionamiento de un sistema de energía fotovoltaica durante un año, de acuerdo al clima y al diseño del modelo seleccionado por el usuario. Existen tres versiones disponibles del programa: PV-DesignPro-S (para sistemas autónomos con batería), PV-DesignPro-G (para modelos conectados a la red sin acumulador), y PV-DesignPro-P (para los sistemas de bombeo de agua) (Lalwani, 2010).

3.2.1 Software TRNSYS

Se opta por TRNSYS (TRaNsient SYstem Simulation), debido a que presenta excelentes características para el propósito de modelación de este proyecto, además de su relativa facilidad de manejo. Este programa es un solucionador de ecuaciones algebraicas y diferenciales, diseñado para la simulación transitoria de sistemas de energía. Su estructura modular posee un entorno de simulación específico para cada elemento, genera una interacción entre parámetros, objetiva y sencilla, posibilitando el modelado de los requerimientos de potencia de la carga respecto al tiempo. Es así como permitió un análisis completo de comportamiento del sistema solar diseñado para la Escuela El Cardonal.

Creado en el SEL (Solar Energy Laboratory) por la universidad de Wisconsin – Madison, la primera versión fue lanzada al público en Marzo de 1975 y se denominó TRNSYS 6.0. (Chandía, 2012).

El programa fue desarrollado originalmente para modelar los procesos térmicos de los sistemas, pero actualmente las aplicaciones de TRNSYS incluyen (Solar Energy Laboratory, 2012):

- Sistemas solares térmicos y fotovoltaicos
- Edificios de baja energía y los sistemas de climatización con características de diseño avanzado (ventilación natural, calefacción losa / enfriamiento, doble fachada, etc.)

- Sistemas de energía renovable como eólico y de hidrógeno
- Celdas de Cogeneración de combustible

Por lo tanto, permite la simulación de varios sistemas de forma combinada, la interacción con otros programas de simulación y la adición de competentes y modelos matemáticos (Lalwani, 2010).

TRNSYS posee una arquitectura basada en DLL (biblioteca de enlace dinámico, por sus siglas en inglés), que permite al usuario añadir modelos de componentes personalizados, utilizando lenguajes de programación como C, C ++, Pascal, y FORTRAN (Solar Energy Laboratory, 2012).

La solución de los sistemas se hace mediante subrutinas, cada una de estas, denominada como un TYPE, estructura modular de TRNSYS que permite analizar el modelo no como un todo, si no como la suma de sistemas individuales interconectados entre sí (Solar Energy Laboratory, 2012).

Cada TYPE está compuesto por dos partes, la primera es el código fuente desarrollado mediante Fortran, la cual contiene las ecuaciones matemáticas y procesos técnicos, que definen la función del componente. La segunda, es la interfaz de usuario que describe los parámetros, entradas y salidas de los procesos matemáticos, y proporciona las condiciones para que se puedan vincular eficientemente las entradas y salidas de las diferentes subrutinas involucradas dentro del sistema (Solar Energy Laboratory, 2012).

Una vez que el modelo se ha diseñado completamente, es necesario definir la duración de la simulación y el número de pasos de tiempo para analizar, debido a que TRNSYS itera en cualquier espacio de tiempo especificado por el usuario, sean segundos, minutos, horas o días (Klinetob, 2009).

Este simulador, es una herramienta utilizada por ingenieros e investigadores para validar nuevos modelos de energías alternativas como eólica, solar y sistemas de hidrógeno (Solar Energy Laboratory, 2012). En cuanto a los sistemas solares fotovoltaicos modelados se puede agregar:

- TRNSYS ha sido utilizado para explorar el potencial fotovoltaico del campus de la Universidad del Estado de Pennsylvania (USA), a partir del diseño de un sistema solar para un edificio y asumiendo que el comportamiento es igual para todas las otras edificaciones, modelando los parámetros críticos como la energía en el punto de máxima potencia y el factor de capacidad (Ositelu *et al*, 2010).
- Sarah Klinetob de la universidad de Pennsylvania, evaluó la creación avanzada de modelos de gestión energética en edificios, examinando la

demanda de energía actual y cómo pueden contribuir los sistemas de energía renovable, en este caso solar fotovoltaica. (Klinetob, 2009).

- El modelado y simulación de un sistema solar fotovoltaico autónomo para la iluminación residencial en Malasia mediante TRNSYS, permitió comprender el comportamiento dinámico del sistema. El diseño se comparó y validó con mediciones reales tomadas del modelo implementado en Bandar Sri Iskandar (Malasia), encontrando que el sistema en TRNSYS dio resultados comparables a las mediciones reales, pero que necesita algunos ajustes, que deben introducirse en el sistema simulado para alcanzar mejores resultados (Firmanda *et al*, 2010).
- También se ha empleado el *software* TRNSYS, para validar el comportamiento de un sistema híbrido constituido por un generador fotovoltaico y un grupo electrógeno, incluyendo los modelos matemáticos para cada uno de los componentes de TRNSYS, simulando su comportamiento transitorio en condiciones reales y bajo determinados escenarios de trabajo, que permiten comprobar la veracidad del diseño (Cruz, 2010).

4. METODOLOGÍA

Partiendo del análisis de las condiciones eléctricas de la Escuela, se identifican las causas de la seria deficiencia del servicio eléctrico externo que no garantiza su continuidad (como se describe en la introducción).

Se realiza el registro de condiciones atmosféricas en la Escuela, de una forma científica, mediante una estación meteorológica que permite conocer entre otros, los niveles de radiación presentes en la zona de interés.

Adicionalmente para incluir en el proceso a los niños de la Escuela, se elaboran tablas para el registro aproximado de las condiciones climáticas presentes en el lugar, tales como, presencia de lluvia y nivel nubosidad (alto, medio, bajo), las cuales son aplicadas bajo la dirección pedagógica de la maestra.

A la información de la estación meteorológica es necesario generarle una corrección de los valores de radiación solar, debido a que se evidencia que estos no concuerdan con los parámetros de tolerancia establecidos por el fabricante del equipo.

Posteriormente, con la información de radiación ajustada, se efectúa el dimensionamiento de cada uno de los elementos del sistema solar fotovoltaico y se delimita la carga eléctrica a ser abastecida.

4.1 REGISTRO Y ANÁLISIS DE DATOS

Se vincula a los estudiantes en el proceso de recolección de datos, buscando generar en ellos conciencia sobre los recursos disponibles en su entorno y la importancia de los mismos.

Dado que son niños de primaria, las tablas diseñadas para ellos son muy básicas, como se presenta en la Figura 9, en el primer formato se registra la percepción general de brillo solar, nubosidad y pluviosidad en el día.

Figura 9. Registro de condiciones climáticas - Niños Escuela El Cardonal

REGISTRO DE CONDICIONES CLIMATICAS
ESCUELA RURAL EL CARDONAL VEREDA RUCHE TIBANÁ-BOYACÁ

Fecha	Intensidad de sol				Llovió				
	Considera que el día estuvo:				Llovizna leve	Llovizna	Lluvia	Lluvia fuerte	Tormenta
	Muy soleado	Soleado	Poco soleado	Nublado					
12 Junio									
	8:00 AM			X	X				
	7:00 PM			X			X		
73 Junio	8:00 AM		X						
	7:00 PM	X							

Fuente: Elaboración propia

Mediante la segunda tabla, los estudiantes de cuarto y quinto grado registraron cada cambio de nubosidad y/o pluviosidad presentado durante el día (Figura 10). Esta información fue comparada con los registros de la estación meteorológica instalada en el sitio, para analizar el grado de comprensión de los niños respecto a las variables climáticas que intervienen en un sistema solar, a la vez, confirmando condiciones de nubosidad o falta de brillo solar en la zona.

Figura 10. Registro de cambios climáticos por los niños - Escuela El Cardonal

REGISTRO DE CONDICIONES CLIMATICAS
ESCUELA RURAL EL CARDONAL VEREDA RUCHE TIBANÁ-BOYACÁ

Muy soleado	Soleado	Poco soleado	Nublado	Llovizna leve	Llovizna	Lluvia	Lluvia fuerte	Tormenta
CAMBIOS CLIMATICOS DURANTE EL DIA								Fecha:
Cambio experimentado	Primero	Segundo	Tercero	Cuarto	Quinto	Sexto	Septimo	
	Nublado	Llovizna leve	Lluvia	Llovizna leve	Poco soleado	Soleado		
27 Agosto	7:47	7:49	7:75	9:00	10:00	11:03		

Fuente: Elaboración propia

En el lugar de estudio se realizó la instalación de una estación meteorológica Marca Davis, Modelo Vantage Pro 2 plus; la cual fue ubicada sobre el techo de la Escuela, considerando que para el registro de radiación dicho equipo debe ser empotrado en un lugar alto y donde no tenga presencia de sombras durante el día (Figura 11).

Figura 11. Estación meteorológica instalada en la Escuela El Cardonal



Fuente: Elaboración propia

Esta estación permite registrar datos de temperatura (promedio, máxima y mínima), humedad, dirección y velocidad del viento, presión, pluviosidad, radiación solar (promedio y máxima), y radiación ultra violeta. La información más detallada de los elementos del equipo, se encuentra en el Anexo 1.

En la Tabla 2 se presentan las características especificadas por el fabricante de: resolución, rangos de mediciones y exactitud, de cada uno de los sensores de la estación meteorológica.

Tabla 2. Características de los sensores - Estación meteorológica Davis, Vantage Pro 2 plus

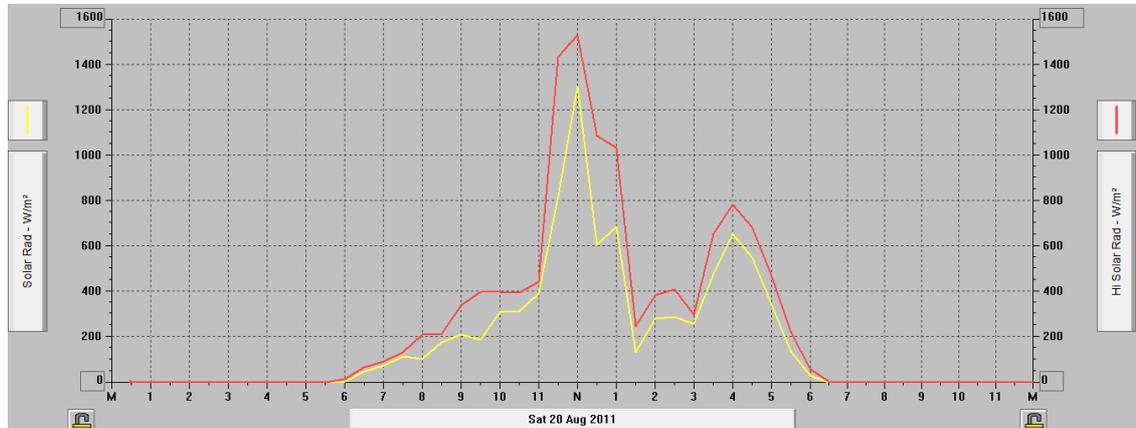
Función	Resolución	Límites	Precisión
Presión barométrica	0.1 mb	500 a 1080 mb	1 mb
Humedad	1%	10% a 90%	5%
Humedad	1%	0% a 100%	3%
Punto Rocío	1°C	-75+54 °C	1,5 °C
Precipitación	0,2 mm		4%
Tasa precipitación	0,1 mm	0 a 1999,9 mm/h	5%
Radiación	1 W/m ²	0 a 1800 W/m ²	5%
Temperatura interior	0,1 °C	0 a +60 °C	0,5 °C
Temperatura exterior	0,1 °C	-40+65 °C	0,5 °C
Dirección Viento	1°	0°a 360°	4°
Rosa los vientos	22.5°	16 direcciones	4°
Rapidez vientos	0,1 m/s	1 a 67 m/s	5%

Fuente: Elaboración propia, con información obtenida de: Manual VP2 console Book, 2004.

El registro de datos para el presente proyecto se desarrolló desde el mes de agosto de 2011 y hasta el mes de octubre de 2012 (con excepción del mes de enero de 2012, debido a que no se pudo descargar la información del *datalogger* a tiempo y en consecuencia esta se perdió).

Al analizar los datos se evidenció que los valores de radiación registrados por la estación meteorológica eran altos, con algunos valores oscilando alrededor de 1 300 W/m², llegando a registrar un promedio máximo de 1 303 W/m², con una radiación solar máxima de 1 528 W/m², almacenado el 20 de agosto de 2011 al medio día como se presenta en la Figura 12.

Figura 12. Radiación Solar promedio y máxima registradas - Estación meteorológica Davis, Vantage Pro 2 plus



Fuente: elaboración propia mediante el software WeatherLink

Dado que el valor aceptado como constante solar fuera de la atmósfera terrestre está en alrededor de $1\,360\text{ W/m}^2$ ($1\,353\pm 21\text{ W/m}^2$ valor dado por la NASA y $1\,367\text{ W/m}^2$ valor promovido por la OMM (Organización Meteorológica Mundial), (Newport, 2011). Se determinó que la estación meteorológica necesitaba ser recalibrada, motivo por el cual, se realizó un procedimiento de calibración, efectuando una comparación de datos en el mismo instante y lugar con un piranómetro disponible en la Universidad, que posee certificado de calibración (Anexo 2), efectuando así la corrección de los registros obtenidos con la estación, como se detalla a continuación.

4.2 CORRECCIÓN DE DATOS REGISTRADOS DE RADIACIÓN

Para este proceso se utilizó el piranómetro marca KIPP & ZONEN modelo CMP3, el cual fue conectado a un circuito de amplificación en cascada conformado por amplificadores de instrumentación que generan un nivel de ganancia alto, aumentando la señal de 4 mA a 20 mA, nivel necesario para que la tarjeta de adquisición USB 6009 de LabVIEW pudiera hacer lectura de datos analógicos (Figura 13).

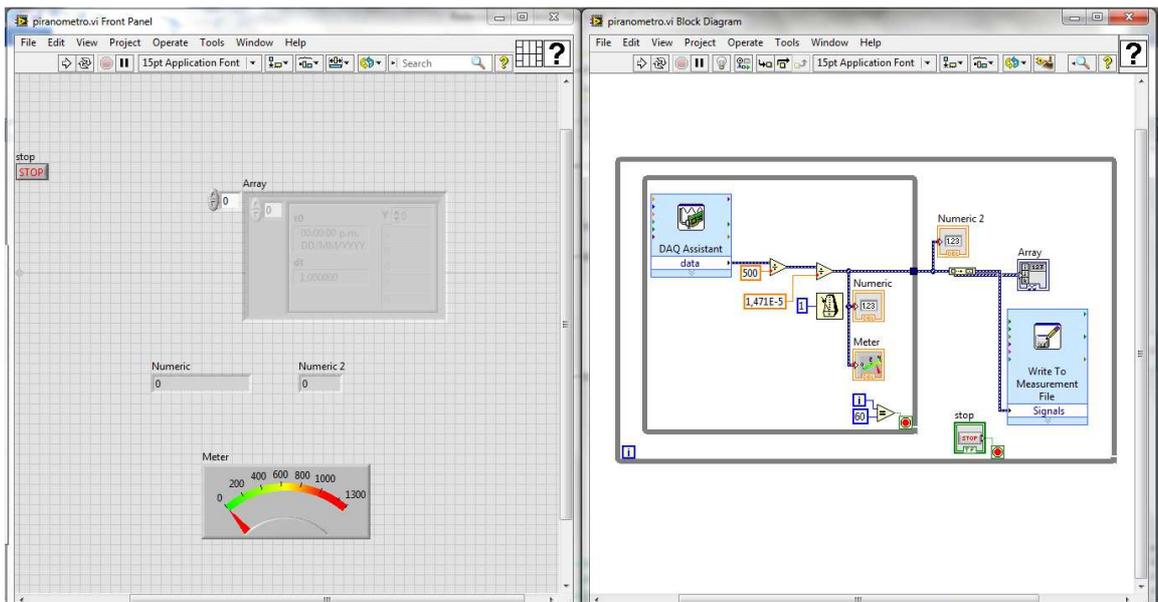
Figura 13. Lectura de datos de radiación solar - Piranómetro KIPP & ZONEN, CMP3



Fuente: Elaboración propia

El programa generado mediante LabVIEW (Figura 14), permite visualizar en la pantalla del computador el valor de radiación capturado por el piranómetro, además almacena los datos registrados en un archivo Excel, lo cual facilita posteriormente su comparación con los datos de la estación meteorológica.

Figura 14. Programa LabVIEW para almacenamiento de datos registrados por el piranómetro



Fuente: Elaboración propia

Para realizar el procedimiento de calibración se ubicaron los sensores de radiación de la estación meteorológica y del piranómetro lo más próximos posible con el fin de obtener mayor precisión en los resultados (Figura 15).

Figura 15. Sensores de radiación - Estación meteorológica Davis Vantage Pro 2 plus y Piranómetro KIPP & ZONEN CMP3.



Fuente: Elaboración propia

Se procedió a realizar registro de datos en escala ascendente y descendente de forma simultánea, por medio de la estación meteorológica Davis Vantage Pro 2 plus y el piranómetro KIPP & ZONEN CMP3, en un área despejada y libre de sombras en el campus de la Universidad, como se observa en la Figura 16.

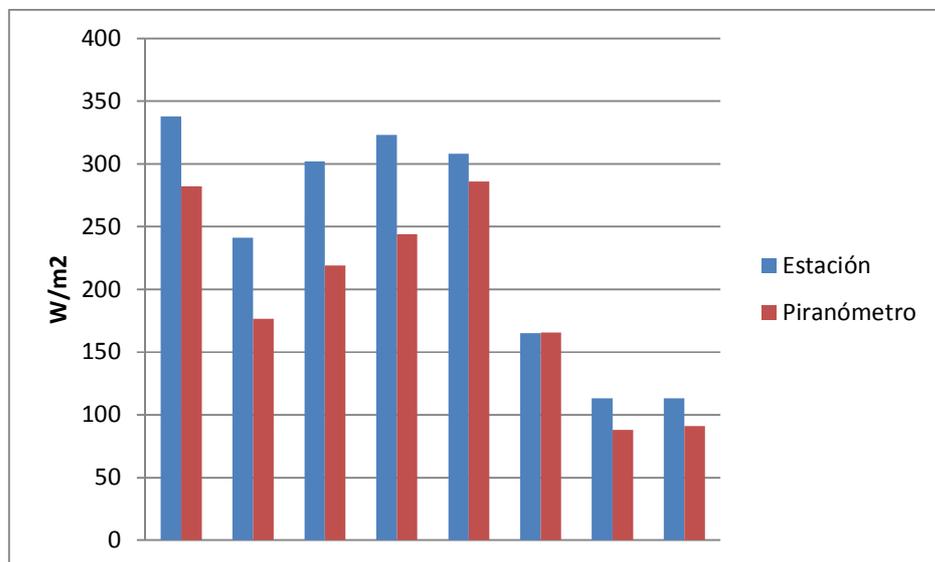
Figura 16. Registro de datos de radiación - Estación meteorológica Davis Vantage Pro 2 plus y Piranómetro KIPP & ZONEN CMP3.



Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, con la información almacenada y siguiendo el modelo de metrología descrito en Aspectos fundamentales para el diseño de procedimientos de calibración para laboratorios de metrología con base en la Norma NTC-ISO-IEC-17025 (Llamosa *et al*, 2004), se busca establecer la precisión de los datos del instrumento de medida (la estación meteorológica), con el valor correspondiente del patrón de referencia (piranómetro), presentados en la figura 17.

Figura 17. Relación de radiación - Estación meteorológica Davis Vantage Pro 2 plus y piranómetro KIPP & ZONEN CMP3.



Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 3, se relacionan los valores promedio de radiación solar en W/m^2 registrados mediante la estación meteorológica, los cuales reciben el nombre de Mensurando (valor del objeto de medida comparado con el patrón), con los datos instantáneos del piranómetro.

Tabla 3. Media de radiación solar del mesurando - respecto a los valores instantáneos del patrón

Estación	Piranómetro											
	692,7	539,1	533,1	325,9	271,7	243,2	210,8	142,3	139,9	68,0	63,9	155,6
241	131,7	125,7	159,6	246,7	191,5	147,8	165,7	151,5	179,2	239,5	207,7	172,3
302	200,5	198,8	216,0	108,2	233,5	249,7	221,0	162,0	230,0	253,4	267,4	287,8
323	132,1	267,2	202,3	269,0	262,2	262,4	256,4	254,1	253,9	253,4	257,9	259,0
308	308,1	305,9	300,9	271,9	270,6	271,3	281,1	280,8	286,9	290,8	284,2	277,8
165	186,7	180,3	180,3	169,0	170,9	173,5	172,2	167,4	160,8	158,0	139,1	129,6
113	84,1	80,6	90,9	112,9	105,4	107,0	102,5	96,1	82,0	69,3	64,0	60,9
113	125,3	110,1	93,9	92,8	94,2	94,1	90,3	90,0	89,0	87,1	60,9	64,8

Fuente: Elaboración propia

Para realizar la calibración de un instrumento, se desea verificar si los valores entregados por el mesurando, se encuentran dentro de las especificaciones del fabricante del equipo, fuera del rango, o si es considerado como indeterminado, de acuerdo a los valores reales que entrega el equipo patrón (piranómetro).

Para lo cual se emplea la tolerancia del parámetro de radiación, especificada por el productor de la estación meteorológica (Tabla 2).

$$\text{Tol} = 5 \%$$

Considerando en este procedimiento de calibración una fiabilidad del 95%, el factor de confianza K es

$$K = 2,75$$

Se realiza la calibración, hallando la desviación estándar σ , para determinar si el equipo a patronar se encuentra dentro o fuera de las especificaciones del mesurando (Tabla 4).

Tabla 4. Calibración inicial

d	\bar{x}	Err	Tol	K	σ	Resultado
338	282,18	55,82	14,11	2,57	203,50	DES
241	176,57	64,43	8,83	2,57	38,81	FES
302	219,03	82,97	10,95	2,57	48,43	FES
323	244,16	78,84	12,21	2,57	39,26	FES
308	285,85	22,15	14,29	2,57	13,15	Indeterminado
165	165,64	0,64	8,28	2,57	16,82	DES
113	87,97	25,03	4,40	2,57	17,42	FES
113	91,06	21,94	4,55	2,57	17,02	FES

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la relación ente valor del mesurando d , la media del patrón \bar{x} , la tolerancia de la estación meteorológica Tol y la desviación estándar σ , se considera que la estación meteorológica está dentro del rango, fuera de especificaciones o indeterminada, por medio de las siguientes tres condiciones:

Dentro de especificaciones (DES) si: $\text{DES} = |d - \bar{x}| < |Tol| - \sigma$ (1)

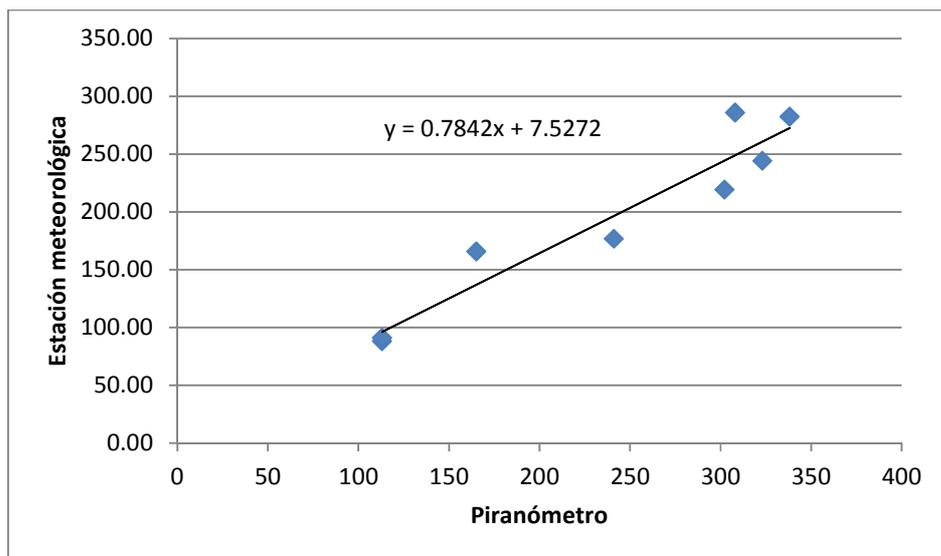
Fuera de especificaciones (FES) si: $\text{FES} = |d - \bar{x}| > |Tol| + \sigma$ (2)

O se considera indeterminado si: $|Tol|-|\sigma| < |d-\bar{x}| < |Tol|+|\sigma|$ (3)

En correspondencia a los resultados de la calibración inicial (Tabla 4), se verifica en un 75 % de los casos, que los valores la estación meteorológica no se encuentra dentro del rango del mesurando, haciendo necesario un ajuste de datos.

Se procede a generar un análisis de dispersión ente los datos, para establecer cómo se relacionan los valores de la estación meteorológica con los del piranómetro, y determinar la ecuación empírica de ajuste mediante el comportamiento de los valores experimentales (Figura 18).

Figura 18. Dispersión - Estación meteorológica Davis Vantage Pro 2 plus y Piranómetro KIPP & ZONEN CMP3.



Fuente: Elaboración propia

Se observa la relación lineal entre los datos, por lo tanto es válido emplear el método de mínimos cuadrados. Para lo cual, se determina el coeficiente de correlación R , dado por el número del intervalo n , el dato de la estación meteorológica d y la media del piranómetro \bar{x} (Nieves, 2009).

$$R = 0,9555$$

El coeficiente de determinación para esta relación, indica que los registros del piranómetro de acuerdo a la relación lineal, están explicados en un 91 %, en los datos de la estación meteorológica.

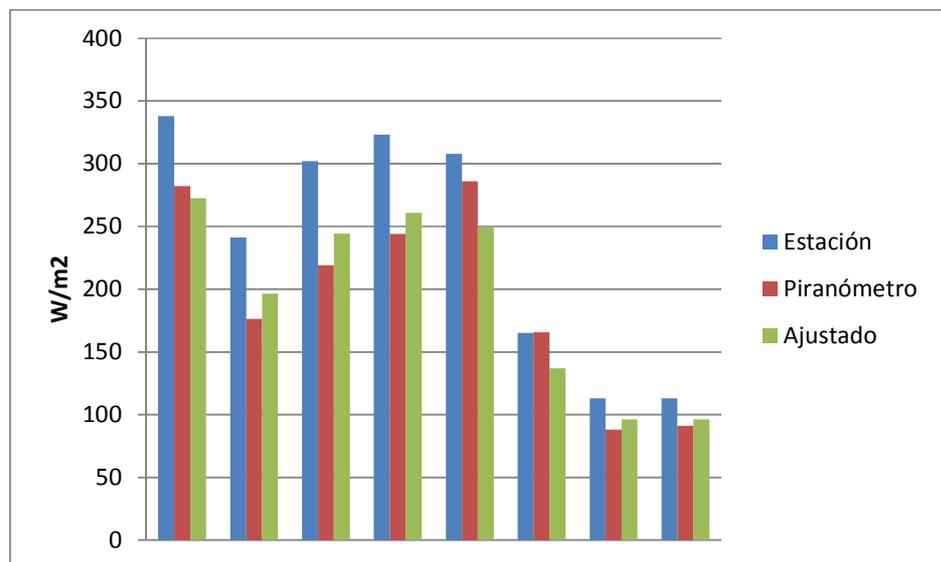
$$R^2 = 0,9129$$

Por lo tanto, se procede a aplicar la ecuación generada en Excel mediante el análisis de dispersión a los datos registrados por la estación meteorológica, para obtener los valores predichos.

$$\text{Dato} = (0,78 * d) + 7,53 \quad (4)$$

Los resultados ajustados a través de la Ecuación 4, se comparan con los registrados originalmente mediante la estación meteorológica y con los datos del piranómetro, mediante la Figura 19 se puede observar que la tendencia de los valores predichos tiene un comportamiento proporcionado a los datos del patrón.

Figura 19. Relación de radiación - Estación meteorológica, piranómetro y datos los corregidos.



Fuente: Elaboración propia

Se rehace el proceso de calibración, para verificar que los valores ajustados con la ecuación empírica, se encuentran dentro de especificaciones del mesurando, como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Calibración con valores ajustados

dato	\bar{x}	Err	Tol	K	σ	Resultado
272,59	282,18	9,60	14,10	2,57	203,49	DES
196,52	176,57	19,95	8,82	2,57	38,81	DES
244,36	219,03	25,33	10,95	2,57	48,43	DES
260,82	244,16	16,66	12,20	2,57	39,25	DES
249,06	285,85	36,79	14,29	2,57	13,14	FES
136,92	165,64	28,72	8,28	2,57	16,81	FES
96,14	87,97	8,17	4,39	2,57	17,41	DES
96,14	91,06	5,08	4,55	2,57	17,02	DES

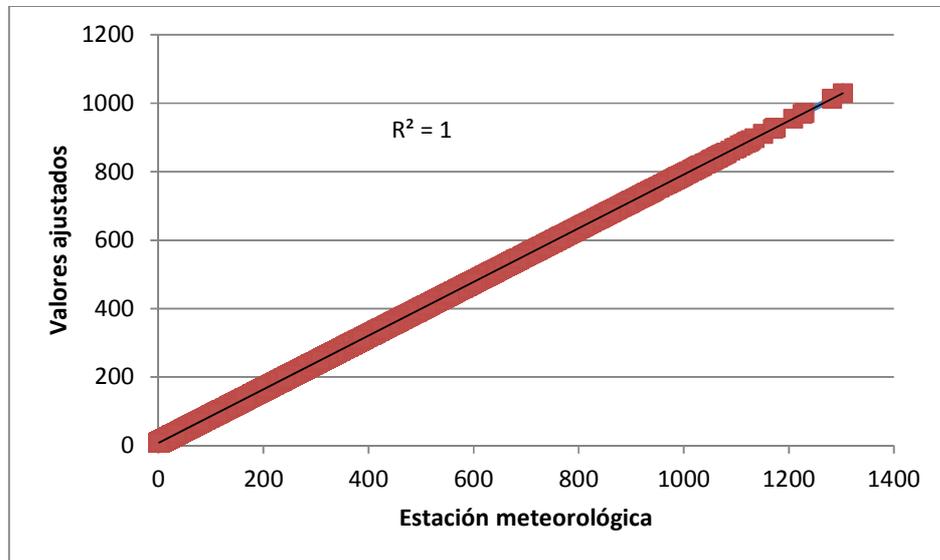
Fuente: Elaboración propia

Se comprobó así que la mayoría de los datos se encuentran dentro del rango de confianza del mensurando, validando el proceso; por lo tanto, se procede a realizar el ajuste de la Ecuación 4, a todo el histórico de datos de radiación registrados por la estación meteorológica.

En este proceso se observa que el valor promedio máximo de radiación, que había sido registrado como $1\ 303\ \text{W/m}^2$, después de la corrección quedó ajustado a $1\ 029,33\ \text{W/m}^2$, lo cual es una cifra teóricamente válida.

La gráfica de dispersión entre los datos registrados por la estación meteorológica y los predichos utilizando la ecuación empírica, se muestra en la Figura 20, donde el coeficiente de determinación indica que el 100 % de los datos de la estación meteorológica están correlacionados con los valores ajustados.

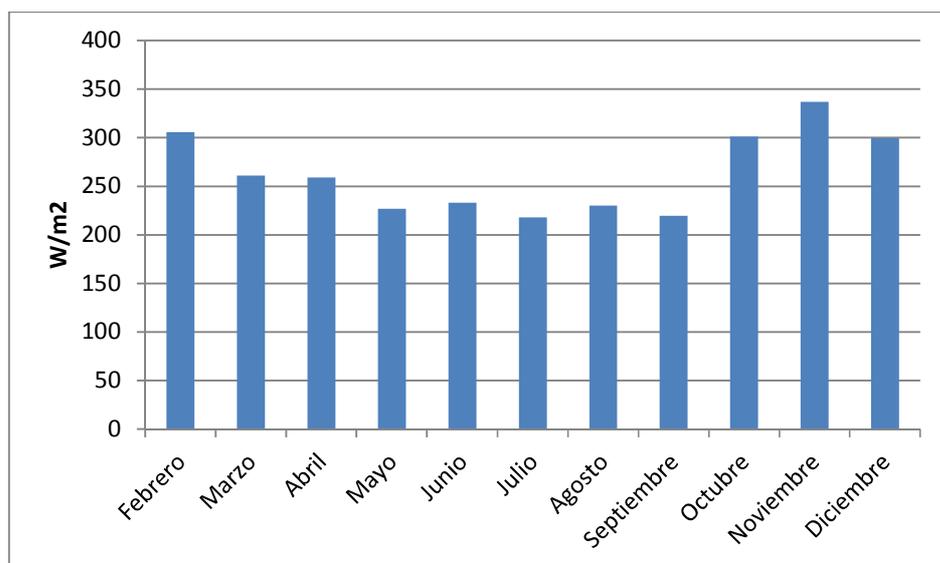
Figura 20. Dispersión - Estación meteorológica y Valores ajustados



Fuente: Elaboración propia

Con los datos de radiación solar corregidos, se determina el valor promedio diario de radiación para cada mes registrado en la zona de estudio, como se presenta en la Figura 21.

Figura 21. Promedio diario mensual de radiación solar – Escuela El Cardonal



Fuente: Elaboración propia

Teniendo la radiación solar (en W/m^2) en el sitio de interés, en este caso, en la Escuela El Cardonal, el cálculo de la energía promedio diaria recibida del sol se hace sabiendo que energía es igual a la potencia multiplicada por el tiempo de brillo solar. Así, en una hora con una potencia de 1 Watt por cada metro cuadrado, se obtiene:

$$\text{Energía por metro cuadrado durante una hora: } 1 \frac{W}{m^2} * 1h = 1 \frac{Wh}{m^2} \quad (5)$$

Considerando 12 horas de brillo solar en un día (valor promedio propio para las condiciones del trópico cerca al Ecuador), la energía recibida en un día sería:

$$1 \frac{W}{m^2} * 12h = 12 \frac{Wh}{m^2} \quad (6)$$

Expresada la energía en unidades de kWh, la anterior cifra quedaría:

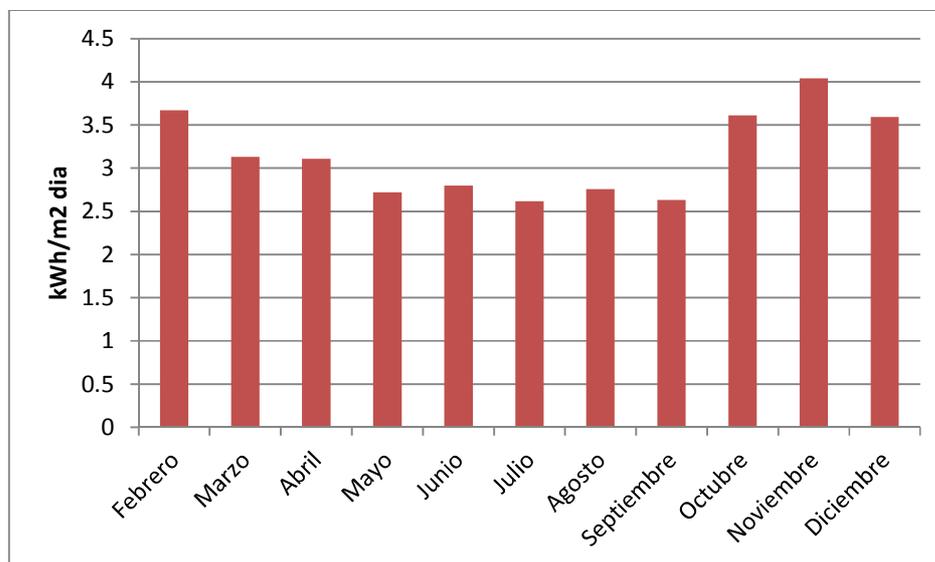
$$0,012 \frac{kWh}{m^2} \quad (7)$$

Esto es, la energía recibida en un día (12 horas de sol) por cada vatio de potencia por metro cuadrado de superficie receptora. En el S.I. de unidades esto equivale a $0,0432 \text{ MJ/m}^2$ (teniendo en cuenta el factor de conversión de 3 600 J/Wh, que resulta de considerar que $1 \text{ W} = 1 \text{ Joule} / \text{s}$ y que una hora tiene 3 600 segundos).

Este es el factor que se aplica a todos los registros de radiación solar medidos en W/m^2 , para convertirlos a energía solar recibida en el día en cada metro cuadrado de superficie.

Aplicado la relación descrita en la Ecuación 7, se determina la energía promedio diaria, en cada mes para la Escuela El Cardonal (Figura 22).

Figura 22. Energía media diaria en cada mes – Escuela El Cardonal



Fuente: Elaboración propia

4.3 DISEÑO DEL SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO

El sistema solar fotovoltaico se desarrolla teniendo en cuenta que esta tecnología es una de las fuentes de energía más apropiadas para llevar electricidad al medio rural, en razón a sus propiedades de modularidad y autonomía, adicionalmente al tener bajo mantenimiento y no ser contaminante (Egido, 2006), hoy con costos decrecientes por un uso más extendido.

Así mismo debido a que es una fuente de electricidad confiable, de fácil instalación y con una vida útil larga, lo cual permite aprovechar los recursos de la zona, sin generar ruido que pueda perturbar el ambiente académico y donde las posibilidades de que los niños puedan acceder al sistema son reducidas.

El diseño del sistema solar fotovoltaico básicamente consta de los elementos indicados en la Figura 23. Comienza con los paneles solares sobre los que incide luz solar para convertirla en electricidad, el regulador evita sobrecargas y la reducción de la vida útil de las baterías, estas a su vez, son las encargadas de acumular la energía generada para ser empleada en periodos de poca o nula radiación y de donde se alimenta la carga; el inversor que suministra la electricidad a los artefactos en corriente alterna AC.

Cuando las necesidades eléctricas son mínimas se recomienda un sistema DC, pero cuando los requerimientos incluyen bombas de agua u otro tipo de

electrodoméstico, es preferible un sistema fotovoltaico en AC. Teniendo como característica sobresaliente para elegir este modelo, que es más fácil adquirir comercialmente equipos a 110 V que reemplazar equipos DC, por lo tanto, aunque existe un incremento de costos por el uso del inversor, también existe un ahorro de tiempo y dinero en la adquisición de los utensilios domésticos (Joachín, 2008).

En este diseño no se calcularon cargas en Corriente Directa, con lo cual, toda la energía almacenada es transformada por el inversor en Corriente Alterna, para ser utilizada por la carga (Figura 23). Los cálculos empleados a continuación se basan principalmente en (Nina, 2011), (Ortega, 2001) y (Alonso, 2014).

Figura 23. Diagrama de bloques del sistema solar



Fuente: Elaboración propia

Para que el dimensionamiento del sistema solar fotovoltaico autónomo cumpla con los requerimientos del proyecto, debe basarse en los principios básicos (Alonso, 2014):

- Capacidad del diseño suficiente para garantizar que la producción del generador fotovoltaico sea igual al consumo en valores promedio.
- El abastecimiento del banco de baterías pueda proveer el consumo para cuando no brille el sol durante un cierto número de días estimado según las condiciones del sitio de la instalación.

Lo anterior requiere calcular el consumo de la carga prevista y la capacidad de las baterías de acuerdo con la radiación solar disponible en el lugar y captada por el sistema fotovoltaico, además de la selección apropiada del regulador de carga y el inversor, así como el dimensionamiento del cableado y de las protecciones de todo el sistema.

Para el propósito existen varios métodos recomendados, desde los más sencillos hasta unos que se apoyan en software especializado. Sin embargo, la variabilidad permanente del recurso solar introduce bastante incertidumbre en los resultados finales del diseño en operación, así como incidencia importante de pérdidas en los varios componentes que reducen la eficacia del sistema solar; donde el fin del

diseño es optimizar la respuesta de los elementos de acuerdo a las variadas condiciones.

Otro aspecto adicional a tener en cuenta es que en las aplicaciones de sistemas solares en el trópico, por sus condiciones de variaciones solares no tan marcadas, los cálculos son menos exigentes en cuanto a posicionamiento de los colectores que puede hacerse más complicada para otras latitudes.

A continuación se detallan cada uno de los pasos indicados para el dimensionamiento del sistema solar más apropiado para las necesidades básicas previstas para la Escuela El Cardonal.

4.3.1 Estimación del consumo de energía eléctrica

La carga eléctrica consumida por la Escuela se registra mediante visitas técnicas, para investigar las características, consumos, forma de operación y tiempo de funcionamiento de cada uno de los equipos (Tabla 6).

Los computadores, solamente son utilizados un par de horas durante un día a la semana, por lo cual, el consumo promedio diario para cada uno de estos equipos, es considerado como 0,3 horas al día. En el caso del televisor, de acuerdo a lo informado por la maestra, solo se usa durante una hora al día.

Tabla 6. Consumo eléctrico por áreas – Escuela El Cardonal

Lugar	Equipo	Operación (h/día)	Potencia (W)	Energía (Wh/día)
Área 1	Nevera	6	150	900
	Bombilla Habitación	5	100	500
	Cargador de celular	2,5	4,38	11
	Laptop	6	30	180
	Bombilla Cocina	2	100	200
	Bombilla baño	1	80	80
	Ducha eléctrica	0,25	1 000	250
Área 2	Bombilla	3	100	300
	Televisor	1	200	200
	Computador 1	0,3	150	45
	Computador 2	0,3	150	45
	Computador 3	0,3	150	45
	Computador 4	0,3	150	45
	Computador 5	0,3	150	45
	Computador 6	0,3	150	45
Baño	Bombilla	0,5	100	0,05
Total			2 764	2 891

Fuente: Elaboración propia, con información obtenida de (Ministerio de Minas y Energía de Perú, 2009) y <http://www.electrocalculator.com/> {30 agosto de 2012}

Sin embargo, la carga eléctrica establecida para ser abastecida por el sistema solar fotovoltaico a diseñar, se tomó como la mínima básica para asegurar la operación del refrigerador, agregando solo dos bombillas. Así el funcionamiento está compuesto por la nevera, con un consumo estimado en 900 Wh/día (el fabricante señala 0,86 kWh/día, Anexo 3), y por dos lámparas de 20 W cada una, destinadas a aprovecharse entre las 8 am y las 2 pm (horario en que los niños asisten a la Escuela).

La energía consumida por las bombillas E_{bom} , se determina por su potencia y operación durante las 6 horas diarias de actividad escolar

$$E_{bom} = P_{bom} * t \quad (8)$$

$$E_{bom} = 40 W * 6 h$$

$$E_{bom} = 240 \frac{Wh}{dia}$$

Para la potencia del refrigerador, de acuerdo a valores entregados por el fabricante, la corriente nominal de operación I_{nev} es

$$I_{nev} = 1,3 A$$

Con un voltaje nominal de funcionamiento V_{nev}

$$V_{nev} = 115 V$$

Luego la potencia demandada por la nevera P_{nev} es

$$P_{nev} = I_{nev} * V_{nev} \quad (9)$$

$$P_{nev} = 1,3A * 115V$$

$$P_{nev} = 150 W$$

Debido a que los refrigeradores no son equipos de funcionamiento continuo, se asume el consumo de la potencia nominal P_{nev} , en un tiempo de operación de 6 horas diarias t

$$E_{nev} = P_{nev} * t \quad (10)$$

$$E_{nev} = 150 Wh * 6 h$$

Lo cual equivale a un consumo total diario E_{nev} de

$$E_{nev} = 900 Wh$$

Las características generales de los equipos que conforman la demanda de energía para el sistema solar fotovoltaico, y la energía total diaria en Corriente Alterna E_{ac} , se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Demanda en AC del sistema solar fotovoltaico

Demanda de consumo en AC			
Equipo	P (W)	t (h/día)	E (Wh/día)
2 Bombillas	40	6	240
Nevera	150	6	900
E_{ac}			1 140

Fuente: Elaboración propia

Para el diseño propuesto se estima una eficiencia en la inversión AC-DC del 83 %, de tal manera que el factor de eficiencia en la inversión F_{ac-dc} es

$$F_{ac-dc} = 1,2$$

La energía diaria en DC demandada de los paneles solares E_{dc} , es dada por el factor de inversión F_{ac-dc} y la carga estimada en AC E_{ac}

$$E_{dc} = F_{ac-dc} * E_{ac} \quad (11)$$

$$E_{dc} = 1,2 * 1140 \frac{Wh}{dia}$$

$$E_{dc} = 1368 \frac{Wh}{dia}$$

De acuerdo a la potencia diaria de la nevera P_{nev} y de las bombillas P_{bom} se determina la potencia máxima en AC P_{ac}

$$P_{ac} = P_{bom} + P_{nev} \quad (12)$$

$$P_{ac} = 150 W + 40 W$$

$$P_{ac} = 190 W$$

Debido a que el compresor de un refrigerador opera con un motor de inducción, el cual requiere una corriente de arranque muy alta por un período de tiempo corto estimado regularmente en un segundo o menos (Enerdex, 2014). Se considera el pico de arranque para la nevera como máximo el 150 % de la potencia a carga nominal, con una duración de un segundo; por lo tanto el factor equivalente del pico de carga del refrigerador F_p es

$$F_p = 1,5$$

La potencia máxima de la nevera $P_{M,nev}$, se determina por la potencia del refrigerador P_{nev} y el factor del pico de arranque para la nevera F_p

$$P_{M,nev} = P_{nev} * F_p \quad (13)$$

$$P_{M,nev} = 150 W * 1,5$$

$$P_{M,nev} = 225 \text{ W}$$

Por lo tanto, la potencia máxima resultante $P_{ac,max}$ está dada por la potencia máxima del refrigerador $P_{M,nev}$ y la potencia diaria de las bombillas P_{bom}

$$P_{ac,max} = P_{M,nev} + P_{bom} \quad (14)$$

$$P_{ac,max} = 225 \text{ W} + 40\text{W}$$

$$P_{ac,max} = 265 \text{ W}$$

El nivel de tensión nominal del sistema en su parte DC se escogió en $V_{nom} = 24 \text{ V}$ incluyendo los paneles solares, el banco de baterías y el regulador. Este valor se seleccionó entre los valores más comerciales (12 o 24 V) recomendados para sistemas pequeños (Alonso, 2014), considerando que las pérdidas eléctricas en el sistema son menores que a 12 V, a la vez que el regulador y el inversor presentan mayor eficiencia a 24 V. Este valor solo actúa como una referencia para estandarizar todos los elementos del diseño, pero se sabe que cada uno de estos opera con tensión diferente, generalmente más elevada que dicho valor; por ejemplo, las baterías requieren alrededor de 28 V para alcanzar su punto de máxima carga, y los módulos fotovoltaicos necesitan un voltaje cercano a los 35 V para obtener su punto de máxima operación, como se indica más adelante.

La energía diaria E_d , se determina por la carga estimada en corriente directa (DC) E_{dc} (Ecuación 11) y el voltaje de referencia del sistema V_{nom} , que en unidades de Amperio-hora (Ah) vendrá dada por las expresiones:

$$E_d = \frac{E_{dc}}{V_{nom}} \quad (15)$$

$$E_d = \frac{1\ 368 \frac{\text{Wh}}{\text{día}}}{24 \text{ V}}$$

$$E_d = 57 \frac{\text{Ah}}{\text{día}}$$

Para las pérdidas de energía por suciedad, de potencia en los módulos fotovoltaicos asociadas a altas temperaturas de operación y en las baterías, el regulador y el inversor, se considera un factor de seguridad F_S

$$F_S = 1,2$$

Por lo tanto la carga total diaria E_T es dada por el producto de la energía diaria E_d por el factor de seguridad por pérdidas F_S

$$E_T = E_d * F_S \quad (16)$$

$$E_T = 57 \frac{Ah}{dia} * 1,2$$

$$E_T = 68,4 \frac{Ah}{dia}$$

4.3.2 Dimensionamiento del subsistema de generación

Se anota que el modulo solar presenta un comportamiento variable por los cambios continuos de la radiación solar y por su respuesta de acuerdo a las características eléctricas (curva I-V) del panel especificadas por el fabricante (Anexo 4), donde se definen valores óptimos de operación. Es así como el voltaje indicado de 24 V es un valor de referencia para todos los componentes del sistema y para parte de los cálculos, valor que se denomina nominal del sistema. En la modelación hecha con TRNSYS (sección 5), dentro de los requisitos del diseño del modelo, se aprecia el comportamiento del sistema en cuanto a voltajes y corrientes para condiciones específicas de operación del sistema solar.

El principal componente del modelo solar son los paneles fotovoltaicos ya que generan la electricidad requerida, existiendo una amplia gama en oferta comercial, debiendo seleccionarse principalmente en base a garantía, servicio de respaldo, marca reconocida y sus características acordes con la operación que se demandará del sistema.

El tamaño o capacidad de generación de los módulos fotovoltaicos, se determina de acuerdo a las horas de brillo solar disponibles. Esto, se expresa en cantidad de energía, dado por un número equivalente en horas de brillo solar a la máxima potencia de irradiación posible, esto es, 1 000 W/m², valor que se denomina Horas Solar Pico (HSP).

Para la Escuela El Cardonal, según las mediciones de radiación solar efectuadas, se calculó el promedio total del año mes a mes del valor promediado de radiación solar de un día (Figura 21, Sección 4.2), obteniéndose:

$$HSP = 3 h$$

Por la definición de HSP, nótese que este valor corresponde en cifra a la cantidad de energía de 3,0 kWh/m² - día. También se observa que es usual tomar como

HSP el valor promedio diario del mes de más baja radiación solar, especialmente en localidades de mayor latitud, donde la irradiación solar recibida en los meses invernales baja sustancialmente en intensidad y duración, situación que no es tan marcada en la zona tropical. Se aprecian diferencias debidas más al régimen de lluvias por la alta nubosidad que generalmente las acompaña. En dichas regiones fuera del trópico también se vuelve crítico el ángulo de inclinación que debe darse a los paneles para captar el máximo de radiación.

En cuanto a la calidad y respuesta de los paneles solares, el material de las celdas fotovoltaicas juega un papel muy importante. El efecto fotovoltaico se produce en sustancias cristalinas semiconductoras, cuya conductividad puede ser modificada por medio del dopado con cantidades muy pequeñas de otro material, y al incidir los fotones de luz generan una corriente eléctrica con cargas negativas, positivas o ambas. Dentro de los tipos de celdas más destacadas se encuentran las de silicio (mono y poli cristalino), de silicio amorfo, los semiconductores II-VI y los semiconductores III-V (Pereda, 2005).

Las celdas solares de silicio mono y policristalino, son las más producidas industrialmente, en las cuales las pérdidas por reflexión superficial se disminuyen aplicando capas antirreflejo y texturizando la superficie del módulo (Pereda, 2005). En el presente diseño se eligen paneles solares de tipo monocristalino, debido a que este material proporciona un rendimiento energético más alto (REDFE, 2014) y una mayor duración respecto a los módulos que emplean otro tipo de materiales (Fernández, 2009). Las celdas de silicio monocristalino son las más usadas a nivel mundial, en parte debido a que gran porción de la industria electrónica se ha montado alrededor del silicio, y aunque este material no se encuentra en estado puro, es el segundo material más abundante en la Tierra (Joachín, 2008).

Se consideran paneles solares marca *Suntech* (Anexo 4), modelo *STP175S – 24 /Ab-1* de tipo monocristalinos, recomendados para aplicaciones domesticas sobre tejados; que como la nomenclatura de su nombre indica, está diseñado para una potencia máxima P_{ref} y voltaje nominal (o de referencia) V_{ref} :

$$P_{ref} = 175 W$$

$$V_{ref} = 24 V$$

Es oportuno anotar que el voltaje nominal de 24 V escogido para el panel solar corresponde a un valor de referencia, igual para el resto del sistema en su parte DC, pero que generalmente no es el de operación, como tampoco genera la potencia máxima nominal. La potencia que entrega varía casi constantemente con la radiación solar incidente y de acuerdo a respuesta eléctrica del panel según su característica I-V (intensidad - voltaje) que suministra cada fabricante, resultantes de mediciones rigurosas hechas en condiciones estándar de laboratorio. Así cada

modelo de panel presenta en sus especificaciones valores máximos de corriente (la de corto-circuito $I_{sc,ref}$, para el modelo escogido, Anexo 4) y máximo de tensión (voltaje de circuito abierto $V_{oc,ref}$), valores que sin carga se medirían (con amperímetro y voltímetro, respectivamente, conectados uno a la vez) a los terminales del panel con la irradiación máxima.

$$I_{sc,ref} = 5,2 A$$

$$V_{oc,ref} = 44,2 V$$

Para la potencia máxima del panel, se define en la curva I-V, el punto de operación óptima para la radiación máxima (y temperatura estándar de 25 °C), con valores especificados por el fabricante, en este caso (Anexo 4) de tensión $V_{mp,ref}$ y corriente $I_{mp,ref}$

$$V_{mp,ref} = 35,2 V$$

$$I_{mp,ref} = 4,95 A$$

Los paneles solares tienen la ventaja de mantener valores de corriente casi constantes para un amplio rango de tensiones de operación, en este caso y para máxima irradiación, cercana al valor de corriente de corto circuito $I_{sc,ref} = 5,2 A$, según puede verse en la característica I-V.

En la práctica en sistemas autónomos, la tensión y corriente de operación, V_{op} y I_{op} , respectivamente, dentro de los límites dados y para un cierto valor de radiación solar, viene determinada más por el módulo regulador/cargador de las baterías, pues es el que se encarga de hacer los ajustes necesarios, por medio de circuitos lógicos, para optimizar la operación del banco de acumulación, según el tipo de éstas, para mayor confiabilidad y duración.

Las baterías responden a la demanda de la carga, lo cual establece la condición de descarga y la respuesta casi instantánea del regulador para iniciar un ciclo relativamente complejo de recarga de los acumuladores que se realizan con variaciones de voltaje demandado de los paneles (como puede verse en un manual de regulador, por ejemplo, en el de la marca Atersa, en www.atersa.com, de España; modelo L-10, de voltaje nominal 24 V, opera el ciclo de baterías entre 24,6 V y máximo de 30,4 V, desconectando los acumuladores del panel cuando el voltaje baja de 23,2 V, esto es, cuando la irradiación solar baja mucho o de noche). Según la radiación que esté recibiendo el módulo solar en un momento dado, este responde a la demanda de voltaje del regulador con la corriente correspondiente a la potencia que esté generando. Los valores demandados por el regulador pueden ajustarse por el operador para optimizar funcionamiento, pero

generalmente se recomienda mantener los valores introducidos por el fabricante. Hay reguladores modernos que ajustan automáticamente sus valores de operación tratando de mantener un punto óptimo para conseguir la máxima transferencia de energía de los paneles a las baterías.

En el modelo desarrollado con los valores dentro de los requisitos del diseño, se aprecia el comportamiento del sistema en cuanto a voltajes y corrientes para condiciones específicas de operación del sistema solar.

El número de módulos solares fotovoltaicos NP , necesarios para generar la energía requerida, se establece por medio de la expresión descrita a continuación (Alonso, 2014), donde se toma el número entero superior más próximo al valor dado por la relación entre: La energía promedio diaria requerida por la carga eléctrica E_{dc} , la potencia máxima del módulo fotovoltaico P_{ref} , las horas de sol pico HSP y el factor de pérdidas η_d , que incluye pérdidas por conexionado, dispersión de parámetros y por operación de los paneles fuera del punto de máxima potencia (usualmente se toma como un 25%).

$$NP = \frac{E_{dc}}{P_{ref} * HSP * (1 - \eta_d)} \quad (17)$$

$$NP = \frac{1\ 368\ Wh}{175\ W * 3\ h * 0,75}$$

$$NP = 3,5 \approx 4$$

Por lo que se asume un número de cuatro paneles fotovoltaicos; Siendo iguales las tensiones nominales (en 24 V) tanto de los módulos solares como del sistema DC, los cuatro paneles deben conectarse en paralelo.

4.3.3 Dimensionamiento del subsistema de acumulación

El banco de acumulación se diseña teniendo en cuenta que en las aplicaciones de sistemas solares, las baterías deben mantener la corriente durante horas y generalmente están siendo cargadas o descargadas, por lo cual los periodos de reposo son casi nulos (Martínez, 2011).

Se eligen acumuladores de plomo ácido, debido a que son de larga duración y las condiciones de mantenimientos son bajas (Martínez, 2011). Estas baterías son uno de los sistemas de almacenamiento de energía electroquímica ampliamente usados, esto se puede atribuir a sus propiedades químicas y físicas que lo convierte en un sistema eficiente y adecuado para una variedad de aplicaciones. Los reactivos son sólidos de baja solubilidad, provocan una tensión estable y

reacciones altamente reversibles, adicionalmente esta tecnología es relativamente económica (Tammineedi, 2011).

En el diseño del banco de acumulación se consideran cuatro días de reserva, debido a que la vereda Ruche se encuentra en un sector con bastante nubosidad según los registros de radiación

$$N_D = 4 \text{ dias}$$

Se determina la capacidad del banco de baterías Q_B , con la carga total diaria estimada E_T y los días de reserva N_D

$$Q_B = E_T * N_D \quad (18)$$

$$Q_B = 68,4 \frac{Ah}{\text{día}} * 4 \text{ dias}$$

$$Q_B = 273,6 \text{ Ah}$$

Para evitar descargas profundas en el acumulador y que esto reduzca su vida útil, se estipula una profundidad de descarga máxima Q_{max} del 50 %.

$$Q_{max} = 0,5$$

Por lo tanto la capacidad total del sistema de baterías Q_T , es establecida por la capacidad del banco de acumulación Q_B , considerando la profundidad de descarga Q_{max} .

$$Q_T = \frac{Q_B}{Q_{max}} \quad (19)$$

$$Q_T = \frac{273,6 \text{ Ah}}{0,5}$$

$$Q_T = 547 \text{ Ah}$$

Donde debido a que el sistema de tensión nominal es de 24 V y se plantea el uso de baterías de 12 V, esto exige conectarlas en grupos de a dos en serie, con el número de parejas en paralelo que se requiera para la capacidad Q_T .

4.3.4 Dimensionamiento del Regulador-Inversor

Para que el Regulador - Inversor pueda manejar la potencia requerida por la carga sin forzar el equipo, la capacidad de este P_{reg} , debe ser mayor que la potencia máxima de la carga en AC $P_{ac,max}$ (como margen de seguridad).

$$P_{reg} > P_{ac,max} \quad (20)$$

$$P_{reg} > 265 W$$

Se considera un rango adicional mucho mayor, con el fin de que en caso que el usuario quisiera ampliar la carga el sistema (en una fase posterior a la implementación del modelo), este pueda responder a ese requerimiento extra. Por lo tanto se estima la potencia del Regulador inversor P_{reg} como

$$P_{reg} = 500 W$$

4.3.5 Generalidades del sistema solar fotovoltaico diseñado

Como se menciona en el diseño del subsistema de generación, la conexión ente los cuatro módulos fotovoltaicos se hace en paralelo, manteniendo de esta forma el voltaje y sumando la potencia de generación de cada uno de los cuatro paneles formando una matriz fotovoltaica equivalente a 700 W con una corriente óptima de 20 A, para un voltaje óptimo de 35,2 V, según las características dadas del panel solar (Anexo 4).

Para obtener la capacidad diseñada de acumulación, 547 Ah a 24 V, se tiene en cuenta que cuando un sistema solar fotovoltaico requiere más de una batería, es necesario realizar con estas una configuración serie y/o paralelo, en donde los acumuladores deben ser del mismo tipo, con la misma capacidad e idéntico potencial eléctrico (UPME, 2003).

Por lo tanto para este caso que requiere una capacidad total del banco de baterías de 547 Ah (Ecuación 19), se consideran cuatro acumuladores de plomo ácido, marca CSPOWER/OEM (Anexo 5), modelo CG12-300, cada uno con una capacidad 300 Ah a 12 V, los cuales deben estar en configuración serie-paralelo para lograr la capacidad indicada y el voltaje nominal. Así, se conectarían dos grupos en paralelo, cada grupo de a dos baterías en serie (Figura 24), para una acumulación máxima de 600 Ah. Se indican baterías plomo-ácido por ser las más comerciales, encontrando en el mercado tanto especiales para sistemas solares, o comunes (para vehículos y otros usos), las primeras de más durabilidad y mayor profundidad de descarga, pero más costosas, y las segundas, de menor

durabilidad, pero a menor costo inicial. La batería seleccionada presenta máxima durabilidad con profundidad de descarga del 50 %, valor previsto en este diseño.

En la Tabla 8 se muestran las características de los elementos requeridos para el sistema solar fotovoltaico de acuerdo al diseño aquí calculado. Cabe mencionar que dado que es un sistema autónomo, los excesos de potencia son aprovechados únicamente para cargar completamente las baterías, limitadas por el controlador de carga; con lo cual permitiría, en dado caso que se requiera, un mayor número de horas de operación del sistema de reserva. En los momentos a pleno sol y que las baterías estén con carga completa y sin consumo, dicho exceso de potencia no tendría uso, siendo disipado en una resistencia prevista para el caso, o simplemente el regulador corta el suministro de potencia desde los paneles al detectar excesos.

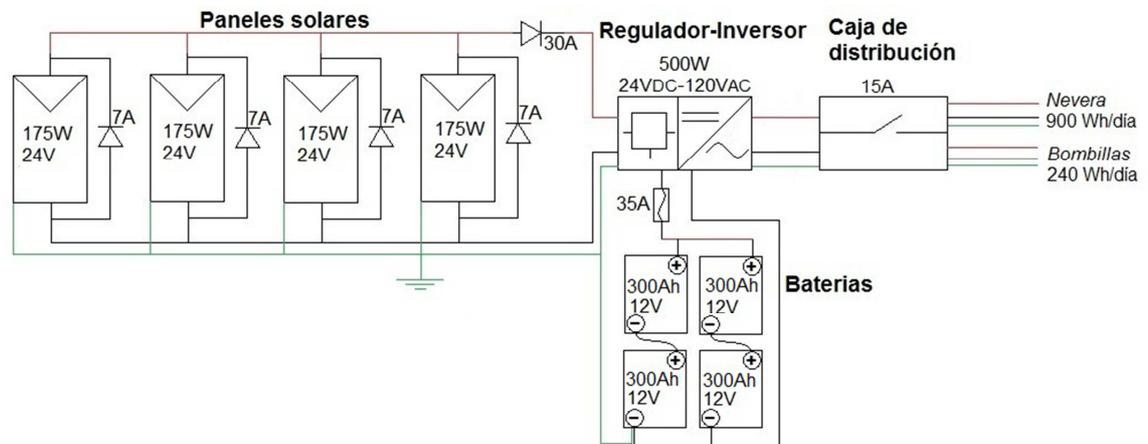
Tabla 8. Elementos del sistema solar diseñado

Cantidad	Equipo	Descripción
4	Módulos solares fotovoltaicos monocristalinos	175 W – 24 V
4	Baterías de Plomo Ácido	300 Ah – 12 V
1	Regulador-Inversor	500 W
		24 V _{DC} – 120 V _{AC}

Fuente: Elaboración propia

Al sistema eléctrico diseñado (Figura 24) de acuerdo a la Guía de especificaciones de sistemas fotovoltaicos (UPME, 2003) y a la Norma técnica universal para sistemas fotovoltaicos domésticos (Instituto de energía solar, 2001), se deben aplicar protecciones tanto en las líneas de generación fotovoltaica, como en la de carga, con el fin de proteger los acumuladores y el regulador contra sobrecorrientes y corrientes de cortocircuito, por medio de fusibles, diodos e interruptores de disparo.

Figura 24. Plano eléctrico del diseño propuesto



Fuente: Elaboración propia

Para elegir dichos elementos, la corriente máxima de operación necesita estar en un rango del 50 al 80% de la capacidad nominal del dispositivo de protección (Instituto de energía solar, 2001).

En el caso de los paneles solares, previendo las corrientes inversas, se estiman diodos de 7 A debido a que la corriente de corto circuito para cada módulo $I_{sc,ref}$ es de 5,2 A. Para todo el conjunto de la matriz fotovoltaica se establece un diodo de protección con una capacidad de 30 A, la cual es establecida en relación a la corriente pico I_p 22,8 A.

Entre el Regulador - Inversor y la batería se estima un fusible de protección por sobrecorriente, con un valor de 35 A, en relación a que la corriente máxima durante la fase de carga del acumulador es 27,3 A (de acuerdo al valor calculado posteriormente en el modelado para cada celda de la batería I_{max}).

Antes de la carga, en la caja de distribución se consideran interruptores magnetotérmicos de 15 A, debido a que la corriente máxima es de 11 A (dada por la potencia máxima en AC $P_{ac,max}$, y al voltaje de operación del sistema); adicionalmente este tipo de protección permite efectuar una interrupción manual del fluido eléctrico, adecuada para en caso de presentarse una sobrecarga (Instituto de Energía Solar, 2001).

En este diseño, se considera emplear en la Escuela dos pequeñas líneas de cableado nuevo de tres líneas de cobre aisladas (línea viva, neutro y tierra para los circuitos AC, y dos líneas positiva y negativa para la conexión del banco de baterías en DC) para tramos estimados entre 3 y 15 metros (Figura 25), y de esta forma asegurar que el estado del cable y de la puesta a tierra para los equipos sea

adecuado, además, con calibres que limiten las pérdidas, preferiblemente por debajo del 3 % (caída de voltaje). Con este fin se consideran: línea desde los paneles a la caja de conexión en cable No. 10 AWG, siendo recomendado llevarlo desde cada panel hasta la caja de distribución (evitando empates); cable No. 6 AWG para la conexión del regulador a las baterías, y No. 12 AWG para los circuitos en AC (nevera y bombillas).

4.3.6 Dimensionamiento del sistema de puesta a tierra

De acuerdo a la Norma colombiana NTC 2050 y la guía de especificaciones de sistemas fotovoltaicos, la conexión a tierra para sistemas de bajo voltaje ($30 V_{DC}$ o menos) no es obligatoria, pero se considera necesaria y recomendable en aplicaciones solares fotovoltaicas (UPME, 2003).

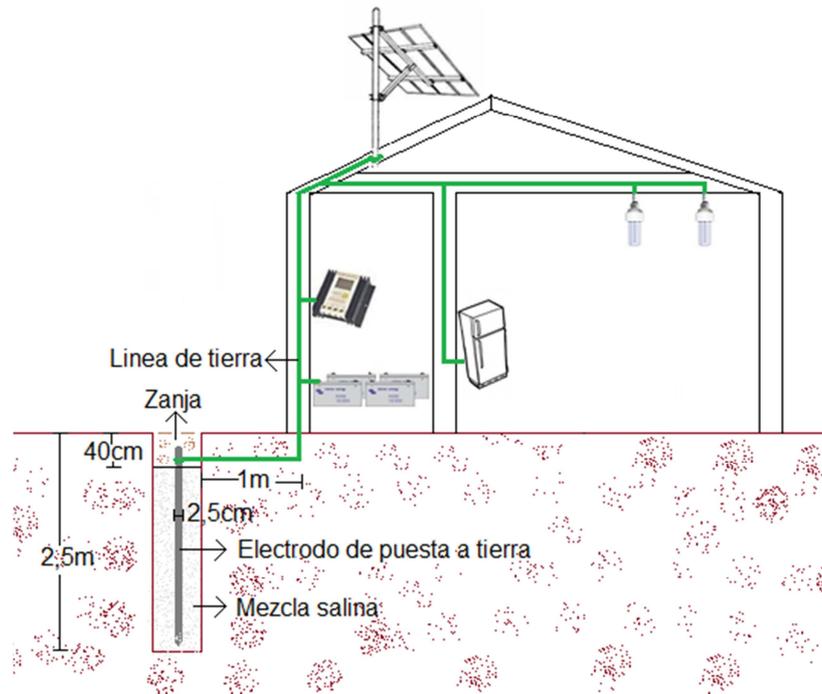
Para una adecuado diseño de puesta a tierra, es necesario tener en cuenta la conductividad del terreno, debido a que es un factor importante en el comportamiento de los electrodos de tierra (Morales, 1999). Para este caso el suelo de la Escuela es cultivable fértil, catalogado como Humus, por lo tanto en este proyecto se considera una resistividad adecuada del terreno menor a $50 \Omega m$. Sin embargo, para asegurar baja resistividad y buen contacto con el terreno se recomienda construir un pequeño foso o zanja de no más de un metro de profundidad y 30 cm de diámetro alrededor de la varilla, rellenándola con sustancia salina especial o suelo artificial de nombre favigel o hidrosolta (Casas, 1998).

Para sistemas solares fotovoltaicos el electrodo de tierra debe ser una varilla de metal, idealmente cobre, con un diámetro de mínimo 1,8 cm y una longitud que le permita entrar al menos 2,5 m por debajo de la superficie del piso (UPME, 2003), habiéndose tomado así para este diseño.

Para garantizar que el sistema de puesta a tierra no alcance voltajes elevados que puedan afectar la instalación en el momento en que la misma esté disipando energía, se debe mantener una separación entre el electrodo de pica y la edificación, distancia que depende de la intensidad y la resistividad del terreno, en este caso como la intensidad del sistema es menor a 60 A, y la resistividad del suelo es inferior a $60 \Omega m$, la separación requerida es de 1 m (Martínez, 2001).

El plano del diseño de puesta a tierra para el sistema solar fotovoltaico estimado se presenta en la Figura 25.

Figura 25. Diseño de puesta a tierra

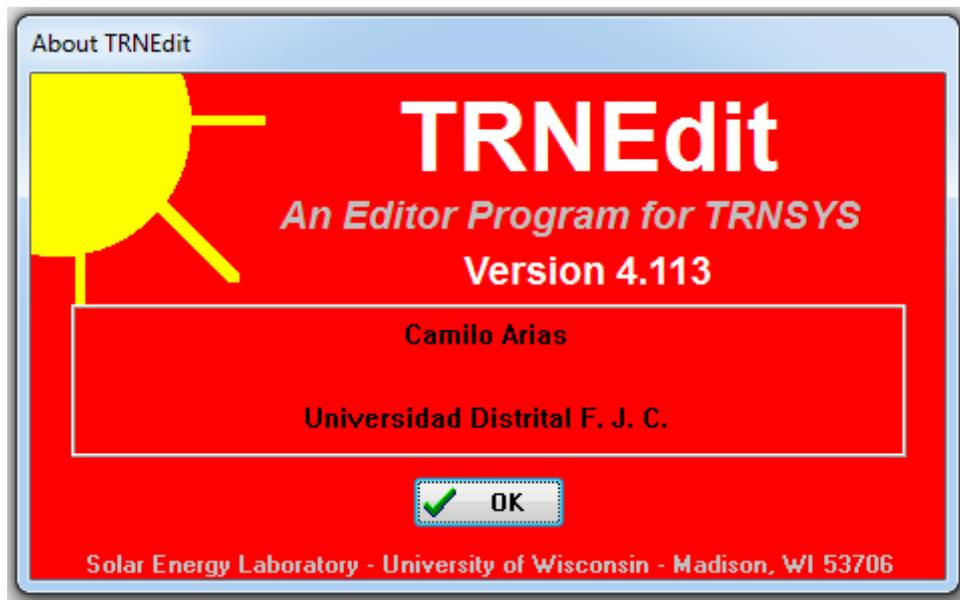


Fuente: Elaboración propia

5. ANÁLISIS Y RESULTADOS OBTENIDOS CON TRNSYS

Después de realizar el dimensionamiento del sistema solar fotovoltaico, se genera una plataforma de simulación mediante el *software* TRNSYS 17. Como se muestra en la Figura 26, bajo la licencia educativa y la autorización respectiva de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Figura 26. Licencia educativa de TRNSYS 17



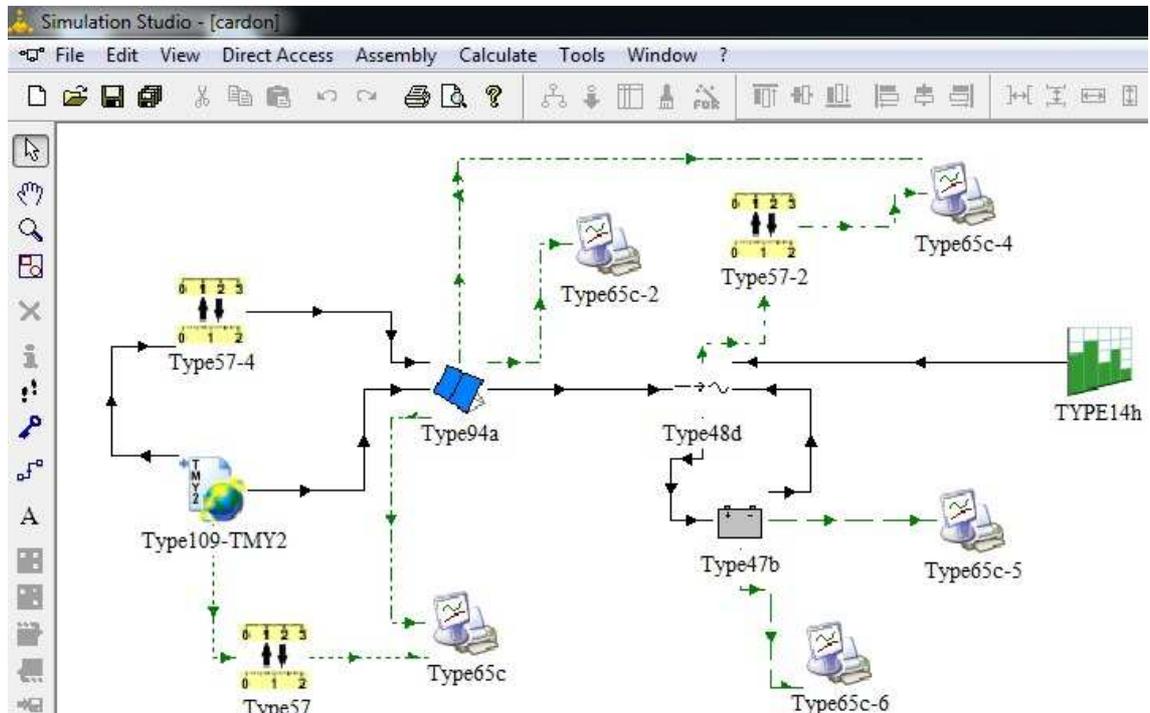
Fuente: Elaboración propia mediante el software TRNSYS 17

5.1 MODELO DESARROLLADO

El programa creado en TRNSYS para el moldeamiento del sistema solar fotovoltaico, permite obtener un panorama general del funcionamiento de todos los equipos, ante las diferentes condiciones de operación y los factores que afectan su rendimiento, obteniendo de esta forma, un mejor aprovechamiento del recurso solar.

La Figura 27 muestra la pantalla con el diagrama en que representan todos los componentes del sistema a simular. El programa maneja subrutinas denominadas "TYPE", que modelan cada uno de los equipos a simular, conteniendo las respectivas características.

Figura 27. Modelo desarrollado en TRNSYS



Fuente: Elaboración propia mediante el software TRNSYS 17

Se emplea el *TYPE 109-TMY2*, el cual lee un archivo de datos climáticos en formato *TMY2* (año típico meteorológico, por sus siglas en inglés).

El *TYPE 94a*, recrea las condiciones de los módulos solares tanto policristalinos como monocristalinos, bajo las características de diseño del sistema generado en el presente trabajo.

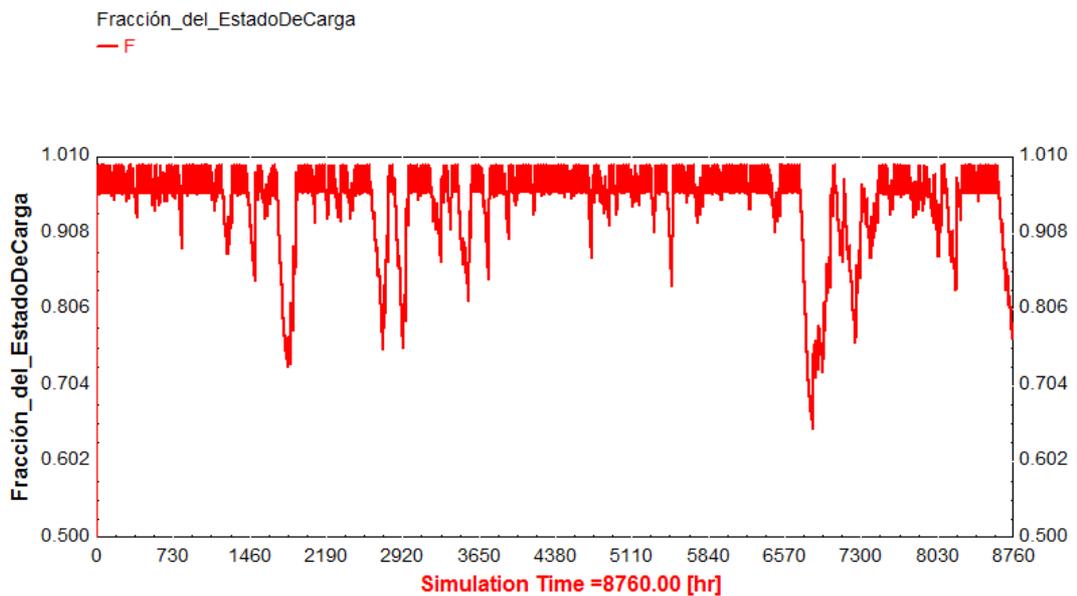
El regulador – inversor *TYPE 48d*, supervisa el estado de carga y voltaje de la batería, donde la tensión de la matriz fotovoltaica es igual al voltaje del acumulador, y la corriente hace la distribución de energía.

El *TYPE 47b* modela la batería de plomo ácido, en esta subrutina la entrada es una señal de potencia, el estado de carga del acumulador se maneja en Ah y utiliza fórmulas relativas de corriente, voltaje y estado de carga definidas mediante las ecuaciones de Shepherd.

El *TYPE 14h* es empleado como simulador de la carga, generando la forma de operación eléctrica respecto al tiempo de las bombillas y el refrigerador.

La simulación del sistema solar fotovoltaico, permite mostrar la eficacia del modelo generado para abastecer los parámetros técnicos de la carga, durante todas las horas del año promedio simulado, como se puede ver en la Figura 28, donde se presenta el porcentaje de carga y descarga del sistema de acumulación para las 8 760 horas que comprenden un año.

Figura 28. Estado de carga del banco de baterías – Durante todo el año



Fuente: Elaboración propia mediante el software TRNSYS 17

A continuación se describen las subrutinas empleadas en el modelado y los parámetros seleccionados para tal fin: *TYPE 109-TMY2* el archivo climático, *TYPE 94a* los paneles solares, *TYPE 48d* el regulador – inversor, *TYPE 47b* el banco de baterías y *TYPE 14h* la carga. Cabe mencionar que adicionalmente se utilizan módulos del *TYPE 57*, los cuales son convertidores de unidades, necesarios para realizar acoples entre parámetros de los diferentes modelos.

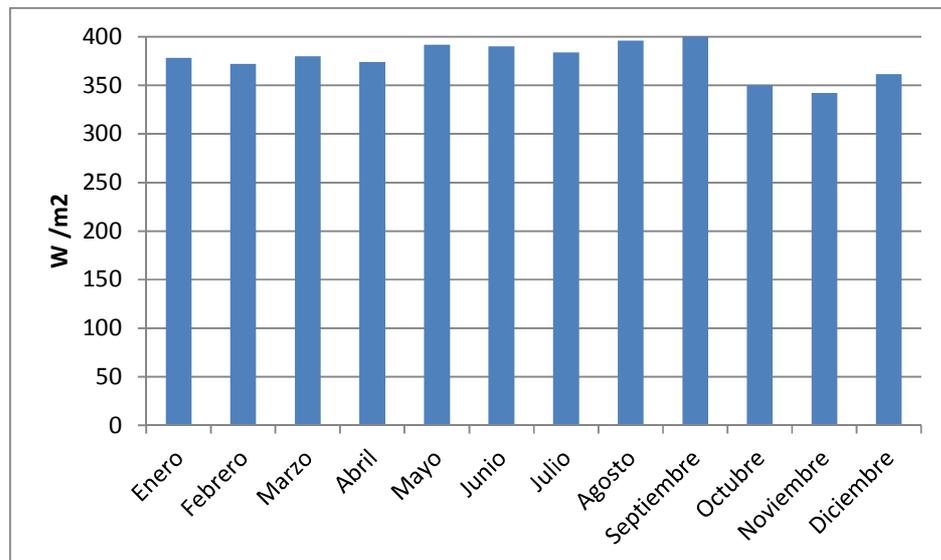
5.1.1 Archivo climático

Para la apropiada operación de TRNSYS, el *software* requiere datos continuos de Radiación total incidente en el panel G_T , Temperatura ambiente T_a , Radiación difusa $G_{T,diff}$, Haz de radiación incidente $G_{T,beam}$, y Ángulo de incidencia de la radiación solar θ .

Los datos registrados por la estación meteorológica utilizada para las mediciones en el sitio son de tipo discreto, estos no pueden ser aprovechados por el software para un adecuado modelado del sistema solar fotovoltaico diseñado, debido a que para generar resultados TRNSYS simula haciendo un barrido de forma continua respecto al tiempo; además la estación no genera registros de radiación difusa, ni del haz de radiación incidente. Por lo tanto, es necesario emplear una base de datos meteorológicos mundiales, generando el archivo climático específico con la información correspondiente de la Escuela El Cardonal. Dicho registro esta en formato *TMY2*, para que pueda ser procesado por el modelo del *TYPE 109* elegido. Dentro de la estructura de datos climáticos en TRNSYS, existen otros modelos, como el *TYPE 109-TRY* y el *TYPE109-VDI*, que corresponden a formatos alemanes y el *Type109-AMeDAS* que concuerda a un estándar japonés (Solar Energy Laboratory, 2012).

La Figura 29 presenta los valores de radiación promedio mensual, en términos de potencia W/m^2 , obtenidos mediante el archivo climático para la ubicación de la Escuela El Cardonal.

Figura 29. Promedio mensual de radiación solar – Archivo climático

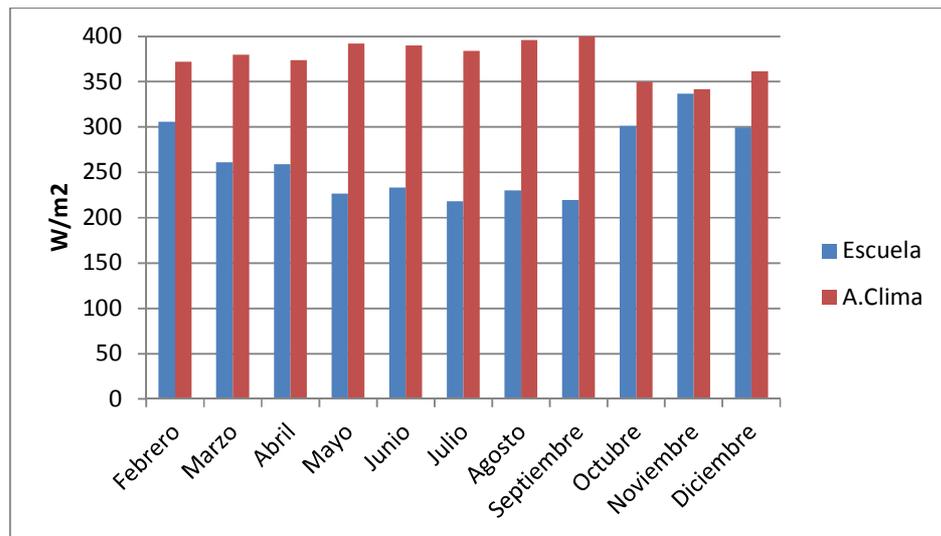


Fuente: Elaboración propia con información del archivo climático.

Con el fin de verificar la información obtenida de la base de datos mundial, se hace su comparación con los datos mensuales promedio de radiación solar que fueron registrados directamente en la Escuela, como se muestra en la Figura 30, se observa que los valores del archivo climático son más altos, según los cuales existirían cuatro horas de sol pico ($HSP = 4 h$), por lo cual, en la simulación, el

sistema solar fotovoltaico diseñado debe responder de una forma más holgada respecto a lo calculado.

Figura 30. Promedio mensual de radiación solar –Escuela El Cardonal y Archivo climático

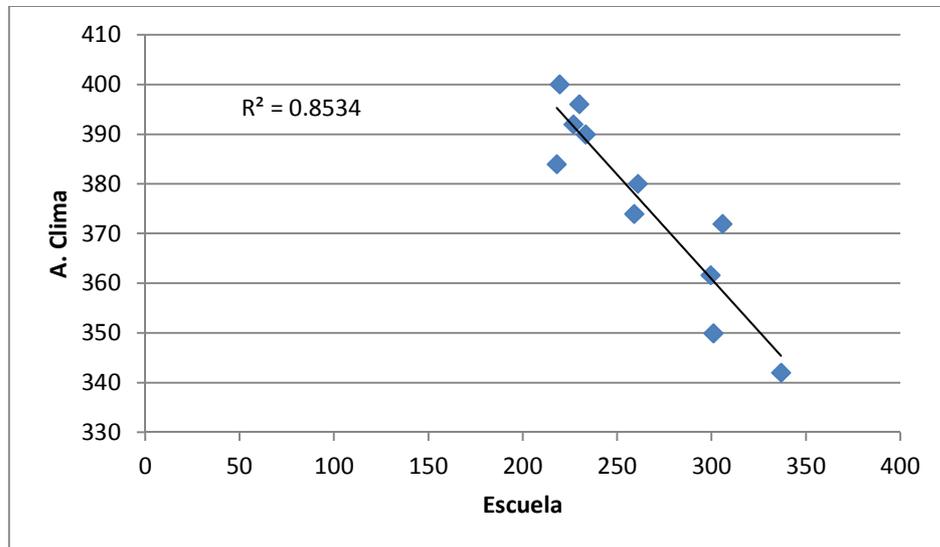


Fuente: Elaboración propia

Se genera la gráfica de dispersión entre los datos radiación solar registrados en la Escuela El Cardonal y los obtenidos por el archivo climático (Figura 31), donde se evidencia que existe una correlación del 85 %, con una relación inversa que se hace notoria, de acuerdo a la Figura 30, en los meses de mitad del año.

La diferencia indicada en los valores de radiación solar disponible en la zona, podría explicarse por el hecho de que los datos de archivos a nivel mundial generalmente son tomados de un promedio de registros de varias estaciones cercanas al sitio (no conociéndose cuáles son), lo cual no necesariamente refleja las condiciones específicas del sitio, por ejemplo, en nubosidad que cambia según la topografía y otras condiciones del lugar.

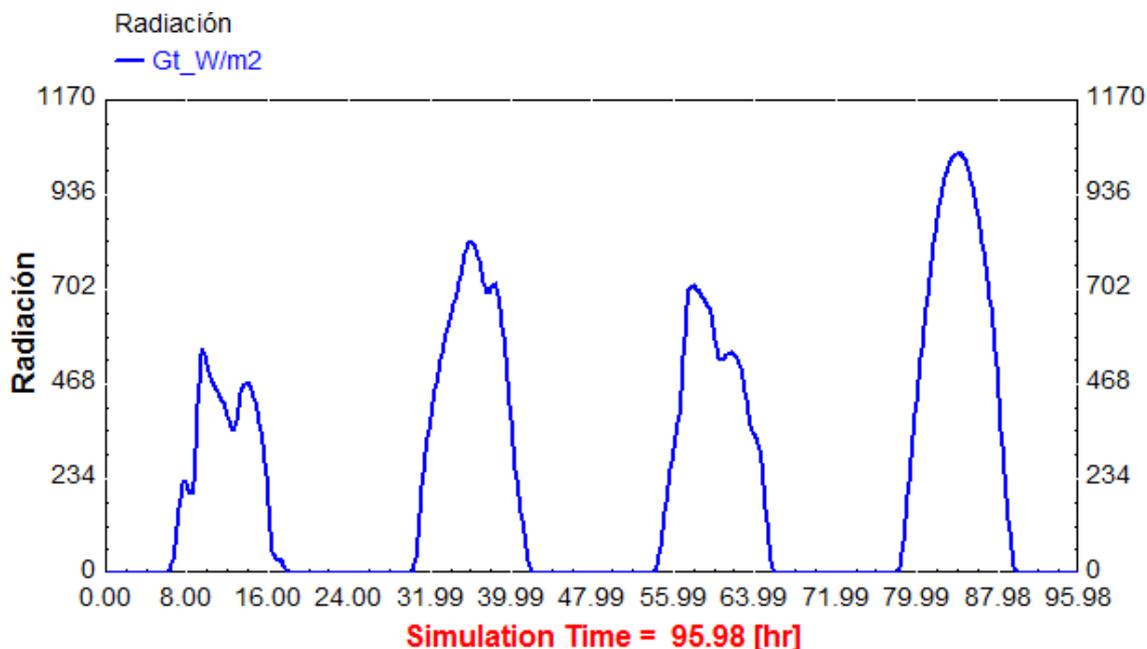
Figura 31. Dispersión - Escuela El Cardonal y Archivo climático



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo al tratamiento realizado con TRNSYS para la presente modelación, a partir de este momento, para poder simplificar y estudiar con claridad el funcionamiento del sistema diseñado, se considera la simulación del comportamiento durante cuatro días con diferentes potencias solares (Figura 32): uno con radiación relativamente baja, dos comportamientos medios y el siguiente día con una radiación máxima.

Figura 32. Radiación solar simulada durante 4 días – TYPE 109



Fuente: Elaboración propia mediante el software TRNSYS 17

Para lo anterior, las condiciones asumidas son:

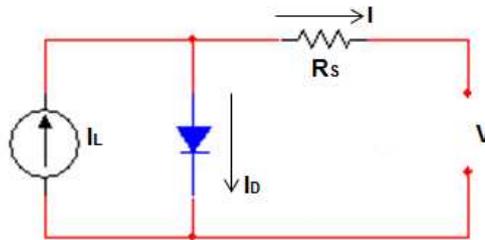
- El primer día exhibe una fuerte presencia de nubosidad con una radiación máxima de 550 W/m^2 la cual se presenta alrededor de las 9:30 horas, sobre las 13 horas decrece a 360 W/m^2 y vuelve a aumentar hasta 471 W/m^2 a las 14 horas.
- El segundo día muestra un valor máximo de 820 W/m^2 a las 13 horas, cae a 694 W/m^2 sobre las 13:30 horas y sube hasta 718 W/m^2 a las 14:30 horas.
- En el tercer día se observa una radiación máxima de 713 W/m^2 a las 10 horas, decae a 528 W/m^2 a las 12:30 horas y crece a 548 W/m^2 a las 14 horas.
- Para el último día se presentan condiciones óptimas de radiación, sobre el medio día alcanzando una radiación de 1040 W/m^2 .

5.1.2 Matriz solar fotovoltaica

Dentro de los TYPEs de paneles fotovoltaicos disponibles en el *software*, existen modelos de colectores térmicos dentro de subdivisiones del TYPE 50, el TYPE 94b como subrutina para módulos de capa delgada, y el TYPE 94a que recrea los módulos solares fotovoltaicos de silicio monocristalino y policristalino mediante un seguimiento al punto de máxima potencia, emplea ecuaciones para un tipo de circuito equivalente empírico que contempla las características de corriente y voltaje de un solo panel y luego las extrapola para predecir el rendimiento de una matriz multi-módulo (Solar Energy Laboratory, 2012), como se detalla a continuación.

El generador fotovoltaico de este TYPE, básicamente está descrito por un circuito con una fuente de corriente DC, un diodo y una resistencia (Figura 33). La intensidad de corriente de la fuente depende de la radiación solar y las características de voltaje y corriente del diodo, que a su vez son dependientes de la temperatura (Solar Energy Laboratory, 2012).

Figura 33. Circuito equivalente del módulo solar – TYPE 94a



Fuente: Elaboración propia con información de TRNSYS 17-Mathematical Reference.

El funcionamiento del sistema se describe mediante la ley de Kirchhoff, como el balance entre la corriente de generación del módulo I_L y la intensidad sobre el diodo I_D

$$I = I_L - I_D \quad (21)$$

La ecuación característica de corriente I respecto al voltaje (Gimeno, 2002), se describe como

$$I = I_L - I_0 \left(\exp \frac{V + IR_S}{V_T} \right) \quad (22)$$

Siendo V_T la tensión térmica, la cual depende de la temperatura absoluta (300 K)

$$V_T = \frac{k T}{q} \quad (23)$$

Donde la constante de la carga eléctrica sobre el electrón con una incertidumbre estándar q y la constante de Boltzmann k , de acuerdo al National Institute Of Standards And Technology (NIST, 2013), son respectivamente

$$q = 1,602\ 176\ 565\ (35) \times 10^{-19}\ \text{C}$$

$$k \approx 1,3806504 \times 10^{-23}\ \text{J/K}$$

Por lo tanto el valor de la tensión térmica V_T es

$$V_T \approx 25\ \text{mV}$$

Para determinar la corriente generada I_L , se debe tener en cuenta la relación linealmente dependiente de la radiación incidente

$$I_L = I_{L,ref} \frac{G_T}{G_{T,ref}} \quad (24)$$

Donde la fotocorriente del módulo en condiciones de referencia $I_{L,ref}$ es equivalente a la corriente de corto circuito en condiciones de referencia $I_{sc,ref}$

$$I_{L,ref} = I_{sc,ref}$$

El parámetro empírico de ajuste de la curva fotovoltaica γ , está dado por

$$\gamma = \frac{q(V_{mp,ref} - V_{oc,ref} + I_{mp,ref} R_s)}{k T_{c,ref} \ln\left(1 - \frac{I_{mp,ref}}{I_{sc,ref}}\right)} \quad (25)$$

La corriente de saturación inversa del diodo I_0 , depende de la temperatura del módulo T_C y de sus parámetros de referencia

$$\frac{I_0}{I_{0,ref}} = \left(\frac{T_C}{T_{c,ref}}\right)^3 \quad (26)$$

En donde la corriente de referencia de saturación inversa del diodo $I_{0,ref}$, se define a partir de

$$I_{o,ref} = \frac{I_{sc,ref}}{\exp\left(\frac{q V_{oc,ref}}{\gamma k T_{c,ref}}\right)} \quad (27)$$

La derivada analítica del voltaje con respecto a la temperatura en condiciones de referencia en circuito abierto, está dada por

$$\frac{\partial V_{oc}}{\partial T_c} = \mu_{voc} = \frac{\gamma k}{q} \left[\ln\left(\frac{I_{sc,ref}}{I_{o,ref}}\right) + \frac{T_c \mu_{isc}}{I_{sc,ref}} - \left(3 + \frac{q \varepsilon_g}{\gamma N_s T_{c,ref}}\right) \right] \quad (28)$$

Para conseguir una buena aproximación de los módulos cristalinos, se calculan los valores de la corriente generada I_L , la corriente de referencia de saturación inversa del diodo $I_{o,ref}$, el parámetro empírico de ajuste de la curva fotovoltaica γ y la resistencia en serie del módulo R_s , de acuerdo a los parámetros descritos a continuación.

Adicionalmente para determinar el valor de R_s , se asume que la pendiente de la curva Corriente-Voltaje es cero en la condición de corto circuito (Solar Energy Laboratory, 2012).

$$\left(\frac{dI}{dV}\right)_{v=0} = 0 \quad (29)$$

Partiendo de las condiciones técnicas del fabricante del panel fotovoltaico monocristalino elegido (Anexo 4), se establece la corriente de corto circuito del módulo en condiciones de referencia $I_{sc,ref}$

$$I_{sc,ref} = 5,2 \text{ A}$$

El voltaje de circuito abierto del módulo fotovoltaico $V_{oc,ref}$

$$V_{oc,ref} = 44,2 \text{ V}$$

La tensión del módulo en el punto de máxima potencia $V_{mp,ref}$

$$V_{mp,ref} = 35,2 \text{ V}$$

La corriente del módulo en el punto de máxima potencia $I_{mp,ref}$

$$I_{mp,ref} = 4,95 \text{ A}$$

El número de celdas conectadas en serie en cada panel solar N_s

$$N_s = 72$$

El área del módulo A

$$A = 1,27 \text{ m}^2$$

El voltaje de operación del panel solar V

$$V = 24 \text{ V}$$

El coeficiente de temperatura de la corriente de corto circuito μ_{Isc}

$$\mu_{Isc} = 0,017 \% / ^\circ\text{C}$$

Y el coeficiente de temperatura del voltaje de circuito abierto μ_{Voc}

$$\mu_{Voc} = -0,34 \% / ^\circ\text{C}$$

De acuerdo al sistema solar fotovoltaico diseñado, la cantidad de paneles conectados en paralelo de la matriz fotovoltaica NP es

$$NP = 4$$

Y según lo estimado, el número de módulos enlazados en serie de la matriz fotovoltaica NS

$$NS = 1$$

Las características de referencia, se toman como constantes al nivel del mar (Delgado, 2010), establecidas con los siguientes valores

Temperatura de referencia $T_{c,ref}$

$$T_{c,ref} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

Referencia de insolación $G_{T,ref}$

$$G_{T,ref} = 1\,000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

La Temperatura ambiente en condiciones NOCT (temperatura nominal de funcionamiento de la celda, por sus siglas en ingles) $T_{a,NOCT}$, es la temperatura de

funcionamiento del módulo con una velocidad del viento de 1 m/s, sin carga eléctrica (Bækhøj, 2005). Establecida como

$$T_{a,NOCT} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Así mismo, la radiación incidente en condiciones NOCT $G_{T,NOCT}$ es

$$G_{T,NOCT} = 800 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Las características NOCT, para un módulo de silicio monocristalino suele estar en torno a los 47 °C (Bækhøj, 2005), en este caso el fabricante especifica la Temperatura del módulo en condiciones NOCT $T_{c,NOCT}$

$$T_{c,NOCT} = 45 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Usando la información de los parámetros NOCT, se calcula la temperatura del módulo T_c , para cada instante de tiempo, y la relación del producto de transmitancia - absorptancia del panel, el cual determina el coeficiente de pérdida del módulo

$$\frac{\tau\alpha}{U_L} = \frac{(T_{c,NOCT} - T_{a,NOCT})}{G_{T,NOCT}} \quad (30)$$

Asumiendo que esta relación es constante y teniendo en cuenta la eficiencia de conversión del módulo η_c , que varía con las condiciones ambientales. La temperatura del módulo en cualquier paso de tiempo T_c es

$$T_c = T_a + \frac{\left(1 - \frac{\eta_c}{\tau\alpha}\right)}{\left(G_T \frac{\tau\alpha}{U_L}\right)} \quad (31)$$

Donde el producto de la transmitancia y la absorptancia $\tau\alpha$ se asume como constante, siendo τ la transmitancia de la cubierta fotovoltaica y α la fracción absorbida en la superficie en la celda fotovoltaica

$$\tau\alpha = 0,95$$

Definir el *bandgap* del semiconductor ε_g como 1,12 eV, se considera como una buena estimación (Solar Energy Laboratory, 2012).

$$\varepsilon_g = 1,12 \text{ eV}$$

Los valores de fotocorriente del módulo en condiciones de referencia $I_{L,ref}$, corriente de saturación inversa del diodo en condiciones de referencia $I_{o,ref}$ y el parámetro empírico de ajuste de la curva fotovoltaica γ , son calculados automáticamente por el software para cada instante de tiempo.

Los datos instantáneos de radiación total incidente en el panel G_T , temperatura ambiente T_a , haz de radiación incidente $G_{T,beam}$, radiación difusa $G_{T,diff}$, así como el ángulo de incidencia de la radiación solar θ y la pendiente de la matriz fotovoltaica β , son obtenidos del archivo climático *TYPE 109*.

Cuando se modelan sistemas de acoplamiento directo donde el conjunto fotovoltaico está conectado directamente a una carga, se utiliza el *FLAG* para encontrar el punto en el que las tensiones de la malla fotovoltaica y la carga son iguales. Debido a que el sistema solar fotovoltaico diseñado alimenta un banco de baterías, se desactiva esta opción

$$FLAG = 0$$

5.1.2.1 Resultado del arreglo de módulos fotovoltaicos

Teniendo en cuenta la intensidad de corto circuito entregada por el fabricante para cada módulo fotovoltaico $I_{sc,ref}$ y la cantidad de paneles enlazados en paralelo NP , se establece la corriente de corto circuito del arreglo fotovoltaico $I_{sc,T}$

$$I_{sc,T} = I_{sc,ref} * NP \quad (32)$$

$$I_{sc,T} = 5,2 A * 4$$

$$I_{sc,T} = 20,8 A$$

Así mismo, la intensidad en el punto de máxima potencia de la matriz fotovoltaica $I_{mp,T}$, está definida por la corriente en el punto de máxima potencia según las condiciones de referencia $I_{mp,ref}$ y el número de paneles conectados en paralelo NP

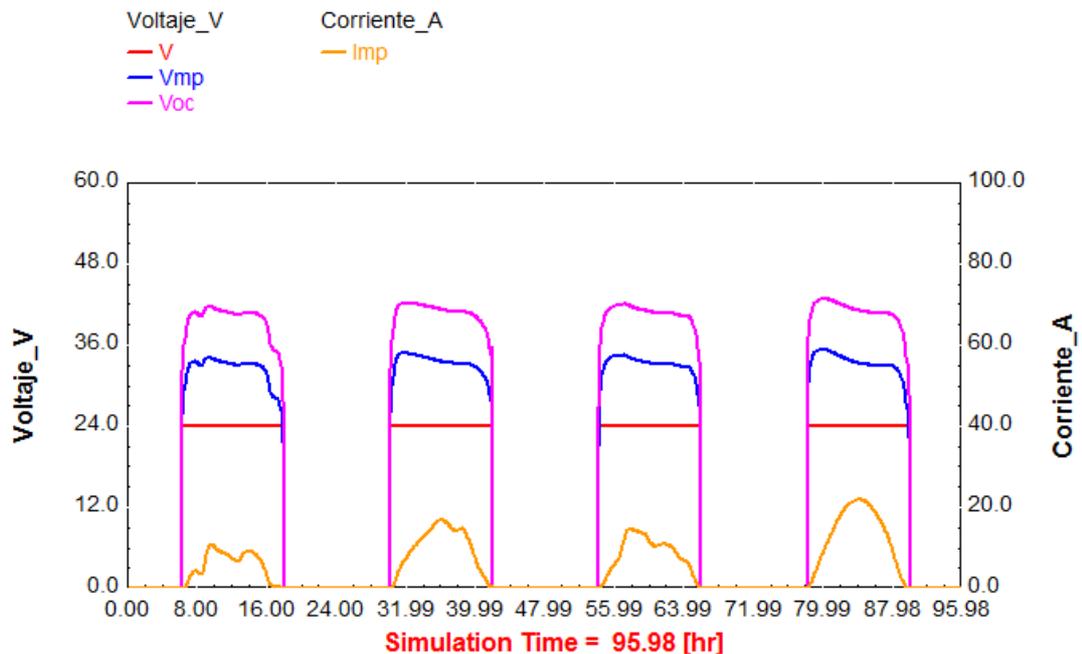
$$I_{mp,T} = I_{mp,ref} * NP \quad (33)$$

$$I_{mp,T} = 4,95 A * 4$$

$$I_{mp,T} = 19,8 A$$

El comportamiento de voltaje y corriente, a la salida del arreglo de módulos fotovoltaicos, se presenta en la Figura 34. Donde en color rojo se muestra el voltaje de la matriz fotovoltaica V , en azul la tensión en el punto de máxima potencia V_{mp} , en fucsia el voltaje de circuito abierto V_{oc} , y la intensidad en el punto de máxima potencia I_{mp} en amarillo.

Figura 34. Comportamiento Voltaje y Corriente - TYPE 94a



Fuente: Elaboración propia mediante el software TRNSYS 17

A lo largo de los cuatro días, durante las horas en que se presenta radiación solar se mantiene el voltaje de la matriz fotovoltaica V en 24 V.

El día con mayor radiación solar es el cuarto, donde el punto máximo de voltaje se encuentra a las 8 horas, en este instante la tensión de circuito abierto $V_{oc,80h}$ es muy próxima al voltaje de circuito abierto establecido por el fabricante $V_{oc,ref}$.

$$V_{oc,80h} = 42,9 V$$

Debido a que el sistema modelado efectúa un seguimiento al punto de máxima potencia, la tensión óptima en la hora 80 de simulación $V_{mp,80h}$ corresponde al voltaje de en el punto de máxima potencia según las condiciones de referencia $V_{mp,ref}$ (tan solo con una diferencia de 0,2 V).

$$V_{mp,80h} = 35 V$$

La corriente en el punto de máxima potencia para este instante de tiempo $I_{mp,80h}$ es

$$I_{mp,80h} = 8,3 A$$

El punto de máxima corriente se encuentra sobre las 12 horas del cuarto día, donde la tensión de circuito abierto $V_{oc,84h}$ es

$$V_{oc,84h} = 41,1 V$$

El voltaje en el punto de máxima potencia $V_{mp,84h}$ corresponde a

$$V_{mp,84h} = 33 V$$

El valor de la corriente en el punto de máxima potencia en el medio día $I_{mp,84h}$ es cercano al de la intensidad en el punto de máxima potencia de la matriz fotovoltaica definida teóricamente $I_{mp,T}$ y muy próximo al valor de la corriente de corto circuito del arreglo fotovoltaico $I_{sc,T}$

$$I_{mp,84h} = 21 A$$

Debido a que en el modelado se definió la referencia de insolación $G_{T,ref}$ en $1\ 000\ W/m^2$, y como en la hora 84 de simulación se presenta una radiación $G_{T,84h}$ de $1\ 040\ W/m^2$; de acuerdo a la Ecuación 24, en teoría se genera una corriente máxima I_L de 21,7 A

$$I_{L,84h} = I_{sc,T} \frac{G_{T,84h}}{G_{T,ref}}$$

$$I_{L,84h} = 20,8 A \frac{1\ 040 \frac{W}{m^2}}{1\ 000 \frac{W}{m^2}}$$

$$I_{L,84h} = 21,7 A$$

Teóricamente, la potencia de salida en la matriz fotovoltaica $P_{ref,T}$, está dada por la potencia para un módulo solar (especificada por el fabricante) P_{ref} y el número de paneles conectados en paralelo NP

$$P_{ref,T} = P_{ref} * NP \quad (34)$$

$$P_{ref,T} = 175 W * 4$$

$$P_{ref,T} = 700 W$$

El valor del punto de máxima potencia de la malla fotovoltaica $P_{mp,T}$, es establecido por la relación ente la corriente en el punto máxima potencia de la matriz fotovoltaica $I_{mp,T}$ y el voltaje en el punto de máxima potencia según las condiciones de referencia $V_{mp,ref}$

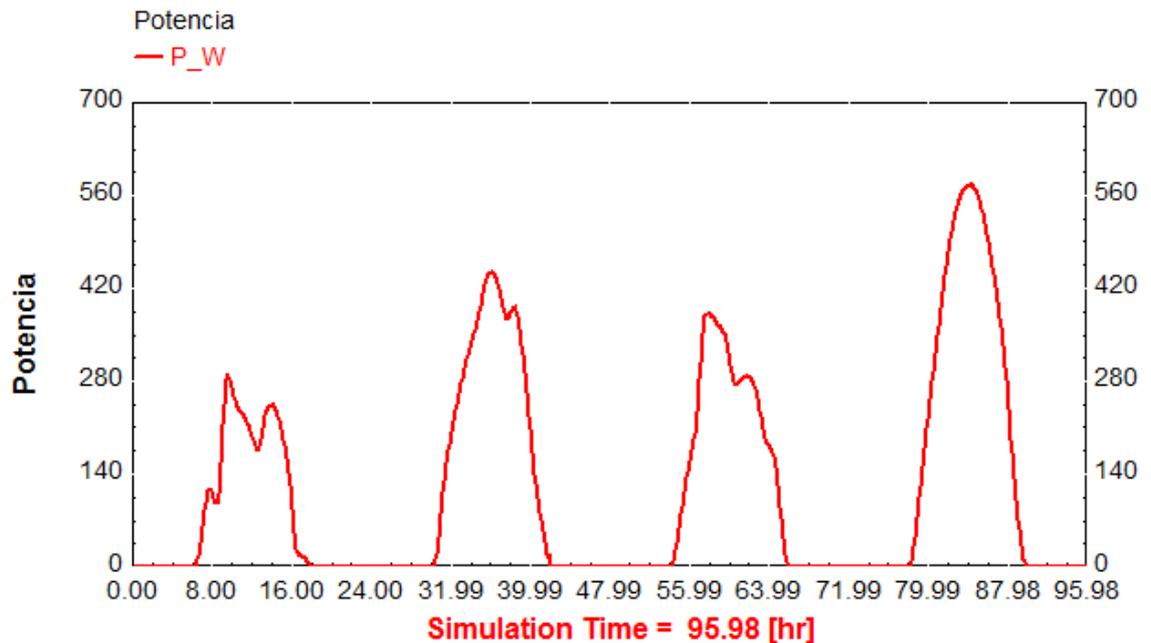
$$P_{mp,T} = I_{mp,T} * V_{mp,ref} \quad (35)$$

$$P_{mp,T} = 19,8 A * 35,2 V$$

$$P_{mp,T} = 696,9 W$$

De acuerdo al resultado del modelado, la potencia generada por el arreglo de módulos fotovoltaicos para las 96 horas que comprenden los días analizados, se observa en la Figura 35.

Figura 35. Potencia generada por el arreglo fotovoltaico –TYPE94a



Fuente: Elaboración propia mediante el software TRNSYS 17

En relación a los valores teóricos de voltaje de máxima potencia en la hora 80 de simulación $V_{mp,80h}$ y de corriente de máxima potencia en ese mismo instante $I_{mp,80h}$, teóricamente la potencia máxima a las 8 horas del cuarto día $P_{max,80h}$ es

$$P_{max,80h} = I_{mp,80h} * V_{mp,80h} \quad (36)$$

$$P_{max,80h} = 8,3 A * 35 V$$

$$P_{max,80h} = 290,5 W$$

En el cuarto día, la potencia máxima a las 8 horas $P_{A,80h}$ (momento en que se alcanza el voltaje de circuito abierto de referencia $V_{oc,ref}$) tiene un valor de

$$P_{A,80h} = 232,1 W$$

Se verifica que la potencia máxima a las 8 horas $P_{A,80h}$ es menor que la potencia máxima teórica en ese mismo instante del cuarto día $P_{max,80h}$, obteniendo una eficiencia máxima en ese punto del 79,89 %.

Teóricamente, la potencia máxima que se puede conseguir a la salida del arreglo de paneles solares $P_{max,84h}$, es obtenida por los valores de voltaje $V_{mp,84h}$ y corriente de máxima potencia para ese momento $I_{mp,84h}$

$$P_{max,84h} = I_{mp,84h} * V_{mp,84h} \quad (37)$$

$$P_{max,84h} = 21 A * 33 V$$

$$P_{max,84h} = 693 W$$

Para ese instante de tiempo, la potencia generada mediante el modelado, a la salida del arreglo de paneles $P_{A,84h}$, es

$$P_{A,84h} = 576,6 W$$

El comportamiento del arreglo de módulos fotovoltaicos es adecuado a la forma de operación esperada, la potencia máxima entregada $P_{max,84h}$ tiene una eficiencia del 82,7 % en relación con el valor de la potencia máxima teórica $P_{ref,T}$, determinada de acuerdo a los parámetros dados por el fabricante.

5.1.3 Banco de acumulación

Las baterías almacenan y liberan energía a través de reacciones de oxidación y reducción, existen modelos que se basan en la electroquímica del sistema y otros en circuitos equivalentes, que consisten en condensadores y resistencias, utilizados para representar la carga de la capacidad de almacenamiento del acumulador y la resistencia a la carga, respectivamente (Burgos, 2013).

En TRNSYS, los modelos matemáticos de las baterías de plomo ácido TYPEs 47, describen la relación entre el voltaje, la corriente y el estado de carga (SOC, por sus siglas en inglés). Representan un acumulador que opera conjuntamente con la matriz fotovoltaica y con el módulo de acondicionamiento de potencia (Solar Energy Laboratory, 2012).

En la subrutina TYPE 47a, la potencia es dada como entrada y el estado de carga se maneja en Wh; este modelo presenta la conmutación del estado de carga, en relación a la potencia inyectada P_A , y la eficiencia definida eff_1 . En el TYPE 47c, la potencia es dada como entrada y el estado de carga respecto al tiempo es generado en Ah, emplea las ecuaciones de Shepherd-modificado para determinar el estado de carga, tensión y corriente (este modelo es recomendable cuando la corriente es muy baja).

En el *TYPE 47b* la potencia es entregada como entrada, esta especifica cómo varía el estado de carga de la batería respecto al tiempo, a partir de una tasa dada de carga o descarga (Solar Energy Laboratory, 2012).

Utiliza el modelo de Shepherd, para representar el voltaje del acumulador en función del estado de carga y de la corriente (Burgos, 2013). Mientras la intensidad del acumulador sea menor que cero, la descarga de la batería se representa por la siguiente ecuación

$$I < 0 \tag{38}$$
$$V = e_{qd} - g_d H + I r_{qd} \left(1 + \frac{m_d H}{\frac{Q_d}{Q_m} - H} \right)$$

Donde la fracción del estado de descarga H , es el inverso de la fracción del estado de carga F

$$H = 1 - F \tag{39}$$

La fracción del estado de carga para cada instante de tiempo F , es determinada por el estado de carga Q y la capacidad nominal de la celda Q_m

$$F = \frac{Q}{Q_m} \quad (40)$$

La ecuación del modelo de Shepherd aplicable a la carga para determinar el voltaje de la batería, se emplea cuando la corriente del acumulador es mayor que cero

$$I > 0$$

$$V = e_{qc} - g_c H + I r_{qc} \left(1 + \frac{m_c H}{\frac{Q_c}{Q_m} - H} \right) \quad (41)$$

En este modelo la corriente nunca es 0, el estado de carga de la batería en cada instante de tiempo Q (cuyo valor es manejado en Ah), es establecido por la corriente (cuando el acumulador se encuentra en fase de descarga) y por la relación de corriente y eficiencia de la batería (mientras esta permanece en ciclo de carga)

$$\frac{dQ}{dt} = \begin{cases} I, & \text{si } I < 0 \\ I * \text{eff}_B, & \text{si } I > 0 \end{cases} \quad (42)$$

De acuerdo a las características de acumulación diseñada, se definen los siguientes parámetros

El número de celdas conectadas en serie dentro del acumulador NS_B , se fija conociendo que en una batería de plomo ácido, cada bloque posee una tensión de 2 V (Sánchez, 2010), por lo tanto un acumulador de 24 V incluye 12 celdas en serie.

$$NS_B = \frac{V}{V_n} \quad (43)$$

$$NS_B = \frac{24 V}{2 V}$$

$$NS_B = 12$$

A partir del voltaje del sistema V establecido en 24 V, se considera el voltaje máximo para cargar el acumulador V_B como

$$V_B = 28 V$$

Se define la tensión máxima permitida en cada celda cuando la batería se encuentra en modo de carga V_{max} , de acuerdo a la relación entre el voltaje máximo para cargar el acumulador V_B y la cantidad de celdas en serie dentro de la batería NS_B

$$V_{max} = \frac{V_B}{NS_B} \quad (44)$$

$$V_{max} = \frac{28 V}{12}$$

$$V_{max} = 2,33 V$$

Se estiman como 10, la cantidad de bloques conectados en paralelo dentro del acumulador NP_B

$$NP_B = 10$$

Cada una de estas celdas, con una capacidad de energía Q_m , definida por la capacidad total del banco de baterías diseñado Q_T y el número de bloques en paralelo NP_B

$$Q_m = \frac{Q_T}{NP_B} \quad (45)$$

$$Q_m = \frac{547 Ah}{10}$$

$$Q_m = 54,7 Ah$$

De acuerdo a lo estimado en el diseño por pérdidas F_S , entre ellas en el acumulador, se define en un 83 % la eficiencia de carga de la batería eff_B

$$eff_B = 0,83$$

Se establece la corriente máxima por celda durante la fase de carga I_{max} en relación a la capacidad de energía por cada bloque Q_m y considerando un tiempo de descarga C_{20} (20 horas).

$$I_{max} = \frac{Q_m}{C_{20}} \quad (46)$$

$$I_{max} = \frac{54,7 \text{ Ah}}{20 \text{ h}}$$

$$I_{max} = 2,73 \text{ A}$$

Por lo tanto, manteniendo la relación, la corriente mínima en cada celda durante la descarga I_{min} , equivale a

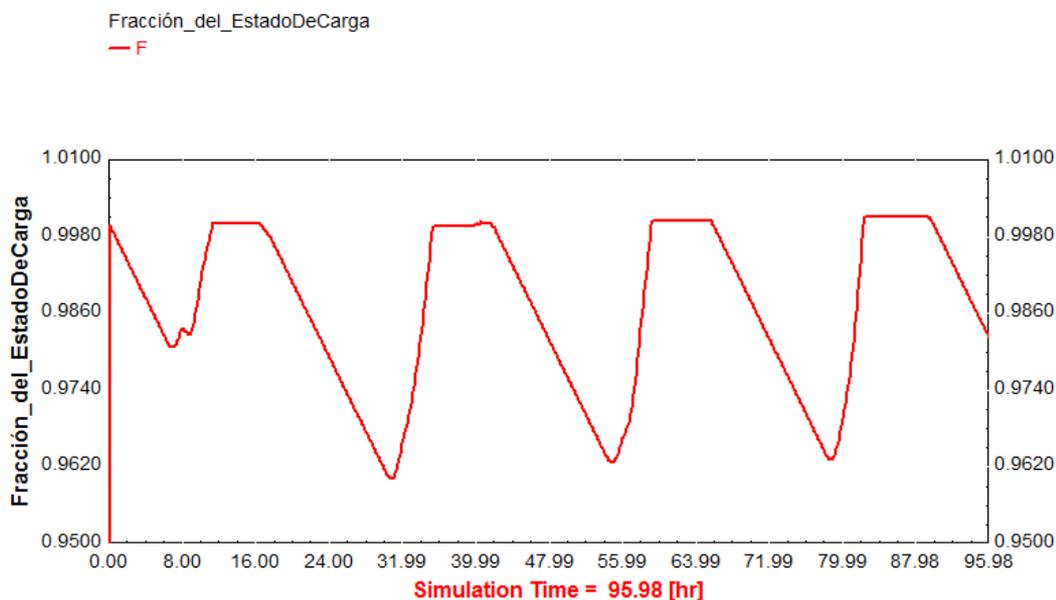
$$I_{min} = -2,73 \text{ A}$$

El voltaje de corte de descarga D_Vc se calcula automáticamente. Los valores de potencia hacia o desde el acumulador P_B , se toman desde el *TYPE 48d* (subrutina del Regulador - Inversor), donde la potencia inyectada a la batería tiene un signo positivo, mientras que la que va desde el acumulador a la carga es en sentido negativo.

5.1.3.1 Resultado del banco de baterías

En esta subrutina se puede determinar el estado de carga inicial de la batería, en este caso, se define un comienzo del acumulador totalmente cargado, debido a que es la manera como el fabricante lo entrega. En la Figura 36, se observa la cantidad de energía disponible en la batería en relación con su capacidad máxima F , para los primeros cuatro días estimados de operación del sistema.

Figura 36. Estado de carga del banco de baterías – TYPE 47b



Fuente: Elaboración propia mediante el software TRNSYS 17

La carga eléctrica comienza a demandar energía desde el instante de tiempo cero, por lo cual, la batería se descarga hasta el 98,08 % cuando son pasadas las 6:30 horas, instante en que los paneles solares fotovoltaicos comienzan a generar la energía para suplir la carga, y con la energía excedente, inicia a recarga el acumulador de forma escalonada, hasta las 11:00 horas, donde nuevamente la batería está al 100 %, se mantiene llena hasta las 16:30 horas, en ese momento entra en fase de descarga hasta las 6:40 horas del segundo día, llegando a 96,03 %, valor de descarga máxima para los días analizados.

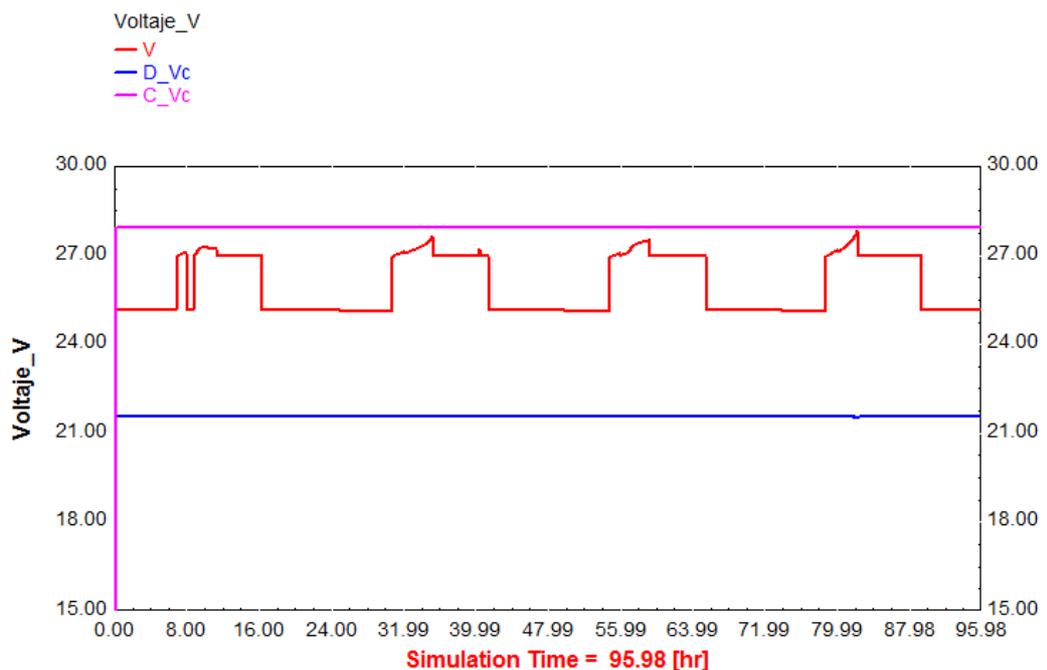
El acumulador vuelve a estar totalmente cargado a las 11:20 horas del segundo día, en ese momento la potencia generada por la matriz solar soporta toda la carga hasta las 17:45 horas, donde nuevamente entra en fase de descarga hasta las 6:45 horas del tercer día con un nivel de carga de 96,29 %, el comportamiento se mantiene de la misma manera durante el tiempo restante del tercer día y todo el cuarto día.

Por las características de descarga diaria en la batería, se predice que el sistema responda de forma adecuada en la Escuela El Cardonal durante los cuatro días de reserva previstos, sin generar una descarga profunda en el sistema de acumulación.

El comportamiento de voltaje a la salida del banco de baterías durante el ciclo de carga se muestra en la Figura 37, donde la tensión de la batería V se presenta de

color rojo, el voltaje de corte en el ciclo de descarga D_Vc en color azul y en fucsia la tensión de corte en el ciclo de carga C_Vc .

Figura 37. Voltajes de salida del banco de baterías – TYPE 47b



Fuente: Elaboración propia mediante el software TRNSYS 17

La tensión máxima de carga C_Vc , se mantiene constante en 27,9 V, muy cercano al valor estimado como voltaje máximo para cargar el acumulador V_B . La tensión mínima de descarga D_Vc , también muestra un comportamiento permanente en 21,6 V.

El voltaje de operación, presenta tres estados de carga durante cada día, los cuales se aprecian claramente del segundo al cuarto día. En el primero, existe una radiación solar muy baja sobre las 8 horas, como se ve en la Figura 32, por lo cual el regulador de carga debe interrumpir por un lapso de tiempo el envío de tensión a la batería, priorizando que la energía generada mediante los paneles solares responda a los requerimientos de la carga.

A partir del segundo día se observa que durante la primera etapa, el voltaje aumenta rápidamente sobrepasando los 27 V, hasta alcanzar el punto de saturación, en este momento el acumulador llega al 100 % de carga y es entonces cuando el regulador reduce el paso de tensión a la batería.

Para el segundo periodo, el acumulador se mantiene en estado de carga total, conservando este lapso de tiempo un voltaje de 27 V, hasta el momento en que es necesario abastecer a la carga por parte la batería.

En la última fase, el regulador permite la descarga del acumulador, conservando un valor levemente mayor a 25 V, este periodo se mantiene hasta que la potencia generada por los módulos solares pueda recargar nuevamente la batería o si se ha llegado al límite de descarga. En esta etapa la tensión puede llegar a un valor mínimo de 24,77 V, debido a que un voltaje menor haría que el acumulador se descargue más que el porcentaje diseñado del 50 %.

5.1.4 Carga eléctrica

De acuerdo al sistema solar fotovoltaico diseñado, la carga está compuesta por dos bombillas y la nevera. La energía diaria diseñada del refrigerador E_{nev} , no se consume de forma constante, esta varía con una secuencia diferente, de acuerdo a los requerimientos eléctricos para cada periodo de tiempo.

$$E_{nev} = 900 Wh$$

La demanda eléctrica en las horas en que la Escuela está en actividad escolar E_1 es mayor que en resto del día, debido a que en estas 6 horas t_1 , es necesario abrir y cerrar varias veces la puerta de la nevera.

Durante las 18 horas restantes del día t_2 , denominadas como el periodo de bajo consumo, la energía requerida por el refrigerador E_2 , es menor, debido a que solamente se debe mantener la energía almacenada, realizando los ciclos de carga de una manera menos frecuente.

La suma de la energía demandada en la fase de actividad escolar E_1 y la energía durante el periodo de bajo consumo E_2 , debe ser igual a la energía diaria diseñada del refrigerador E_{nev}

$$E_{nev} = E_1 + E_2 \quad (47)$$

Se considera que durante las 6 horas diarias en las que los niños se encuentran en la Escuela t_1 (de 8 am a 2 pm), la energía requería en la fase de actividad escolar E_1 , es de 300 Wh. Y que la energía durante el periodo de bajo consumo E_2 , distribuida a lo largo de las otras 18 horas del día t_2 es de 600 Wh.

$$E_{nev} = 300 Wh + 600 Wh$$

Se estima que para ambos periodos de consumo de energía E_1 y E_2 , la carga de la nevera se realiza por ciclos, en los cuales el pulso de carga a potencia nominal tiene la misma duración t_n , durante todo el día y por lo tanto la misma energía consumida por ciclo E_{Cn} .

Dicha energía empleada durante el pulso activo del ciclo de carga del refrigerador E_{Cn} , es definida por la relación entre la potencia nominal de la nevera considerada en el diseño P_{nev} , y el tiempo de operación a potencia nominal t_n , (que se ha estimado en 15 minutos).

$$E_{Cn} = P_{nev} * t_n \quad (48)$$

$$E_{Cn} = 150 \text{ W} * \frac{1}{4} \text{ h}$$

$$E_{Cn} = 37,5 \text{ Wh}$$

La energía demandada por la nevera respecto a la duración de cada periodo de tiempo E_n , está dada por la energía consumida en el refrigerador para cada ciclo durante la fase de carga E_{Cn} y la cantidad de ciclos que se deben cumplir en cada fase C

$$E_n = E_{Cn} * C \quad (49)$$

Durante el periodo de actividad escolar, se calcula que la nevera funciona con 8 ciclos C_1 , cada uno de 45 minutos, dentro de las 6 horas que corresponden a t_1 .

$$C_1 = 8$$

Por lo tanto, la energía necesaria durante la fase de funcionamiento de la Escuela E_1 , está dada por la energía utilizada por la nevera en cada ciclo durante la fase de carga E_{Cn} y la cantidad de ciclos en dicha fase C_1

$$E_1 = E_{Cn} * C_1$$

$$E_1 = 37,5 \text{ Wh} * 8$$

$$E_1 = 300 \text{ Wh}$$

Para el periodo de bajo consumo, se estiman 16 ciclos C_2 , cada uno con una duración de 67,5 minutos, dentro las 18 horas de ese periodo t_2

$$C_2 = 16$$

La energía total requerida durante el periodo de bajo consumo E_2 , corresponde a la energía consumida por el refrigerador en cada ciclo de carga E_{Cn} y la cantidad de ciclos en dicho periodo C_2

$$E_2 = E_{Cn} * C_2$$

$$E_2 = 37,5 Wh * 16$$

$$E_2 = 600 Wh$$

Dentro del periodo de actividad escolar, el requerimiento de potencia corresponde a la potencia diseñada en AC P_{ac} , la cual es establecida de acuerdo a la potencia diaria de la nevera y de las bombillas.

$$P_{ac} = 190 W$$

La potencia de arranque del refrigerador calculada en el diseño dentro de la potencia máxima $P_{ac,max}$, se estima durante el primer segundo de los 15 minutos de la fase de carga.

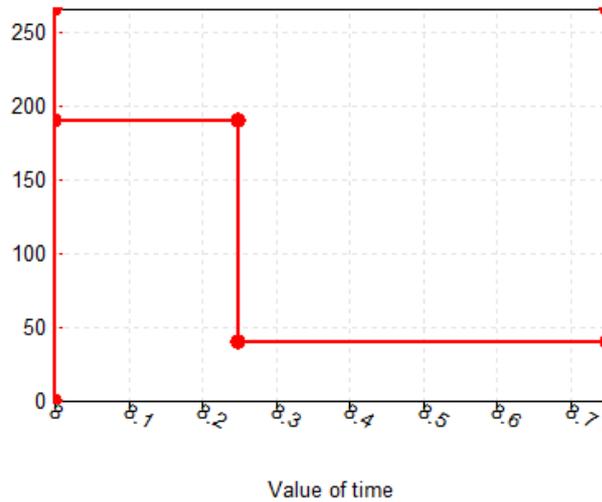
$$P_{ac,max} = 265 W$$

Y durante los restantes 30 minutos del ciclo (tiempo de reposo de la nevera), solamente es requerida la potencia las bombillas.

$$P_{bom} = 40 W$$

La Figura 38, presenta el comportamiento de la potencia estimada para la carga, durante un ciclo (45 minutos) del periodo de actividad en la Escuela, donde se observa el requerimiento de potencia para cada instante de tiempo.

Figura 38. Potencia requerida - Horas de operación de la Escuela



Fuente: Elaboración propia mediante el software TRNSYS 17

Para el periodo de bajo consumo, la potencia por cada ciclo, de acuerdo al diseño, está dada solamente por el refrigerador. Por lo tanto la potencia necesaria durante los 15 minutos de operación de la fase de carga t_n , corresponde a la potencia nominal la nevera P_{nev} .

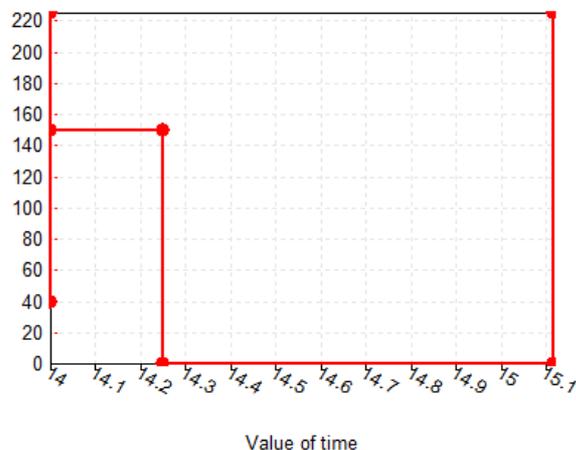
$$P_{nev} = 150 \text{ W}$$

El requerimiento de potencia máxima del refrigerador $P_{M,nev}$, se considera como el pico de carga presente durante el primer segundo del ciclo, dentro del periodo bajo consumo en la Escuela

$$P_{M,nev} = 225 \text{ W}$$

El tiempo de descanso de la nevera en este periodo se extiende a 52,5 minutos, tiempo en cual la demanda de potencia es nula. El comportamiento de uno de los ciclos en el periodo de bajo consumo de la Escuela, se observa en la Figura 39.

Figura 39. Potencia requerida - Horas de bajo consumo.



Fuente: Elaboración propia mediante el software TRNSYS 17

5.1.4.1 Perfil de consumo de la carga

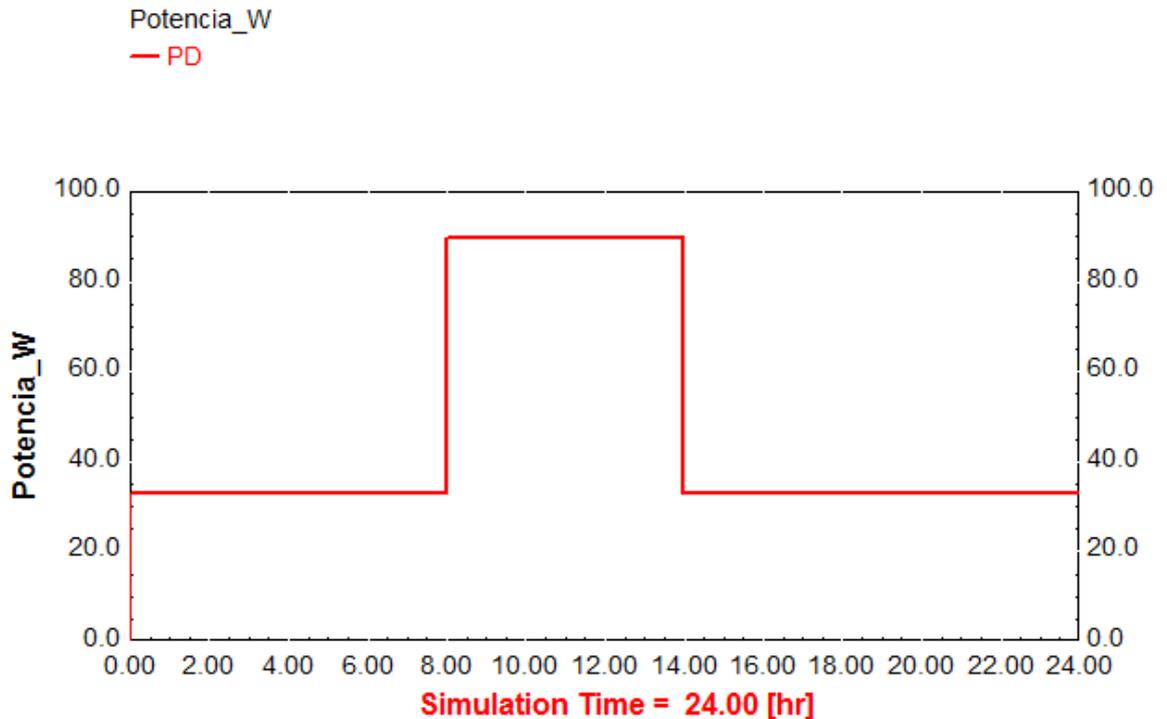
Como sistema para simular la carga, se emplea una función de fuerza TYPE14 con la cual se pueden generar perfiles de operación dependientes del tiempo. El TYPE 14h, es la versión adimensional de este modelo, con el cual se pueden definir las características de la carga del sistema diseñado, en las unidades que maneja el TYPE de regulación e inversión.

Esta subrutina repite un patrón periódico establecido, durante todo el tiempo de simulación indicado por el usuario; las características de dicho ciclo se establecen mediante un conjunto de puntos, indicando el valor de la función para cada instante de tiempo.

De acuerdo a la forma de operación de la carga diseñada, se requiere definir dentro de la secuencia de comportamiento diario 24 sub-ciclos, comprendidos por 8 sub-series para las horas de actividad escolar C_1 y 16 para el periodo de bajo consumo C_2 .

La cantidad de intervalos dentro del TYPE 14h es limitada a 20 conjunto de puntos de la forma (x, y), con los cuales solamente se podrían definir 3 sub - ciclos. Motivo por el cual se genera un perfil de consumo de potencia para todo el día P_D , el cual está conformado por la potencia promedio requerida para el periodo de actividad escolar y para la fase de bajo consumo (Figura 40).

Figura 40. Perfil de consumo diario de potencia - TYPE 14h



Fuente: Elaboración propia mediante el software TRNSYS 17

De acuerdo a las características definidas, diariamente desde las 0 hasta las 8 horas, y de las 14 a las 24 horas, se requiere una potencia de 600 Wh correspondiente a la energía durante el periodo de bajo consumo E_2 , por lo cual se establece dentro de esas 18 horas t_2 , un consumo constante de potencia P_2

$$P_2 = \frac{E_2}{t_2} \quad (50)$$

$$P_2 = \frac{600 \text{ Wh}}{18 \text{ h}}$$

$$P_2 = 33,3 \text{ W}$$

La media del consumo de potencia P_1 , para las 6 horas en las cuales la Escuela está en el periodo de actividad escolar t_1 , se determina en relación a los 240 Wh estimados para el consumo de las bombillas E_{bom} y a los 300 Wh demandados por la nevera en ese periodo de tiempo E_1

$$P_1 = \frac{E_{bom} + E_1}{t_1} \quad (51)$$

$$P_1 = \frac{240 \text{ Wh} + 300 \text{ Wh}}{6 \text{ h}}$$

$$P_1 = 90 \text{ W}$$

Cabe mencionar que las características del perfil de consumo diario modelado mediante el TYPE14h, se repiten continuamente durante todo el tiempo de simulación establecido.

5.1.5 Regulador - Inversor

Dentro de los modelos de Regulador - Inversor disponibles en TRNSYS, se encuentran subsistemas como el TYPE 48a, el cual funciona sin conexión al acumulador, en esta versión la salida es dada por la potencia de la matriz P_A , multiplicada por la eficiencia del regulador - inversor eff_1 , y enviada directamente a la carga P_L . El TYPE 48b realiza un monitoreo de carga a la batería y debe conectarse con el módulo de acumulador TYPE 47a. El TYPE 48c, donde se supervisa tanto el estado de la carga de del acumulador, como el estado de voltaje (Solar Energy Laboratory, 2012).

En este modelado se emplea la subrutina más completa de regulación e inversión, denominada TYPE 48d, la cual constituye los dos dispositivos de acondicionamiento de potencia. El primero de ellos es el regulador, que en sistemas con almacenamiento de energía, es el encargado de distribuir la energía DC (corriente directa) del conjunto de células solares hacia y desde el acumulador, realizando además un monitoreo del voltaje y del estado de carga de la batería. Para el segundo componente, el inversor, es quien transforma la energía de DC a AC (corriente alterna) y la envía a la carga (Solar Energy Laboratory, 2012).

Esta subrutina, parte de la potencia del arreglo de paneles solares P_A , para establecer la potencia desde o hacia el acumulador P_B . La tensión de la matriz fotovoltaica, se toma inicialmente igual al voltaje de la batería, luego, se recalcula la nueva potencia de la malla fotovoltaica P_A , desde regulador hasta que se satisfaga la ley de corrientes de Kirchhoff, haciendo que los voltajes del acumulador y la matriz solar, sean iguales (Solar Energy Laboratory, 2012).

En el *TYPE 48d*, se controla la fracción del estado de la carga (FSOC, por sus siglas en inglés) del banco de baterías F , mediante el límite superior del estado de carga cuando el acumulador se está cargando F_C .

$$F < F_C \quad (52)$$

El límite de del estado de carga para que la batería pueda empezar a descargarse después de estar cargada F_B , indica la prioridad para recargar el acumulador con cualquier salida del arreglo fotovoltaico sobre el requerimiento de la carga. Si el valor de este, es mayor que la fracción de estado de carga F , se denomina que Regulador - Inversor se encuentra en modo de “Carga Plena”.

$$F < F_B \quad (53)$$

Para desactivar el modo de “Carga Plena”, haciendo que la salida del regulador - inversor se envíe a la carga, la fracción del estado de carga debe estar entre F y F_B .

$$F > F_B \quad (54)$$

Adicionalmente para dar prioridad a al *Load* y no a cargar la batería, se debe mantener la siguiente relación entre F_B y el límite inferior de F cuando el acumulador se está descargando F_D

$$F_B < F_D \quad (55)$$

La descarga de la batería se permite mientras que la fracción del estado de carga F , sea mayor que el límite inferior de F para la descarga de del acumulador F_D

$$F > F_D \quad (56)$$

TRNSYS no considera directamente la simulación de sistemas autónomos, por lo cual para modelar este tipo de sistema, la fracción del estado de carga F , debe ser mayor que el límite superior de F para la carga la batería mediante la red eléctrica F_{grid}

$$F > F_{grid} \quad (57)$$

La carga del acumulador se permite, mientras que la tensión del sistema diseñado V , sea menor que el límite superior de V cuando la batería se está cargando V_c .

$$V < V_c \quad (58)$$

El acumulador se pone en carga lenta, una vez se alcance el punto en que la potencia desde o hacia la batería P_B y la tasa de carga permitida cuando el acumulador está en el límite de voltaje de V_C , denominada como P_C , sean iguales

$$P_B = P_C \quad (59)$$

Los valores de $P_{L, MAX}$ Capacidad de salida del inversor, P_C Taza de carga permitida cuando la batería está en el límite de voltaje V_C , P_D Potencia demandada por la carga, P_B Potencia desde o hacia el acumulador, $P_{B,MAX}$ Potencia máxima de entrada (carga) y $P_{B,MIN}$ Potencia mínima de salida hacia la batería (descarga) se determinan mediante los valores instantáneos de voltaje y corriente.

Dentro de los parámetros de entrada necesarios en esta subrutina, se considera la eficiencia del regulador eff como el 83 %, de acuerdo lo estimado en el diseño como factor de seguridad por pérdidas F_S

$$eff = 0,83$$

La eficiencia de inversión de DC – AC eff_1 , se establece como el 83 %

$$eff_1 = 0,83$$

Se permite la carga del acumulador hasta el 100 % mediante el límite superior de F cuando la batería se está cargando, denominada F_C

$$F_C = 1$$

De acuerdo a las condiciones de diseño se ha limitado la descarga máxima del acumulador al 50 %, mediante el límite inferior de F para la descarga de la batería F_D

$$F_D = 0,5$$

El Límite de F para que el acumulador pueda empezar a descargarse después de estar cargado F_B , se establece como cero, desactivando el modo de “Carga Plena” y priorizando los requerimientos de la carga eléctrica

$$F_B = 0$$

El límite máximo de potencia de salida del inversor P_I , es definido como el valor de la capacidad de potencia diseñada del regulador inversor P_{reg}

$$P_I = 500 W$$

Debido a que no se requiere de una inversión de AC - DC, la eficiencia de esta eff_2 es tomada como cero

$$eff_2 = 0$$

En el sistema diseñado no se contempla el uso de la red eléctrica, por lo cual se fijan como nulos los parámetros asociados a esta, como el valor de la corriente para la carga de la batería por parte de la red I_{grid}

$$I_{grid} = 0$$

Y el límite superior de la fracción del estado de carga, para alimentar el *Load* por parte de la red eléctrica F_{grid}

$$F_{grid} = 0$$

La corriente de entrada del generador solar I_A , es obtenida de la respuesta de los paneles solares fotovoltaicos mediante el *TYPE 94a* y la potencia requerida por la carga P_D , es generada a través la subrutina de *Load TYPE 14h*.

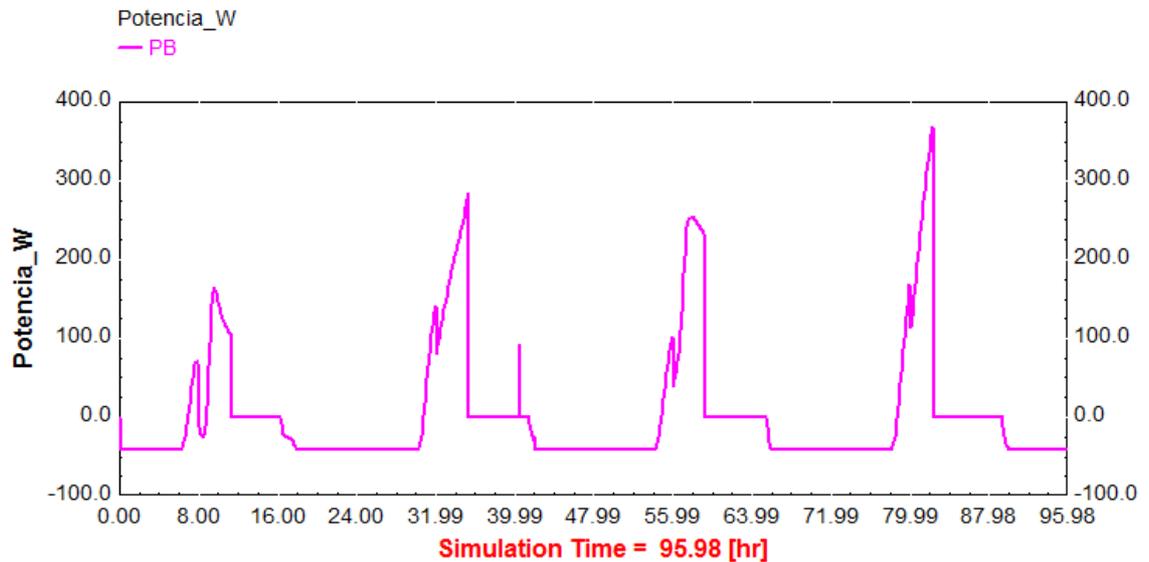
Con información del modelado del banco de baterías *TYPE 47b*, se determinan los valores de: Estado fraccional de carga de del acumulador F , Voltaje de la batería BV , Potencia máxima de carga del acumulador $P_{B,MAX}$, Potencia máxima de descarga de la batería $P_{B,MIN}$, Límite inferior del voltaje del acumulador durante la descarga V_D , Potencia correspondiente al límite inferior de la tensión del acumulador durante la descarga P_{VD} , Límite superior del voltaje de la batería durante la carga V_C y Potencia correspondiente al límite superior de tensión del acumulador durante la carga P_{VC} .

5.1.5.1 Resultados obtenidos del Regulador - Inversor

En esta subrutina se analiza en forma general el comportamiento de todo el sistema, debido a que el Regulador - Inversor distribuye la energía a través de cada uno de los elementos del modelo.

La Figura 41 presenta la salida de potencia del regulador - inversor desde o hacia la batería P_B ; cuando la potencia aumenta, indica el paso de potencia en dirección al acumulador, y cuando esta disminuye el regulador controla la descarga de la batería de acuerdo al requerimiento eléctrico de la carga.

Figura 41. Potencia del regulador-Inversor desde o hacia la batería – TYPE 48d



Fuente: Elaboración propia mediante el software TRNSYS 17

Durante las 18 horas del periodo de bajo consumo en la Escuela t_2 , el regulador permite una descarga de potencia continua en la batería con un valor de 40,12 W, donde para ese periodo de tiempo el perfil de consumo de carga establecido P_2 , indica un requerimiento de 33,3 W, con lo cual se evidencia el cumplimiento de la eficiencia de inversión eff_1 , estimada en 83 %.

Durante las horas del día en que se presenta radiación solar, respondiendo a lo estimado, la potencia generada por el arreglo fotovoltaico es enviada prioritariamente desde el regulador hacia el *Load* para abastecer la carga eléctrica.

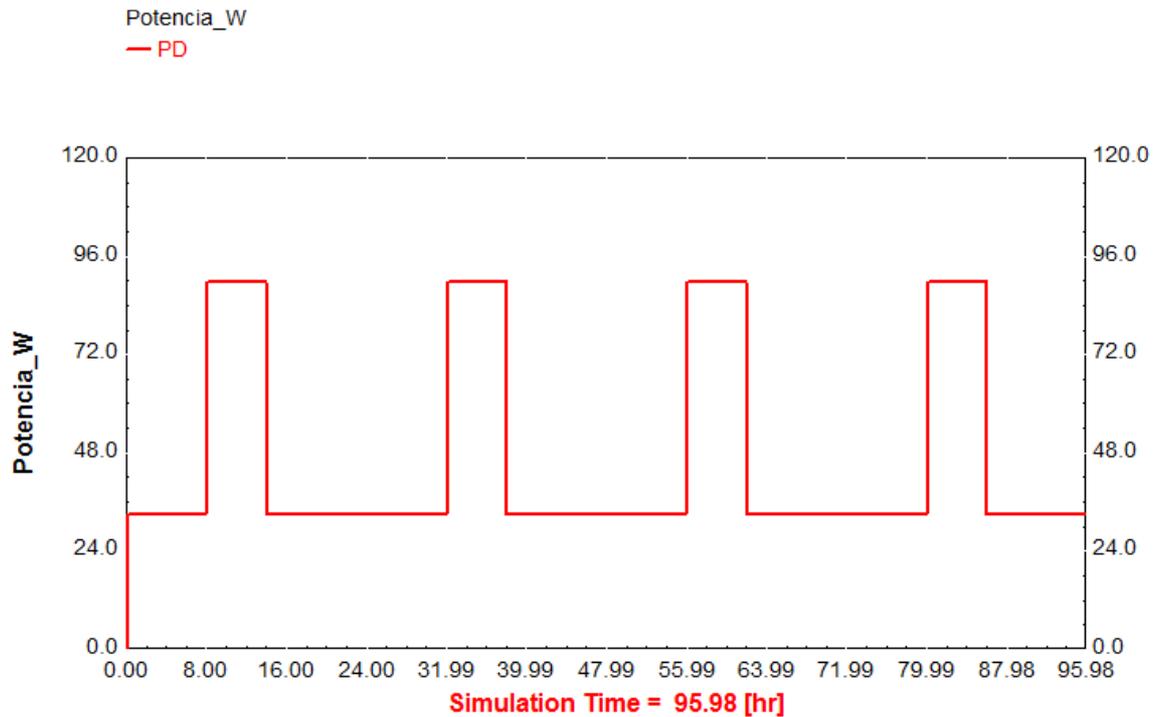
Cada mañana de acuerdo a la potencia excedente generada por los paneles solares, el acumulador comienza a ser recargado; a las 8 horas, cuando aumenta el requerimiento de potencia al comenzar el periodo de actividad escolar a 90 W (P_1), se pausa por unos minutos el proceso de carga en la batería, ante este repentino cambio, y posteriormente continúa su ritmo de carga.

Una vez el acumulador alcanza el 100 % del estado de carga, se mantiene en pausa hasta las 17 horas, momento en que la potencia generada por la matriz fotovoltaica es muy baja y la batería se convierte en la única fuente de alimentación para la carga eléctrica.

En la Figura 42 se observa la potencia que el Regulador - Inversor entrega a la carga, denominada P_D , durante los cuatro días analizados se evidencia que el sistema diseñado responde eficazmente a los requerimientos establecidos en el

perfil de consumo, 90 W para las horas de actividad escolar y 33,3 W durante el resto del día (considerado como periodo de bajo consumo).

Figura 42. Potencia del regulador-Inversor hacia la carga – TYPE 48d

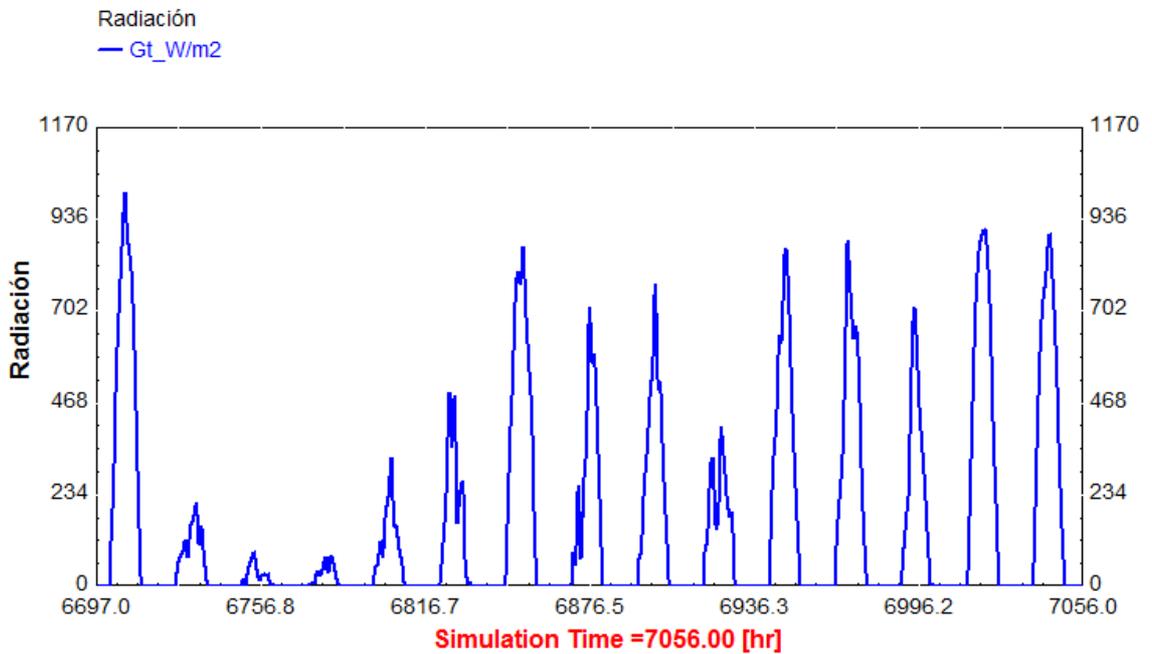


Fuente: Elaboración propia mediante el software TRNSYS 17

5.2 PERIODO DE BAJA RADIACIÓN

Luego de haber detallado el comportamiento del sistema solar fotovoltaico diseñado ante cuatro días con diferentes condiciones de radiación, en esta sección se analiza uno de los peores escenarios de radiación solar, esto es un periodo de 15 días del mes de octubre, en el que se presentan los valores más bajos de radiación del año promedio simulado, adicionalmente en este espacio de tiempo se presenta una radiación máxima y varias radiaciones medias (Figura 43), con las cuales se puede analizar de forma global el comportamiento del sistema ante diferentes condiciones de radiación.

Figura 43. Periodo de menor radiación solar



Fuente: Elaboración propia mediante el software TRNSYS 17

Los valores de radiación máxima para los 15 días analizados, se presentan en la Tabla 9. Donde de acuerdo a los parámetros establecidos como valores típicos de radiación (fijados en las características del piranómetro, Anexo 2), se consideran como:

- Totalmente soleados los días: primero, séptimo, octavo, noveno y del décimo primero al décimo quinto.
- Parcialmente nublados los días segundo, quinto, sexto y decimo.
- Totalmente nublados los días tercero y cuarto.

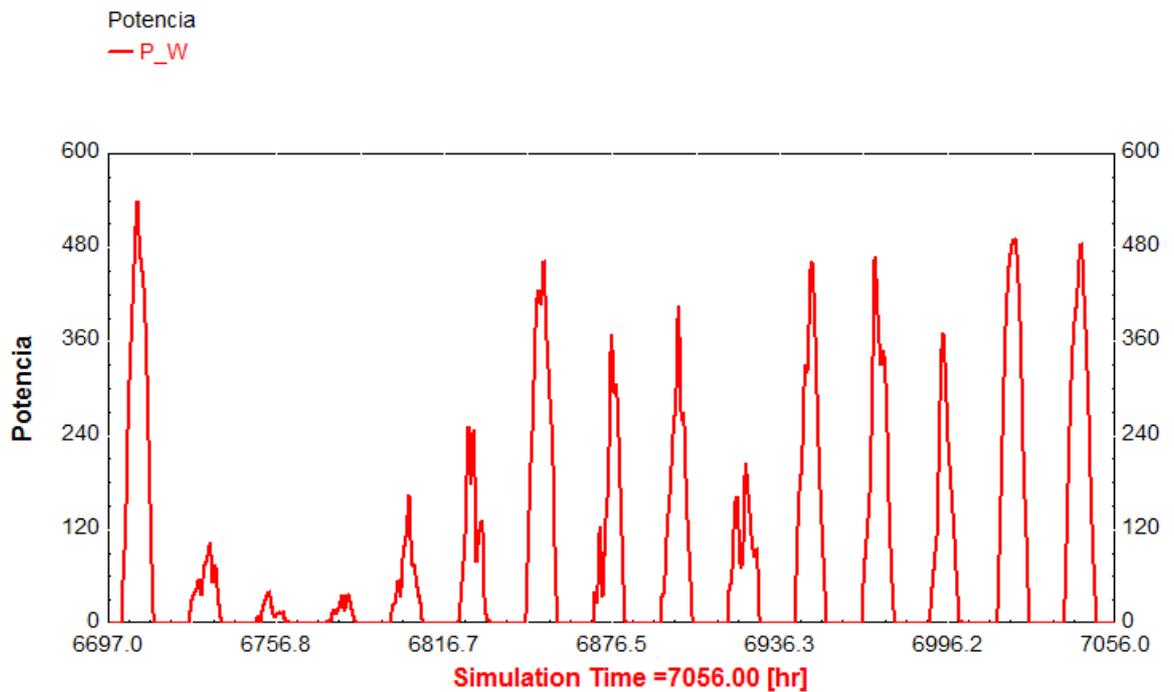
Tabla 9. Radiación solar máxima – Periodo de baja radiación

Día	Radiación solar máxima (W/m²)
1	996,2
2	208,8
3	81,86
4	77,69
5	328,7
6	495,5
7	857,2
8	708,7
9	771,3
10	379
11	854,7
12	876,7
13	650,7
14	910,8
15	900

Fuente: Elaboración propia

El comportamiento de la potencia máxima generada por la matriz fotovoltaica, durante el periodo de tiempo aquí analizado se presenta en la Figura 44, en la cual el valor máximo de radiación para este intervalo de tiempo, se alcanza el primer día donde se presenta una potencia de 539 W, y los valores mínimos se presentan los días tercero y cuarto, donde la radiación no supera los 100 W/m², y con la cual se genera una potencia máxima de 42,7 W.

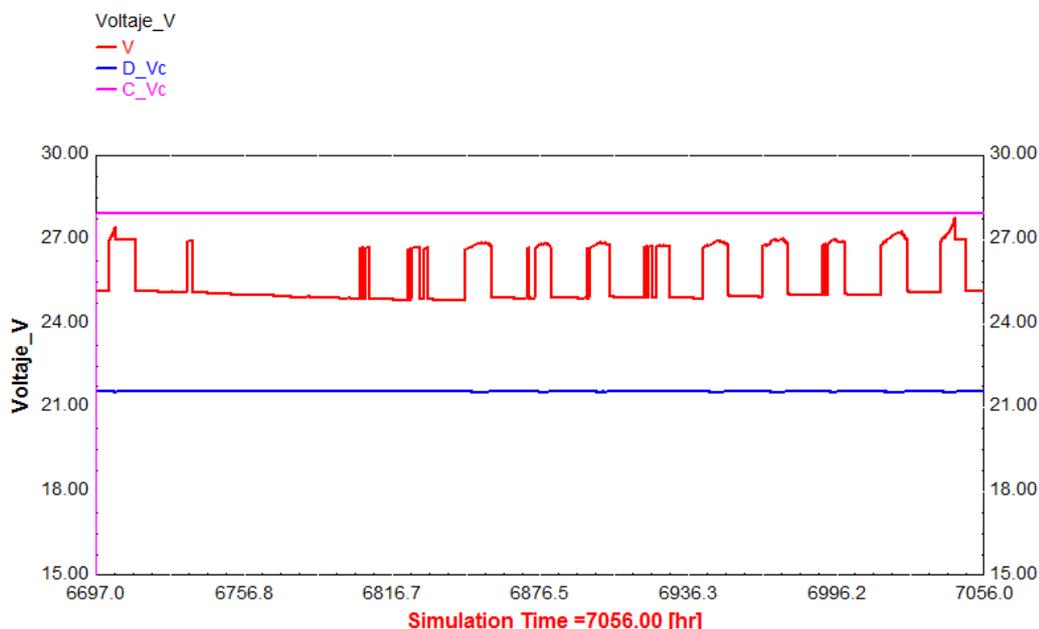
Figura 44 Potencia generada por la matriz fotovoltaica - Periodo de menor radiación solar



Fuente: Elaboración propia mediante el software TRNSYS 17

El comportamiento de la tensión en el sistema de acumulación, se observa en la Figura 45, donde el voltaje máximo de carga C_Vc (de color fucsia) y la tensión mínima de descarga D_Vc (línea azul), permanecen constantes en 27,9 V y 21,6 V respectivamente (al igual que en periodo de cuatros días analizado anteriormente).

Figura 45. Voltajes en la batería - Periodo de menor radiación solar



Fuente: Elaboración propia mediante el software TRNSYS 17

En cuanto al voltaje de operación V (de color rojo), se evidencia que en el primer día como la radiación solar incidente es óptima, se cumplen los 3 estados de carga. El segundo día solo después de las 14 horas, cuando el requerimiento de potencia se reduce (debido a que la demanda eléctrica entra en el periodo de bajo consumo), se genera una pequeña inducción de tensión a la batería.

Desde el tercer día hasta las 11 horas del quinto día, se genera una mínima cantidad de potencia por parte del arreglo fotovoltaico, en consecuencia el requerimiento de potencia es suplido por el acumulador, haciendo que se mantenga en fase de descarga y reduciendo de forma progresiva la tensión de la batería.

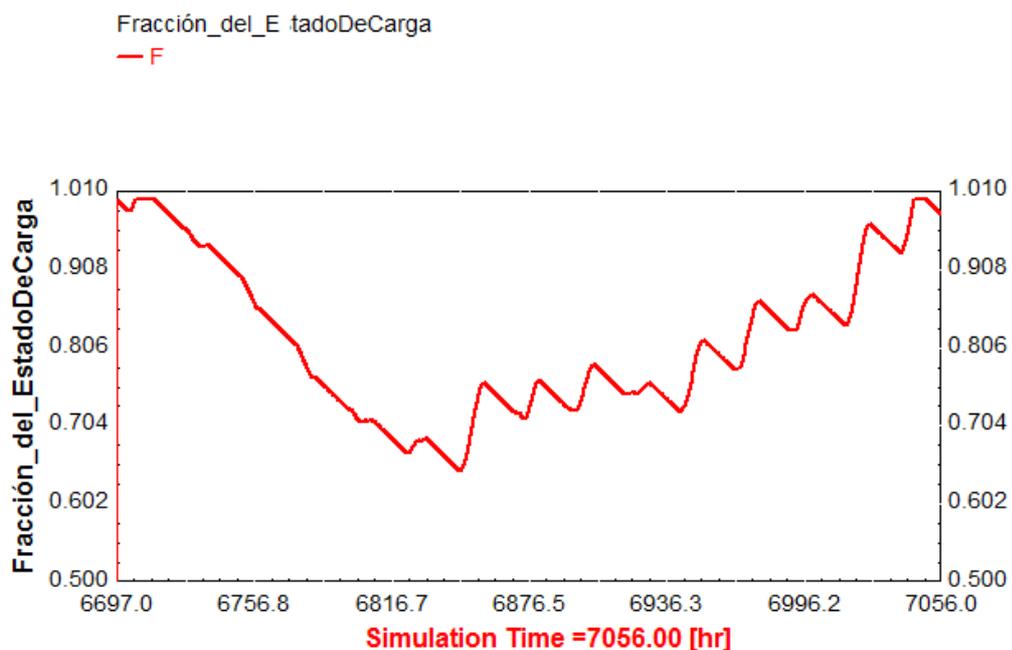
Durante los días siguientes, la radiación solar incidente es media con presencia de nubosidad, efectuando periodos muy cortos de carga al acumulador, por lo cual, en los momentos en que la radiación es baja, la carga eléctrica es abastecida por la batería, forzando su descarga progresiva hasta obtener un valor mínimo de voltaje de 24,84 V, en el amanecer del séptimo día.

A partir de ese momento, la radiación solar presenta un comportamiento más regular, por lo tanto los ciclos de carga del acumulador se van haciendo estables de acuerdo a la potencia disponible y el pico de voltaje en la fase de carga se

alcanza en el decimoquinto día, cuando el acumulador recupera el 100 % del estado de carga.

El estado de carga de la batería F , se presenta en la Figura 46, donde se muestra cómo en el primer día con la potencia generada por la matriz fotovoltaica, se abastece el requerimiento eléctrico de la carga, por lo tanto no es necesaria la energía del acumulador y este permanece totalmente cargado. A partir del anochecer de dicho primer día y hasta el amanecer del día séptimo, la descarga de la batería presenta una tendencia casi lineal debido a la poca radiación solar incidente, alcanzando una descarga máxima de 65,18 %; luego desde ese momento y de acuerdo a la potencia excedente generada por los paneles solares, se efectuó la recarga del acumulador, alcanzado el 100 % en el día quince a las 12:30 horas.

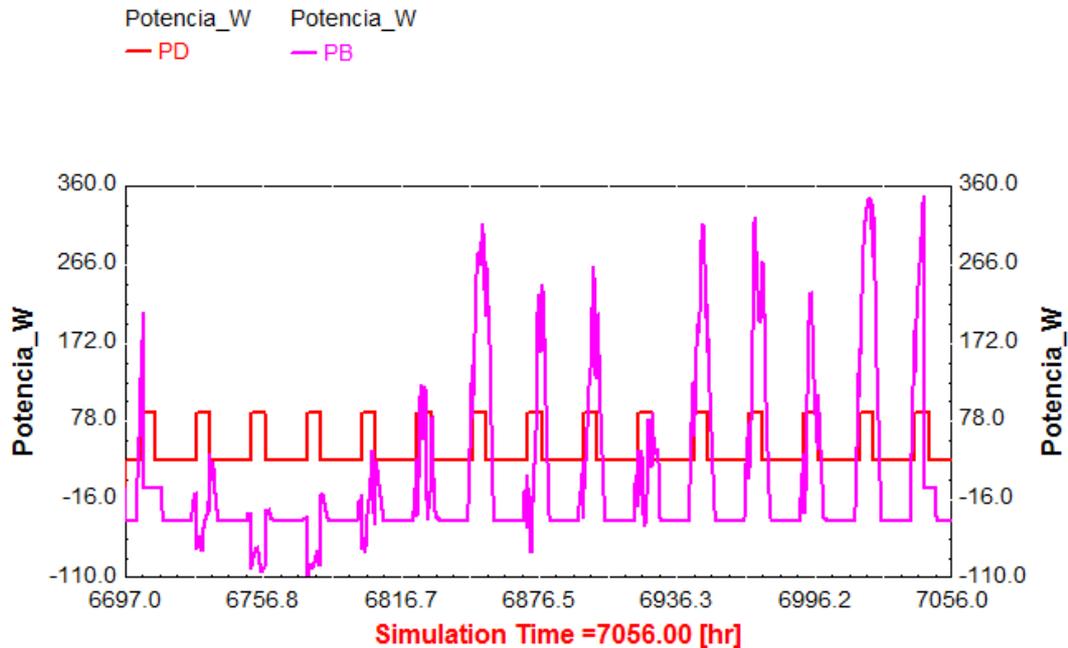
Figura 46. Estado de carga - Periodo de menor radiación solar



Fuente: Elaboración propia mediante el software TRNSYS 17

En la Figura 47 se analiza el comportamiento de la potencia enviada desde y hacia la batería P_B (de color fucsia), y como esta se relaciona con la tendencia de la potencia requerida por perfil de consumo de la carga P_D (color rojo).

Figura 47. Potencia requerida por la carga y Potencia de la batería - Periodo de menor radiación solar



Fuente: Elaboración propia mediante el software TRNSYS 17

El comportamiento de la potencia enviada por el regulador-inversor a la carga, de acuerdo al perfil requerido por la escuela (de color rojo), muestra como el sistema solar fotovoltaico diseñado responde adecuadamente los requerimientos eléctricos de esta, durante los cuatro días previstos como de reserva (a partir del segundo día).

Mediante la línea fucsia en sentido negativo, se muestra como durante los días tercero y cuarto (donde se presentan las radiaciones más bajas), la batería se mantiene de forma permanente entregando la potencia necesaria para abastecer la carga eléctrica. En los periodos de actividad escolar de estos dos días, el acumulador llega a ceder una potencia máxima de 108 W, obteniendo una eficiencia de inversión DC – AC eff_1 del 83 % al transformarse en 90 W para proveer el Load.

Luego de superar adecuadamente los requerimientos de potencia durante los días de reserva diseñados, la línea fucsia en sentido positivo muestra la potencia hacia la batería, donde se necesita de una semana para alcanzar el 100 % del estado carga, debido a que los días décimo y décimo tercero, presentan nuevamente bajas condiciones de radiación solar, haciendo que parte de la potencia demandada por la carga sea suministrada por el acumulador.

Tras hechas estas pruebas satisfactorias del modelado en el *software* TRNSYS, fue posible comprobar la operación adecuada del sistema solar fotovoltaico y el abastecimiento de energía a la carga de la Escuela, de acuerdo al diseño previsto.

6. CONCLUSIONES

- Se lograron los objetivos propuestos de este proyecto, en cuanto a haber demostrado las posibilidades y bondades de la modelación especializada de sistemas de operación relativamente compleja, de un sistema de aprovechamiento de la energía solar con alto sentido social. Así se facilitan tareas de diseño y de análisis de resultados simulados, pudiendo prever oportunamente, antes de implementar el sistema, ajustes oportunos para el mejor desempeño, evitando el riesgo de despilfarrar importantes recursos por no lograr el propósito esperado.
- El modelo de sistema solar fotovoltaico diseñado, es efectivo para reconocer la suficiencia en atención a las necesidades eléctricas primordiales de la Escuela El Cardonal, donde de implementarse este sistema, se lograría continuidad del plan nutricional de los estudiantes. Por lo tanto, es un diseño de sistema solar fotovoltaico que puede ser considerado para replicarlo en regiones con similares condiciones de escaso desarrollo y falta de electricidad, apoyando además planes de formación educativa en zonas rurales desfavorecidas.
- La ventaja del diseño complementado con un *software* especializado como el TRNSYS, es facilitar el modelado y el manejo de variables, buscando mejorar el desempeño, así como el análisis del funcionamiento y conocer respuestas del sistema en simulación. De esta manera el diseño podrá ser adaptado sin mayor dificultad a otras instituciones educativas principalmente rurales que presenten condiciones similares de radiación solar y potencia requerida. Con lo cual puede favorecerse, no solamente el desempeño escolar, sino más aún importante, los escenarios de alimentación infantil para niños en condición de vulnerabilidad.
- Se determina que la Escuela cuenta con un recurso solar moderado, por debajo del promedio nacional, siendo una de las razones la nubosidad relativamente alta que se presenta en la vereda Ruche (altiplano de Ramiriquí), lo cual se manifiesta como oscilaciones de los valores de radiación; sin embargo, aún en estas condiciones, este proyecto demuestra que dicho potencial energético local podría ser bien aprovechado para el propósito planteado.

- Se elige energía solar fotovoltaica, por tratarse de una de las energías menos contaminantes, que aprovecha un recurso renovable existente en el sitio y sin costos de combustible alguno, de fácil operación y mantenimiento, además, de no ocasionar en el sitio de operación, ningún riesgo para los seres humanos ni para el entorno. Los equipos necesarios en una instalación solar fotovoltaica son relativamente pequeños y livianos, por lo que podrían ser transportados sin mayor dificultad, a pesar, en este caso, del estado regular de la vía de acceso a la Escuela. Adicionalmente, la vida útil de los elementos requeridos es alta, de 5 a 10 años para las baterías y 30 años para los paneles solares (Pereda, 2005), lo que amortiguaría en parte el costo relativamente alto del sistema fotovoltaico, sumado al hecho de un mantenimiento preventivo, sencillo y ocasional, requiriendo muy pocos desplazamientos a la institución de personal calificado para mantener al sistema.
- La instalación y operación en la Escuela de una estación meteorológica y el registro de datos durante un año de radiación solar y demás variables (temperatura, humedad, velocidad del viento), otras a cargo de los mismos escolares (variación de condiciones climáticas), constituye una experiencia valiosa, no solamente por permitir conocer el recurso solar y otra información del lugar, sino también por el aspecto pedagógico relacionado. El proceso realizado de calibración de la estación meteorológica, permite determinar la inexactitud de los datos registrados por el mesurando, lo cual posibilita el ajuste correspondiente de la información, garantizando la confiabilidad de los datos y los resultados dados por el modelo.
- El sistema desarrollado en TRNSYS emplea un seguidor del punto de operación a máxima potencia de los paneles solares simulados, lo que permite evaluar los valores de voltaje y corriente óptimos para el funcionamiento del modelo. De esta forma se pueden dar indicaciones más precisas para un mejor diseño del sistema solar, y así lograr, en caso de implementarse, un funcionamiento cercano a lo óptimo, con un buen aprovechamiento de la energía solar disponible y, a la vez, atendiendo debidamente y sin riesgos la demanda de diseño.
- El modelado de la matriz fotovoltaica hace posible, analizar la capacidad de este sistema para transformar la energía radiante del sol en energía útil con la potencia aprovechable que generarían los paneles solares considerados.

- A través de la simulación del banco de baterías, se puede analizar y confirmar un comportamiento adecuado para la acumulación de energía diseñada, como suficiente para la demanda prevista, evidenciándose además la potencia conveniente que se obtendría por parte de la malla fotovoltaica planteada.
- La caracterización que se hace del Regulador – Inversor permite determinar la potencia que la carga eléctrica requiere de las baterías a cada instante, y la forma como estas absorben energía con el tiempo para recargarse y garantizar el cumplimiento de los días de reserva.
- El análisis detallado del comportamiento de la nevera no es fácil por su operación por ciclos, pero con el software TRNSYS se puede simular y evaluar la tendencia de esta, demostrando la capacidad del sistema solar fotovoltaico diseñado para operar adecuadamente ante los diferentes requerimientos eléctricos de carga, incluso mostrando suficiencia para soportar el pico de corriente que se presenta en el arranque del refrigerador durante cada ciclo.
- Mediante los resultados obtenidos en el modelado, se demuestra que el sistema solar fotovoltaico diseñado, es eficaz para suplir los requerimientos eléctricos de la carga estimada, en especial lo relacionado con la conservación de los alimentos, logrando de esta forma, demostrar su potencialidad en favor del bienestar de los niños.
- Como valor agregado, se comprueba la validez de TRNSYS como herramienta para estimar la producción de energía en sistemas solares fotovoltaicos y para optimizar su diseño, con lo cual, en caso de ser instalado el sistema, se podría asegurar una mayor eficacia en el uso de los recursos naturales disponibles.

7. RECOMENDACIONES

- El registro de datos meteorológicos, tomados directamente en el sitio de estudio, permite efectuar un diseño más ajustado al comportamiento real de la radiación, sin embargo, es necesario verificar que la información reportada sea fiable y se encuentre dentro de los parámetros, evitando inconvenientes de sub-dimensionamiento, para cuando el sistema sea implementado.
- En el diseño del sistema solar fotovoltaico, se deben tener en cuenta las pérdidas en cada uno de los elementos (paneles fotovoltaicos, regulador-inversor y baterías), para de esta manera generar una adecuada fiabilidad en la operación del sistema, además garantizando suficiencia energética.
- Para el adecuado modelado en el *software* TRNSYS, es necesario analizar detenidamente cada uno de los sub-modelos asociados a cada TYPE, eligiendo el apropiado para recrear las características de cada uno de los equipos diseñados. Además, se debe tener en cuenta que en algunas subrutinas, las unidades en las que se entregan los resultados, no son las mismas que las se manejan a la entrada de otros TYPEs, requiriendo el uso de otros módulos para efectuar la conversión de unidades.
- Como trabajo futuro se podría construir el sistema diseñado, comparando la respuesta computacional con la forma de operación real, para validar el comportamiento del modelo. En el caso específico de la Escuela El Cardonal, teniendo como base el convenio firmado con la Alcaldía de Tibaná, sería de gran oportunidad para la Universidad dar su apoyo a un proyecto que ya estando diseñado se haga realidad una vez se cuente con el presupuesto que se asigne con este propósito, seguramente pudiendo contar con recursos adicionales provenientes de los planes e inversiones nacionales en mejoramiento de infraestructura.
- También se propone generar un estudio de viabilidad económica del sistema solar fotovoltaico para diferentes escuelas rurales en condiciones similares a las de la Escuela El Cardonal. De esta forma se podría ayudar a mejorar la calidad de vida en muchas regiones de Colombia que todavía no cuentan con un buen servicio eléctrico, en particular, favoreciendo a muchos niños de las diferentes instituciones educativas rurales.

- Cabe mencionar que para lograr el adecuado apoyo gubernamental y de otras instituciones en la ejecución de este tipo de proyectos, se recomienda dar a conocer ampliamente que se cuenta ya con herramientas como esta.
- En caso de que el sistema solar fotovoltaico diseñado fuera a ser implementado, sería necesario tener en cuenta su mantenimiento adecuado, por lo que es recomendable el suministro de un manual al respecto, con instrucciones, por ejemplo: que para una adecuada operación de los paneles solares estos necesitan estar libres de suciedad, las baterías no deben tener ningún objeto sobre ellas y requieren estar en un lugar fresco y seco; adicionalmente, evitar la incidencia de luz solar directa y la caída de agua en el regulador - inversor.

Para minimizar daños por uso y al tener partes expuestas a la intemperie, se deben considerar los procesos de mantenimiento, limpieza y monitoreo; el mantenimiento preventivo para los módulos solares debe consistir por lo menos, en inspeccionar visualmente cada 6 meses posibles daños, como roturas del vidrio, acumulación de agua dentro del panel, tornillos faltantes u oxidados y presencia de sombra o manchas.

- Conocidas las capacidades y bondades del software TRNSYS, podría considerarse convertirlo en un instrumento de uso regular en la Maestría de Ingeniería, dada su utilidad para los estudios de aplicación de la energía solar.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALONSO ABELLA, Miguel. Dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos autónomos. Madrid: Laboratorio de energía Solar, CIEMAT. {En línea} {24 de junio de 2014}. Disponible en: http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/eoi.../componente45301.pdf.

ALTA CONSEJERÍA PRESIDENCIAL PARA LAS REGIONES Y LA PARTICIPACIÓN CIUDADANA. Presidencia de la República, Departamento BOYACÁ. Diciembre, 2011.

ÁLVAREZ CASTAÑEDA, William Fernando. Estudio numérico del potencial energético eólico en Tunja, Colombia. Bogotá, 2013. Trabajo de investigación (Magister en Ingeniería con énfasis en energía alternativa). Universidad Libre. Facultad De Ingeniería. Instituto De Postgrados.

BÆKHØJ KJÆR, Søren. Design and Control of an Inverter for Photovoltaic Applications. Dinamarca, 2005, p 18. Trabajo de investigación (Doctor of Philosophy in Electrical Engineering). Aalborg University. Institute of Energy Technology.

BLAIR, Nate; et al. System Advisor Model, SAM 2014.1.14: General Description. NREL, 2014.

BURGOS MELLADO, Claudio Danilo. Estimación del estado de carga para un banco de baterías basada en modelación difusa y filtro extendido de Kalman. Chile, 2013. Trabajo de investigación (Magister en ciencias de la ingeniería mención eléctrica). Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería Eléctrica.

CASAS, OSPINA. Favio, Tierras – Soporte de la seguridad eléctrica. Bogotá. Segeléctrica Ltda., 1998.

CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe); CLUB DE MADRID; GTZ; PNUD. Contribución de los servicios energéticos a los Objetivos de Desarrollo del Milenio y a la mitigación de la pobreza en América Latina y El Caribe. Santiago de Chile, 2009, Naciones Unidas, 2009.

CHANDÍA ABUÍN, Eduardo Andrés. Diseño y análisis técnico-económico de una central solar termoeléctrica con almacenamiento térmico en el norte de Chile. Santiago de Chile, 2012. Trabajo de grado (Magister en ciencias de la ingeniería mención mecánica). Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería Civil Mecánica.

CRUZ LAZO, Edwin Gabriel. Diseño y simulación del comportamiento de un sistema híbrido de potencia. Perú, 2010. Trabajo de investigación (Ingeniero Mecánico — Eléctrico). Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Área Departamental de Ingeniería Mecánico-Eléctrica.

CSBA (California School boards association). {En línea}. {29 julio de 2013}. Disponible en <http://www.csba.org/Services/Services/DistrictServices/SolarSchoolsProgram.aspx>

DAVIS INSTRUMENT. Manual Vantage Pro 2 console Book, 2004.

DELGADO TRUJILLO, Eduardo. Diseño de una instalación y alimentación eléctrica de un comedor industrial por medio de generación distribuida. México, 2010. Trabajo de investigación. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería. Departamento Ingeniería Eléctrica – Electrónica.

DEPARTMENT OF INDUSTRY, Australian Government. {En línea}. {07 mayo de 2013}. Disponible en <http://ee.ret.gov.au/node/1294>

DINIZ, A.S.A.C., et al. The Important Contribution of Photovoltaics in a Rural School Electrification Program. En, Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion. Vol. 2, (May 2006); p. 2528 – 2531.

EGIDO AGUILERA, Miguel Ángel; CAAMAÑO MARTÍN, Estefanía. Energía solar fotovoltaica para la electrificación del medio rural. En Energía Participación y sostenibilidad. Tecnología para el desarrollo humano. Primera edición (Feb 2006); p 157 – 172.

ENERDEX. Inversores. {En línea}. {30 enero de 2014} disponible en: <http://enerdex.com/es/about-renewable-energy/power-inverters/>

ENERGÍAS RENOVABLES. La OEI presenta en Madrid el proyecto “Luces para aprender”. {En línea}. {10 mayo de 2012}. Disponible en <http://www.energias-renovables.com/energias/renovables/index/pag/panorama/colleft/colright/panorama/tip/articulo/pagid/20369/botid/69/len/es/>.

ESCUELA TÉCNICA N° 17 CORNELIO SAAVEDRA, Departamento de Eléctrica. Proyecto SOLARES, Escuelas con Energía. {En línea}. {23 octubre de 2011}. Disponible en <http://www.oni.escuelas.edu.ar/2005/GCBA/803/>

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). Estudio comparativo de los datos sobre consumo de alimentos de las encuestas en los hogares y de las hojas de balance de alimentos, Estudio FAO: Desarrollo económico y social No 34. Roma, 1983.

FERNÁNDEZ FERICHOLA, Julio. Caracterización de módulos fotovoltaicos con dispositivo portátil. España, 2009. Trabajo de investigación (Ingeniería Técnica en Electricidad). Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de Tecnología Electrónica.

FIRMANDA AL RIZA, Dimas; Syed Ihtsham Ul Haq Gilani, Mohd. Shiraz Bin Aris. Measurement and Simulation of Standalone Solar PV System for Residential Lighting in Malaysia. En EFEEA'10 International Symposium on Environment Friendly Energies in Electrical Applications (Nov 2010).

GARCÍA MÁRQUEZ, Rogelio. Puesta a tierra de instalaciones eléctricas. Alfaomega, 1999.

GIMENO SALES, Fco. J. SEGUÍ CHILET, Salvador. ORTS GRAU, Salvador. Convertidores Electrónicos: Energía solar fotovoltaica, aplicaciones y diseño. España: Universidad Politécnica de Valencia, 2002.

GOBERNACIÓN DE BOYACÁ. Despacho de Gobernador-Hacienda-Desarrollo Humano. Boletín extraordinario 24 de marzo de 2009. {En línea}. {02 abril de 2011}. Disponible en <http://www.boyaca.gov.co/?idcategoria=3633>.

GONZÁLEZ MARCELO, Raúl. Modelado y propuestas para el control de un lazo de colectores cilindro parabólicos. España, 2009. Trabajo Fin de grado (Master en Automática, Robótica y Telemática). Universidad de Sevilla. Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática.

GREEN PEACE. Red de escuelas solares. {En línea}. {25 octubre de 2011}. Disponible en <http://redsolar.greenpeace.org/red.htm>

GUASCH MURILLO, Daniel. Modelado y análisis de sistemas fotovoltaicos. España, 2003. Trabajo de investigación (Tesis doctoral). Univrsitat politècnica de Catalunya. Departament d'Enginyeria Electrònica.

GUTIÉRREZ, José Antonio. La energía solar: situación y aplicaciones en el sector agrario. En Dossier Nuevas Tecnologías. Vida rural (Oct 2002); p 34 – 45.

HANKINS, Mark; JACKSON, Frank. Introducing PV in Solmali Oasis Town. En Home power. No 82 (Abr-May, 2001); p. 22-28.

HERNÁNDEZ DOMÍNGUEZ, Sixto. Una inversión interesante que ayuda a combatir el cambio climático la energía solar fotovoltaica. En Ciencia y medio ambiente. Antena de telecomunicación. No 166 (Dic 2006); p 58-64.

HORNO GARCÍA, Elena Carmen. Electrificación de escuelas públicas rurales de Chalaco con energía solar fotovoltaica. En Anales de mecánica y electricidad (May-Jun, 2007); p 36 – 42.

INSTITUTO DE ENERGÍA SOLAR. Norma técnica universal para sistemas fotovoltaicos domésticos Versión 2, Thermie B: SUP-995-96. España, 2001.

JOACHÍN BARRÍOS, Carmencita De Los Ángeles. Diseño de un sistema solar fotovoltaico aislado, para el suministro de energía eléctrica a la comunidad rural buena vista, san marcos. Guatemala, 2008. Trabajo de grado (Ingeniera química). Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería.

KLINETOB, Sarah. The evaluation of TRNSYS in creating advanced energy management systems in buildings. USA, 2009. Trabajo de investigación (Master of Science). The Pennsylvania State University. The Graduate School College of Engineering.

LALWANI, Mahendra; KOTHARI, D.P.; SINGH, Mool. Investigation of Solar Photovoltaic Simulation Softwares. En International journal of applied engineering research, dindigul. Vol. 1, No 3 (2010)

LLAMOSAS, Luis Enrique; MEZA, Luis Gregorio; GALLEGOS, Hugo Armando. Aspectos fundamentales para el diseño de procedimientos de calibración para laboratorios de metrología con base en la Norma NTC-ISO-IEC-17025. En Scientia et Technica. No 26 (Ago 2014); p. 251 – 256.

LUCES PARA APRENDER. {En línea}. {10 mayo de 2012}. Disponible en <http://lucsparaprender.org/web/escuelas/>

MARTÍNEZ CERRO, Bianca. Instalación solar fotovoltaica aislada. España, 2011. Tesis de maestría en Telecomunicaciones (E. T. de Telecomunicacions, especialitat en Sistemes Electrònics). Universitat Politècnica de Catalunya. Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú.

MARTÍNEZ ESPINOZA, Jean Daniel. Evaluación económica de un sistema fotovoltaico en punta arenas con diseño de emulación de potencia suministrada por paneles solares. Punta Arenas, Chile, 2011. Trabajo de investigación (Ingeniero de ejecución en electricidad). Universidad de Magallanes. Facultad de Ingeniería. Departamento de electricidad.

MARTÍNEZ REQUENA, Juan J.; TOLEDANO GASCA, José C. Puesta a tierra en edificios y en instalaciones eléctricas. Paraninfo, 2001.

MINISTERIO DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE DE ESPAÑA. Proyecto de escuelas solares. {En línea}. {20 febrero de 2013}. Disponible en http://www.magrama.gob.es/es/ceneam/programas-de-educacion-ambiental/programas-de-otras-entidades/escuelas_solares.aspx

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA DE PERÚ. Guía del consumo y facturación de energía eléctrica cliente regulado BT5 B residencial (Abril, 2009). Disponible en <http://intranet.minem.gob.pe/AppWeb/DGE/CalculoConsumo>

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Memorias al Congreso de la República 2009 – 2010. Sector energía eléctrica (2010). Disponible en [http://www.minminas.gov.co/minminas/downloads/UserFiles/File/Memorias/Memorias_2010/04-energia_electrica%20\(2\).pdf](http://www.minminas.gov.co/minminas/downloads/UserFiles/File/Memorias/Memorias_2010/04-energia_electrica%20(2).pdf)

MORALES OSORIO, Nelson. Sistemas de puestas a tierra. ProCobre, 1999.

MUHAIMIN MAHMUD, Abdul. Evaluation of the Solar Hybrid System for Rural Schools in Sabah, Malaysia. En 2010 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon). (Nov – Dic, 2010); p. 628 – 633.

MURILLO LÓPEZ, William; BANGUERO PALACIOS, Edison; ARAGÓN CARDONA, Gonzalo. La energía solar fotovoltaica (Una alternativa para mejorar la calidad de vida en nuestra región). En Investigación biodiversidad y desarrollo. Universidad Tecnológica del Chocó “D. L. C.”, No. 25 (Jul – Dic, 2006); p. 97-100. ISSN 1657 – 3498

NEWPORT, Introduction to Solar Radiation. {En línea}. {18 diciembre de 2011}. Disponible en <http://www.newport.com/Introduction-to-Solar-Radiation/411919/1033/content.aspx>

NIEVES HURTADO, Antonio; DOMÍNGUEZ SÁNCHEZ, Federico C. Probabilidad y Estadística para Ingeniería: Un enfoque moderno. México: Mc Graw Hill, 2009. ISBN 9701068904.

NINA E., Edgar. DIMENSIONAMIENTO Y EVALUACIÓN ECONÓMICA DE SFV. En XVIII Simposio Peruano de Energía Solar, 14 al 18 de noviembre de 2011. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú. Centro de Energías Renovables y Uso Racional de la Energía.

OEI, Luces para aprender. {En línea}. {19 septiembre de 2012} disponible en: <http://www.oei.es/Lucesparaaprender.pdf>

ORTEGA RODRÍGUEZ, Mario. Energías renovables. Ediciones Paraninfo, 2001.

OSITELU, Oladipo; CETINER, Ruveyda; BAYRAKCI, Mesude; TAMMINEEDI, Charith; JAGARLAMUDI, Vasudev. Design and Simulation of a Distributed PV System for Pennsylvania State University. USA, 2010. The Pennsylvania State University. Penn State College of Earth and Mineral Sciences.

PEREDA SOTO, Isidro Elvis. Celdas fotovoltaicas en generación distribuida. Santiago de Chile, 2005. Trabajo de investigación (Ingeniero Civil Industrial Mención Electricidad). Pontificia universidad católica de Chile. Escuela de ingeniería. Departamento de ingeniería eléctrica.

PÉREZ y OSORIO, 2002. Citado por PRIAS CAICEDO, Omar Fredy. Programa de uso racional y eficiente de energía y fuentes no convencionales (PROURE). En Informe final Plan de acción 2010-2015. Ministerio de Minas y Energía República de Colombia (2010); p 61.

REDFE. Red de fuentes de energía CONACYT: Estado del arte de la investigación en fuentes de energía y políticas públicas. México. {En línea}. {17 junio de 2014}. Disponible en <http://www.redfe.org.mx/es/images/redfe/estado-de-arte-totalredfe.pdf>.

RUSSO, Víctor Santiago. El Proyecto de Energías Renovables en Mercados Rurales (PERMER). En Petrotecnia (Ago, 2009); p 40 – 46.

SÁNCHEZ MAZA, Miguel Ángel. Energía solar fotovoltaica. México: Limusa, 2010.

SOLAR BC. {En línea}. {15 julio de 2013}. Disponible en <http://www.solarbc.ca/install/schools>

SOLAR ENERGY LABORATORY, University of Wisconsin-Madison. TRNSYS 17 - Getting Started, Vol. 1. USA, 2012. Ed. Madison, Wisconsin.

SOLAR ENERGY LABORATORY, University of Wisconsin-Madison. TRNSYS 17 - Simulation Studio, Vol. 2. USA, 2012. Ed. Madison, Wisconsin.

SOLAR ENERGY LABORATORY, University of Wisconsin-Madison. TRNSYS 17 - Standard Component Library Overview, Vol. 3. USA, 2012. Ed. Madison, Wisconsin.

SOLAR ENERGY LABORATORY, University of Wisconsin-Madison. TRNSYS 17 - Mathematical Reference, Vol. 4. USA, 2012. Ed. Madison, Wisconsin.

SOLAR ENERGY LABORATORY, University of Wisconsin-Madison. TRNSYS 17 - Programmer's Guide, Vol. 7. USA, 2012. Ed. Madison, Wisconsin.

SOLAR ENERGY LABORATORY, University of Wisconsin-Madison. TRNSYS 16 - Input - Output - Parameter Reference, Vol. 4. USA, 2005. Ed. Madison, Wisconsin.

TAMMINEEDI, Charith. Modeling battery-ultracapacitor hybrid systems for solar and wind applications. Pennsylvania (USA), 2011. Trabajo de grado (Master of Science in Energy and Mineral Engineering). The Pennsylvania State University.

THE NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY (NIST) REFERENCE ON COSTANTS, UNITS, AND UNCERTAINTY. {En línea}. {7 noviembre de 2013}. Disponible en <http://physics.nist.gov/cuu/Constants/index.html>

TIBANÁ, Alcaldía Municipal. {En línea}. {30 enero de 2014} disponible en: http://tibana-boyaca.gov.co/informacion_general.shtml.

TIBANÁ, Informe de gestión. Alcaldía municipal: Administración 2008-2011. Diciembre, 2011.

UNIVERSIA, Honduras. Zamorano instala sistemas solares en escuelas rurales. {En línea}. {14 abril de 2011}. Disponible en <http://noticias.universia.hn/en-portada/noticia/2011/04/14/812101/zamorano-instala-sistemas-solares-escuelas-rurales.pdf>

UPME (Unidad de planeación minero energética), 2005. Citado por Mundo Andino The Andean World. {En línea}. {29 agosto de 2010}. Disponible en <http://www.mundoandino.com/Colombia/Renewable-energy-in-Colombia>.

UPME (Unidad de planeación minero energética). Guía de Especificaciones de Sistemas Fotovoltaicos. Unión Temporal ICONTEC – AENE, 2003.

VAN CAMPEN, B.; GUIDI, D.; BEST, G. Energía solar fotovoltaica para la agricultura y desarrollo rural sostenibles. Documento de Trabajo sobre Medio Ambiente y Recursos Naturales, No. 3. FAO, 2000.

VISIÓN HISPANA, Newspaper. Escuelas Locales Utilizarán Energía Solar Con Ayuda De PG&E. USA (29 enero 2011). Disponible en http://www.visionhispanausa.com/index.php?option=com_content&view=article&id=559:escuelas-locales-utilizaran-energia-solar-con-ayuda-de-pgae-&catid=38:educacion&Itemid=29

ZANESCO, Izete; MOEHLECKE, Adriano; SEVERO, Tiago C.; SANTOS JÚNIOR, Silvio L. R.; ZENZEN, Eduardo A.; EBERHARDT, Dario. Implementação e análise de sistemas fotovoltaicos autónomos. En Anais do X CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA. Vol. 1, (Brasil, 2004); p 530 – 541.

ANEXOS

Anexo 1. Componentes de la estación meteorológica

Marca: *DAVIS* - Modelo: *Vantage Pro 2*

Elemento	Vista frontal	Vista posterior
Copas del anemómetro		
Colector de lluvia, sensores UV y solar, panel solar, panel de control, blindaje para radiación y base ISS.		
Consola		

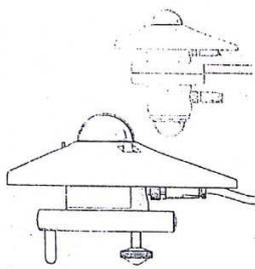
<p>Software para el registro de datos</p>		
<p>Tarjeta de almacenamiento o de datos</p>		
<p>Veleta y cable del anemómetro</p>		

Anexo 2. Hoja técnica y certificado de calibración del piranómetro

INSTRUCTION SHEET
ANWISUNG • FEUILLE D'INSTRUCTIONS • HOJA DE INSTRUCCIONES

CMP 3

Pyranometer



← 2000 W/m²

0.3 kg (Albedo 0.9 kg)

max. 80°C / 176°F
min. -40°C / -40°F



Kipp & Zonen B.V.
P.O. Box 507, 2600 AM Delft
The Netherlands
T: +31 (0) 15 2755 210
F: +31 (0) 15 2620 351
info@kipazonen.com
www.kipazonen.com

IP 67 CE

USER INFORMATION • ANWENDERINFORMATION
INFORMATION UTILISATEUR • INFORMACIÓN PARA EL USUARIO

Read this document carefully before installation.
Warranty is 2 years from date of invoice, subject to correct installation and use. Kipp & Zonen accepts no liability for any loss or damages arising from incorrect use of the product. This device conforms to the EU 'CE' guideline 89/336/EEC 73/23/EEC. Unauthorised modifications may void the warranty and CE validity. For the latest product support information visit our website.

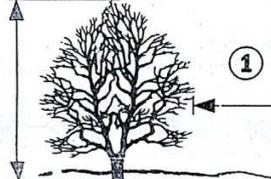
Lesen Sie dieses Dokument sorgfältig vor der Installation
Die Garantie beträgt 2 Jahre ab dem Rechnungsdatum, abhängig von korrekter Installation und Gebrauch. Kipp & Zonen übernimmt keine Haftung für mögliche Verluste oder Beschädigungen, die durch den falschen Gebrauch des Produktes entstehen. Dieses Produkt entspricht der EU 'CE' Richtlinie 89/336/EEC 73/23/EEC. Nicht autorisierte Änderungen können die Garantie und die CE-Konformität aufheben. Die neuesten Produktinformationen finden Sie auf unserer Internetseite.

Lisez ce document soigneusement avant installation
La garantie est de 2 ans à dater de la facture, pour une installation et une utilisation correctes. Kipp & Zonen n'accepte aucune responsabilité quant à la perte ou dommage résultant d'une utilisation incorrecte du produit. Ce dispositif est conforme à la directive EU "CE" 89/336/EEC 73/23/EEC. Toutes modifications non autorisées peuvent annuler la garantie et la validité CE. Consultez notre website pour tout renseignement "support produit".

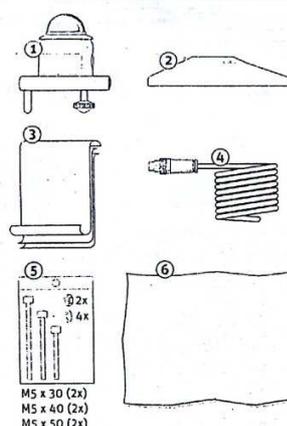
Lea este documento cuidadosamente antes de la instalación.
La garantía es de 2 años contados desde de la fecha de adquisición y está condicionada a una instalación y utilización correctas. Kipp & Zonen no acepta ninguna responsabilidad por pérdida o daños resultantes de un uso incorrecto del producto. Este dispositivo es conforme con las directrices 89/336/EEC 73/23/EEC de 'CE' y de la EU. Las modificaciones no autorizadas pueden anular la garantía y la validez CE. Para obtener la última de la información de soporte del producto lo rogamos visiten nuestro website.

© 2010 Kipp & Zonen B.V.

ALL RIGHTS RESERVED
ALLE RECHTE VORBEHALTEN
TOUS DROITS RÉSERVÉS
RESERVADOS TODOS LOS DERECHOS



0338321 - V1007

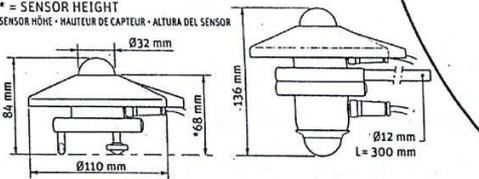


- 1 Radiometer
Radiometre
Radiómetro
- 2 Sun screen
Sonnenschirm
Ecran solaire
Pantalla solar
- 3 Test reports
Prüfberichte
Rapports des essais
Informes de prueba
- 4 Cable
Kabel
Cable
- 5 Pyranometer Fixing Kit
Pyranometer Befestigungssatz
Kit de fixation du pyranomètre
Kit de fijación para el Piranómetro
- 6 Instruction sheet
Anleitung
Feuille d'instructions
Hoja de instrucciones

MS x 30 (2x)
MS x 40 (2x)
MS x 50 (2x)

Keep original packaging for recalibration
Verwahren Sie die Originalverpackung für den Versand zur Rekalibrierung
Gardez l'emballage original pour le recalibrage
Guarde el embalaje original para la recalibración

* = SENSOR HEIGHT
SENSOR HOÏE • HAUTEUR DE CAPTEUR • ALTURA DEL SENSOR



SPECIFICATIONS
SPEZIFIKATIONEN • SPÉCIFICATIONS • ESPECIFICACIONES

Parameter	Value	Value
Spectral range Spektralbereich • Gamme spectrale • Rango espectral	@ 95 %	300 to 2800 nm
Response time Anspruchzeit • Temps de réponse • Tiempo de respuesta	@ 95 %	< 18 s
Non-linearity Nichtlinearität • Non-linearité • No-linealidad	@ 95 %	< 1 %
Temperature dependence of sensitivity Temperaturabhängigkeit der Empfindlichkeit Dépendance en température de la sensibilité Temperatura dependiente de la sensibilidad	-10 °C to +40 °C	< 5 %
Directional error Richtungsfehler • Erreur directionnelle • Error direccional	Up to 80 ° (with 1000 W/m ² beam)	< 20 W/m ²
Tilt error Neigungsfehler • Erreur d'inclinaison • Error de inclinación	@ 1000 W/m ²	< 2 %
Zero offsets Null-Offsets • Zéro offsets • Offsets de Cero	A: 200 W/m ² FIR B: d1 = 5 K/h	A: < 15 W/m ² B: < 5 W/m ²
Non-stability (change/year) Jährliche Stabilitätsabweichung Instabilité par an Variación anual de la estabilidad		< 1 %
Uncertainty in daily total Messunsicherheit der täglichen Summen Incertidumbre sur le total journalier Incertidumbre total diaria		< 10 %

DELIVERY CONTENTS
LIEFERUMFANG • CONTENU DE LA LIVRAISON • CONTENIDO DEL SUMINISTRO

SPECIFICATIONS
SPEZIFIKATIONEN • SPÉCIFICATIONS • ESPECIFICACIONES

MECHANICAL • MECHANISCH • MECANIQUE • MECAÁNICA • **INSTALLATION** • ANSTALATION • INSTALACION • **ELECTRICAL** • ELEKTRISCH • ELECTRIQUE • ELECTRICA

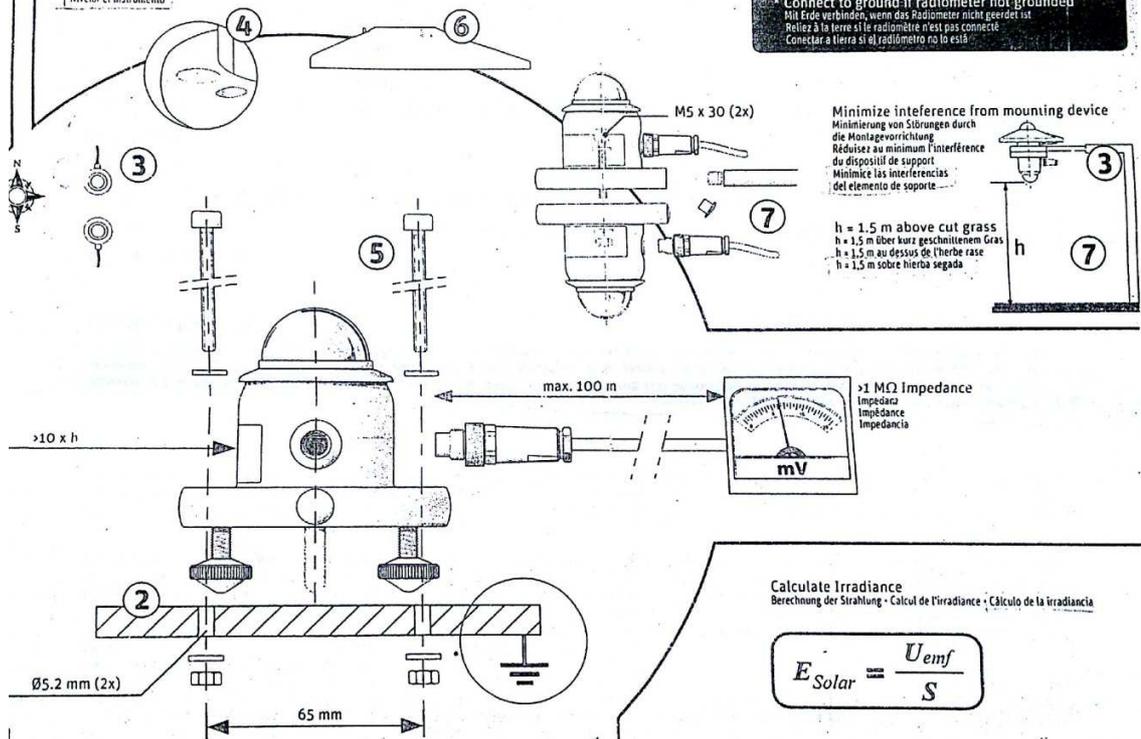
- 1 Unobstructed hor. zon
Freier Horizont
Horizon sans obstacle
Horizonte sin obstáculo
- 2 Solid surface
Feste Oberfläche
Surface solide
Superficie sólida
- 3 Point cable towards nearest pole
Kabelführung zum nächsten Pol
Pointez le câble vers le pôle le plus proche
Orientar el cable hacia el polo más próximo
- 4 Level instrument
Nivellieren Sie den Sensor
Instrument de niveau
Nivelar el instrumento
- 5 Mount with screws, washers and nuts
Montage mit Schrauben, Muttern und Unterlegscheiben
Montez avec les vis, anneaux et écrous
Montaje con los tornillos, arandelas y tuercas
- 6 Mount sun screen
Montage des Sonnenschirmes
Montez l'écran solaire
Montar de pantalla de sol
- 7 Albedo set-up
AlbedoEinstellung
Installation d'albedo
Ajuste del albedo



PYRANOMETER CONNECTION
ANSCHLUSS • RACCORDEMENT • CONEXION

Wire Kabel Fil Cable	Function Funktion Fonction Función	Connect with Anschluss an Relier à Conectar con
1 Red Rot • Rouge • Rojo	+	+ (Hi)
2 Blue Blau • Bleu • Azul	-	- (Lo)
Shield Abschirmung Protection Malla	Housing Gehäuse Boîte Cubierta	Ground* Erde Terre Tierra

Connect to ground if radiometer not grounded
Mit Erde verbinden, wenn das Radiometer nicht geerdet ist
Reliez à la terre si le radiomètre n'est pas connecté
Conectar a tierra si el radiómetro no lo está



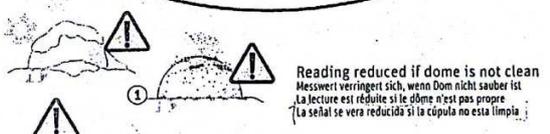
Calculate Irradiance
Berechnung der Strahlung • Calcul de l'irradiance • Cálculo de la irradiación

$$E_{Solar} = \frac{U_{emf}}{S}$$

- E_{Solar} [W/m²] = Irradiance
Strahlungsstärke • Rayonnement • Irradiación
- U_{emf} [μV] = Output Voltage
Ausgangsspannung • Sortie tension • Voltaje de salida
- S [μV/W/m²] = Sensitivity
Empfindlichkeit • Sensibilité • Sensibilidad

Typical Values
Typische Werte • Valeurs types • Valores típicos

Fully clouded Bewölkt Très nuageux Totalmente Nublado	Sunny, partly clouded Sonnig, teils bewölkt Ensoleillé, un peu nuageux Parcialmente nublado	Clear and Sunny Klarer Himmel und sonnig Clair et ensoleillé Cielo despejado
50 ... 120 W/m ²	120 ... 500 W/m ²	500 ... 1000 W/m ²



- 1 Keep dome clean using water or alcohol
Säubern Sie den Dom regelmäßig mit Wasser oder Spiritus
Nettoyer le dôme avec de l'eau ou alcool
Mantenga la cúpula limpia utilizando agua o alcohol
- 2 Keep instrument levelled
Achten Sie darauf, dass der Sensor immer korrekt nivelliert ist
Maintenez l'instrument à niveau
Mantenga el instrumento nivelado
- 3 Recalibrate every 2 years
Lassen Sie den Sensor alle 2 Jahre recalibrieren
Recalibrez tous les 2 ans
Recalibrar cada 2 años

MAINTENANCE
WARTUNG • ENTRETIEN • MANTENIMIENTO

MEASUREMENT
MESSUNG • MESURE • MEDIDA

GERTIFICATE NUMBER	004035103401
PYRANOMETER MODEL	CMP 3
SERIAL NUMBER	103401
SENSITIVITY	14.71 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$ at normal incidence on horizontal pyranometer
IMPEDANCE	51
TEMPERATURE	22 \pm 2 °C
REFERENCE PYRANOMETER	Kipp & Zonen CMP 3 sn071176 active from 06/01/2010
CALIBRATION DATE	11 August 2010 (recalibration is recommended every two years)
IN CHARGE OF TEST	S.van Wijk

Calibration procedure

The indoor calibration procedure is based on a side-by-side comparison with a reference pyranometer under an artificial sun fed by an AC voltage stabiliser. It embodies a 150 W Metal-Halide high-pressure gas discharge lamp. Behind the lamp is a reflector with a diameter of 16.2 cm. The reflector is 1 m above the pyranometers producing a vertical beam. The reference and test pyranometers are mounted horizontally on a table, which can rotate. The irradiance at the pyranometers is approximately 500 W/m². During the calibration procedure the reference and test pyranometer are interchanged to correct for any non-homogeneity of the beam.

Hierarchy of traceability

The reference pyranometer was compared with the sun and sky radiation as source under mainly clear sky conditions using the "continuous sun-and-shade method". The measurements were performed in Davos (latitude: 46.8143°, longitude: -9.8458°, altitude: 1588 m above sea level). The readings are referred to the World Radiometric Reference (WRR) as stated in the WMO Technical Regulations. The originally estimated uncertainty of the WRR is $\pm 0.2\%$.

The inclination of the receiver surface versus the true horizontal plane was set to 0.0 degrees, the instrument signal wire to the north. During the comparisons, the instrument received global radiation intensities from 636 to 958 with a mean of 822 W/m². The angle between the solar beam and the normal of the receiver surface varied from 27.7 to 50.0 with a mean of 38.4 degrees. The ambient temperature ranged from +13.8 to +25.9 with a mean of +21.8 °C. The sensitivity calculation and the single measurements deviation (σ) are based on 1083 individual measurements. The obtained sensitivity value and its expanded uncertainty (95% level of confidence) are valid for similar conditions and are: 11.30 \pm 0.38 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$ (but is corrected by Kipp & Zonen to 11.44 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$. See "correction applied" below.)
Dates of measurements: 2009, July 27 - 30, August 5, 6, 18 - 20, 24.

Global radiation data were calculated from the direct solar radiation as measured with the absolute cavity pyrheliometer PMO2 (member of the WSG, WRR-Factor: 0.998618, based on the last International Pyrheliometer Comparison IPC-2005) and from the diffuse radiation as measured with a continuous disk shaded pyranometer CM 22 sn020059 with sensitivity 8.91 (ventilated with heated air, instrument-wire to the north).

Correction applied +1.2 %

This correction is necessary to compensate for the mean directional errors of the reference CMP 3 in Davos. This error is estimated at Kipp & Zonen by measuring the directional error for the mean angle of incidence at azimuth S-30° and S+30°. The reference CMP 3 now measures the vertical beam of the indoor calibration facility more correctly.

Justification of total instrument calibration uncertainty

The combined uncertainty of the result of the calibration is the positive "root sum square" of three uncertainties.

1. The expanded uncertainty due to random effects and instrumental errors during the calibration of the reference CMP 3 as given by the World Radiation Center in Davos is $\pm 0.38/11.30 = \pm 3.36\%$. (See traceability text).
 2. The uncertainty in the correction for the systematic effect of a directional error (cosine error) during the calibration in Davos. Based on experience this cosine error can be estimated with an expanded uncertainty of $\pm 0.5\%$.
 3. Also based on experience the expanded uncertainty of the transfer procedure (calibration by comparison) is estimated to be $\pm 0.5\%$.
- The estimated combined expanded uncertainty is the positive "root sum square" of these three uncertainties: $\sqrt{(3.36^2 + 0.5^2 + 0.5^2)} = \pm 3.4\%$.

Notice

The calibration certificate supplied with the instrument is at the date of first use. Even though the calibration certificate is dated relative to manufacture, or recalibration, the instrument does not undergo any sensitivity changes when kept in the original packing. From the moment the instrument is taken from its packaging and exposed to irradiance the sensitivity may deviate with time. See the 'non-stability' value (% change in sensitivity per year) given in the radiometer specifications.

Page
1/1

Kipp & Zonen B.V.
Delftechpark 36, 2628 XH Delft
P.O. Box 507, 2600 AM Delft
The Netherlands

T: +31 (0) 15 2755 210
F: +31 (0) 15 2620 351
info@kippzonen.com
www.kippzonen.com

VAT no.: NL0055.74.857.B.01
Trade Register no.: 27239004
Member of HMEI

Anexo 3. Características eléctricas de la nevera

 REFREGERADOR CONVENCIONAL TIPO VERTICAL REFERENCIA: NEV HACEB CONV N209L 1P MI ALM	
CLASE: T FRECUENCIA NOMINAL DE OPERACIÓN: 60 Hz TENSION NOMINAL DE OPERACIÓN: 115 V CONSUMO DE ENERGÍA: 0,86 kWh/24 h CORRIENTE NOMINAL DE OPERACIÓN: 1,3 A ESPUMANTE: 141 b TEMPERATURA DE OPERACIÓN: 18°C HASTA 43°C	TIPO DE GAS: HFC - 134a CANTIDAD DE REFRIGERANTE: 120 g VOL. BRUT. TOTAL NOMINAL: 209 (l) VOLUMEN NOMINAL DE ALMACENAMIENTO: COMPARTIMIENTO  : 22 (l) CONSERVADOR: 186 (l)
FABRICADO POR: INDUSTRIAS HACEB S.A. Dirección: Calle 59 # 55 - 80 Autopista Norte PAIS DE ORIGEN: Colombia (Copecabens - Antioquia). Tel 400 81 00 Fax 4882498 www.haceb.com	
COLOR: ALMENDRA	Cod.P.T: 90719101
 (01)07704353021783(21)L081252876	

Anexo 4. Hoja Técnica Panel Solar SunTech 24 V – 175 W

<http://www.wholesalesolar.com/solar-panels.html>

SUNTECH

Solar powering a green future™

STP180S - 24/Ab -1
 STP175S - 24/Ab -1
 STP170S - 24/Ab -1
 STP165S - 24/Ab -1
 STP160S - 24/Ab -1

175 Watt MONO-CRYSTALLINE SOLAR PANEL

Features

- High conversion efficiency based on innovative photovoltaic technologies
- High reliability with guaranteed +/-3% power output tolerance
- Withstands high wind-pressure and snow load, and extreme temperature variations

Quality and Safety

- 25-year power output transferable warranty
- Rigorous quality control meeting the highest international standards
- ISO 9001:2000 (Quality Management System) and ISO 14001:2004 (Environmental Management System) certified factories manufacturing world class products
- UL listings: UL1703, cULus, Class C fire rating, conformity to CE

Recommended Applications

- Residential roof top systems
- On-grid utility systems
- On-grid commercial systems



Suntech's technology yields improvements to BSF structure and anti-reflective coating to increase conversion efficiency



Unique design on drainage holes and rigid construction prevents frame from deforming or breaking due to freezing weather and other forces



The panel provides more field power output through an advanced cell texturing and isolation process, which improves low irradiance performance



Suntech was named Frost and Sullivan's 2008 Solar Energy Development Company of the Year

www.suntech-power.com | E-mail: sales@suntech-power.com
 STP is a trademark of Suntech Power Holdings Co., Ltd. All rights reserved

STP-D5-STD-N01.01 Rev 2008
 © Copyright 2008 Suntech Power



Solar powering a green future™

Electrical Characteristics

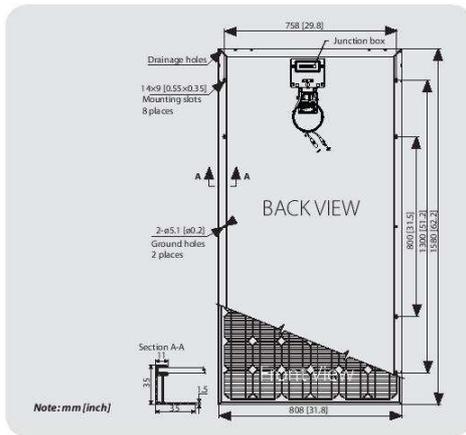
STP180S - 24/Ab -1
 STP175S - 24/Ab -1
 STP170S - 24/Ab -1
 STP165S - 24/Ab -1
 STP160S - 24/Ab -1

Characteristics	STP180S-24/Ab-1	STP175S-24/Ab-1	STP170S-24/Ab-1	STP165S-24/Ab-1	STP160S-24/Ab-1
Open - Circuit Voltage (Voc)	44.4V	44.2V	43.8V	43.6V	43.2V
Optimum Operating Voltage (Vmp)	35.6V	35.2V	35.2V	34.8V	34.4V
Short - Circuit Current (Isc)	5.4A	5.2A	5.14A	5.04A	5A
Optimum Operating Current (Imp)	5.05A	4.95A	4.83A	4.74A	4.65A
Maximum Power at STC (Pmax)	180Wp	175Wp	170Wp	165Wp	160Wp
Operating Temperature	-40°C to +85°C				
Maximum System Voltage	600V DC				
Maximum Series Fuse Rating	15 AMPS				
Power Tolerance	±3 %	±3 %	±3 %	±3 %	±3 %

STC: Irradiance 1000W/m², Module temperature 25°C, AM=1.5

Mechanical Characteristics

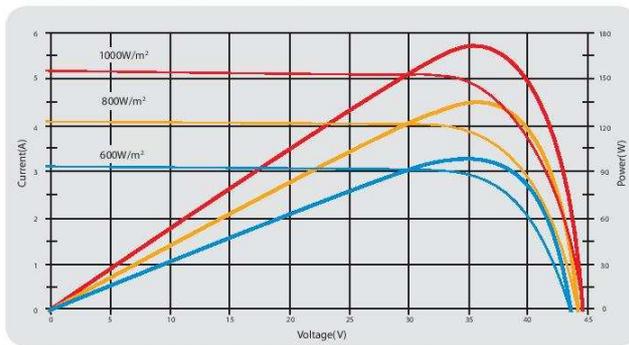
Solar Cell	Mono-crystalline 125x125mm (5inch)
No. of Cells	72 (6x12)
Dimensions	1580x808x35mm (62.2x31.8x1.4inch)
Weight	15.5kg (34.1lbs.)
Front Glass	3.2 mm (0.13inch) tempered glass
Frame	Anodized aluminium alloy
Junction Box	IP65 rated
Output Cables	AWG (12AWG), asymmetrical lengths (-) 1200mm (47.2inch) and (+) 800mm (31.5inch), MC Plug Type IV connectors



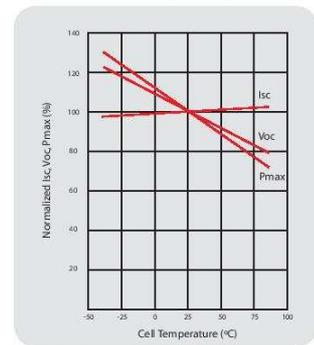
Temperature Coefficients

Nominal Operating Cell Temperature (NOCT)	45°C±2°C
Temperature Coefficient of Pmax	-0.48 %/°C
Temperature Coefficient of Voc	-0.34 %/°C
Temperature Coefficient of Isc	0.017 %/°C

Current-Voltage & Power-Voltage Curve (170W)



Temperature Dependence of Isc, Voc, Pmax



Anexo 5. Hoja Técnica Batería CSPower/OEM 12 V – 300 Ah



Basic Info.

Model NO.:CG12-300	Type:Lead-Acid Batteries
Chargeable:Chargeable	Discharge Rate:Low Discharge Rate
Shape:Solar Gel Battery	Maintenance Type:Free
Nominal Capacity:300ah	Nominal Voltage:12V
Usage: Electric Bicycle, Solar, Wind	Sealed Type:Sealed
Size:522*269*242mm	Weight:71kgs
Warranty:3years	Color:Black, White, Gray
Advantage:Sealed Free Maintenance Non Spillable	Export Markets:Global
Life:12-15 years	Cycles:1500cycles on 30%DOD

Additional Info.

Trademark:CSPower/OEM	Packing:Pallet
Standard:CE, ISO, UL, IEC, VDS, SGS	Origin:Shenzhen, Guangzhou, China
HS Code:8507200000	Production Capacity:500000PCS

Product Description

GEL Solar system Battery 12V300Ah

1. Deep cycle gel battery for solar and Wind Power System
2. Life 20 years
3. Warranty 3year

Solar accumulator solar system battery 12V300Ah

Solar GEL Battery
Long service life 20years
sealed free maintenance
for solar&wind power

Features:

- Sealed/Maintenance-Free: The valve regulated spill proof construction allows trouble-free safe operation in any position. There is no need to add electrolyte, as gases generated during the charge phase are recombined in a unique "oxygen cycle".
- Long Shelf Life: A low self-discharge rate, up to approximately 3% per month, may allow storage of fully charged batteries for up to a year, depending on storage temperatures, before charging becomes critical.
- Deep Discharge Recovery: Special separators, advanced plate composition and a carefully balanced electrolyte system ensure that the battery has the ability to recover from excessively deep discharge.
- Low Pressure Valve Regulators: All batteries feature a series of low pressure one-way relief valves. These valves safely release any excessive accumulation of gas inside the battery and then reseal.
- High Discharge Rate: Low internal resistance allows discharge currents of up to ten times the rated capacity of the battery. Relatively small batteries may thus be specified in applications requiring high peak currents.
- Wide Operating Temperature Range: SINGLANG batteries may be discharged over a temperature range of -40°C to +60°C (-40°F to + 140 °F) and charged at temperatures ranging from -20°C to +50°C (-4°F to +122°F).
- Rugged Construction: The high impact resistant battery case is made of nonconductive ABS plastic. The case materials impart great resistance to shock, vibration, chemicals and heat. Flame Retardant (FR) battery cases and lids are available where the end application dictates.
- Long Service Life: Have a design life of up to five years in standby applications. In cyclical applications up to 1,000 charge/discharge cycles can be expected depending on average depth of discharge.

Application:

- 1: Telephone switchboard, electric equipments, medical equipments, instruments, and meters
- 2: Computer, uninterrupted power source (UPS), Inverter
- 3: Power transmission and transformer station, switch control, and accident lighting
- 4: Fire fighting, safety device, and alarm monitoring
- 5: Aviation, spaceflight, and power storage
- 6: Automatic office system
- 7: Radio communication system
- 8: Emergency lighting and car/ship starting system
- 9: Portable electric appliances and mining system
- 10: Traffic and navigation signal lamp
- 11: Solar/Wind/Hybrid power systems

Terms Details:

Payment Terms: T/T

Minimum Order: 20 Units

FOB Port: Guangzhou/Shenzhen/Hongkong

Lead Time: 7 - 10 days

Product Certificate: CE, ISO, UL, IEC, VDS, SGS

Our deep cycle batteries is the best partner for solar and wind system use, it is with long service life span almost 15 years and high durability to work in severe environment.

We focus on quality, never use faulse gel and recycle lead. All production lines in our factory are automatic and imported from Germany, and produce lead plates by ourselves in order to control quality and lowest save cost in order to give best competitive price for customers.

