

Anexo II – Interpolación de los resultados del Brams para alturas comerciales

Tras la finalización de las simulaciones del modelo Brams para el año 2013, el Cepel solicitó al Inpe diversos cálculos de post-procesamiento para obtener los parámetros de Weibull y la consolidación de los datos horarios en el formato de día típico anual. Además de los datos post-procesados, el Inpe repasó para el Cepel todo el conjunto de datos resultante del modelo (velocidad y dirección del viento, desvío estándar de la velocidad, etc.) en las alturas nativas. Sin embargo, la presentación de los resultados de la simulación para el año 2013 del nuevo Atlas del Potencial Eólico de Brasil tomó en cuenta las diversas alturas de aerogeneradores comerciales, sin coincidir, necesariamente, con aquellas utilizadas en el procesamiento del modelo Brams.

Los resultados de las simulaciones fueron obtenidos y suministrados para cinco (5) alturas nativas del modelo. Para fines del proyecto del Nuevo Atlas del Potencial Eólico de Brasil se definieron seis (6) alturas como muestra la Figura 1.

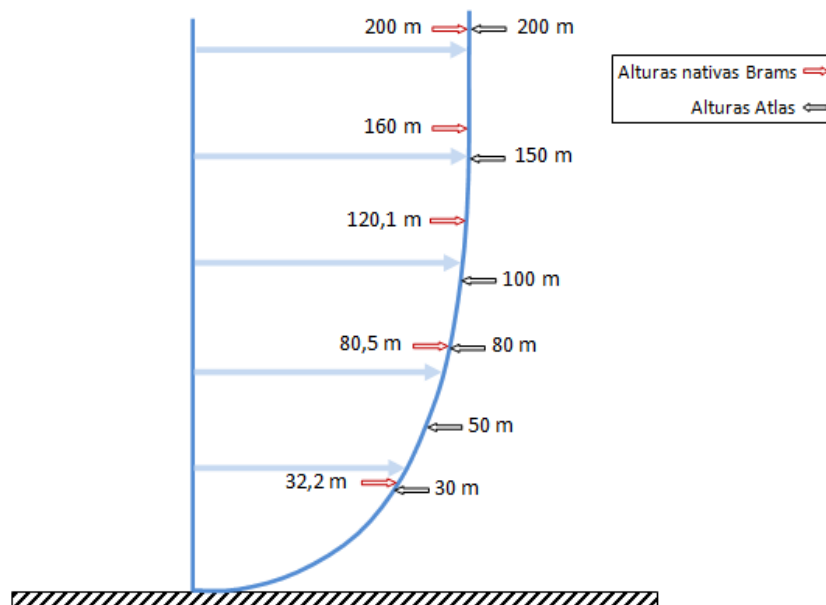


Figura 1. Alturas nativas del Brams y alturas definidas para el Atlas Eólico.

Toda la metodología presentada fue aplicada para cada punto de célula del modelo Brams en la resolución de 5 km x 5 km, utilizando herramientas de álgebra de mapas disponibles en *softwares* de geoprocésamiento. A continuación, son descritas las metodologías utilizadas para la elaboración de los mapas temáticos.

Velocidades del viento

Además del suministro de archivos geotiff con informaciones de la velocidad media anual ajustada para todas las alturas nativas del Brams, el Inpe proporcionó informaciones (en el mismo formato de archivo) de la rugosidad utilizada por el modelo. Para determinar la velocidad en las alturas definidas por el Atlas, tomando como base los datos en las alturas nativas del modelo, se utilizó la expresión logarítmica del perfil del viento como se ilustra a continuación.

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{\ln\left(\frac{h_2}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_1}{z_0}\right)}$$

donde:

h_1 = altura del suelo del punto 1 [m];

h_2 = altura del suelo del punto 2 [m];

v_1 = velocidad en el punto 1 [m/s];

v_2 = velocidad en el punto 2 [m/s];

z_0 = longitud de rugosidad [m]

Para estimar la velocidad de una altura definida por el Atlas de la cual la altura nativa del Brams se encuentra muy cercana, se aplicó directamente la expresión logarítmica. En el caso en que la altura definida se encontraba en una región intermedia entre dos alturas nativas consecutivas, fue usado un valor medio de las velocidades calculadas, teniendo como referencia las alturas nativas inmediatamente superior e inferior a la altura definida por el Atlas. Los procedimientos utilizados, para cada altura definida por el Atlas, son descritos a continuación:

Velocidad a 30 m

Para el cálculo de la velocidad en la altura de 30 m se consideró la altura nativa de 32,2 m, de la forma:

$$v_{30} = v_{32,2} \frac{\ln\left(\frac{30}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{32,2}{z_0}\right)}$$

Velocidad a 50 m

Para el cálculo de la velocidad en la altura de 50 m se consideraron las velocidades en las alturas inmediatamente inferior e inmediatamente superior, 32,2 m y 80,5 m, cada una de las cuales fue calculada según el procedimiento mostrado anteriormente:

$$v_{50\text{inf}} = v_{32,2} \frac{\ln\left(\frac{50}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{32,2}{z_0}\right)} \quad \text{e} \quad v_{50\text{sup}} = v_{80,5} \frac{\ln\left(\frac{50}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{80,5}{z_0}\right)}$$

Los subíndices “inf” y “sup” indican el cálculo de la velocidad de acuerdo con la altura nativa inferior y superior, respectivamente. La velocidad representativa para la altura de 50 m fue finalmente obtenida de acuerdo con:

$$v_{50} = \frac{v_{50\text{inf}} + v_{50\text{sup}}}{2}$$

Velocidad a 80 m

Para el cálculo de la velocidad en la altura de 80 m se consideró la altura nativa de 80,5 m, de la siguiente forma:

$$v_{80} = v_{80,5} \frac{\ln\left(\frac{80}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{80,5}{z_0}\right)}$$

Velocidad a 100 m

Para la velocidad en la altura de 100 m se consideraron las alturas nativas de 80,5 m y 120,1 m, utilizando el procedimiento ya descrito en el cálculo de la velocidad a 50 m:

$$v_{100\text{inf}} = v_{80,5} \frac{\ln\left(\frac{100}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{80,5}{z_0}\right)} \quad \text{e} \quad v_{100\text{sup}} = v_{120,1} \frac{\ln\left(\frac{100}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{120,1}{z_0}\right)}$$

donde la velocidad en esa altura fue obtenida finalmente de acuerdo con:

$$v_{100} = \frac{v_{100\text{inf}} + v_{100\text{sup}}}{2}$$

Velocidad a 120 m

La altura de 120 m considerada para el Nuevo Atlas del Potencial Eólico de Brasil es muy cercana a la altura nativa de 120,1 m del Brams. Considerando que la diferencia obtenida con el uso de la ecuación logarítmica se localiza a partir de la tercera casa decimal, se optó por el uso del mismo valor de la simulación para esta altura.

Velocidad a 150 m

Para la velocidad en la altura de 150 m se consideraron las alturas nativas de 120,1 m y 160 m, utilizando el procedimiento previamente descrito en el cálculo de la velocidad a 50 m:

$$V_{150\text{inf}} = V_{120,1} \frac{\ln\left(\frac{150}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{120,1}{z_0}\right)} \quad \text{e} \quad V_{150\text{sup}} = V_{160} \frac{\ln\left(\frac{150}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{160}{z_0}\right)}$$

donde la velocidad en esa altura fue obtenida finalmente de acuerdo con:

$$V_{150} = \frac{V_{150\text{inf}} + V_{150\text{sup}}}{2}$$

Velocidad a 200 m

La altura de 200 m considerada para el Nuevo Atlas del Potencial Eólico de Brasil coincidía con la altura nativa del Brams. Para tal caso, la velocidad en la altura de 200 m fue obtenida directamente del resultado de la simulación del Brams.

Parámetros de Weibull

Mientras que las velocidades y direcciones horarias fueron obtenidas directamente de las simulaciones realizadas con el modelo de mesoescala Brams, los parámetros de Weibull (el parámetro de forma k y el parámetro de escala c), que describen la variación de la velocidad del viento en una determinada localización, fueron determinados después de las simulaciones del modelo para las alturas nativas de 80,5 m y 120,1 m. Para cada una de las alturas, el Inpe proporcionó, también, los valores de desvío estándar necesarios para calcular los parámetros de Weibull como se describe a continuación.

La distribución de Weibull es un modelo estadístico que describe la variación de la velocidad del viento para un determinado lugar. Ella es una función biparamétrica y es expresada matemáticamente por:

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right]$$

donde:

- $f(v)$ = frecuencia de ocurrencia de la velocidad del viento;
- v = velocidad del viento (m/s);
- k = parámetro de forma (adimensional);
- c = parámetro de escala (m/s)

El parámetro de escala c es una medida para la velocidad característica del viento de la distribución. Ella es proporcional a la velocidad media del viento. El parámetro de forma k especifica la forma de la distribución de Weibull. Un pequeño valor de k significa vientos variables, mientras que vientos constantes son caracterizados por un valor alto de k . Este comportamiento puede ser verificado en la Figura 2, donde se muestra la variabilidad de la curva de Weibull para un valor constante de c (7,0 m/s).

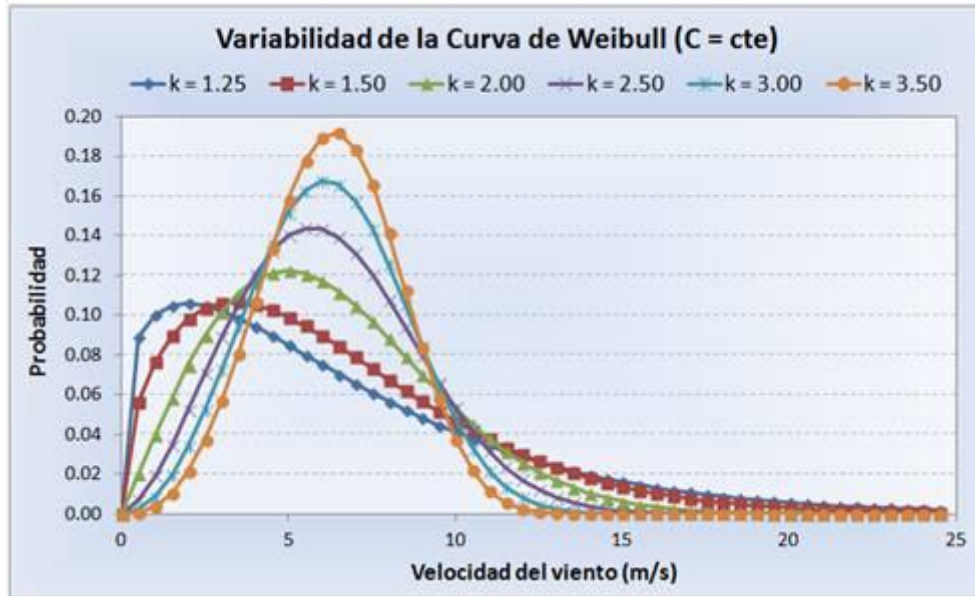


Figura 2. Distribución de la curva de Weibull para diversos valores de k .

El parámetro de forma k está relacionado al desvío estándar de la muestra de velocidades, siendo que altos valores de k indican valores bajos del desvío estándar. Por otro lado, valores bajos de k indican valores altos del desvío estándar. Para una serie histórica anual, el cálculo de los parámetros de Weibull para las alturas nativas del Brams fue realizado de acuerdo con las formulaciones detalladas a continuación.

Parámetro de forma k

Calculado a través del método denominado empírico-analítico (CUSTODIO, 2013; BOWEDEN et al. 1983 y JUSTOS et al. 1978):

$$k = \left(\frac{\sigma}{\bar{v}} \right)^{-1,086}$$

donde:

σ = desvío estándar (m/s);

\bar{v} = velocidad media del viento (m/s).

Una vez obtenido el parámetro de forma k en la altura nativa, se procedió al cálculo del parámetro de escala c .

Parámetro de escala c

El parámetro de escala c es calculado a partir de (CUSTODIO, 2013; BOWEDEN et al. 1983 y JUSTOS et al. 1978):

$$c = \frac{\bar{v}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)}$$

donde:

\bar{v} = velocidad media del viento (m/s);

k = parámetro de forma;

Γ = función gama.

La función gama es una función matemática muy utilizada en energía eólica, como una función del factor de forma k de Weibull. La función fue aproximada de acuerdo con la fórmula de Stirling obtenida a partir de una expansión asintótica (ABRAMOWITZ, 1972):

$$\Gamma(z) \approx \left(\frac{z}{e}\right)^z \sqrt{\frac{2\pi}{z}} \exp\left(\frac{1}{12z} - \frac{1}{360z^3} + \frac{1}{1260z^5} - \frac{1}{1680z^7} + \frac{1}{1188z^9}\right)$$

donde:

Γ = función gama

z = argumento de la función.

De esta manera, en el cálculo del parámetro de escala c , el argumento de la función gama pasa a ser $z = 1 + 1/k$.

Una vez calculados los parámetros de Weibull para las alturas nativas de 80,5 m y 102,1 m, se adoptaron las expresiones a continuación para determinar los valores de c y k en la altura de 100 m (JUSTUS & MIKHAIL, 1976):

$$k_2 = k_1 \left(\frac{1 - 0,088 \ln\left(\frac{h_1}{10}\right)}{1 - 0,088 \ln\left(\frac{h_2}{10}\right)} \right)$$

y

$$c_2 = c_1 \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^{n_{h_1}} \quad \text{onde} \quad n_{h_1} = \frac{0,37 - 0,088 \ln(c_1)}{1 - 0,088 \ln\left(\frac{h_1}{10}\right)}$$

donde:

h_1 = altura del suelo del punto 1 [m];

h_2 = altura del suelo del punto 2 [m];

c_1 = factor de escala en h_1 [m/s];

c_2 = factor de escala en h_2 [m/s];

k_1 = factor de forma en h_1 ;

k_2 = factor de forma en h_2 ;

Así pues, para el cálculo del factor de forma k en la altura de 100 m, se tomaron en cuenta las velocidades en las alturas inmediatamente inferior e inmediatamente superior, 80,5 m y 120,1 m, cada una de las cuales fue calculada siguiendo la metodología descrita anteriormente:

$$k_{100\text{inf}} = k_{80,5} \left(\frac{1 - 0,088 \ln\left(\frac{80,5}{10}\right)}{1 - 0,088 \ln\left(\frac{100}{10}\right)} \right) \quad e \quad k_{100\text{sup}} = k_{120,1} \left(\frac{1 - 0,088 \ln\left(\frac{120,1}{10}\right)}{1 - 0,088 \ln\left(\frac{100}{10}\right)} \right)$$

$$k_{100} = \frac{k_{100\text{inf}} + k_{100\text{sup}}}{2}$$

y

$$c_{100\text{inf}} = c_{80,5} \left(\frac{100}{80,5} \right)^{n_{80,5}} \quad e \quad c_{100\text{sup}} = c_{120,1} \left(\frac{100}{120,1} \right)^{n_{120,1}}$$

donde:

$$n_{80,5} = \frac{0,37 - 0,088 \ln(c_{80,5})}{1 - 0,088 \ln\left(\frac{80,5}{10}\right)} \quad e \quad n_{120,1} = \frac{0,37 - 0,088 \ln(c_{120,1})}{1 - 0,088 \ln\left(\frac{120,1}{10}\right)}$$

y

$$c_{100} = \frac{c_{100\text{inf}} + c_{100\text{sup}}}{2}$$

Perfil diurno

El perfil diurno de velocidades, también denominado día típico, muestra el comportamiento del viento a lo largo del día. Este comportamiento ocurre principalmente en función de la variación del calentamiento solar de la superficie de la tierra en el ciclo de 24 horas. Es muy común que los locales presenten una variación diaria de la velocidad del viento bastante definida, indicando la relación entre la velocidad del viento y la hora del día. El gráfico de la variación diurna de la velocidad del viento muestra la media aritmética de todos los datos medidos para cada hora del día. De esta forma, esas informaciones permiten evaluar los períodos de mayor probabilidad de disponibilidad de energía para análisis de integración energética y control de generación.

El perfil diurno abarca un determinado período de tiempo, que puede ser mensual, anual o estacional. Como fue expuesto previamente, para el cálculo del día típico se consideran los valores de velocidad horarios en el período determinado. Así, en el perfil diurno, el valor de la velocidad en la hora i corresponde a la media obtenida a partir de todos los valores de la hora i contenidos en el período, de acuerdo con el procedimiento mostrado en la Figura 3. En la Figura 4 se muestra el gráfico del perfil diurno con la velocidad media horaria normalizada por la velocidad media del período correspondiente.

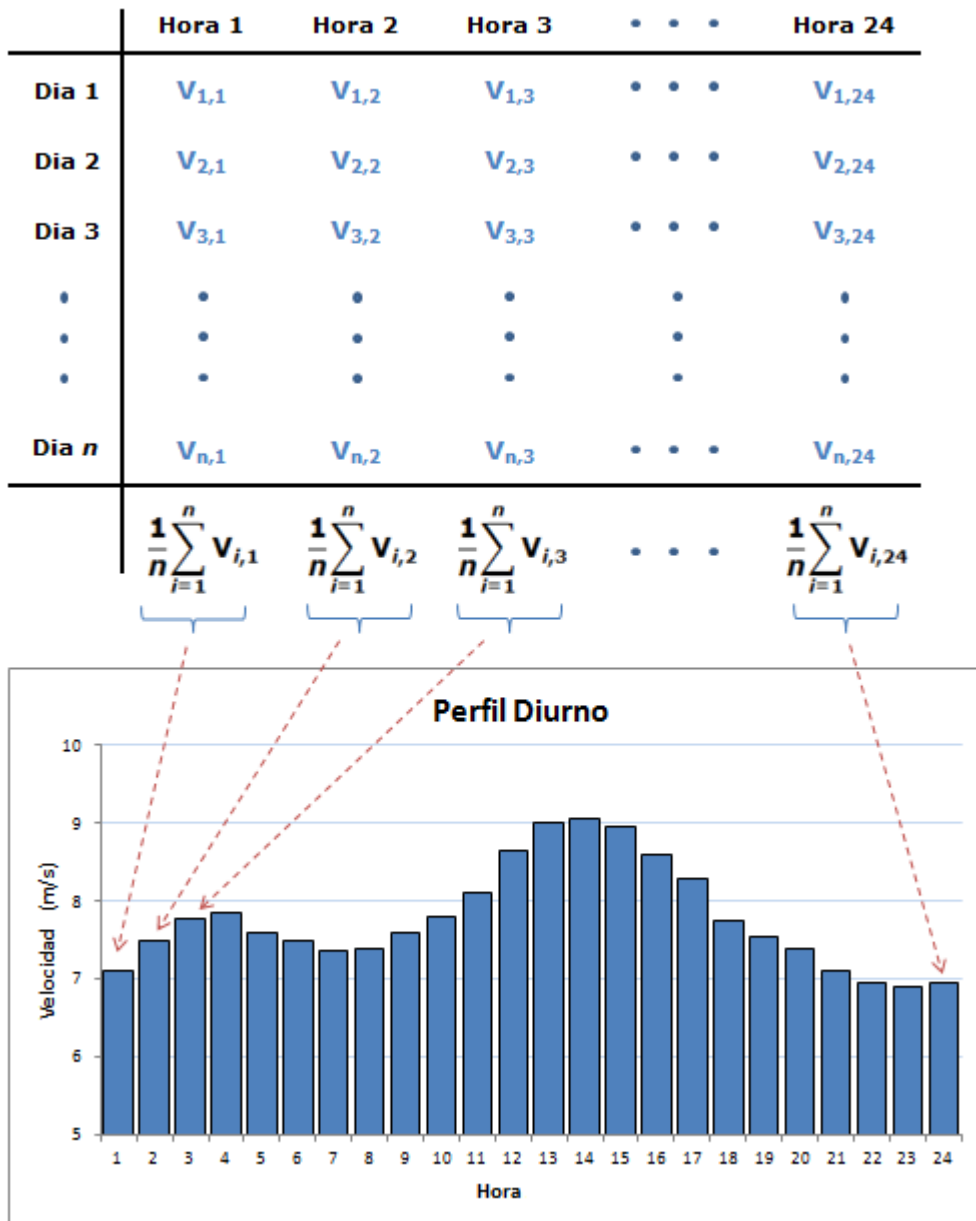


Figura 3. Procedimiento para el cálculo del perfil diurno.

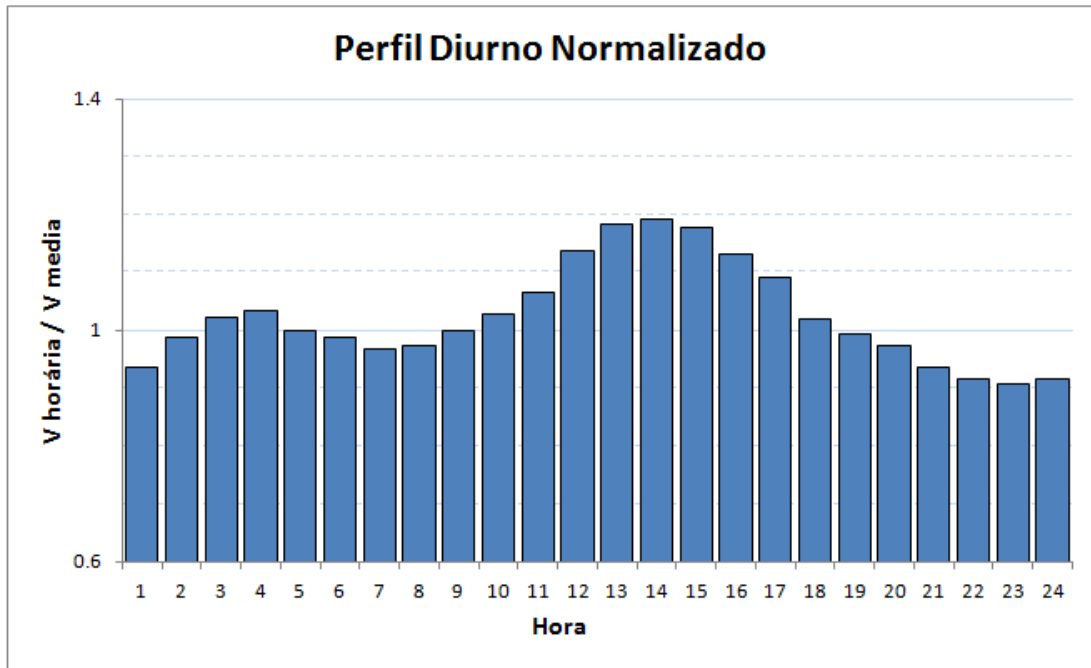


Figura 4. Gráfico del perfil diurno normalizado.

El Inpe, después del ajuste de los resultados simulados, aplicó la metodología expuesta arriba para la obtención del perfil diurno para cada altura nativa. Para la obtención del perfil diurno a 100 m, fueron utilizados los valores obtenidos para las alturas nativas de 80,5 m y 120,1 m. Cada valor de la velocidad media horaria del perfil en la altura nativa fue calculado de acuerdo con la expresión logarítmica utilizada previamente, como se muestra en el esquema presentado en la Figura 5.

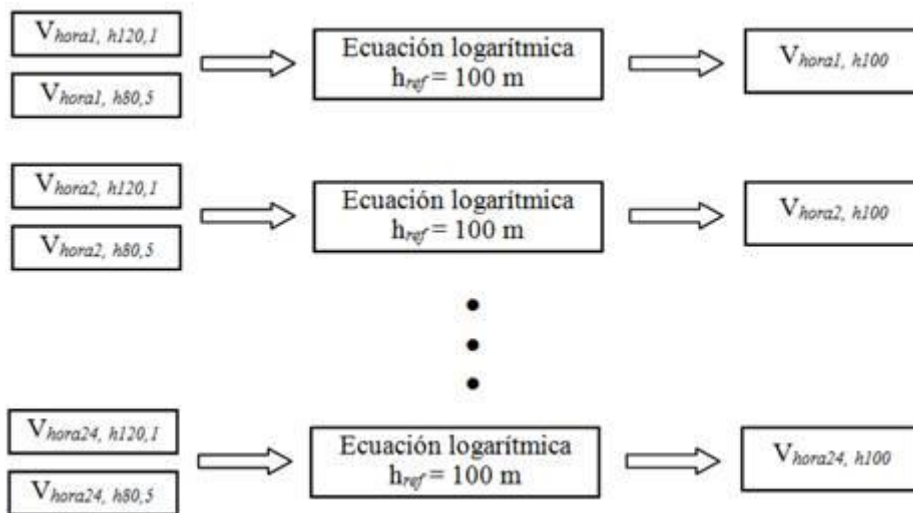


Figura 5. Procedimiento para el cálculo del perfil diurno en las alturas

El perfil diurno fue obtenido con base en las simulaciones realizadas para el año 2013. La velocidad correspondiente a la hora 1 consideró las velocidades de la hora 1 en las alturas de 80,5 m y 120,1 m en la forma:

$$v_{1,100inf} = v_{1,80,5} \frac{\ln\left(\frac{100}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{80,5}{z_0}\right)} \quad e \quad v_{1,100sup} = v_{1,120,1} \frac{\ln\left(\frac{100}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{120,1}{z_0}\right)}$$

Hora 1:

$$v_{1,100} = \frac{v_{1,100inf} + v_{1,100sup}}{2}$$

$$v_{2,100inf} = v_{2,80,5} \frac{\ln\left(\frac{100}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{80,5}{z_0}\right)} \quad e \quad v_{2,100sup} = v_{2,120,1} \frac{\ln\left(\frac{100}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{120,1}{z_0}\right)}$$

Hora 2:

$$v_{2,100} = \frac{v_{2,100inf} + v_{2,100sup}}{2}$$

...

...

$$v_{24,100inf} = v_{24,80,5} \frac{\ln\left(\frac{100}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{80,5}{z_0}\right)} \quad e \quad v_{24,100sup} = v_{24,120,1} \frac{\ln\left(\frac{100}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{120,1}{z_0}\right)}$$

Hora 24:

$$v_{24,100} = \frac{v_{24,100inf} + v_{24,100sup}}{2}$$

Densidad de potencia

La densidad de potencia fue calculada a partir de la masa específica del aire y la velocidad del viento en la altura de 100 m. La ecuación aplicada para el cálculo de la densidad de potencia (DP), expresada en W/m^2 , se presenta abajo (SATHYAJITH M., 2006):

$$DP = \frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho v^3$$

donde:

ρ = masa específica del aire [kg/m^3];

A = área del rotor [m^2];

P = potencia eólica [W];

v = velocidad del viento [m/s];

Utilizando los parámetros de Weibull, a DP también puede ser representada por (SATHYAJITH M., 2006):

$$DP = \frac{1}{2} \rho c^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right)$$

donde:

ρ = masa específica del aire [kg/m^3];

Γ = función gamma;

c = factor de escala [m/s];

k = factor de forma

La masa específica del aire (ρ) es calculada, según SATHYAJITH (2006), a partir de la elevación del terreno (Z) y de la temperatura local (T) como se puede observar a continuación:

$$\rho = \frac{353,049}{T} \exp\left(-0,034 \frac{(Z + h)}{T}\right)$$

donde:

T = temperatura [K];

Z = altitud [m];

h = altura encima del suelo¹ [m]

Bibliografía

ABRAMOWITZ, M., STEGUN, I.A. 1972. **Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables**. Dover Publications, New York (1972).

BOWEDEN, G.J., BARKER, P.R., SHESTOPAL, V.O., TWIDELL, J.W., 1983. **The Weibull distribution function and wind statistics**. Wind Engineering 7:85-98.

CUSTÓDIO, R., 2013. **Energia Eólica para Produção de Energia Elétrica**. Synergia Editora Ed.2 ISBN: 9788561325886 Rio de Janeiro.

JUSTOS, C.G., HARGRAVES, W.R., MIKAIL A., GRABER, D., 1978. **Methods of estimating wind speed frequency distribution**. J Applied Meteorolgy 17: 350-353.

JUSTUS, C.G. and A. MIKHAIL, 1976. **Height variation of wind speed and wind distributions statistics**. Geophys. Res. Lett., 3261-264. DOI: 10.1029/GL003i005p00261.

SATHYAJITH M., 2006. **Wind Energy – Fundamentals, Resource Analysis and Economics**. Ed.1 Springer Science ISBN 9783540309055 Berlin.

¹ En este caso, 100 m.