

Balance energético de la unidad de monitoreo remoto.

1 Introducción

Este reporte describe el balance energético de una unidad de monitoreo remoto situada en las coordenadas 41°19'15.17" S – 72°58'02.86" W en el Lago Llanquihue. Por ser un sistema de boya y dispositivos electrónicos situados en un punto de la masa de agua, su funcionamiento dependerá de la energía solar captada, transformada y almacenada para el óptimo funcionamiento. Las figuras muestran la unidad de monitoreo remoto y una parte de los dispositivos que la componen.



Figura 1 Unidad de monitoreo remoto. Fuente: equipo Más-Azul



Figura 2 Sensores de medida de temperatura, conductividad y oxígeno disuelto. Fuente: equipo Más-Azul.

El balance de energía se calcula mediante la expresión:

$$\Delta E = E_{solar-rec} - (E_{sens} - E_{trans} - E_{perd}) \quad 1)$$

Donde ΔE es el balance de energía en vatios (W), $E_{solar-rec}$ representa la radiación solar recibida (directa, difusa y reflejada), E_{sens} equivale a la energía utilizada por los sensores en la medida y registro de sus variables, E_{trans} corresponde a la energía consumida en la transmisión de los datos y E_{perd} cuantifica las pérdidas internas de la electrónica e instrumentación.

Los sensores y el sistema de transmisión de datos necesitan energía eléctrica para su funcionamiento las 24 horas del día. La energía eléctrica es producto de la transformación de la energía solar captada por medio de dos placas solares de 10 W cada una situadas en los laterales de la torre de la unidad de monitoreo remoto, ver la Figura 1. La cantidad de energía transformada depende de variables como el flujo de radiación solar, inclinación de las placas (en este caso son perpendiculares a la vertical de la superficie del agua) y eficiencia de transformación de los paneles solares. El ensuciamiento de los mismos es una restricción que debe tenerse en cuenta. El consumo energético de los sensores dependerá de las características de sus componentes, arquitectura y patrón de medida y registro de datos. Por otra parte, los datos registrados deben transmitirse vía GPRS hacia un receptor para que el usuario de la página web pueda observar en tiempo real la

evolución de las mediciones en el lugar señalado del lago. Su consumo está vinculado a la frecuencia de envío de datos. Por ejemplo, el consumo es mayor si se transmiten datos cada dos minutos en vez de hacerlo cada diez minutos.

A continuación, se expone el balance energético estimado para un año en base a los datos de radiación solar obtenidos del explorador solar del Ministerio de Energía para el citado punto geográfico. La Tabla 1 expone las condiciones operativas asumidas en la estimación. La Tabla 2 resume los resultados del balance de un día típico de cada mes, desde las 5 horas hasta las 20 horas. Los datos con que se nutre este balance se detallan en la sección 3 de desarrollo de este informe. Las ecuaciones utilizadas en la estimación de la energía solar transformada en los paneles y consumida por sensores y transmisión también se detallan en dicha sección. Un ejemplo de cálculo planteado en una hoja Excel se anexa a este informe.

2 Balance energético

Las siguientes figuras resumen el patrón de generación y consumo de energía (sensores y transmisión de datos) de la unidad de monitoreo remoto, ya expuestos en la Tabla 2.

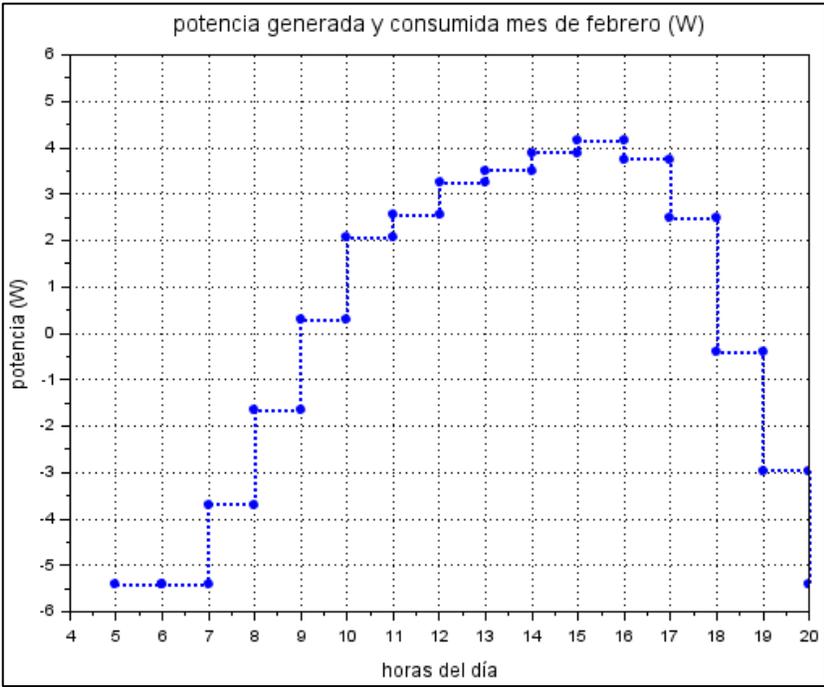
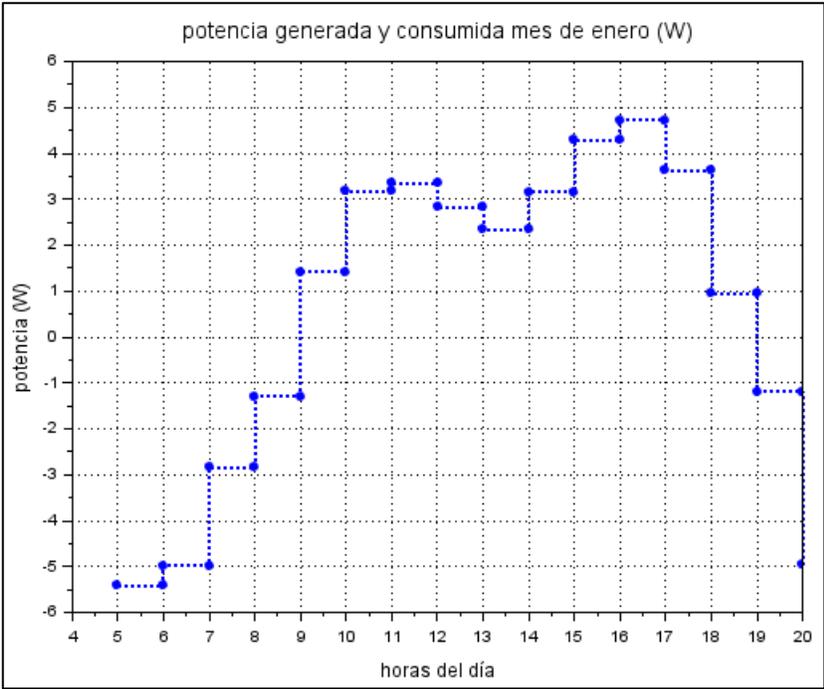
Tabla 1 Condiciones operativas en el punto de instalación de la unidad de monitoreo remoto.

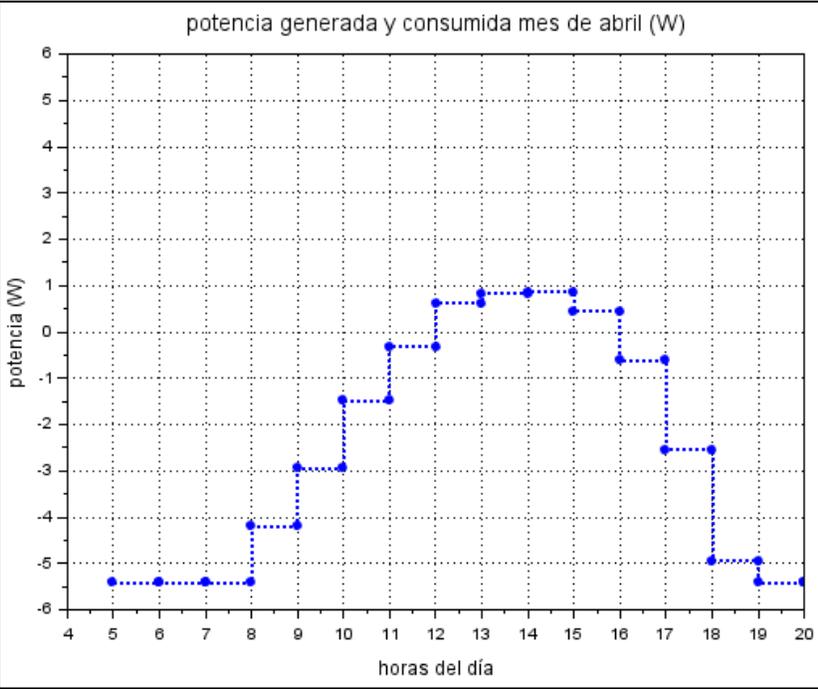
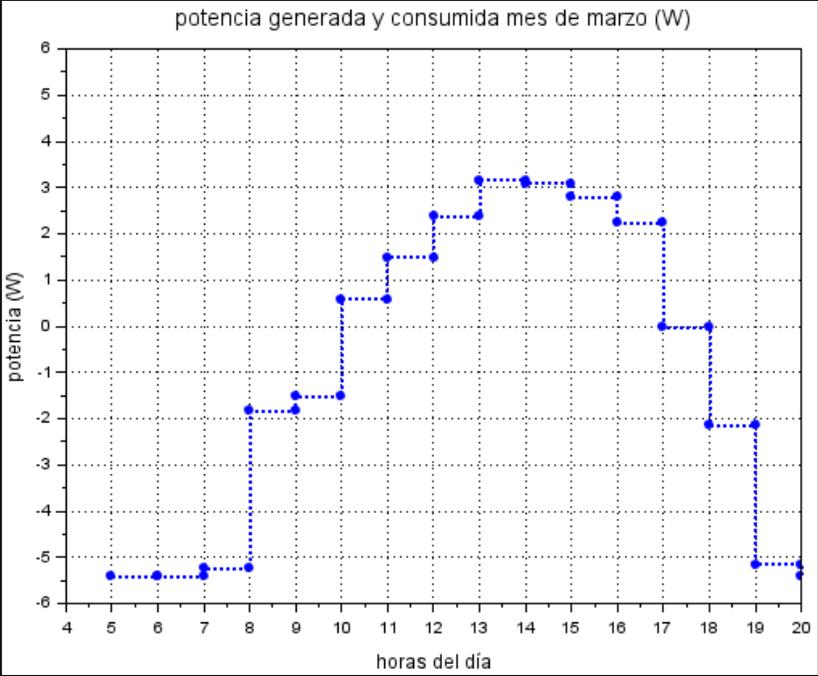
Concepto	Descripción
Tiempo registrado	Desde las 5 horas hasta las 20 horas para todos los meses.
Datos de parámetros (temperatura, viento, radiación solar)	Explorador Solar del Ministerio de Energía (https://solar.minenergia.cl/exploracion)
Localización geográfica	41°19'15.17" S – 72°58'02.86" W
Ángulo de elevación solar	Sun Earth Tools (https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php?lang=es)
Potencia nominal paneles solares	10W
Número de paneles	2
Ángulo de inclinación	90°
Consumo energético de sensores	1,75 W

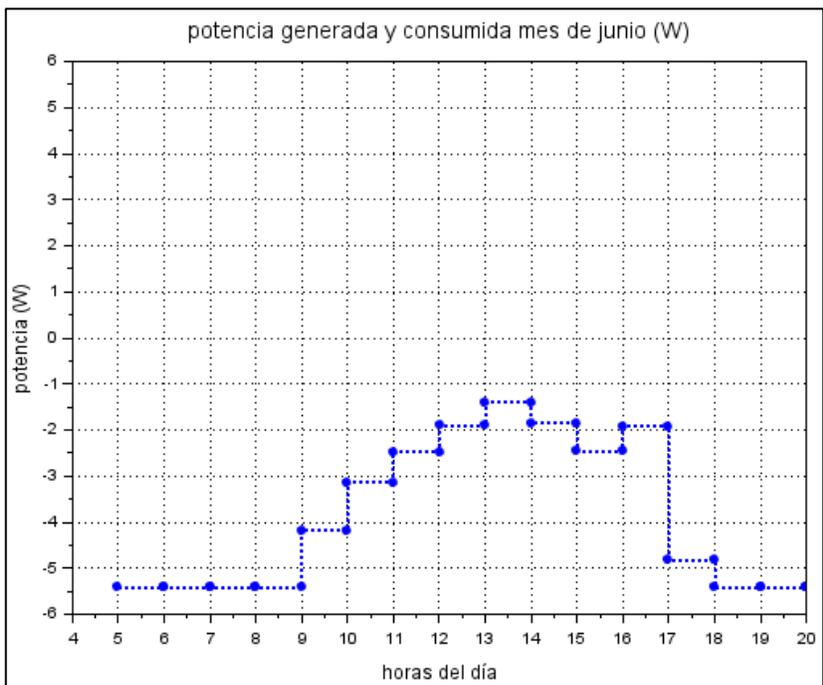
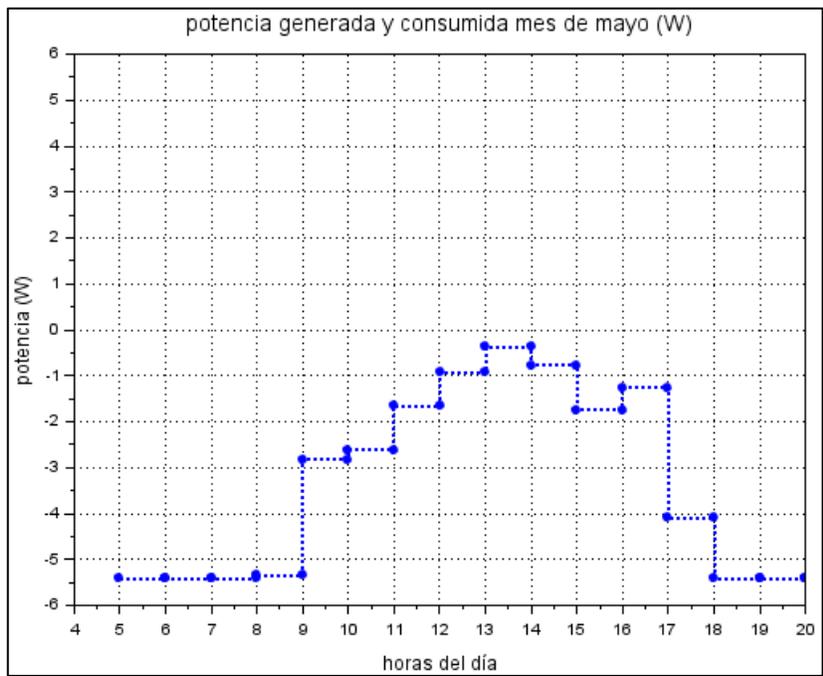
Tabla 2 Balance de energía unidad de monitoreo remoto (W).

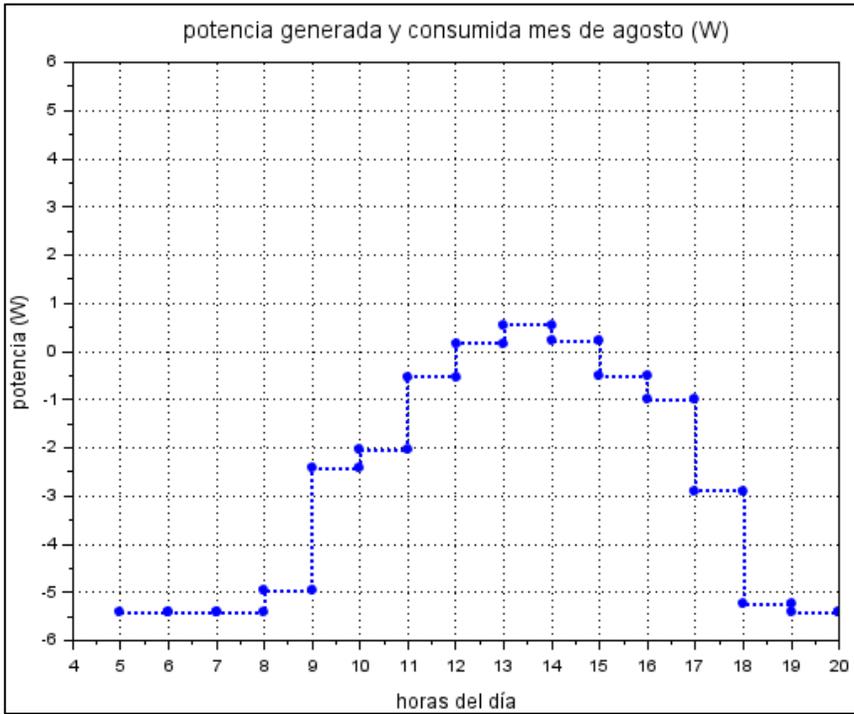
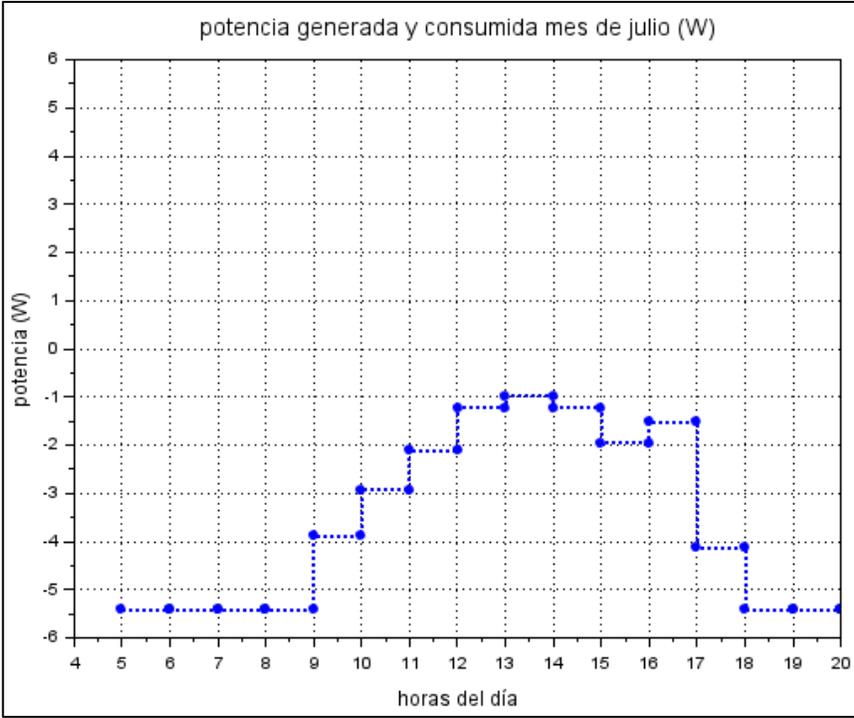
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
5.00	-5,42	-5,42	-5,42	-5,42	-5,42	-5,42	-5,42	-5,42	-5,42	-5,42	-5,42	-5,42
6.00	-4,99	-5,42	-5,42	-5,42	-5,42	-5,42	-5,42	-5,42	-5,42	-5,36	-4,36	-3,97
7.00	-2,84	-3,70	-5,24	-5,42	-5,42	-5,42	-5,42	-5,42	-5,19	-3,27	-3,14	-2,58
8.00	-1,30	-1,66	-1,83	-4,20	-5,35	-5,42	-5,42	-4,96	-2,06	-1,89	-1,11	-0,20
9.00	1,42	0,29	-1,52	-2,94	-2,82	-4,18	-3,89	-2,42	-0,64	0,13	0,54	1,59
10.00	3,17	2,06	0,58	-1,49	-2,62	-3,14	-2,93	-2,05	0,55	1,26	1,73	2,43
11.00	3,34	2,54	1,48	-0,32	-1,67	-2,48	-2,11	-0,53	1,74	1,60	2,03	2,41
12.00	2,83	3,24	2,37	0,62	-0,93	-1,90	-1,23	0,17	2,06	2,10	1,92	1,70
13.00	2,34	3,50	3,16	0,82	-0,37	-1,40	-0,98	0,55	2,27	2,14	2,04	1,40
14.00	3,15	3,89	3,09	0,85	-0,77	-1,85	-1,23	0,22	2,07	2,32	2,81	2,25
15.00	4,28	4,14	2,79	0,44	-1,74	-2,47	-1,96	-0,51	1,46	1,82	2,87	3,56
16.00	4,73	3,75	2,23	-0,62	-1,27	-1,92	-1,52	-1,00	0,39	1,43	2,43	3,84
17.00	3,62	2,48	-0,02	-2,55	-4,10	-4,83	-4,12	-2,90	-1,88	-0,59	0,84	2,44
18.00	0,95	-0,41	-2,14	-4,94	-5,42	-5,42	-5,42	-5,24	-3,98	-1,96	-1,62	-0,13
19.00	-1,20	-2,97	-5,15	-5,42	-5,42	-5,42	-5,42	-5,42	-5,42	-5,15	-3,47	-1,65
20.00	-4,96	-5,41	-5,42	-5,42	-5,42	-5,42	-5,42	-5,42	-5,42	-5,42	-5,42	-5,08

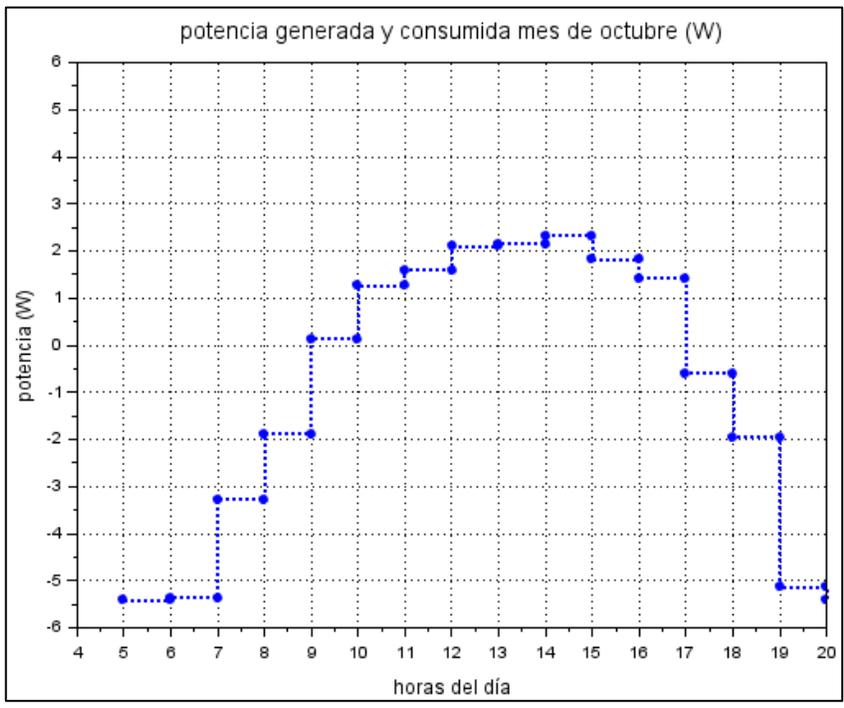
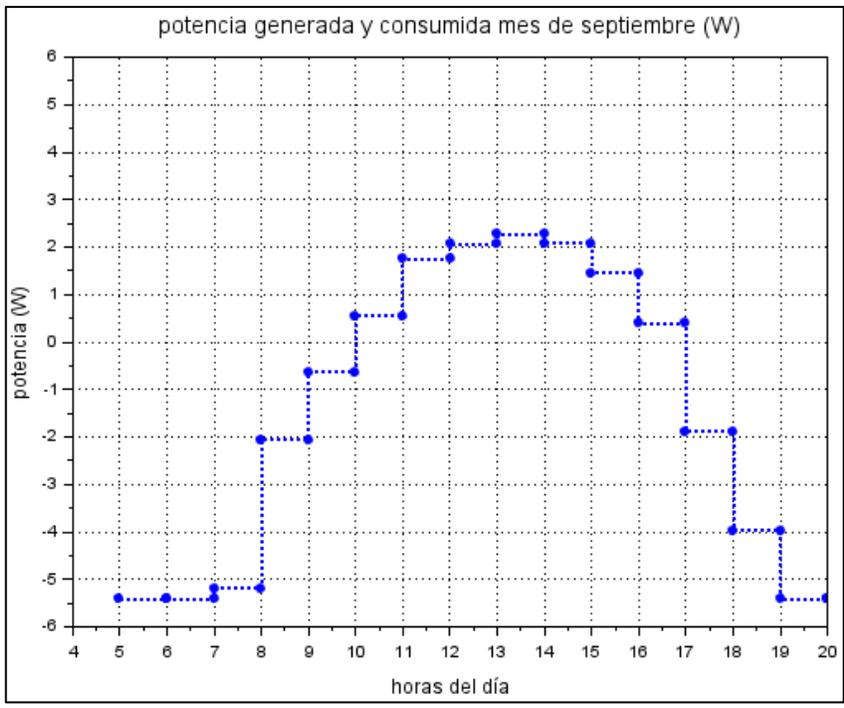
En las figuras, valores por encima de cero implica que la generación de energía es mayor a la consumida y ésta es almacenada en la batería. Los meses de mayor irradiación solar corresponde a una mayor transformación energética y se incrementa el almacenamiento (generación > consumo). En periodos de menor irradiación solar y de oscuridad (desde las 20 horas hasta las 6 horas del día siguiente en promedio en verano, desde las 18 horas hasta las 9 horas del día siguiente en promedio en invierno) el balance neto energético es negativo (generación < consumo) y se consume la energía almacenada en la batería.

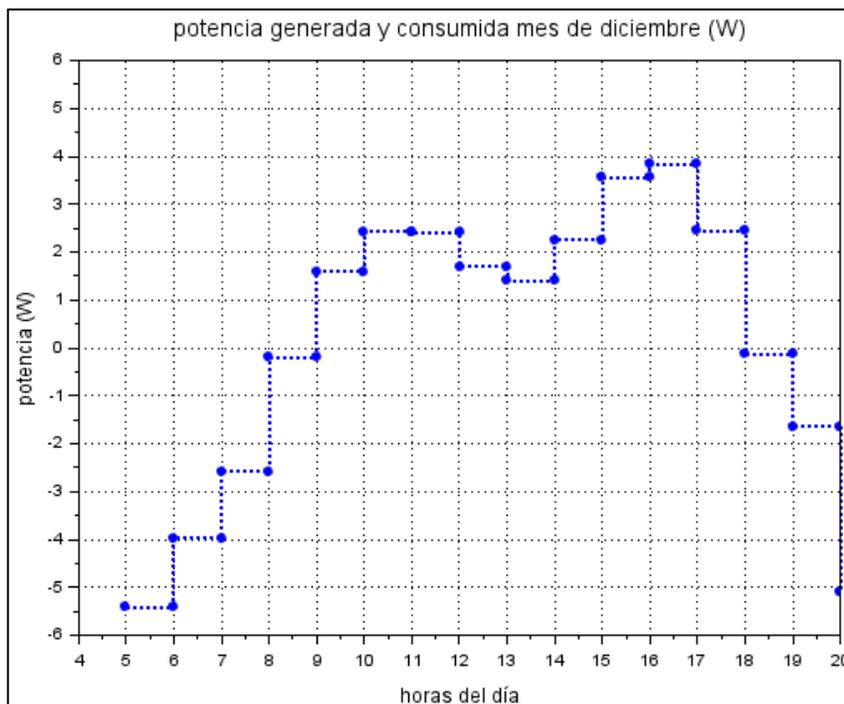
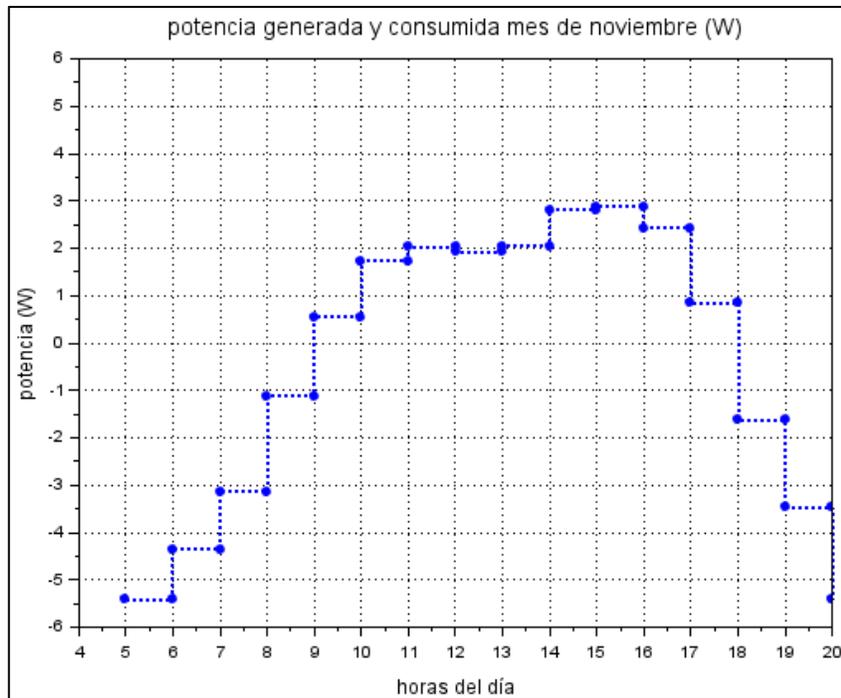


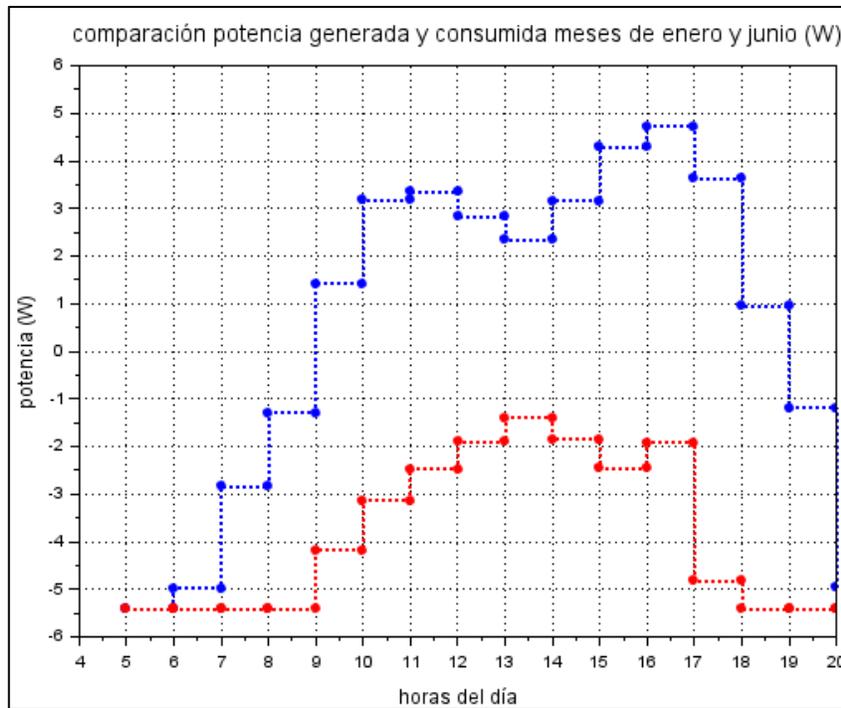












3 Desarrollo

Las fases de análisis del balance energético y autonomía de la unidad de monitoreo remoto se resumen en la Figura 3.

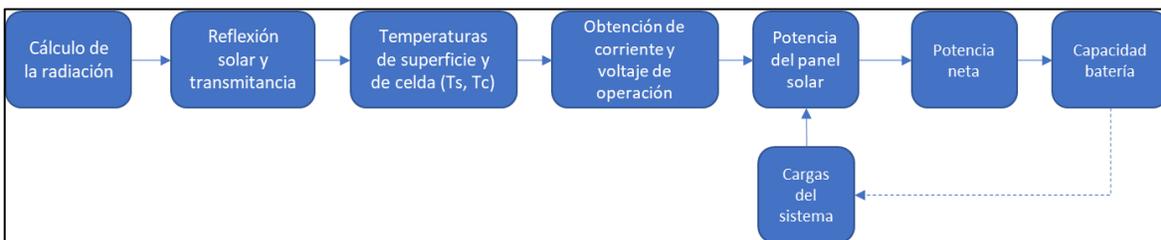


Figura 3 Esquema de procedimiento de análisis de autonomía energética de la unidad de monitoreo remoto. Fuente: equipo Más-Azul.

3.1 Tablas de radiación solar y ángulo de elevación solar

Como se explica el Manual del Usuario del Explorador Solar la radiación solar que llega a la atmósfera comienza a perder energía debido a que parte de ella es absorbida por el vapor de agua y aerosoles, reflejada y dispersada por el efecto de las nubes. A medida que el rayo solar realice un mayor recorrido en la atmósfera, mayor será su interacción y mayor su atenuación [1].

Radiación directa es la radiación que alcanza la superficie proveniente directamente del Sol. Cuando los rayos solares son dispersados por el efecto de la atmósfera y pueden provenir de diversas partes del cielo se tiene a la radiación difusa. La suma de estas dos componentes es la radiación global. Si los rayos solares incidentes son perpendiculares a una superficie, se conoce como radiación normal. Si la superficie de recepción se coloca en un plano horizontal o paralelo a la superficie de la Tierra, la radiación captada se denomina radiación horizontal [1].

Para efectos de cálculo de la radiación que se proyecta sobre las superficies de los paneles de la caja de control se consultaron las bases de datos del Explorador Solar del Ministerio de Energía [1] (<https://solar.minenergia.cl/inicio>) y la aplicación Sunearth Tools [2] (https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php?lang=es) para la estimación del ángulo de elevación solar. A continuación, las tablas consultadas para la localización en cuestión.

Tabla 3 Radiación directa

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
6.00	10,58	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,74	29,70	42,47
7.00	73,21	52,61	3,91	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,46	64,62	52,56	79,59
8.00	118,99	110,09	121,42	35,42	0,89	0,00	0,00	11,70	111,97	94,85	118,98	162,67
9.00	231,74	176,22	110,39	62,66	84,86	35,49	46,16	93,73	151,68	163,47	185,72	255,57
10.00	366,88	284,29	194,56	108,83	74,23	61,17	66,08	91,51	193,43	239,45	280,52	342,15
11.00	463,74	358,46	260,47	147,52	107,54	75,47	89,99	147,77	263,08	289,78	354,12	435,19
12.00	571,92	465,37	341,94	199,78	126,63	94,34	121,48	175,36	294,32	351,43	430,41	527,20
13.00	623,36	548,27	406,47	222,28	151,39	116,02	130,06	197,05	312,99	354,87	477,83	561,48
14.00	605,90	549,98	387,42	220,40	136,85	98,44	122,33	177,09	298,61	351,54	463,54	526,81
15.00	563,92	499,48	334,26	196,88	105,46	78,75	98,65	151,09	245,73	284,31	386,70	487,79
16.00	484,15	398,82	285,28	153,42	139,96	118,13	129,66	135,81	188,61	235,04	301,83	412,51
17.00	360,71	296,43	178,24	87,70	39,14	14,05	38,08	75,92	105,40	146,81	206,70	289,59
18.00	224,65	165,40	108,61	13,14	0,00	0,00	0,00	4,32	42,91	113,71	111,51	175,21
19.00	145,22	79,03	6,77	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,88	60,31	126,80
20.00	10,22	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,77

Fuente: Explorador Solar (<http://ernc.dgf.uchile.cl:48080/fotovoltaiico>)

Tabla 4 Radiación difusa

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
6.00	14,96	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,43	27,19	32,66
7.00	60,54	33,32	7,82	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8,70	43,35	76,84	71,24
8.00	103,76	84,04	45,57	28,14	4,23	0,00	0,00	14,93	46,09	97,12	122,39	118,95
9.00	153,08	134,56	100,45	73,44	39,22	29,33	31,59	53,69	91,63	151,32	171,39	152,51
10.00	170,71	150,15	140,37	107,92	77,91	60,63	67,55	92,32	133,84	165,92	194,08	183,18
11.00	190,28	167,44	152,57	145,32	97,13	87,23	90,29	120,08	152,53	183,82	220,05	198,46
12.00	185,05	186,99	157,59	150,92	125,19	101,73	107,14	140,13	165,66	200,79	222,30	188,49
13.00	178,54	177,98	160,06	139,99	127,60	102,93	113,30	140,09	165,98	206,15	208,12	182,39
14.00	188,87	169,44	154,87	133,75	117,27	97,44	105,55	139,97	149,61	182,17	201,14	184,50
15.00	168,60	141,81	147,49	117,85	91,49	81,70	86,02	114,27	140,79	162,39	176,38	178,67
16.00	143,49	130,34	119,93	90,89	55,50	45,49	55,20	89,41	117,25	145,26	158,81	155,36
17.00	122,49	110,02	92,68	55,63	28,78	20,62	29,04	50,66	76,26	106,37	127,68	135,81
18.00	88,31	80,41	46,84	13,88	0,00	0,00	0,00	6,71	30,76	51,13	85,12	91,17
19.00	49,73	38,99	9,37	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	11,17	36,72	49,52
20.00	17,20	1,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,17	14,47

Fuente: (<http://ernc.dgf.uchile.cl:48080/fotovoltaiico>)

Tabla 5 Radiación global

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
6.00	25,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,14	56,82	75,13
7.00	133,75	85,93	11,73	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	14,16	107,97	129,40	150,83
8.00	222,75	194,13	166,99	63,56	5,12	0,00	0,00	26,63	158,05	191,97	241,37	281,61
9.00	384,82	310,78	210,84	136,10	124,08	64,81	77,76	147,42	243,31	314,79	357,12	408,07
10.00	537,59	434,44	334,93	216,75	152,14	121,80	133,63	183,83	327,28	405,37	474,60	525,34
11.00	654,02	525,90	413,04	292,84	204,66	162,70	180,28	267,85	415,61	473,60	574,17	633,65
12.00	756,97	652,37	499,52	350,69	251,82	196,07	228,62	315,49	459,98	552,22	652,71	715,69
13.00	801,90	726,25	566,53	362,27	278,98	218,95	243,35	337,14	478,97	561,02	685,94	743,87
14.00	794,77	719,42	542,29	354,15	254,13	195,88	227,88	317,07	448,22	533,71	664,68	711,31
15.00	732,52	641,29	481,75	314,73	196,95	160,45	184,66	265,36	386,52	446,70	563,08	666,45
16.00	627,64	529,16	405,21	244,31	195,46	163,62	184,85	225,22	305,86	380,30	460,63	567,86
17.00	483,20	406,45	270,93	143,33	67,92	34,67	67,13	126,58	181,66	253,17	334,38	425,40

18.00	312,96	245,81	155,44	26,67	0,00	0,00	0,00	10,48	73,66	164,83	196,63	266,38
19.00	194,95	118,03	16,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	17,05	97,03	176,32
20.00	27,42	1,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,17	21,22

Fuente: (<http://ernc.dgf.uchile.cl:48080/fotovoltaico>)

Tabla 6 Ángulo de elevación solar en el día central de cada mes sobre el Lago Llanquihue. Latitud (-41,19°), Longitud (-72,58°)

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
6.00	2,96	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,59	6,9
7.00	13,46	7,12	1,15	0	0	0	0	0	0,55	9,91	16,46	17,44
8.00	24,47	18,31	12,37	5,89	0,22	0	0	2,38	11,67	21,17	27,66	28,47
9.00	35,71	29,52	23,29	16,15	9,86	5,9	6,54	12,5	22,27	32,16	38,89	39,71
10.00	46,84	40,35	33,44	25,27	18,19	14	14,93	21,45	31,84	42,37	49,73	50,84
11.00	57,32	50,16	42,12	32,6	24,66	20,29	21,57	28,64	39,64	50,94	59,37	61,27
12.00	65,88	57,73	48,25	37,31	28,63	24,22	25,85	33,34	44,65	56,41	66,03	69,45
13.00	69,67	61,09	50,54	38,63	29,59	25,33	27,28	34,86	45,84	57,09	66,8	71,79
14.00	66,2	58,78	48,32	36,3	27,39	23,48	25,66	32,95	42,92	52,72	61,2	66,42
15.00	57,77	51,85	42,24	30,77	22,35	18,91	21,21	27,93	36,59	44,8	52,01	56,98
16.00	47,34	42,35	33,58	22,86	15,07	12,12	14,44	20,5	27,92	34,91	41,36	46,15
17.00	36,22	31,65	23,44	13,36	6,16	3,65	5,95	11,38	17,85	24,07	30,18	34,93
18.00	24,97	20,46	12,51	2,86	0	0	0	1,17	6,99	12,86	18,96	23,75
19.00	13,93	9,22	1,27	0	0	0	0	0	0	1,67	8,02	12,9
20.00	3,38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,65

Fuente: Solar Earth Tools, https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php?lang=es

3.1.1 Estimación radiación en plano inclinado

Radiación global sobre un plano inclinado [3] se calcula por medio de la ecuación 2:

$$\dot{I}_{\beta t} = \dot{I}_{\beta n} + \dot{I}_{\beta d} + \dot{I}_r \quad 2)$$

donde $\dot{I}_{\beta t}$ es la radiación global (W/m^2) sobre un plano inclinado, β grados; $\dot{I}_{\beta n}$ es la radiación directa proyectada según la geometría del plano (W/m^2), ecuación 3

$$\dot{I}_{\beta n} = \dot{I}_n \cos \theta \quad 3)$$

\dot{I}_n es la radiación directa (W/m^2); θ es el ángulo entre la normal \hat{n} del plano inclinado de la superficie receptora y los rayos solares en función de la altura solar γ_s y equivale a [4]:

$$\theta = \beta - \gamma_s \quad 4)$$

Si la placa está en posición vertical, el ángulo de la normal al plano estará a 0° con respecto al horizonte. De la ecuación 4 $\dot{I}_{\theta d}$ es la radiación difusa que proviene de la parte visible del cielo (W/m^2), ecuación 5:

$$\dot{I}_{\theta d} = \dot{I}_d(0,5)(1 + \cos \beta) \quad 5)$$

\dot{I}_d es la radiación difusa sobre una superficie horizontal (W/m^2); β es el ángulo de inclinación del panel. De la ecuación 2 \dot{I}_r es la radiación difusa reflejada desde el suelo (W/m^2) aproximada por la ecuación 6:

$$\dot{I}_r = \dot{I}_{ht}(0,5)(\rho_a)(1 + \cos \beta) \quad 6)$$

\dot{I}_{ht} es la radiación global horizontal (W/m^2); ρ_a es el albedo, se asume 0,24.

3.2 Estimación de pérdidas por reflexión y transmitancia del panel solar

No toda la radiación solar incidente en el panel es transmitida. Una parte es reflejada como consecuencia del material de la cubierta y su espesor. Para estimar las pérdidas por reflexión ha de considerarse el ángulo de refracción de la cubierta ϑ_r , ecuación 7:

$$\theta_r = \sin^{-1} \left(\left(\frac{k_a}{k_g} \right) \sin \theta \right) \quad 7)$$

k_a es el índice de refracción del aire, en este caso 1; k_g es el índice de refracción de la cubierta, que para el vidrio es de 1,526.

El parámetro que determina la pérdida por reflexión se denomina modificación por ángulo de incidencia IAM [3] el cual resulta de la relación entre la transmitancia con el ángulo de incidencia θ y la transmitancia de un rayo normal al sol $\vartheta = 0$, ecuación 8

$$IAM = \frac{\tau(\theta)}{\tau(0^\circ)} \quad 8)$$

Para el cálculo de estas pérdidas, la transmitancia se puede aproximar por medio de la expresión 9:

$$\tau(\theta) = e^{-\left(\frac{kL}{\cos \theta_r}\right)} \left(1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\sin^2(\theta_r - \theta)}{\sin^2(\theta_r + \theta)} + \frac{\tan^2(\theta_r - \theta)}{\tan^2(\theta_r + \theta)} \right) \right) \quad 9)$$

La transmitancia para el ángulo $\vartheta = 0$

$$\tau(0^\circ) = e^{-kL} \left(1 - \left(\frac{1 - k_g}{1 + k_g} \right)^2 \right) \quad 10)$$

Para un rango de inclinación ϑ entre 0° y 90° las pérdidas por reflexión por modificación del ángulo de incidencia IAM, ecuaciones 9 y 10, está dado por la Figura 4:

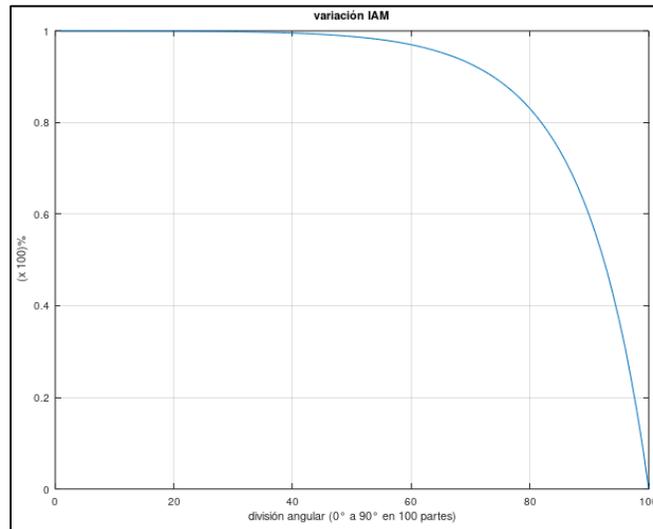


Figura 4 Coeficiente de pérdidas por reflexión en función del ángulo de inclinación (de 0° a 90°). Fuente: equipo Mas-Azul.

De Figura 4 se aprecia que hasta 55° de inclinación, no existe una variación significativa de las pérdidas. Estas se evidencian dramáticas a partir de 80° de inclinación. De esta forma, la radiación global establecida en la ecuación 2 se plantea como:

$$\dot{I}_{\theta t} = \dot{I}_{\theta n} \cdot IAM + \dot{I}_{\theta d} + \dot{I}_r \quad 11)$$

Además de las pérdidas en la transmitancia debido al ángulo de inclinación del panel se debe considerar la temperatura de la celda.

3.3 Estimación de la potencia neta de los paneles solares

Para la mayoría de los paneles fotovoltaicos, cuando la temperatura de trabajo aumenta, el valor de la potencia disminuye. Según Gasquet [4], debido a la disipación de calor dentro de las celdas del panel, a excepción de climas fríos, la temperatura de trabajo excede los 25°C. Para aproximar la temperatura de la celda, T_c , y de la temperatura del panel, T_p , se utiliza el modelo del Explorador Solar, basado en el planteamiento de Sandia Laboratories [5]. La temperatura de celda, T_c , se estima a partir de la ecuación 12:

$$T_c = T_p + \frac{\dot{I}_{\theta t}}{\dot{I}_0} \Delta T \quad 12)$$

En la que $\dot{I}_{\theta t}$ es la radiación incidente (W/m^2), ecuación 11; \dot{I}_0 es la radiación solar de referencia ($1000 W/m^2$); ΔT es la diferencia de temperatura entre la celda y el módulo de superficie negra a un nivel de irradiación de $1000 W/m^2$ [5] Esta diferencia es de 2 ó 3°C para un montaje de paneles en bastidor. Para la temperatura de panel, T_p , se tiene la ecuación 13:

$$T_p = \dot{I}_{\theta t} e^{a+bV} + T_{amb} \quad 13)$$

a es un coeficiente determinado experimentalmente que establece el límite superior de la temperatura a bajas velocidades de viento y elevada irradiación solar; b es un coeficiente determinado experimentalmente la tasa a la que la temperatura disminuye mientras la velocidad del viento se incrementa; V es la velocidad del viento (m/s); T_{amb} es la temperatura ambiente ($^{\circ}C$). tanto para T_c como para T_p los coeficientes de las variables de las ecuaciones se reflejan en la Tabla 7.

Tabla 7 Coeficientes experimentales y ΔT de varios tipos de paneles solares [5]

Tipo de panel	Sistema de instalación	a	b	ΔT
Vidrio/celda/vidrio	Rack abierto	-3,47	-0,0594	3
Vidrio/celda/vidrio	Montaje en el techo	-2,98	-0,0471	1
Vidrio/celda/lámina de polímero	Rack abierto	-3,56	-0,0750	3
Vidrio/celda/lámina de polímero	Aislamiento posterior	-2,81	-0,045	0
Concentrador lineal (parabólico)	Mecanismo de seguimiento	-3,23	-0,130	13

Corrientes y voltajes de operación

La capacidad de generación del sistema, \dot{W} (Watts), corresponde a la potencia que generaría el panel fotovoltaico en condiciones estándar, esto es, irradiación incidente de $1000 W/m^2$ y temperatura de celda T_c de $25^{\circ}C$ [3]. Dos aproximaciones pueden predecir la capacidad del sistema. Si se conoce la superficie efectiva del panel, A_p en (m^2), el número de éstos, N , la eficiencia de la

conversión (dato del fabricante del panel), η_{elec} , y una irradiación incidente de 1000 W/m^2 , la capacidad \dot{W} se aproxima por medio de la ecuación 14:

$$\dot{W}_{sist} = A_p N \eta_{elec} 1000 \quad 14)$$

Si se conoce la máxima potencia del panel, \dot{W}_{max} , y el número de ellos, N, se tiene, ecuación 15:

$$\dot{W}_{sist} = \dot{W}_{max} N \quad 15)$$

Para determinar la potencia de salida, según [3] se puede aplicar la aproximación de Sandia Laboratories, donde se determina la curva V-I del panel a partir de las diferentes variables ambientales (curva del fabricante) y, seguidamente, el punto de máxima operación. Para ello se determina la corriente de cortocircuito del panel, I_{sc} , ecuación 16:

$$I_{sc} = I_{sc0} f_1(AM_a) \left[\frac{(I_{\theta t} f_2(\theta) + f_d I_{\theta d})}{I_0} \right] [1 + \alpha_{I_{sc}} (T_c - T_{amb})] \quad 16)$$

I_{sc0} es la corriente de cortocircuito nominal (A), AM_a corresponde a la masa de aire absoluta (adimensional), calculada del ángulo de elevación del Sol y de la elevación del lugar, proporciona una medida de la longitud de la trayectoria que el sol traza a través de la atmósfera. En el nivel del mar cuando el Sol está en el techo $AM_a=1$.

$f_1(AM_a)$ es un polinomio determinado empíricamente que relaciona el espectro solar en la corriente de cortocircuito y la variación diaria de la masa de aire. El polinomio está dado por la ecuación 17. Esta expresión se utiliza para el caso de concentradores parabólicos. En el caso de una placa plana, sustituir por 1.

$$f_1(AM_a) = a_0 + a_1 AM_a + a_2 (AM_a)^2 + a_3 (AM_a)^3 + a_4 (AM_a)^4 \quad 17)$$

$f_2(\theta)$ polinomio obtenido empíricamente que relaciona la corriente de cortocircuito del panel, I_{sc} , con el ángulo de incidencia solar, θ , ecuación 18. Esta expresión también se plantea para el caso de concentradores parabólicos. Para una placa plana, sustituir por 1.

$$f_2(\theta) = b_0 + b_1 \theta + b_2 (\theta)^2 + b_3 (\theta)^3 + b_4 (\theta)^4 + b_5 (\theta)^5 \quad 18)$$

f_d es la fracción de radiación difusa irradiada al panel; colocar 1 si la superficie del módulo o panel es plana. $\alpha_{I_{sc}}$ es el coeficiente de temperatura para la corriente de cortocircuito.

La corriente de máxima potencia de operación del panel, I_{mw} , ver ecuación 19:

$$I_{mw} = I_{mw,ref} \frac{I_{sc}}{I_{sc,ref}} \quad 19)$$

$I_{mw,ref}$ es la corriente de máxima potencia de referencia del panel, especificación técnica, $I_{sc,ref}$ la corriente de cortocircuito de referencia del panel, especificaciones del fabricante.

La tensión de circuito abierto se estima a partir de la expresión 20:

$$V_{oc} = V_{oc,ref} N \delta(T_c) \ln I_e + \beta (T_c - T_{amb}) \quad 20)$$

$V_{oc,ref}$ es la tensión de circuito abierto de referencia, N es el número de celdas en serie, δT_c se refiere a la tensión o voltaje térmico por celda a la temperatura T_c , equivale a 1V por cada módulo de 36 celdas de sílice, I_e es la irradiancia efectiva en la que cada celda del panel solar responde. Está dado en soles, 1 Sol = 1 kW/m², β es un parámetro que relaciona la irradiancia efectiva I_e con la tensión en circuito abierto del panel (V/°C). En este caso se asume un valor constante. La tensión de máxima potencia, V_{mw} , es, por tanto, ecuación 21:

$$V_{mw} = V_{mw,ref} \frac{V_{oc}}{V_{oc,ref}} \quad 21)$$

$V_{mw,ref}$ es la tensión de máxima potencia de referencia del panel, especificación técnica.

Potencia panel solar

La potencia máxima de salida, P_{mw} , se obtiene a partir de la expresión 22:

$$P_{mw} = V_{mw} I_{mw} \quad 22)$$

Consumo de los dispositivos electrónicos de la unidad de monitoreo remoto

El sistema electrónico de registro y transmisión de datos de una unidad de monitoreo remoto tiene esta configuración general, la cual puede tener variantes específicas de acuerdo con las condiciones del entorno, autonomía energética y la exigencia de la transmisión de datos. Configuraciones de las Figura 5 y Figura 6 se han obtenido de Ionel et al. [6]:

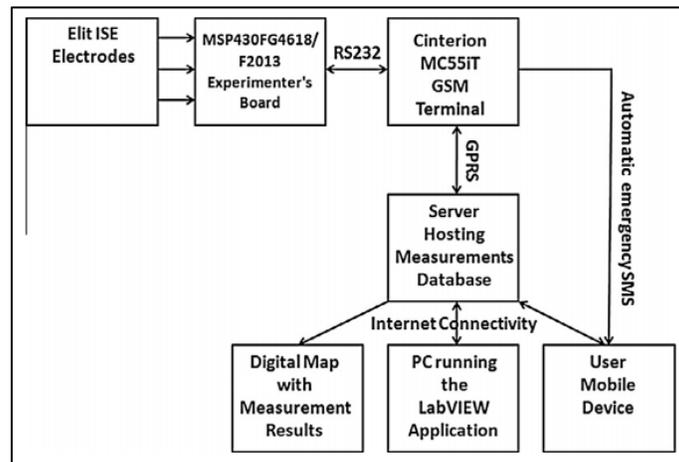


Figura 5 Arquitectura de instrumentación de análisis de calidad de agua. Fuente: Ionel, R. et al (2015) [6].

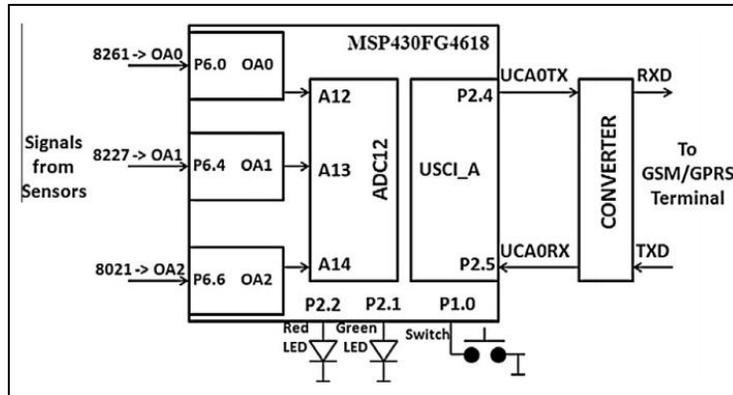


Figura 6 Esquema de microcontrolador. Fuente: Ionel, R. et al (2015) [6].

Lo antes expuesto contribuye a cuantificar las variables expresadas en la ecuación 1.

4 Bibliografía

- [1] M. d. Energía, «Explorador solar,» Departamento de Geofísica. Universidad de Chile, 2017. [En línea]. Available: <https://solar.minenergia.cl/inicio>. [Último acceso: Noviembre 2021].
- [2] S. E. Tools, «Sun Earth Tools,» [En línea]. Available: https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php?lang=es. [Último acceso: marzo 2021].
- [3] Molina, Alejandra; Martínez, Francisco;, «Explorador solar,» enero 2021. [En línea]. Available: <http://ernc.dgf.uchile.cl:48080/fotovoltaico>.
- [4] H. Gasquet, «Conversión de la luz solar en energía eléctrica. Manual teórico y práctico sobre los sistemas fotovoltaicos,» Solartronic SA de CV, Ciudad de México, 1997.
- [5] D. King, W. Boyson y J. Kratochvil, «Photovoltaic array performance model,» Sandia National Laboratories, Albuquerque, Nuevo México, 2003.
- [6] R. Ionel, L. Pitulice, G. Vasiu, S. Mischie y O. Bizerea, «Implementation of a GPRS based remote water quality analysis instrumentation,» *Measurement*, vol. 65, pp. 81-93, 2015.