

Factores de Temperatura y Presión Gerencia de Distribución ENARGAS

(Informe interno)

martes, 27 de enero de 2009

Introducción: Existen muchas situaciones en la industria del gas natural donde es necesario cuantificar en forma precisa los volúmenes de gas bajo distintas condiciones de presión y temperatura. Estas situaciones son comunes cuando el gas cambia la custodia entre distintos operadores o cuando se realiza cualquier traspaso de titularidad del fluido. Según el Marco Regulatorio vigente en la República Argentina (Ley 24.076), lo que se comercializa en la industria del gas natural es energía, expresada en metros cúbicos estándares (Sm^3), reducidos a 9300 Kcal/m^3 . Las condiciones estándares definidas por la Ley 24.076 se definen como $1 \text{ At} = 101.325 \text{ kpa}$ y $T = 15^\circ\text{C}$. Es importante destacar que el contenido energético del gas natural depende de su composición y el número de moléculas contenida en un dado volumen. Imaginemos que tenemos un Sm^3 de gas en un lugar como Buenos Aires en condiciones estándares a 9300 Kcal/m^3 . Si colocamos este volumen en un recipiente (por ejemplo un globo) y lo transportamos al norte del país, por ejemplo Salta (altura 1300 m sobre el nivel de mar) donde la presión barométrica es de aproximadamente 86.8 Kpa . El volumen de dicho gas a 15°C será de 1.16 m^3 , debido a que la presión manométrica es menor. Su contenido energético no varió pero su volumen es ahora 16% mayor. Si al mismo Sm^3 ahora lo llevásemos a Ushuaia, a nivel del mar pero a temperaturas cercanas a 0°C , el volumen de dicho gas será 0.95 m^3 o sea 5% menor. Estos ejemplos lo ilustramos con el globo, pero es válido en todos los casos. En realidad el globo es un ejemplo válido y representativo de la realidad, la mayoría de los medidores usados por los usuarios residenciales y comerciales, funcionan por desplazamiento de volumen de gas, de un fuelle o cilindro, que dependen de la presión barométrica.

Por lo tanto cuando trabajamos con grandes volúmenes, estas correcciones son críticas. En este anexo, se discute la fundamentación técnica de los criterios usados para calcular los factores de presión y temperatura.

Determinación de los volúmenes de gas entregados

El volumen de gas entregado en condiciones estándares en un período de facturación lo designamos como V_e . El consumo registrado en los dispositivos corrientes de medición, V_{me} , debe ser corregido por la aplicación de los denominados factores de corrección (F_p , F_t , F_z). El concepto rector es que lo que en realidad se comercializa es energía, la cual depende de la masa de gas (o el número de moles contenidos en un dado volumen de gas). Por la ecuación de estado de los gases,¹ tenemos:

$$P_e \cdot V_e = nRT_e, \quad (1)$$

donde el subíndice “e” indica condiciones estándares de presión y temperatura ($T_e = 288.15 \text{ K}$ (15°C) y $P_e = 101.3 \text{ KPa}$). R es la constante universal de los gases y n es el número de moles en consideración, en la ecuación de estado,

T es la temperatura absoluta ($T(K) = T(^{\circ}C) + 273.5$) y P la presión total absoluta del gas, o sea la suma de la presión manométrica y la barométrica. A otra presión y temperatura, este mismo número de moles tendrá otro volumen, V_{me} , que según la ley de estado será:

$$P_{me} \cdot V_{me} = n \cdot z \cdot RT_{me} \quad (2)$$

donde $z(P_{me}, T_{me})$ es el coeficiente de compresibilidad del gas a esa presión y temperatura. Tomando el cociente de las Ec.(1) y (2) tenemos:

$$V_e = V_{me} \cdot \frac{T_e}{T_{me}} \cdot \frac{P_{me}}{P_e} \cdot \frac{z_e}{z_{me}} = V_{me} \cdot F_T \cdot F_P \cdot F_z \quad (3)$$

Dado que las temperaturas normalmente se miden en grados Celcius, el factor de temperatura se puede escribir como:

$$F_T = \frac{T_e}{T_{me}} = \frac{288.15}{273.15 + T(^{\circ}C)} \quad (4)$$

Similarmente para el factor de presión, como lo que normalmente se mide es la presión manométrica, P_{man} , la presión absoluta se obtiene sumando a esta la presión barométrica P_{atm} del lugar de medición, o sea:

$$P_{me} = P_{man} + P_{atm} \quad (5)$$

Factor de Presión: La presión manométrica fluctúa por condiciones meteorológicas en unos pocos puntos por ciento alrededor de un valor promedio que depende de la altura de la localidad respecto del nivel del mar. Dado que la variación de presión es un muy buen indicador de la altura, en aviación se usan altímetros que miden la presión y a partir de este dato se calcula la altura. Dado que esta vinculación es muy confiable, se usan expresiones empírico-teóricas que relacionan la presión barométrica con la altura. Una de ellas es el modelo adiabático:^{2,3}

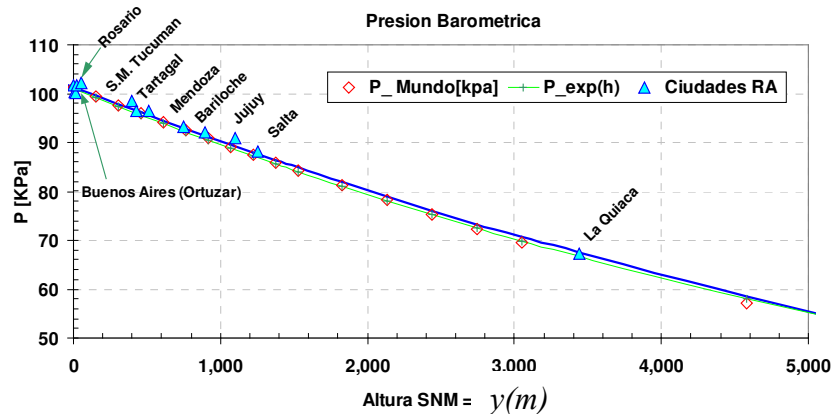


Figura 1 Variación de la presión con la altura. Los símbolos rombo rojo son los valores medidos de la presión. La línea de continua azul es la predicción para la presión del modelo adiabático, Ec.(6) y la línea fina (verde) las correspondiente al modelo simplificado Ec.(7). En el mismo gráfico se representan las presiones de varias ciudades de Argentina para el día 13/8/2008..

$$P_{barom}(y) = P_0 \cdot \left(1 - k \cdot \frac{Mg}{RT_0} \cdot y \right)^{1/k} = P_0 \cdot \left(1 - \frac{y}{h_0} \right)^{\beta} \quad (6)$$

con $k=0.191$ y $\beta=1/k=5.237$, $h_0=43\ 721$ m e y la altura respecto al nivel de mar en metros. P_0 ($=101.3$ KPa) es la presión barométrica a nivel del mar. Aquí los subíndices 0 indican valores a nivel del mar. Para alturas sobre el nivel de mar (SNM) hasta uno 5000 m se puede usar la expresión:

$$P_{barom}(y) = P_{00} \cdot \exp(-y/h_{00}) \quad \text{con: } P_{00} = 101.056 \text{ kPa} \quad \text{y} \quad h_{00} = 8251 \text{ m} \quad (7)$$

donde y es la altura SNM en metros, $P_{barom}(y)$ es la presión barométrica en kPa a la altura y . Según la expresión (7), la variación porcentual de presión para una diferencia de altura dy es:

$$dP/P(y) = -dy/h_{00} \quad (8)$$

Para $dy=100\text{m}$, $dP/P(y)=0.2\%$, o se dos lugares cuyas alturas sobre el nivel del mar es inferior a 100m, presentan una variación de presión menor del 0.2%.

En la Figura 1 se muestra la variación de la presión con la altura predicha por la expresión (7). En esta figura también se indican los datos medidos de presión a varias alturas y los registrados en un día particular (13/8/2008) en algunas ciudades de Argentina.

Por lo tanto para el factor de presión se puede usar la expresión (7).

$$F_p(y) = \frac{P_{me}}{P_e} = \exp(-y/h_{00}), \quad (9)$$

donde y es la altura del lugar SNM.

Factor de Compresibilidad: para $P < 80$ bar el coeficiente de compresibilidad se puede aproximar como:

$$z(P) \approx 1 - \frac{P}{500}, \quad (10)$$

donde P es la presión total en bar. El coeficiente de compresibilidad en condiciones estándares, ($Z_e \cong 1$). Por lo tanto el factor de compresibilidad será:

$$F_z = \frac{z_e}{z_{me}} \approx \frac{1}{z_{me}} = 1/[1 - P_{me}(\text{bar})/500] \approx 1 + P_{me}(\text{bar})/500 = 1 + \frac{(P_{barom} + P_{man})}{500} \quad (11)$$

Factor de Temperatura: Para calcular el factor de temperatura, es necesario tener en cuenta que la temperatura varía a lo largo de año. Designamos con $T_{mes}(i)$ la temperatura media de mes (i), la corrección de volumen para un dado mes será:

$$V_{corr}(i) = V_{med}(i)F_T = V_{med}(i) \cdot \frac{T_e}{T_{mes}(i)} \quad (12)$$

A lo largo de un año, el volumen corregido total para ese año será:

$$V_{corr}(\text{anual}) = \sum_1^{12} V_{med}(i)F_T = \sum_1^{12} \frac{T_e}{T_{mes}(i)} V_{med}(i), \quad (13)$$

Si se definen:

$$\frac{1}{T_{prom}} = \frac{1}{V_{med}(Tot)} \sum_1^{12} \frac{V_{med}(i)}{T_{mes}(i)} \quad \text{o bien} \quad \frac{V_{med}(Tot)}{T_{prom}} = \sum_1^{12} \frac{V_{med}(i)}{T_{mes}(i)}. \quad (14)$$

La expresión (13) se puede escribir como:

$$V_{corr}(\text{anual}) = \frac{T_e}{T_{prom}} \cdot V_{med}(Tot) = F_T \cdot V_{med}(Tot), \quad (15)$$

Aquí $V_{med}(Tot)=\sum V_{med}(i)$ es el volumen anual sin corrección y T_{prom} , es una temperatura promedio ponderada, definida por la ecuación (14).

Dado que para cada categoría de usuarios y cada localidad, los volúmenes $V_{med}(i)$ y temperaturas $T_{mes}(i)$ son conocidos, una posibilidad sería calcular esta temperatura T_{prom} y F_T con los datos de los tres años anteriores al año en cuestión hasta el mes de enero del año, de manera de posibilitar el calculo del nuevo factor con los datos del último año de enero a diciembre. Como se observa en las Figs. 4 y 5 no se espera que para una dada zona los parámetros T_{prom} y F_T tengan gran variación en el tiempo, sin embargo, si por variación de la características socioeconómicas de la comunidad, se produjese un cambio, el método propuesto (recalcular F_T anualmente) iría acompañando dicha variación. De este modo el factor de temperatura a usar será:

$$FT = \frac{T_e}{T_{prom}} \quad (16)$$

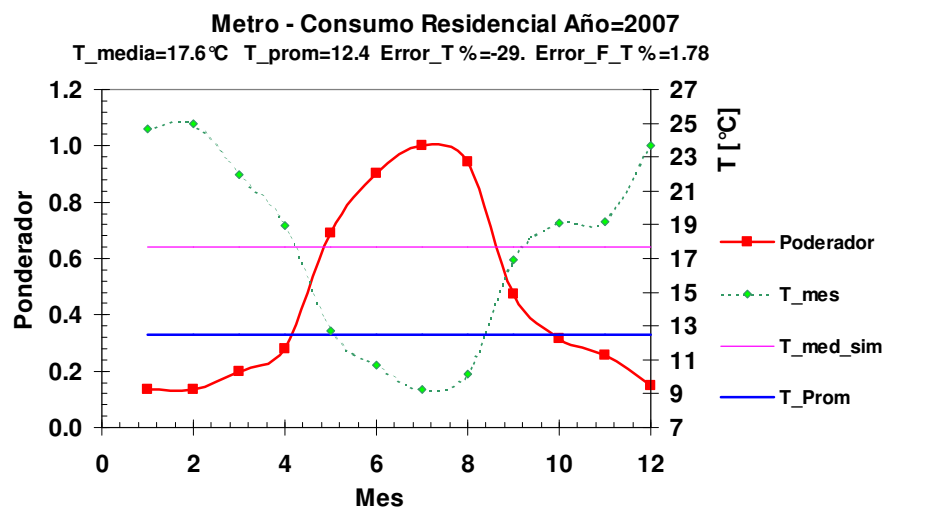


Figura 2 Variación de la temperatura media mensual (T_{mes}) para la región abastecida por Metrogas. También se muestra la variación de los consumos residenciales (ponderador) y los valores de las temperaturas media simple (T_{med_sim}) y el promedio ponderado dado por (14).

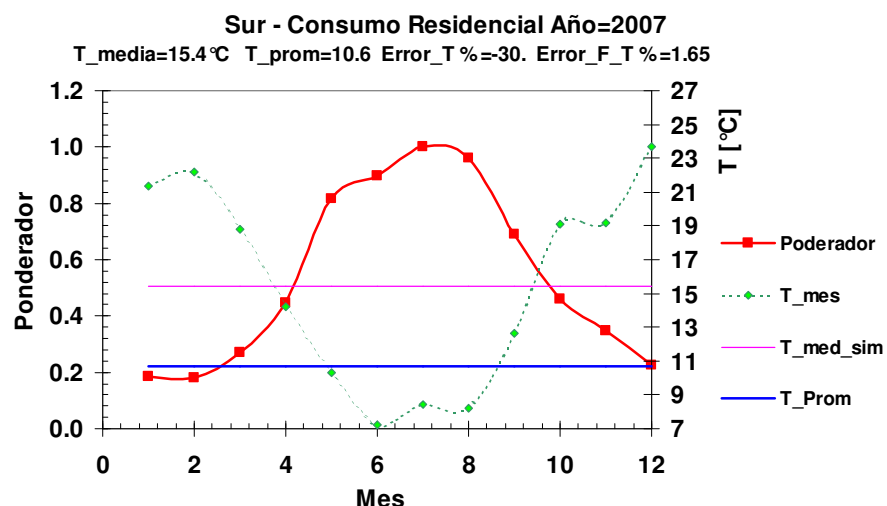


Figura 3 Variación de la temperatura media mensual (T_{mes}) para la región abastecida por Camuzzi Sur. También se muestra la variación de los consumos residenciales (ponderador) y los valores de las temperaturas media simple (T_{Med_sim}) y el promedio ponderado dado por (14).

En la Figura 2 y 3 se ilustra la variación de consumo y temperatura para la distribuidoras Metrogas y Sur respectivamente. Se observa que la Temperatura Promedio ponderada (T_{prom}) calculada por la expresión (14) es bien diferente que la temperatura media anual simple (T_{med_simp} = promedio de temperaturas mensuales). Las diferencias son del orden del 30%. Sin embargo, las diferencias en el factor de temperatura son mucho menores, ya que en este caso se usa el cociente de las temperaturas absoluta, que disminuye la influencia de las diferencias de temperaturas en Celcius. De hecho las variaciones en los factores de temperatura, calculado usando T_{prom} o T_{media} es del orden de 1%.

En la Tabla 1 se resumen los valores de las temperaturas medias simples y ponderadas como así también los factores de temperatura para las distribuidoras Metrogas y Camuzzi sur.

Distribuidora	$\langle T \rangle_{Med_simp}$	T_{prom}	F_T	Variación %
Metro	18.2	14.5	1.002	0.30%
Sur	13.6	9.9	1.018	0.38%

Tabla 1. Resumen de los factores de temperatura para los años 1993-2007

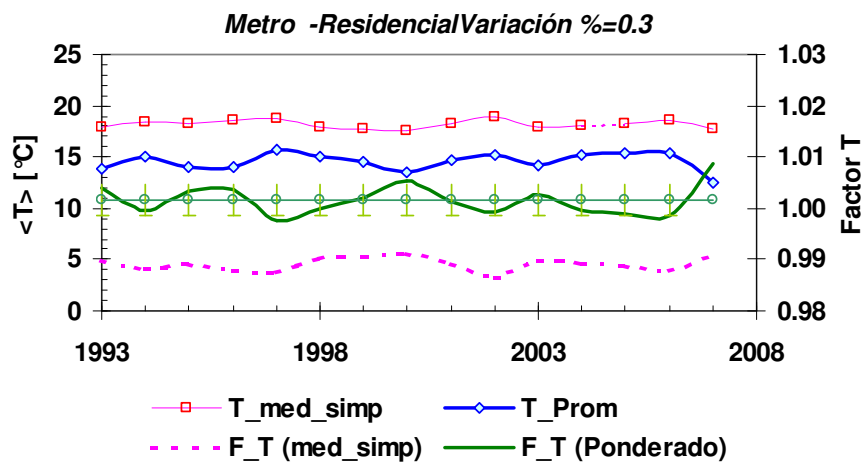


Figura 4 Variación de la temperatura media anual simple y ponderada para la región abastecida por Metrogas. También se muestra la variación de los factores de temperatura (ponderado) a lo largo de los últimos 15 años.

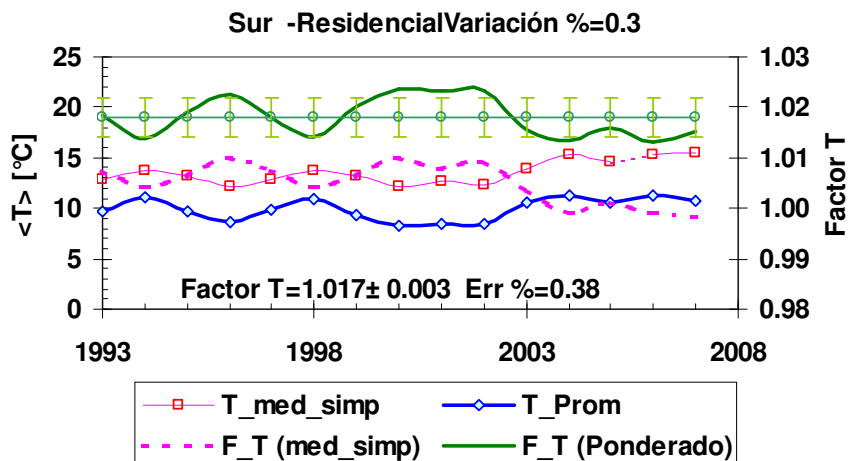


Figura 5 Variación de la temperatura media anual simple y ponderada para la región abastecida por Camuzzi Sur. También se muestra la variación de los factores de temperatura (ponderado) a lo largo de los últimos 15 años.

Es interesante notar que el factor de temperatura para Camuzzi Sur es un 2% mayor que para Metrogas. Este resultado es significativo en grandes volúmenes. Si suponemos que tenemos un volumen de gas en condiciones estándares ($T_e=15^\circ\text{C}$) es claro que en el sur, donde es en general más frío que en el GBA, dicho volumen tendrá un valor menor que en el GBA. Por lo tanto en el sur los volúmenes medidos deben ser afectados por un factor de corrección mayor que 1 ($T_{prom}=9.9^\circ\text{C}$). En el GBA donde las temperaturas medias ponderadas ($T_{prom}=14.5^\circ\text{C}$) son cercanas a los valores estándares, el factor de temperatura es muy cercano a la unidad.

Una cuestión importante a considerar es la precisión posible de lograr en la determinación del factor de temperatura. Por una parte, las magnitudes utilizadas en su definición, Ecs.(14) y (16), se miden con instrumentos que tienen precisiones finitas. Por otro lado, pequeñas variaciones en su valor pueden tener efectos importantes en grandes volúmenes de gas. Por lo tanto se requiere que su determinación se realice con la mayor precisión compatible con las incertezas propias de los instrumentos usuales de la industria.

Precisión en los volúmenes: según el Marco Regulatorio vigente (Ley 24.076) los instrumentos de medición usados en las mediciones de volúmenes de usuarios residenciales y comerciales deben tener un error menor del 2%, o sea $err=(\Delta V/V) 100 \approx 2\%$. Sin embargo, dado que dichos errores de medición tienen un carácter estadístico, este error puede ocurrir con igual probabilidad con signo positivo o negativo (esto es, a veces un dado medidores mide demás y otras de menos al azar). Si V_i designa el volumen medido a un usuario i , en un dado periodo de facturación, el volumen total, V_T , de todo un grupo de usuarios N_{user} será:

$$V_T = \sum_{i=1}^{N_{user}} V_i, \quad (17)$$

De la teoría estadística sabemos que la varianza de la suma de dos o más variables aleatorias independientes, es la suma de las varianzas.⁴ En general la varianza de la suma de variables aleatorias independientes, es igual a la suma de las varianzas:⁴

$$Var(V_i) = \sigma_{V_i}^2 = err^2 \cdot V_i^2, \quad (18)$$

donde $Var(V_i)$ es la varianza de V_i ($\approx \sigma_{V_i}^2$) y $\sigma_{V_i} = \Delta V_i$, su desviación estándar. Dado que las mediciones de un medidor es independiente de la medición en otro, de (17) y (18) tenemos:

$$Var(V_T) = \sum_i Var(V_i) = err^2 \cdot \sum_{i=1}^{N_{user}} V_i^2, \quad (19)$$

Si dividimos ambos miembros de la Ec.(20) por V_T^2 , tenemos:

$$\frac{Var(V_T)}{V_T^2} = \sum_i \frac{Var(V_i)}{V_T^2} = err^2 \cdot \sum_{i=1}^{N_{user}} \frac{V_i^2}{V_T^2} = err^2 \cdot \sum_{i=1}^{N_{user}} \left(\frac{V_i}{V_T} \right)^2. \quad (20)$$

De (17) tenemos que $\sum (V_i/V_T) = 1$, por lo tanto $\sum (V_i/V_T)^2 \leq 1$. Para estimar valor, supondremos en primera aproximación, todos los usuarios consumen aproximadamente un volumen similar en un dado periodo de facturación, por lo

tanto $V_i/V_T \approx 1/N_{user}$. Con esta suposición podemos estimar la suma $\sum (V_i/V_T)^2 \approx N_{user} \cdot (1/N_{user})^2 = 1/N_{user}$, por lo tanto:

$$\frac{Var(V_T)}{V_T^2} \approx err^2 \cdot \sum_{i=1}^{N_{user}} \left(\frac{1}{N_{user}} \right)^2 = \frac{err^2}{N_{user}} \quad (21)$$

y

$$\frac{\Delta V_T}{V_T} \approx \frac{err}{\sqrt{N_{user}}} \quad (22)$$

Si el número de usuarios involucrados, N_{user} , es mayor o del orden de 10 000, el error relativo en el volumen total $\Delta V_T/V_T \approx err/100 \approx 0.02\%$. Esto significa que el error del volumen total se puede determinar con mucho menor error que los volúmenes de los usuarios individuales. Esto es consecuencia del efecto de compensación que ocurre por la naturaleza estadística de los errores de medición.

Precisión en las temperaturas: los termómetros usuales, tales como los que normalmente registran las temperaturas ambiente, tienen una apreciación del orden de 0.1 °C. Por lo tanto, a temperatura ambiente, las temperaturas absolutas se pueden conocer con un error del orden de 0.1/300, o ser del 0.03%. De la expresión (14) tenemos:

$$T_{prom} = \frac{V_{med}(Tot)}{\sum_1^{12} \frac{V_{med}(i)}{T_{mes}(i)}} \approx \frac{V_{med}(Tot) \cdot T_{mes_media}}{12 \cdot V_{med}(mes_media)} \approx T_{mes_media} \quad (23)$$

desde luego esta es un aproximación solo para estimar la incerteza del valor de T_{prom} , y más bien hace referencia a su orden de magnitud, pero suficiente para estimar los errores involucrados; haciendo propagación de errores:

$$\left(\frac{\Delta T_{prom}}{T_{prom}} \right)^2 \approx \left(\frac{\Delta T_{mes_media}}{T_{mes_media}} \right)^2 = (0.1/300)^2 = (0.003)^2 \quad (24)$$

Por lo tanto:

$$\left(\frac{\Delta T_{prom}}{T_{prom}} \right) \approx 0.03\% \quad (25)$$

En otras palabras, esta debe ser la precisión con que es necesario conocer T_{prom} . Como T_{prom} es del orden de 300k, su valor debe estimarse empleando la Ec.(14) o (23) con al menos *una décima de grado*.

En conclusión se sugiere que se emplee como factor de temperatura y de presión los valores promedios de los tres últimos años, y usar dicho promedio para calcular los volúmenes corregidos del año corriente. Dichos factores se usarían para efectuar las correcciones del año en cuestión incluyendo el mes de enero del periodo siguiente. Asimismo, estos factores sería comunes a toda una región cuyas alturas no varíen más de $\pm 100m$. Durante el mes de enero de cada año se efectuaría el calculo de los nuevos factores de presión y temperatura del nuevo año usando los datos de enero a diciembre del año transcurrido. Estos factores de corrección tendrían vigencia de febrero a enero del año siguiente.

Referencias:

1. Física para Estudiantes de Ciencias e Ingeniería- Halliday, Resnik y Krane, 4ta. Ed. Vol. I . – Cía. Editorial Continental, S.A. México- 1985.

2. US Standard Atmosphere, 1976, As published by NOAA, NASA, and USAF
<http://scipp.ucsc.edu/outreach/balloon/atmos/1976%20Standard%20Atmosphere.htm>
3. Meteorological Model Within the Troposphere
<http://scipp.ucsc.edu/outreach/balloon/atmos/Meteorological%20Model.htm>
4. Probabilidad y Estadística – M. Spiegel, Mc Graw-Hill Mexico 1976. (ISBN 968-451-102-7)