

ANÁLISIS DE ACCIÓN DEL VIENTO SOBRE LOS HELIOSTATOS DE UN HORNO SOLAR PARA APLICACIONES MINERAS EN LA PUNA ARGENTINA

Luisa Romina Vargas¹, Constanza Lopez², Marcelo Gea², Cora Placco², Fernando Tilca², Juan F. Mathisson³

¹Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)- Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO) - Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de Salta (UNSa), Salta, Argentina
e-mail: vargasluisaromina@gmail.com

²Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO), Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de Salta (UNSa), Salta, Argentina
e-mail: marcelogea@gmail.com

³Instituto Tecnológico Regional Suroeste (ITRSO), Universidad Tecnológica (UTEC), Uruguay
e-mail: jfmathi@gmail.com

RESUMEN: Se propone un sistema de horno solar con helióstatos de 9 m² para una aplicación minera localizada en la Puna Argentina. El clima del lugar tiene entre sus características la ocurrencia de vientos con ráfagas de gran velocidad, lo cual pone en riesgo las estructuras de equipos con grandes áreas de exposición, como los sistemas de colección de energía solar. Por esta razón, se plantea el análisis estructural de los helióstatos frente a la acción del viento. En el presente trabajo se realiza la estimación de ráfagas críticas de viento por tratamiento estadístico, la determinación de su acción sobre las construcciones de acuerdo a la normativa y el análisis estructural del nuevo diseño de reflector. Se definió el tiempo máximo durante el cual el equipo se encontraría en la posición de resguardo, es decir fuera de operación. La verificación estructural se realizó para un rango de velocidades en función de ráfagas de viento críticas y la distribución de probabilidad de ocurrencia anual de velocidades de viento.

Palabras clave: energía solar, helióstatos, horno solar, acción del viento.

INTRODUCCIÓN

El trabajo presentado en este artículo se encuentra enmarcado en un proyecto que consiste en el desarrollo de la tecnología de horno solar para procesamiento de minerales a altas temperaturas a través de la construcción y optimización de un prototipo de concentrador solar térmico. La particularidad del diseño de horno solar propuesto es que tanto los helióstatos como el concentrador secundario se diseñaron con un foco lineal. Esto se debe a que en los ensayos preliminares los minerales se procesaron en recintos cilíndricos rotativos que permiten la circulación y el tamizado de los mismos.

El desarrollo es llevado adelante por investigadores del Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO) perteneciente a la Universidad Nacional de Salta y CONICET, en conjunto con personal de una empresa minera que posee una planta productora de boratos en la Puna salteña (Placco et al., 2018).

En trabajos previos se presentaron los primeros resultados, tanto en aspectos conceptuales como experimentales. Mediante el análisis con traza de rayos, se diseñó el primer prototipo de helióstato de 3m² compuesto por 8 facetas cuyo esquema se muestra en la figura 1. Experimentalmente se probaron los mecanismos de canteo y flexión de los espejos con lo cual se pudo comprobar el buen

funcionamiento del sistema de concentración del flujo solar para distintas posiciones del helióstato respecto al absorbedor (Placco et al., 2019).



Figura 1: Foto del helióstato del primer prototipo de horno solar

Nuevo diseño de helióstato

En los trabajos experimentales realizados sobre el primer prototipo se comprobó que el diseño de la estructura formado por un pedestal (Figura 2) resultó inestable frente a la acción del viento en ambas direcciones del movimiento de seguimiento (azimutal y altura).

En el nuevo diseño se procuró que, tanto los apoyos de la estructura principal sobre el suelo, como los apoyos del eje horizontal, se encuentren separados entre sí, para soportar con menores esfuerzos los torques generados en el sistema por la acción del viento. Por ello la estructura principal del nuevo prototipo apoya sobre el suelo en los cuatro vértices del rectángulo de la base y el eje horizontal lo hace sobre los lados de la estructura. Esta distribución otorga al sistema una mayor rigidez (Figura 3).

El movimiento azimutal se realiza respecto a un pivote central en la base y con rotación sobre las cuatro ruedas de apoyo, siendo una de ellas la que posee el mando motor. El movimiento de elevación se realiza con el moto-reductor acoplado directamente al eje horizontal. El sistema electromecánico automático para el seguimiento solar se adaptó al nuevo prototipo (Figura 4).



Figura 2: Estructura pedestal del primer prototipo de helióstato



Figura 3: Estructura del nuevo prototipo de helióstato



Figura 4: Motores para el movimiento azimutal (a) y de elevación (b)

Acción del viento en helióstatos

El sistema de helióstatos se propone para una aplicación térmica en una localización de la Puna. Allí una de las características climáticas principales, además de la gran heliofanía y altas amplitudes térmicas, es la ocurrencia de vientos con ráfagas de gran velocidad. Teniendo en cuenta las dimensiones del sistema de colección solar, con un área de exposición amplia, se decidió realizar el análisis de la velocidad de viento y la probabilidad de ocurrencia.

Los helióstatos están expuestos al viento atmosférico mientras prestan servicio, esto impone un riesgo para el sistema principal resistente como para sus componentes, los cuales deben diseñarse para minimizar la deformación de la estructura en general y local en la superficie reflectiva durante el funcionamiento a diferentes ángulos de elevación ($\alpha > 0^\circ$). También se planteó para el sistema una condición de supervivencia contra la máxima carga durante la ocurrencia de vientos fuertes (por ejemplo: frente de ráfaga o tormenta) en la posición de resguardo, cuando el helióstato está alineado horizontalmente a la superficie del suelo ($\alpha = 0^\circ$).

El objetivo principal del presente trabajo es encontrar un rango de velocidad de viento para el cual la estructura principal resistente verifique en las condiciones límites últimas y de servicio sin perder de vista la funcionalidad del sistema de helióstatos dentro de un proceso industrial. El indicador de que la funcionalidad no se vea afectada en gran medida será la baja probabilidad de ocurrencia de las velocidades críticas de viento.

VELOCIDAD DEL VIENTO

El viento se produce debido a que, “el sol calienta de forma desigual las diferentes zonas del planeta, provocando el movimiento del aire que rodea la Tierra”. El viento es por tanto energía en movimiento. La energía del mismo depende de su velocidad y, en menor medida, de su densidad. Cerca del suelo, la velocidad es baja, pero aumenta rápidamente con la altura (Schallenberg et al, 2008).

En la evaluación del potencial eólico, “el período mínimo de mediciones para valoración del sitio será de 4 meses, siempre que se cuente con datos de otra estación de por lo menos un par de años para realizar la extensión de la serie mediante el método de Medición-Correlación-Predicción (MCP). En su defecto, el período mínimo será de un año” (Mattio et al, 2014).

En este proyecto, hasta la actualidad no se cuenta con mediciones en el sitio, por tal motivo, para una evaluación inicial se plantearon dos métodos para el análisis de velocidad de viento: análisis estadístico y análisis por reglamentación.

Para el análisis estadístico se recurrió a mapas eólicos para una estimación de velocidad de viento a largo plazo en forma local. Luego se realizó el tratamiento de datos para obtener información tal como, la distribución de probabilidad de velocidad de viento, rosa de los vientos, velocidad media anual, velocidad de ráfagas de 3 segundos de duración con períodos de retorno de un año (V_{e1}) y de 50 años (V_{e50}). Los resultados obtenidos fueron corroborados a través de un software de simulación eólica.

Por otro lado, paralelamente se realizó el análisis de la velocidad de viento de acuerdo al contenido del Reglamento Argentino de Acción del Viento sobre las Construcciones (CIRSOC 102, 2005).

Estimación de ráfagas críticas de viento por tratamiento estadístico

Para la estimación de ráfagas de 3 segundos de duración se trabajó con los siguientes datos:

Latitud: $-24,545380^\circ$. Longitud: $-66,665727^\circ$. Altitud: 3975 msnm. En adelante se denomina Sitio 1. En UTM: $x=736453,3$ m; $y=7283388,5$ m; Zona 19, hemisferio sur. Superficie concentradora: 3,86 m de alto por 2,66 m de ancho; su centro está a 2,20 m del suelo.

Del Mapa Eólico de Salta y Mapa Eólico Argentino (sigeolico.energia.gob.ar) se obtuvo: Factor de escala de Weibull (c) 3,2 m/s; factor de forma de Weibull (k) 1,97; densidad del aire (ρ) $0,772 \text{ kg/m}^3$; temperatura media anual (T) 284,4 K; velocidad media anual del viento a 10 m sobre el suelo (V_m) 3,0 m/s.

Luego se calculó la velocidad del viento en el centro del concentrador mediante la expresión (Ec. 1):

$$V_2 = V_1 \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^\alpha \quad (1)$$

Donde:

V_1, V_2 : velocidades del viento a las alturas h_1, h_2 sobre el suelo;

α : exponente de rugosidad; depende de las características del terreno (Mattio et al, 2014), se decidió adoptar $\alpha = 0,125$.

Con los valores: $h_1 = 10\text{m}$; $V_1 = 3,0 \text{ m/s}$; $h_2 = 2,2 \text{ m}$, se obtuvo un valor de V_2 de 2,48 m/s que corresponde a la velocidad media anual de viento a una distancia de 2,2 m sobre el suelo.

Se supuso que el parámetro k de Weibull, a la altura de 2,2 m se mantiene igual al valor que tiene a 10 m de altura sobre el nivel del suelo ($k = 1,97$). Utilizando las distribuciones de Weibull y de Rayleigh se obtuvieron los valores que se muestran en la Tabla 1, donde mi es el número de horas por año que el viento tiene la velocidad V_a , a una altura de 2,2 m sobre el suelo (centro del espejo concentrador).

La distribución de velocidades según ecuación de Weibull (Tabla 1) permitirá luego completar el análisis de velocidad de viento en relación a la disponibilidad del sistema. De la distribución de Weibull, en caso de seleccionar 10 m/s como velocidad máxima media anual admisible, es decir como velocidad para la cual el heliostato se rebatirá a la posición de resguardo, el sistema estará sin disponibilidad 1 hora por año como máximo ($mi = 1$).

Se calculó además la velocidad de referencia (V_{REF}), velocidad extrema promediada en 10 minutos con tiempo de retorno de 50 años, a la altura del centro del espejo. Si se midiera como se hace en forma habitual con un anemómetro, el cual mide cada segundo la velocidad y entrega el promedio de los 600 valores de un período de 10 minutos, la velocidad V_{REF} sería el equivalente al máximo valor promediado por el anemómetro en 50 años de medición (UNE-EN 61400-12-1, 2018; Mattio y Tilca, 2009).

El Código de Construcción Británico calcula la velocidad de referencia como 5 veces la velocidad media del sitio. Esto se debe a que la relación V_{REF}/V_{MED} es una característica probable de latitudes medias. Sin embargo, en Pierik et al (1999) se ha demostrado que dicha relación varía en función del parámetro de forma de Weibull (k). Para un valor de 5 el parámetro k es 1,77, valor característico para latitudes medias y terrenos planos en tierra adentro.

Tabla 1: Distribución de velocidades de viento con bin de 1 m/s, según ecuaciones de Weibull y Rayleigh, a 2,2 m sobre el suelo.

Weibull		Rayleigh	
Va (m/s)	mi	Va (m/s)	mi
0.25	452	0.25	555
1	1577	1	1969
2	2300	2	2685
3	2100	3	2127
4	1418	4	1160
5	748	5	459
6	315	6	135
7	108	7	30
8	30	8	5
9	7	9	1
10	1	10	0
11	0	11	0
12	0	12	0

En este proyecto en particular, el heliostato estará ubicado en una zona cordillerana de la puna salteña. Por tanto, es necesario referirse a la industria eólica, donde la V_{REF} es un parámetro crítico a ser calculado, pues está directamente relacionado con los criterios de seguridad de sobrevivencia de la máquina y la estructura. Las Normas Europeas de Aerogeneradores II, EWTS II (Pierik et al, 1999) exponen una correlación entre la relación V_{REF}/V_{MED} y el parámetro de forma de Weibull (k) (Ec. 2), mediante la cual se realiza el cálculo de la velocidad de referencia:

$$\frac{V_{REF}}{V_{MED}} = \left[\frac{1}{\Gamma(1 + 1/k)} \right] \left\{ -\ln \left[1 - e^{-\frac{\ln(1-1/Tr)}{n}} \right] \right\}^{1/k} \quad (2)$$

Donde:

Γ : Función Gamma

k : Parámetro de forma de la distribución de Weibull

Tr : Período de retorno o recurrencia en años.

n : número de eventos independientes por año.

Para el caso en estudio se tomó como período de recurrencia 50 años y número de eventos independientes por año igual a 23037. EWTS II (Pierik et al, 1999) sugiere utilizar los valores de Bergstrom incluidos en EWTS II (página 1 sub C.12) (Pierik et al, 1999) por la buena correlación entre las medidas y los cálculos para promedios de 10 minutos y 1 hora.

Para el lugar donde se emplazará el sistema de heliostatos, con $V_{MED} = 2,48$ m/s a la altura de 2,2 m sobre el suelo, de la Ec. (2) se obtuvo $V_{REF} = 10,7$ m/s.

El valor de V_{REF} calculado se corroboró a través de los resultados obtenidos por el software de simulación eólica WindPro. Se utilizó una serie de datos de reanálisis ERA5 de la localización más cercana al Sitio 1 que contaba con dicha información. El sitio más cercano se denomina en adelante Sitio 2. Por el Método MCP y con la información de ambos sitios, se obtuvo la serie de datos para la localización donde se emplazará el sistema de heliostatos. Los resultados del software para el Sitio 1 y a 2,2 m sobre el nivel del suelo indican valores de $V_{MED} = 2,30$ m/s, parámetro de forma de Weibull $k = 1,162$, parámetro de escala de Weibull $c = 2,43$ m/s y una velocidad de referencia $V_{REF} = 10,1$ m/s, con una densidad del aire de $0,808$ kg/m³.

Ambos métodos llegan a similar valor de velocidad de referencia. Hay que tener en cuenta que el programa WindPro calculó los factores k y c de Weibull para una altura de 2,2 m, en cambio, en cálculo con SIG eólico se supuso que los parámetros son iguales a los valores a 10 metros. El software determinó un $k = 1,334$ y un $c = 3,43$ m/s para 10 m de altura. La figura 5 muestra la distribución de Weibull para el Sitio 1.

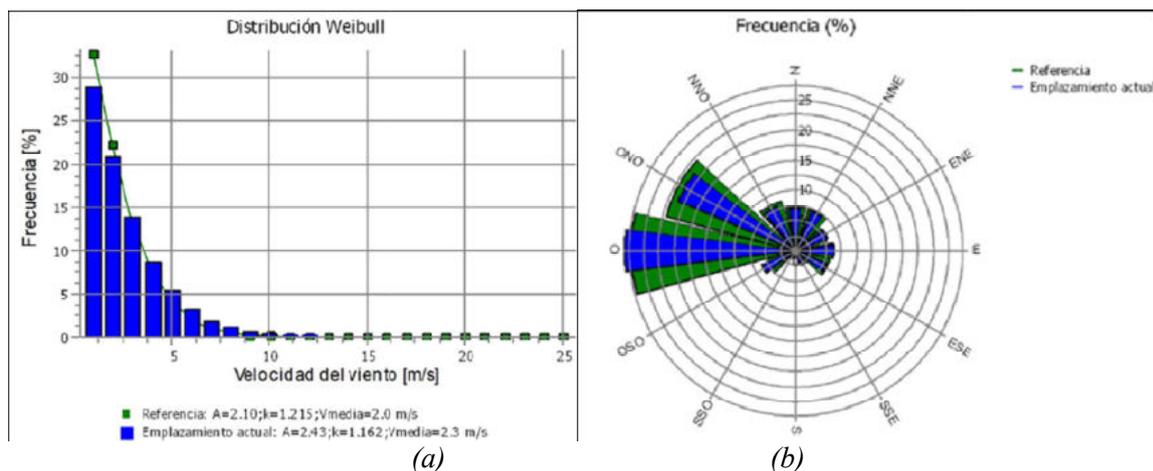


Figura 5: (a) Distribución de Weibull del sitio 1. (b) Rosa de viento de frecuencia. Elaboración propia utilizando el programa WindPro.

Luego se calculó la velocidad de ráfaga de 3 segundos de duración, con un período de retorno de un año ($Ve1$) y de 50 años ($Ve50$). Con los gráficos de la European Wind Turbine Standards II, Página 1-Sub C-20 (Pierik et al, 1999), en los que se utilizan el factor de Weibull k (1,97) y la velocidad media (2,48 m/s), se obtuvo $Ve1 = 12$ m/s y $Ve50 = 14$ m/s. La velocidad de viento para verificación será la $Ve50$.

El micro sitio donde estará el concentrador es una zona llana, prácticamente sin arbustos ni colinas a un radio de unos 50 m. Sin embargo, es una zona cordillerana, motivo por el cual pueden ocurrir importantes variaciones de velocidad de viento en pocos kilómetros de distancia. Por lo tanto, se decidió adoptar un factor de seguridad de 1,3, con lo que la $Ve50$ de verificación tendrá un valor de 18,2 m/s.

Determinación del viento a través de normativa

El reglamento CIRSOC 102 (2005) presenta un mapa y una tabla de velocidad básica del viento. Los valores hacen referencia a velocidades de ráfaga de 3 segundos, en m/s a 10 m sobre el terreno para una categoría C de exposición al viento. Dichas velocidades están asociadas con una probabilidad de

0,02 de ser igualadas o excedidas en cualquier año dado (intervalo de recurrencia medio de 50 años) (CIRSOC 102, 2005).

La reglamentación mencionada, describe la categoría de exposición C, como terreno abierto con obstrucciones dispersas que poseen alturas generalmente menores que 10 m. Cuando la categoría de exposición sea distinta, existe un coeficiente que contempla la variación de la velocidad del viento con la altura sobre el terreno y con la rugosidad (CIRSOC 102, 2005).

El mapa de velocidades de viento de la Figura 1A perteneciente al reglamento CIRSOC 102 (2005) está basado en datos de picos de ráfagas recolectadas en 58 estaciones meteorológicas argentinas en las que se disponía de al menos 10 años de registros. Las series de viento resultantes fueron ajustadas usando la distribución de valores extremos de Fisher-Tippett tipo I (CIRSOC 102, 2005).

En este proyecto, el heliostato será emplazado en el predio de una minera de boratos en Santa Rosa de los Pastos Grandes, dentro del departamento de Los Andes de la Provincia de Salta, por lo cual, de acuerdo al mapa de velocidades del reglamento consultado, en tal lugar correspondería una velocidad básica (V_b) de aproximadamente 36 m/s para una altura de 10 m sobre la superficie del suelo.

Selección del viento

Considerando los valores de velocidad de viento en las subsecciones precedentes, para el análisis estructural se decidió trabajar con un valor conservador, por tal motivo, se hizo uso de la velocidad obtenida del mapa de viento del reglamento CIRSOC 102 (2005) a 10 m sobre el nivel del suelo donde se emplazará el heliostato.

Sin embargo, la velocidad que actuaría en el sistema estructural del heliostato debe tener en cuenta la variación de dicha velocidad con la altura debido a la rugosidad del terreno. En general, se supone que la velocidad de la masa de aire es cero en la zona en contacto con el suelo y creciente con la altura.

Existen diferentes formas de aproximar el perfil vertical de viento, en este proyecto se trabajó haciendo uso de la ley exponencial propuesta por Hellmann en 1915 (Mattio et al, 2014) (Ec. 1).

Para la altura (h_1) de 10 m, con velocidad básica de viento conocida (V_{h1}) de 36 m/s, rugosidad del terreno (α) de 0,125 y considerando (h) la altura máxima de la superficie concentradora del heliostato en posición vertical respecto del nivel del suelo de 4,06 m, la velocidad en dicha altura de acuerdo con la Ec. (1) resulta $V_{h2} = 32$ m/s.

Trabajando con la Ec. (1) se obtuvo el siguiente cuadro y gráfico correspondiente al perfil de velocidad de viento en el sitio donde se emplazaría el heliostato (Figura 6).

Si bien en el trabajo se plantea el análisis estructural del heliostato frente a la acción del viento, no se pierde de vista la finalidad del heliostato. El sistema de concentración debe tener una disponibilidad amplia para poder cumplir con el objetivo de funcionalidad dentro del proceso industrial para el cual se lo destina. Es por ello que al momento de realizar la verificación de la estructura se decidió considerar un rango de valores de velocidad de viento de análisis.

El rango propuesto es entre la velocidad de ráfagas de 3 segundos de duración con un período de retorno de 50 años a la altura de 4,06 m ($V_h = 32$ m/s) y un 30% de dicha velocidad (10 m/s). El límite mínimo del rango seleccionado, se corresponde aproximadamente a la velocidad de viento con una probabilidad de ocurrencia de 1 hora por año de la distribución de Weibull mencionada en la subsección precedente.

Teniendo en cuenta la distribución de probabilidad de Weibull (Tabla 1) y el rango de velocidad de viento para la verificación estructural, se puede cruzar dicha información buscando seleccionar un rango de velocidades que permita a la estructura rebatirse horizontalmente para no exponerse a ráfagas de viento de gran velocidad y al mismo tiempo tener la mayor cantidad de horas disponible para el seguimiento solar.

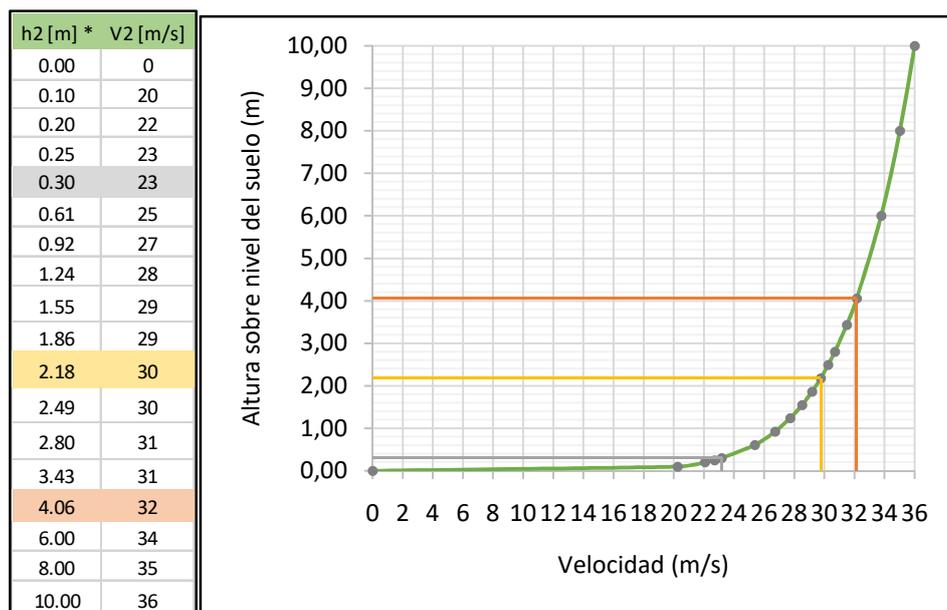


Figura 6: Perfil de velocidad en cuadro (izquierda) y perfil de velocidad en gráfico (derecha)

ANÁLISIS DE CARGA DE VIENTO

El Reglamento Argentino de Acción del Viento sobre las Construcciones (CIRSOC 102,2005) brinda lineamientos para el cálculo de las cargas de viento de diseño para edificios y otras estructuras, incluyendo su sistema principal resistente como sus elementos componentes. Para ello, la normativa consultada presenta una serie de procedimientos admitidos: Procedimiento simplificado, analítico y procedimiento del túnel de viento.

Para el análisis de carga de viento de diseño del heliostato, se empleó el procedimiento analítico, adoptándose como hipótesis el campo de validez del procedimiento descrito en el reglamento CIRSOC 102 (2005).

Para el cálculo de la carga de viento, en una primera instancia se deben determinar los coeficientes y factores para la presión dinámica (q_z). Con esto se realizó el cálculo de la presión haciendo uso de la Ec. (3), según el artículo 5.10 del reglamento CIRSOC 102 (2005).

$$q_z = 0,613 K_z K_{zt} K_d V^2 I \quad (3)$$

Donde:

K_z : Coeficiente de exposición para presión dinámica. Ver artículo 5.6 CIRSOC 102 (2005).

K_{zt} : Factor topográfico. Ver artículo 5.7 del reglamento CIRSOC 102 (2005).

K_d : Factor de direccionalidad del viento. Ver artículo 5.4 del reglamento CIRSOC 102 (2005).

V: Velocidad básica del viento.

I: Factor de importancia. Ver artículo 5.5 del reglamento CIRSOC 102 (2005).

Luego aplicando la ecuación Ec. (4) se determina la carga de viento de diseño (p). Siendo esta la presión estática equivalente.

$$p = q_z G C_f \quad (4)$$

Donde:

G: Factor de efecto de ráfaga. Ver artículo 5.8 del reglamento CIRSOC 102 (2005).

C_f : Coeficiente de fuerza neta.

Para el heliostato, se determinó primero la carga de viento de diseño para el caso considerado más desfavorable, en el cual el sistema de concentración se supone en posición vertical, similar a un cartel lleno. En los cuadros siguientes (Tabla 2 y Tabla 3), se observa los resultados obtenidos para este caso particular. La velocidad básica considerada para el cálculo fue de 32 m/s, correspondiente a la altura máxima del heliostato (4,06 m).

Tabla 2: Presión dinámica con sus factores y coeficientes de cálculo

PRESION DINAMICA (q)					
DATOS			RESULTADOS		
Ubicación	Santa Rosa de los Pastos Grandes	V	32	m/s	Vel. básica del viento
Tipo de estructura	Cartel lleno	K_d	0.85	s.u.	Factor de direccionalidad
Cat. Construcción (Riesgo)	II (R Tabla A-1)	I	1	s.u.	Factor de importancia
Cat. Exposicion (Rugosidad)	C (Lista en R 5.6)	K_z	0.87	s.u.	Coefficiente de exposición
Caract. del terreno (Incremento)	Sin loma, escarpa y colina	K_{zt}	1	s.u.	Factor topográfico
Con coeficientes y factores	Para estructuras de baja altura	q_z	464	N/m2	$q_z = 0,613 K_d K_z K_{zt} V^2 I$

Tabla 3: Carga de viento de diseño con su factor y coeficiente de cálculo

CARGA DE VIENTO DE DISEÑO (p)					
DATOS			RESULTADOS		
	Para estructuras de baja altura	q_z	464	N/m2	Presión dinámica
Tipo de estructura (r ó f)	Rígida (R 5.8.1)	G	0.85	s.u.	Factor efecto de ráfaga
Clasificación cerramientos	Carteles llenos (Tabla 11)	C_f	1.2	s.u.	Coef. de fuerza neta
SPRFV y C&R	p/Edif. abiertos y otras estructuras	p	473	N/m2	$q_z GC_r$

Como se mencionó anteriormente, el análisis de carga se realizó además para una serie de velocidades dentro de un rango, el cual se fundamentó en la sección anterior.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Método de análisis

El análisis estructural se realizó con bases en los reglamentos CIRSOC 302 (2005) y CIRSOC 301 (2005). El primero establece que los proyectos se deben basar en los principios del Método por Estados Límites, también designado por Proyecto por Factores de Carga y Resistencia (*Load and Resistance Factor Design-LRFD*) (Troglia, 2010).

En el Método por Estados Límites (LRFD), en términos generales, las incertidumbres que presentan las acciones y sus efectos son cubiertas por los factores de carga (γ_i). Y las incertidumbres asociadas con el material, tales como su comportamiento, sus características, dimensiones, entre otras, son cubiertas por los factores de resistencia (ϕ).

Un estado límite, es una condición que representa el límite de utilidad de una estructura o de una parte de ella (Troglia, 2010). En el método LRFD, se analizan dos estados límites, el último y el de servicio.

El criterio de diseño de los Reglamentos CIRSOC asegura que un estado límite es superado sólo con una pequeña probabilidad aceptable, mediante la selección de adecuados factores de carga (factores de mayoración), factores de resistencia (factores de minoración), cargas y resistencias nominales, las cuales nunca serán excedidas bajo las hipótesis de proyecto (Troglia, 2010).

Los estados límites últimos (o de resistencia), definen la seguridad contra las cargas extremas durante la vida útil de la estructura. Los estados límites de servicio, definen los requerimientos funcionales. Estos últimos se establecen a fin de que la estructura presente un comportamiento normal y aceptable bajo condiciones de servicio.

Para cada estado límite último se debe cumplir que la resistencia de diseño (Rd) de la estructura en su conjunto, cada elemento estructural y sus uniones, sea mayor o igual o mayor a la Resistencia Requerida (Ru). Para cada estado límite de servicio se deberá cumplir que el valor admisible sea mayor o igual o mayor al valor requerido (Troglia, 2010).

En cuanto al análisis estructural en sí, para determinar reacciones, solicitaciones de sección y deformaciones, éste debe ser realizado sobre un modelo que refleje el comportamiento de la estructura real (Troglia, 2010). Para ello, CIRSOC 301 (2005) permite dos tipos de estructura básicas, estructuras totalmente restringidas y parcialmente restringidas. Para este proyecto se plantó como hipótesis que la estructura del bastidor del helióstato es totalmente restringida, es decir las uniones tienen la rigidez necesaria para mantener invariables los ángulos entre las barras que a ellas concurren cuando actúan las acciones sobre la estructura.

El CIRSOC 301 (2005) en el Capítulo C, Sección C.1. da las especificaciones generales para el análisis estructural. En este proyecto en particular, la estructura es de tipo hiperestática, y se trabajó con análisis global elástico para la determinación de las reacciones de vínculo y las solicitaciones de sección. Se trabajó considerando al sistema principal resistente conformado por elementos tipo barras.

Desarrollo del análisis

Se determinaron las acciones sobre la estructura principal resistente del bastidor del helióstato, con las cuales se realizó la verificación para los estados límites últimos.

Se tuvo en cuenta las disposiciones del reglamento CIRSOC 301 (2005) donde se mencionan las diferentes combinaciones de carga para los diferentes estados, cobrando relevancia aquellas donde interviene la acción del viento.

Se utilizó el programa de cálculo de estructuras CYPE 3D versión estudiantes para la determinación de los esfuerzos en los elementos componentes del sistema principal resistente. El programa considera un comportamiento elástico y lineal de los materiales.

La verificación de la estructura se realizó de acuerdo a lo dispuesto en los reglamentos CIRSOC 302 (2005) y CIRSOC 301 (2005).

Se realizaron los cálculos para el bastidor (Figura 7) teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- Características mecánicas de las barras: Tubo estructural sin costura, límite de fluencia 248 MPa, tensión de rotura 400 MPa.
- Propiedades generales del acero: Módulo de elasticidad longitudinal 200000 MPa; módulo de elasticidad transversal 77200 MPa; coeficiente de Poisson elástico 0,3; peso específico 77,3 KN/m³ (CIRSOC 301, 2005).
- Parámetros geométricos de sección 40x40x1,6 mm: Ancho exterior 40 mm; espesor de pared 6 mm; sección bruta 2,4 cm²; peso por metro lineal 1,9 Kg/m; momento de inercia xx e yy 5,8 cm⁴; módulo elástico resistente 2,9cm³; módulo plástico 3,4cm³; momento de inercia torsional 9cm⁴.
- Parámetros geométricos de sección 20x40x1,6 mm: Ancho exterior 20 mm; alto exterior 40 mm; espesor de pared 1,6 mm; sección bruta 1,8 cm²; peso por metro lineal 1,4 Kg/m, momento de inercia xx 3,4 cm⁴; momento de inercia yy 1,2 cm⁴; módulo elástico resistente xx 1,7 cm³; módulo elástico resistente yy 1,2 cm³; módulo plástico xx 2,2 cm³; módulo plástico yy 1,3 cm³; momento de inercia torsional 8cm⁴.
- Peso por faceta: 26 Kg.

La verificación estructural se realizó para los elementos componentes del bastidor, cuyas dimensiones se pueden observar en la figura 7 (Estructura Base). También se adicionó al cálculo la verificación de la estructura suponiendo la adición de refuerzos (Estructura Reforzada) en los elementos del bastidor ubicados verticalmente en la figura 7. El refuerzo que se consideró fue tal que los parámetros geométricos de los elementos resultaron equivalentes a los de una sección de 40x40x1,6 mm.

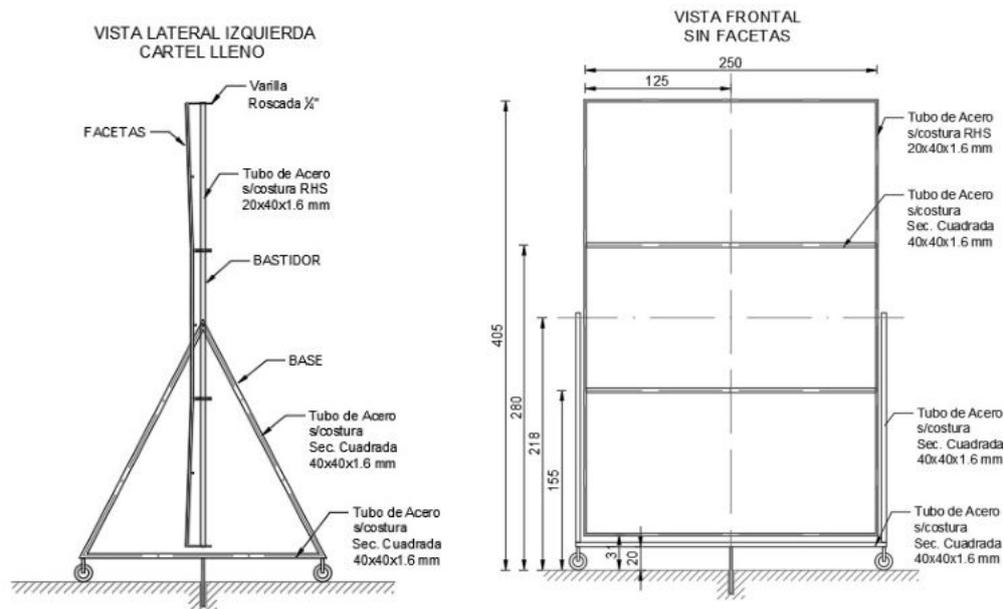


Figura 7: Esquema del heliostato con sus elementos componentes

RESULTADOS OBTENIDOS

El resumen de los resultados de la verificación estructural de los elementos que forman el bastidor se encuentra en la Tabla 4.

El bastidor del prototipo de heliostato actual con los elementos verticales de sección 20x40x1,6 mm, denominada “Estructura Base” en Tabla 4, verifica estructuralmente en posición vertical (tipo cartel lleno) para los estados límites últimos cuando la velocidad del viento es menor o igual a 19 m/s.

Si el bastidor del heliostato contara con los elementos verticales de sección 40x40x1,6 mm, denominada “Estructura Reforzada” en Tabla 4, verifica estructuralmente en posición vertical (tipo cartel lleno) para los estados límites últimos cuando la velocidad del viento es menor o igual a 22 m/s.

La no verificación del sistema ante velocidades mayores a las mencionadas se da principalmente en la flexión alrededor del eje x, siendo este último el coincidente con el eje de elevación.

Tabla 4: Resumen de resultados del análisis estructural en función de la velocidad del viento.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL f(Velocidad Viento)							
Item	V	V	p	Estructura Base		Estructura Reforzada	
	[m/s]	[Km/hr]	[N/m ²]	Resultado	Observación	Resultado	Observación
Vb	36	130	599	NV	Flexion eje x y esfuerzos combinados	NV	Flexion eje x y esfuerzos combinados
Vh	32	115	473	NV	Flexion eje x y esfuerzos combinados	NV	Flexion eje x y esfuerzos combinados
0.9 Vh	29	104	384	NV	Flexion eje x y esfuerzos combinados	NV	Flexion eje x y esfuerzos combinados
0.8 Vh	26	92	303	NV	Flexion eje x y esfuerzos combinados	NV	Esfuerzos combinados
0.7 Vh	22	81	232	NV	Flexion eje x y esfuerzos combinados	V	-.
0.6 Vh	19	69	170	V	-.	V	-.
0.5 Vh	16	58	118	V	-.	V	-.
0.4 Vh	13	46	76	V	-.	V	-.
0.3 Vh	10	35	43	V	-.	V	-.

Nota: NV= No verifica; V= Verifica; eje x= coincidente con el eje de elevación

CONCLUSIONES

Se obtuvo la velocidad máxima para la cual parte de la estructura principal resistente a la fuerza del viento en la posición de mayor criticidad (tipo cartel lleno) verifica para los estados límites últimos.

La verificación se dio para una velocidad de viento de 19 m/s, velocidad correspondiente al 60% de ráfagas de 3 segundos de duración con período de retorno de 50 años para la altura de 4,06 m sobre el nivel del terreno en el sitio donde se emplazará el sistema de heliostatos.

Del análisis de la estructura reforzada en la zona de mayor sensibilidad ante la flexión, se tiene que el incremento en la velocidad del viento crítica que admitiría la estructura con el refuerzo propuesto es de 3 m/s. Por lo que se pudo notar que la estructura frente al refuerzo propuesto no tuvo incrementos significativos en la velocidad máxima a la cual el sistema podría ser expuesto.

De acuerdo al análisis estadístico de la velocidad de viento, se obtuvo la probabilidad de ocurrencia anual de velocidades en el sitio donde se emplazará el sistema de heliostatos, lo cual permitió adoptar una probabilidad como el valor máximo admisible de indisponibilidad anual.

Se logró obtener el rango de velocidad de viento para el cual el prototipo actual verificado puede encontrarse en la posición crítica con baja probabilidad anual (menor a 1 hora por año) de tener que rebatirse a posición de resguardo. Cabe recordar que el rango de velocidad mencionado resultó de 10 m/s a 19 m/s.

Si bien se pudo realizar la verificación a estados límites últimos y se logró encontrar el rango de velocidades de viento buscado, resta completar la verificación con el análisis estructural para los estados límites de servicio. Se propone continuar dicho análisis con el objetivo de verificar que el rendimiento óptico del campo de reflectores no se vea afectado por las deformaciones del sistema. Para ello se debe fijar una deformación límite aceptable del bastidor y las facetas, que no afecten en demasía la forma de la imagen que genera el concentrador en el sistema de acumulación.

REFERENCIAS

- CIRSOC 102. (2005). Reglamento Argentino de Acción del Viento sobre las Construcciones. INTI CIRSOC, Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios, Secretaría de Obras Públicas de la Nación.
- CIRSOC 301. (2005). Reglamento Argentino de Estructuras de Acero para Edificios. INTI CIRSOC, Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios, Secretaría de Obras Públicas de la Nación.
- CIRSOC 302. (2005). Reglamento Argentino de Elementos Estructurales de Tubos de Acero para Edificios. INTI CIRSOC, Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios, Secretaría de Obras Públicas de la Nación.
- Mattio H. y Tilca F. (2009). Recomendaciones para mediciones de velocidad y dirección de viento con fines de generación eléctrica, y medición de potencia eléctrica generada por aerogeneradores. CREE, INENCO, Ministerio de Planificación Federal Inversión Pública y Servicios, Secretaría de Energía de la Nación.
- Mattio H., Tilca F., Jones R. (2014). Curso de Energía Eólica Apuntes Complementarios. Ministerio de Energía y Minas. Fondo Argentino de Cooperación Sur, Sur y triangular (FO-AR).
- Pierik J.T.G., Dekker J.W.M., Braam H., Bulder, B.H., Winkelaar D., Larsen G.C., ... & Molly J.P. (1999, March). European wind turbine standards II (EWTS-II). In EWEC-CONFERENCE- (pp. 568-571).
- Placco C., Gea M., Bonini M., Gutiérrez E., Fernández C., Suligoy H. (2018). Estudio geométrico de un horno solar para procesamiento de minerales a altas temperaturas. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 22, pp. 02.25-02.36
- Placco C., Gea M., Casimiro R., Hongn M., Fernández C., Suligoy H., Lacuadra D. (2019). Construcción y ensayos de un heliostato de foco lineal para un horno solar. Acta de la XLII Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 7, pp. 02.83-02.94.
- Schallenberg J., Izquierdo G., Rodríguez C., Falcón P., Déniz R., Torres M., Pérez D., Rodríguez G., Fariña J., Ortín V. (2008). Energías Renovables y Eficiencia Energética. Instituto Tecnológico de Canarias. Primera edición. ISBN 978 84 69093 86 3.

Trogia G. (2010). Estructuras de Acero con Tubos y Secciones Abiertas Conformadas en Frio, Proyecto por estados límites. Tomo I. Primera edición. ISBN: 978-987-24343-4-2. Ed. Nueva Librería.

UNE-EN 61400-12-1, Aerogeneradores, Parte 12-1: Medida de la curva de potencia de aerogeneradores productores de electricidad. Mayo 2018

Mapa Eólico Argentino, sigeolico.energia.gob.ar

WAsP - DTU, URL: <https://www.wasp.dk/> (acceso Agosto 2019)

WindPro – EMD International, URL: <https://www.emd.dk/windpro/> (acceso Agosto 2019)

WindSim, URL: <http://windsim.com/software.aspx> (acceso Agosto 2019)

ACTION OF THE WIND ON THE SOLAR FURNACE'S HELIOSTATS FOR MINING APPLICATIONS IN THE ARGENTINE PUNA

ABSTRACT: A solar furnace system with heliostats is proposed for a mining application located in the Argentine Puna. One of the characteristics of the local climate is the occurrence of high-speed wind gusts that put the structures of the solar energy equipment at risk. Therefore, structural analysis of heliostats against the action of the wind is proposed. This paper presents the study of estimation of critical wind gusts through statistical treatment, the determination of its action on buildings according to regulations and the structural analysis of a new reflector design. The maximum time during which the equipment would be in the backup position was defined, that is, out of operation. Structural verification was carried out for a range of speeds based on critical wind gusts and probability distribution of annual occurrence of wind speeds.

Keywords: solar energy, heliostats, solar furnace, wind action.