

# Modelo generalizado de predicción de consumos de gas natural a mediano y corto plazo

S.Gil<sup>‡</sup>, J. Deferrari y .L. Duperron

Gerencia de Distribución del ENARGAS.

ENARGAS - Ente Nacional Regulador del Gas. Argentina.

Suipacha 636 - 4p. (1008) Cap. Fed. - Argentina.

FAX: (5411) 4348 -0532/0535

3er. CONGRESO LATINOAMERICANO Y DEL CARIBE DE GAS Y ELECTRICIDAD  
Santa Cruz de la Sierra – Bolivia – 22/24 de Abril de 2002

**Resumen:** En el presente trabajo se presentan las características básicas de un modelo desarrollado en la Gerencia de Distribución del ENARGAS, para realizar predicciones del comportamiento del consumo ininterrumpible del gas natural a mediano plazo (1 a 5 años). Este modelo es una extensión y generalización del modelo de predicción del consumo de gas a corto plazo (1 a 5 días), desarrollado previamente, que viene usándose exitosamente para predecir los consumos ininterrumpibles diarios en las principales ciudades de la República. En su versión original (corto plazo), el modelo fue exitosamente probado en el Gran Buenos Aires y en las principales ciudades del país. El mismo tiene la capacidad de predecir los consumos interrumpibles con hasta 5 días de anticipación, con incertezas del orden del 10%. En este trabajo se presenta la extensión del modelo original al mediano plazo. Asimismo, en este trabajo se presenta un procedimiento novedoso que permite obtener las distribuciones de consumos diarios a partir de las distribuciones de consumo mensuales. Este procedimiento permite obtener los consumos máximos y factores de carga de las distintas componentes del consumo de gas a partir de los datos de facturación mensuales y obtener los parámetros del modelo propuesto. Con esta versión del modelo es posible estimar los consumos máximos, factores de carga y capacidades contratadas óptimas discriminadas por región y categoría de usuario para una dada región.

**Abstract:** In the present work we present the basic characteristics of a model developed at the Distribution Division of ENARGAS, intended to predict the natural gas consumption of the major cities of Argentina. This model is an extension and generalization of an original model intended to predict the daily gas consumption in the short range (1 to 5 days). In its original form, the model has been used successfully to predict the daily gas consumption of the Greater Buenos Aires (GBA) area and most of the major cities of the Country. The model is able to predict the consumption 1 to 5 days in advance with 10% of uncertainty. The new version presented here, extends its applicability to the intermediate range (1 to 5 years). It allows us to estimate the annual peak consumption, load factors and the optimal transportation capacity for a given region of interest. We also present a novel procedure to obtain the distribution of daily consumption from the monthly distribution. This procedure can be used to obtain the parameters of the model, the peak consumption and load factor of the different components of gas consumption for a given region, using the information of consumption obtained from the monthly billing.

<sup>‡</sup> *Escuela de Ciencia y Tecnología - Universidad Nacional de San Martín Buenos Aires y Departamento de Física de la F.C.E. y N. de la Universidad de Buenos Aires - Argentina. - e-mail: sgil@df.uba.ar*

## I.- Introducción

La estimación de consumos futuros de gas natural, es un ejercicio indispensable de realizar para todos los sectores económicos y gubernamentales relacionados con la industria de gas natural. En particular, estimar los máximos consumos esperables y su probabilidad de ocurrencia es de gran utilidad para asegurar el correcto abastecimiento de gas a una dada ciudad o región. Asimismo, es importante caracterizar estos posibles escenarios de consumo para determinar los volúmenes óptimos de capacidad de gas a contratar por parte de los distribuidores y transportistas de gas natural. En este trabajo se presentan las características básicas de un modelo de predicción de consumo útil para realizar predicciones en el de la componente ininterrumpible del consumo a mediano plazo (1 a 5 años). El modelo de predicción de consumo es una generalización de un modelo originalmente desarrollado para predecir el consumo ininterrumpible a corto plazo<sup>1,2</sup> (1 a 5 días). También en este trabajo se presenta un método novedoso de relacionar las distribuciones de consumos mensuales con las correspondientes distribuciones diarias. A partir de esta conexión, es posible obtener los parámetros del modelo y estimar los factores de carga (*FC*) asociados a distintos tipos o categoría de usuarios (residenciales, industriales, GNC, etc) usando los datos de consumos mensuales obtenidos de las facturaciones. Los factores de carga son parámetros muy importantes que determinan los costos de transporte ya que el costo de la infraestructura de transporte depende de las capacidades máximas que la misma puede soportar. De hecho el costo de transporte o tarifa,  $P_i$ , de cada categoría de usuario,  $i$ , se calcula por una expresión de la forma<sup>4</sup>:

$$P_i = P_0 + \frac{A}{FC_i} ; \quad i = \text{residencial, GNC, etc.}$$

Donde  $P_0$  es el costo del gas en el lugar de producción y  $A$  es una constante características de los costos de transporte del sistema. De este modo se ve que la determinación de los parámetros  $FC_i$  juegan un papel crucial en la industria del gas natural.

En este trabajo se presenta en primer lugar las características básicas del consumo de gas en Argentina. Seguidamente se presenta un breve resumen del modelo de predicción de consumo a corto plazo<sup>1,2</sup> y se discute su extensión al mediano plazo, con el que realizamos estimaciones de consumos máximos y estimación de capacidades contratadas. Seguidamente se presenta un procedimiento novedoso para obtener la distribución de consumos diarios a partir de la distribución de consumos mensuales. Este procedimiento es importante ya que permite obtener factores de carga a partir de distribuciones mensuales. Los detalles que justifican este procedimiento se discuten en el apéndice. Por último se presentan las conclusiones de este estudio.

## II.- Hábitos de consumo y variación del número de usuarios

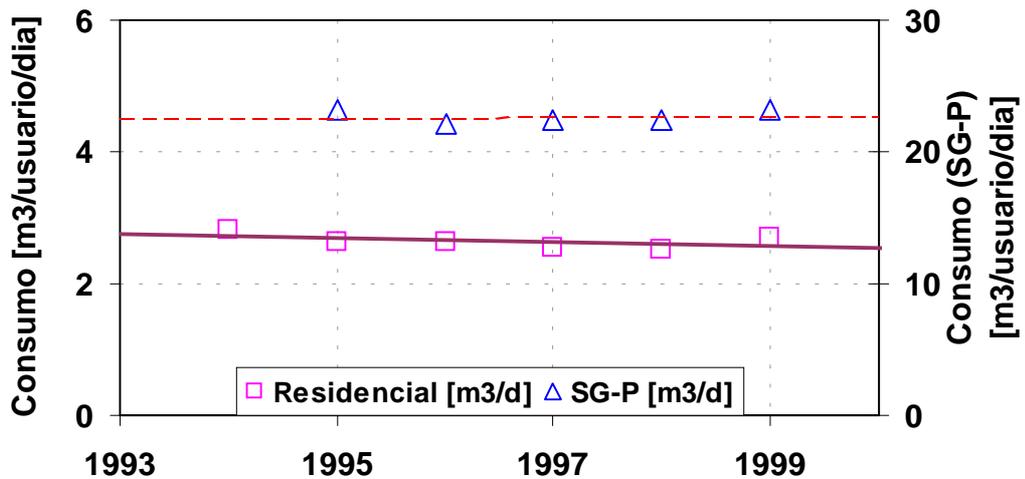
Para nuestro estudio es importante conocer las características básicas del consumo en Argentina que determinan la componente no interrumpible (usuarios residenciales, comerciales, GNC, etc.). Si bien todos nuestros estudios están basados en datos de la República Argentina, es posible que muchas de las características básicas sean válidas para otros lugares. Asimismo la aproximación empleada aquí podría ser aplicable para estudiar otros sistemas de servicios públicos.

El análisis de la variación del consumo anual por tipo de usuario, muestra que en Argentina *el consumo promedio por usuario se mantuvo prácticamente constante* por los último 7 años, con una ligera tendencia a disminuir (-1.5% aproximadamente para la componente residencial en el GBA). La figura 1 ilustra esta situación para el caso de la distribuidora MetroGas. Resultados similares se obtienen para otras distribuidoras de Argentina. En este periodo la variación promedio del precio del gas fue del orden de 1% anual. A partir del análisis de los datos de consumos residenciales (R) y Servicios Generales Pequeños (SG-P), figura 1, podemos afirmar que la variación del consumo por usuario es susceptible de ser modelado por una expresión lineal de la forma:

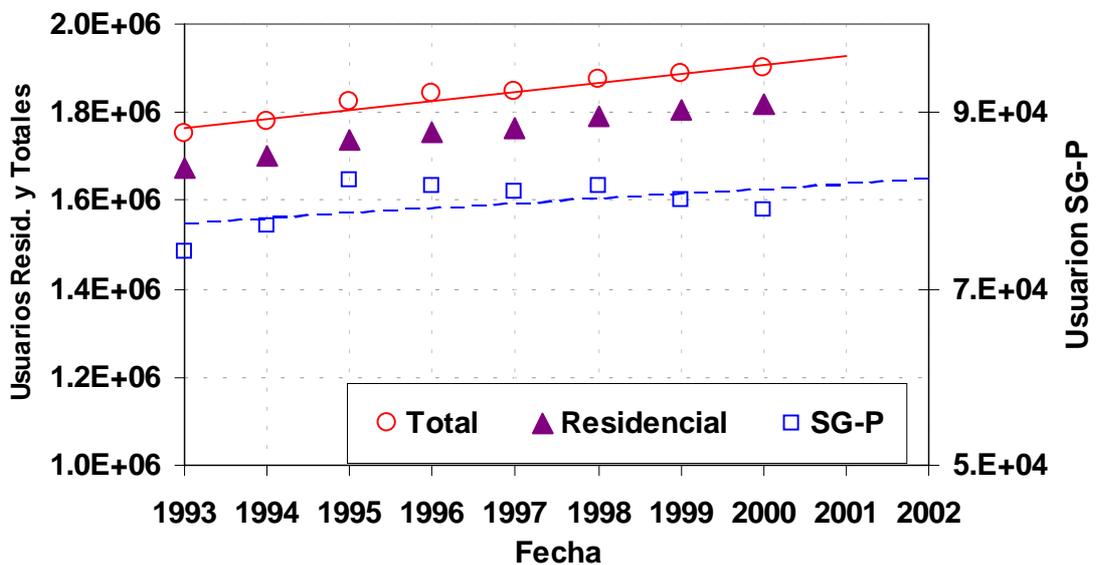
$$Q_{usr}^{(i)}(t) = Q_{usr\_0}^{(i)} \cdot (1 + f_{usr}^{(i)} \cdot (t - t_0)), \quad (1)$$

donde  $Q_{usr}^{(i)}(t)$  representa el consumo por usuario de la componente  $i$  (=Residencial, SG-P, etc.) al tiempo  $t$ .  $Q_{usr\_0}^{(i)}$  es el valor del consumo por usuario a tiempo  $t_0$  tomado como referencia y  $f_{usr}^{(i)}$  es el parámetro que determina el incremento de esta componente del consumo. Lo más relevante de la expresión (1) es que se puede ser modelada a partir de los datos de consumo anuales.

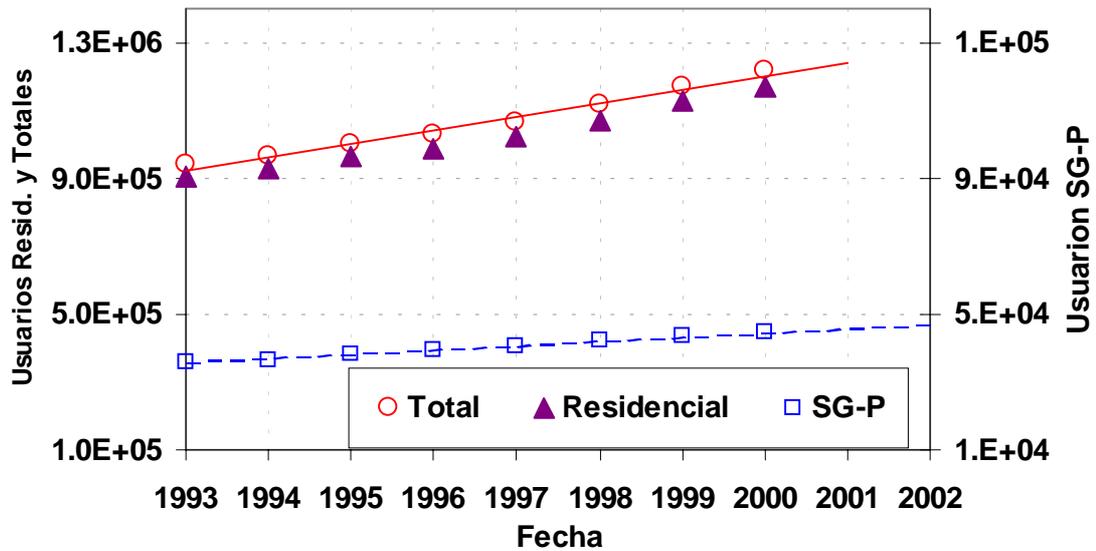
La figuras 2 y 3 muestran la variación anual del número de usuarios residenciales, para las distribuidoras MetroGas y Gas Ban. Resulta claro que la variación en el número de usuarios muestra un comportamiento lineal muy típico.



**Figura 1:** Consumo de gas por usuarios residenciales (R) y servicios generales pequeños (SG-P) a lo largo de los últimos 7 años para la distribuidora MetroGas que abastece a la Capital Federal y la zona sur del Gran Buenos Aires. Los volúmenes corresponden al consumo medio diario. Se observa que el consumo por usuario es prácticamente constante, con una variación que puede ser descrita por la expresión (1). Las líneas son ajustes a los datos.



**Figura 2:** Variación del número de usuarios residenciales y totales en función del tiempo, para la distribuidora MetroGas que abastece parte de la ciudad de Buenos Aires y la zona sur del GBA. Las líneas son ajustes a los datos.



**Figura 3:** Variación del número de usuarios residenciales y totales en función del tiempo a lo largo de los últimos 7 años, para la distribuidora Gas Natural Ban que abastece la zona norte del Gran Buenos Aires.

Este análisis permite afirmar que el comportamiento y hábitos de consumo de los usuarios residenciales y SG-P no varió significativamente en los últimos 7 años en Argentina pero en todos los caso es posible proyectar estas tendencias usando un modelo lineal como el descripto por (1). La variación del número de usuarios residenciales, SG-P y totales ininterrumpibles (incluyendo GNC) ha tenido asimismo una variación constante y sostenida durante los últimos 7 años. A partir de los datos anuales de número de usuarios para cada categoría ( $i$ ) es posible modelar la variación anual de los usuarios por la función:

$$N^{(i)}(t) = N_0^{(i)} \cdot (1 + f_N^{(i)} \cdot \Delta t) \quad (2)$$

donde  $N^{(i)}(t)$  representa el número de usuarios tipo ( $i$ ) para el año indicado por  $t$ ,  $N_0^{(i)}$  es el número de usuario del tipo  $i$  para el año tomado como referencia  $t_0$ ,  $\Delta t (= t - t_0)$  es el número de años transcurridos entre el año de referencia ( $t_0$ ) y el año de interés ( $t$ ).  $f_N^{(i)}$  es el factor de crecimiento anual en el número de usuarios, de la categoría en cuestión ( $i$ ). Este último factor se determina a partir de los datos reales y puede ser usado para realizar proyecciones para años en un futuro cercano, esto es  $\Delta t \leq 6$  años.

Desde luego los parámetros  $f_N^{(i)}$  y  $f_{usr}^{(i)}$  son diferentes para cada ciudad o región en consideración.

La variación del consumo anual total para cada región o ciudad (y por lo tanto también para cada distribuidora) y para cada categoría de usuario ( $i$ ), puede obtenerse multiplicando (1) y (2), esto es:

$$Q_{anual}^{(i)}(t) = Q_{usr\_0}^{(i)} \cdot N_0^{(i)} \cdot (1 + f_{usr}^{(i)} \cdot \Delta t) \cdot (1 + f_N^{(i)} \cdot \Delta t) \approx Q_{anual\_0}^{(i)} \cdot (1 + [f_{usr}^{(i)} + f_N^{(i)}] \cdot \Delta t), \quad (3)$$

donde  $Q_{anual\_0}^{(i)} = Q_{usr\_0}^{(i)} \cdot N_0^{(i)}$ . Si definimos  $f_Q^{(i)} = f_{usr}^{(i)} + f_N^{(i)}$ , entonces podemos describir la variación total del consumo como:

$$Q_{anual}^{(i)}(t) = Q_{0\_anual}^{(i)} \cdot (1 + f_Q^{(i)} \cdot \Delta t) \quad (4)$$

donde  $Q_{anual}^{(i)}(t)$  representa el consumo anual del tipo ( $i$ ) para el año indicado por  $t$ ,  $Q_{0\_anual}^{(i)}$  es el consumo anual del tipo  $i$  para el año tomado como referencia  $t_0$ . Estas expresiones permiten realizar proyecciones robustas de consumos a futuro.

### III.- Modelo de predicción de consumos

#### Corto Plazo

Para una dada ciudad, es posible desarrollar modelos de consumos basados en las temperaturas diarias, día de la semana, etc. En particular para las principales ciudades de Argentina fue posible desarrollar un modelo de consumo de gas a corto plazo (1 a 5 días)<sup>[1,2]</sup>. El mismo es capaz de predecir los consumos diarios con incertidumbres del orden del 10% para las principales ciudades de Argentina<sup>[1,2]</sup>. En la referencia 1 se discuten los detalles de dichos modelos. Sin embargo las características básicas del mismo se basa en el uso del concepto de *temperatura efectiva*,  $T_{ef}$ , que es el promedio pesado entre la temperatura media de cada día y el promedio de las temperaturas medias de  $n$ -días anteriores (*moving average*), usualmente  $n=4$  o 5. Más específicamente definimos:

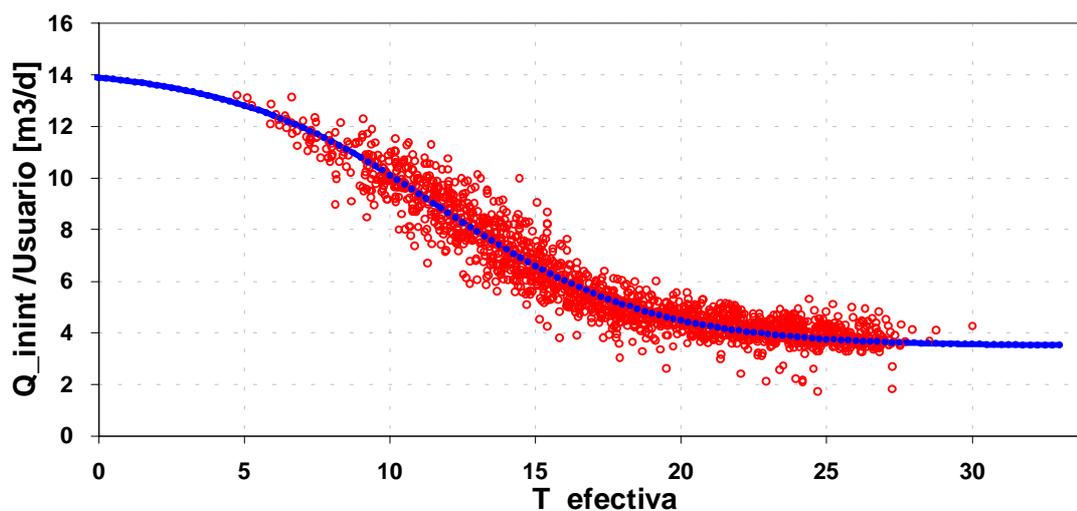
$$T_{ef} = w \cdot \langle T \rangle + (1 - w) \cdot \langle T_{-n} \rangle \quad (5)$$

donde  $w$  es un factor de paso entre 0 y 1 que se determina a partir de los datos de consumo y las temperaturas<sup>[1]</sup>.  $\langle T \rangle$  representa la temperatura media (valor medio de la temperatura máxima y mínima del día en cuestión),  $\langle T_{-n} \rangle$  es el promedio de las temperaturas de los  $n$ -días anteriores al día en cuestión. De este modo la temperatura efectiva automáticamente incorpora el efecto de histéresis o retardo que se manifiesta en el comportamiento típico de los usuarios de gas. Más específicamente, este parámetro permite incluir en los modelos de consumo el hecho de que los usuarios de gas no encienden la calefacción inmediatamente después que la temperatura desciende, sino una

vez que la misma se mantuvo baja por algunos días. Similarmente los calefactores no se apagan inmediatamente apenas sube la temperatura sino una vez que dicho aumento persistió por unos días<sup>[1]</sup>. Usando la temperatura efectiva, es posible parametrizar el consumo ininterrumpible ( $Q^{(inint)}$ ) diario como:

$$Q^{(inint)}(T_{ef}) = Q_0^{(inint)} \cdot \left( 1 + f \cdot \tanh\left(\frac{T_{ef} - T_0}{\Delta T}\right) \right) \quad (6)$$

En esta expresión, los parámetros  $T_0$ ,  $\Delta T$ ,  $f$  y  $Q_0^{(inint)}$  dependen de la ciudad en estudio y sus valores se determinan a partir del análisis de los datos observados de uno o más años. En la Figura 4 se presentan los datos de consumo ininterrumpible por usuario y por día para la zona del Gran Buenos Aires abastecida por MetroGas, junto con la parametrización (6).

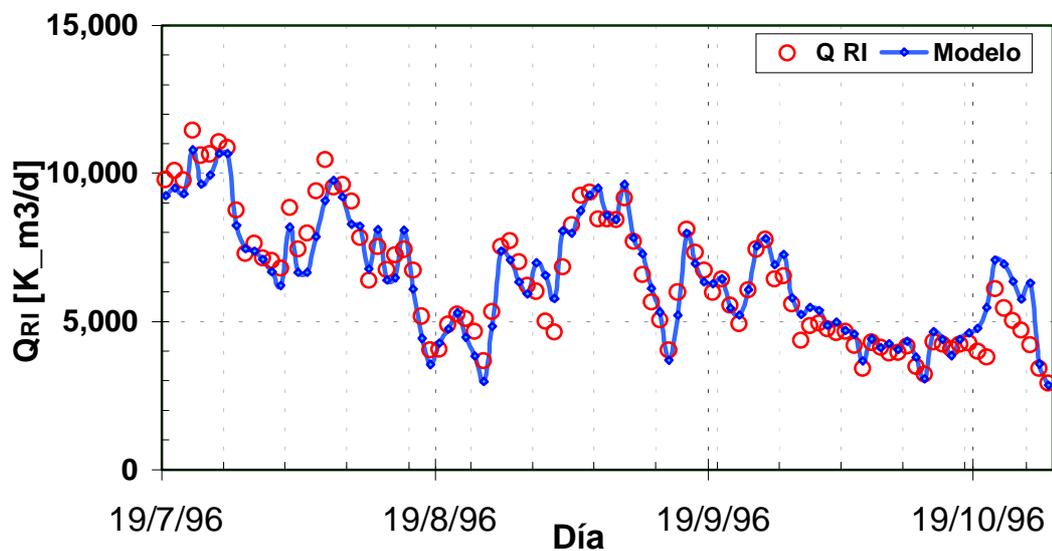


**Figura 4:** Variación del consumo ininterrumpible diario por usuario en la zona de GBA abastecida por MetroGas, en función de la temperatura efectiva para los días hábiles de los años 1996 al 2000. Los círculos representan los datos reales de consumos. La curva continua corresponde a la predicción del modelo, ec.(6).

La variación del consumo en el tiempo es tomada en cuenta en este modelo a través de la variación en el tiempo del parámetro  $Q_0^{(inint)}$ , a saber:

$$Q_0^{(inint)}(t) = Q_{00}^{(inint)} \cdot \left( 1 + f_q^{(inint)} \cdot (t - t_0) \right) \quad (7)$$

El parámetro  $f_q^{(inint)}$  es el que se obtiene del ajuste de los datos usando las expresiones equivalentes a (1),(2) y (4) para la componente ininterrumpible. En la Figura 5 se presentan los datos observados (reales) de los caudales de consumo diario ininterrumpible ( $Q_{RI}$ ) en función del tiempo, para los meses de otoño- invierno del período estudiado para la zona del GBA abastecida por Gas Natural Ban. En esta figura se presentan con una línea continua los valores teóricos de  $Q_{RI}$  obtenidos con nuestro modelo. En todos los casos estudiados se observa un acuerdo muy bueno entre el modelo y los datos observados. Un análisis sistemático de todo el período estudiado, indica que el modelo sigue los datos observados en el 90% de los días con desviaciones menores que el 10%. Este grado de acuerdo es similar o mejor que otros modelos desarrollados para este fin. Además, una característica importante del presente modelo es que hace uso sólo parcialmente los pronósticos de  $\langle T \rangle$ , ya que la temperatura efectiva también incluye la temperatura de días anteriores, sobre los que no se tiene incerteza. Por último, para tener en cuenta la disminución de consumo que ocurre durante los fines de semanas y días feriados, usamos un factor de peso que corrige el consumo en aproximadamente un 15% los domingos y feriados y un 10% los días sábados. Estos parámetros se ajustan en cada ciudad a partir del estudio de los datos observados.



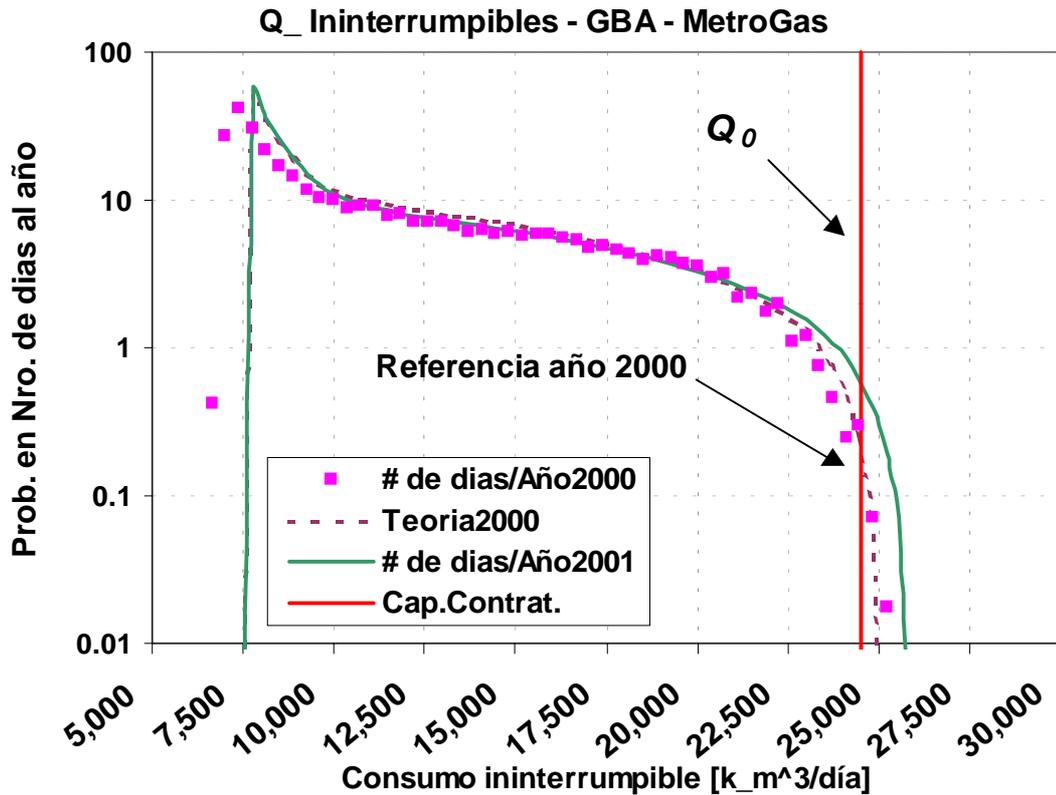
**Figura 5:** Comparación de los consumos ininterrumpibles observados (círculos abiertos) para la zona del GBA abastecida por Gas Natural BAN con los valores predichos por el modelo (curva continua) para el intervalo de tiempo comprendido entre el 19/7/1996 y el 20/10/1996. Las grillas verticales (líneas claras de trazos) corresponden a los días domingo.

## Mediano Plazo

El modelo de corto plazo que acabamos de describir, permite predecir los consumos basándose en dos conjunto de datos: parámetros del modelo que varían en el tiempo suavemente de modo predecibles y los escenarios térmicos pronosticados. De este modo la limitación mayor para extender el modelo a más largo plazo proviene de la gran incerteza que implica realizar pronósticos térmicos a más largo plazo. Sin embargo, para la industria de gas natural, el tipo de predicción que se requiere a mediano plazo, 1 a 5 años, no es necesariamente conocer el consumo en un día determinado de un año del futuro, sino la probabilidad de ocurrencia de un dado valor de consumo y en particular tener la capacidad de predecir los consumos máximos. De este modo, si conocemos las probabilidades de ocurrencia de los distintos escenarios térmicos de un futuro cercano, donde tenemos fundadas razones de supones que las tendencias descritas por las ecuaciones (1), (2) y (4) son aplicables, es posible usar el modelo descrito antes para calcular los correspondientes consumos de gas natural.

Usando la base de datos de las temperaturas ocurridas en los últimos años (preferentemente en los últimos 30 a 40 años), es posible determinar la probabilidad de ocurrencia de un dado escenario de temperatura. La hipótesis fundamental que hacemos es que los escenarios térmicos ocurridos en el pasado pueden volver a ocurrir con igual probabilidad que en el pasado. En otras palabras suponemos que las posibles variaciones globales de temperaturas son pequeñas durante los periodos que se consideran en nuestros estudios. Por lo general, dichas predicciones pronostican variaciones menores a 1 °C por siglo.

De este modo, usando la probabilidad de ocurrencia de un dado escenario térmico y el número de usuarios calculados para un año futuro y sus pautas de consumo, empleando el modelo de consumo, podemos predecir la probabilidad de ocurrencia de los consumos para el año de interés a mediano plazo.

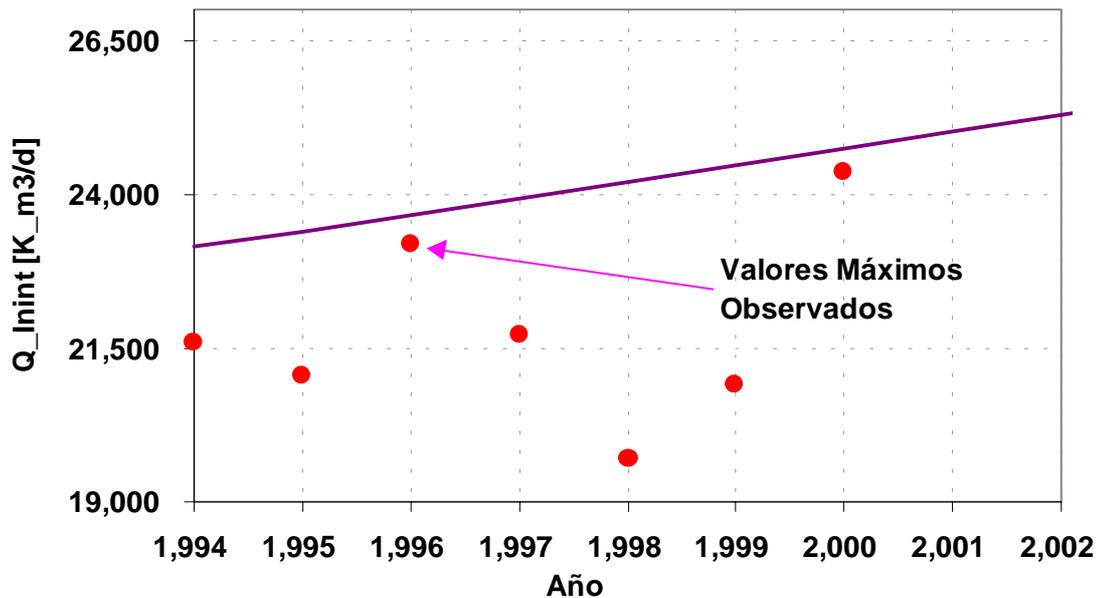


**Figura 6:** Probabilidad de consumo ininterrumpible para la zona del GBA abastecida por MetroGas. En este gráfico la probabilidad se expresa como el número de días al año en que se espera que el consumo tenga el valor expresado en la ordenada. Los datos y la línea de trazo se refieren al año 2000. La línea gruesa continua es la proyección para el año 2001. Calculando el área de la curva, a la izquierda de una dada ordenada  $Q_0$  (Caudal diario) obtenemos una estimación número de días en el que el consumo supera el valor  $Q_0$ .

Con estas suposiciones, es posible construir curvas de probabilidades de consumos como las indicadas en la figura 6. A partir de ellas es posible estimar los valores óptimos para las capacidades contratadas para una dada ciudad. También, estas distribuciones de probabilidad de consumo permiten estimar el valor de los factores de carga para la componente del consumo que se está tratando. Más específicamente, si  $\langle Q \rangle$  representa el valor medio de la distribución de consumo (Fig. 6) y  $Q_{max}$  es el valor máximo de la distribución de consumo. El *Factor de carga (FC)* viene dado por:

$$FC = \frac{\langle Q \rangle}{Q_{max}} \quad (8)$$

donde  $\langle Q \rangle$  es el valor medio de la componente de consumo en estudio y  $Q_{max}$  representa el valor máximo de esa misma componente de consumo.

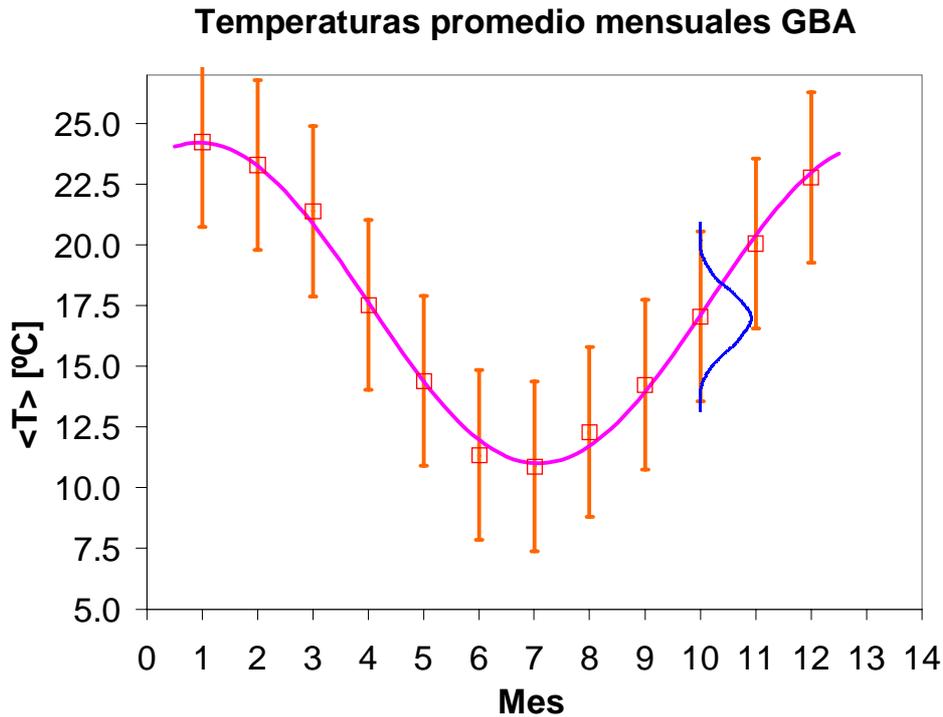


**Figura 7:** Estimación de las capacidades contratadas en distintos años para la Distribuidora MetroGas. Estas estimaciones se realizaron bajo la hipótesis que el consumo ininterrumpible no supere a dicha capacidad más de 1 día cada 20 años en promedio.

Finalmente, a partir de nuestro estudio es posible estimar las capacidades contratadas óptimas para abastecer una dada región o ciudad. En particular en la Figura 7 se presentan los resultados de dichos cálculos para los casos de MetroGas, usando el modelo de mediano plazo, bajo la suposición de que dichas capacidades no sean superadas por la componente ininterrumpibles en más de un día en 20 años.

#### IV.- Relación entre las distribuciones de consumos diarios y mensuales - factores de carga

En esta sección presentamos un procedimiento para la obtención de los factores de carga, usando los valores de consumo obtenidos de facturación mensual de las distintas categorías de usuarios para una región compacta. La metodología propuesta se basa en la hipótesis que cada componente del consumo sigue una distribución del tipo (6). También suponemos que en cada mes del año las temperaturas medias diarias tienen una distribución que es aproximadamente normal, con un valor medio,  $\langle T \rangle_{mes}$ , que varía de mes a mes y una desviación estándar,  $\sigma_{mes}$  que también puede variar de mes a mes. Para el caso del GBA, estas hipótesis se cumplen con muy buena aproximación teniendo una desviación estándar que es casi constante para todos los meses del año ( $\sigma=3.1^{\circ}\text{C} (\pm 0.6^{\circ}\text{C})$ ).

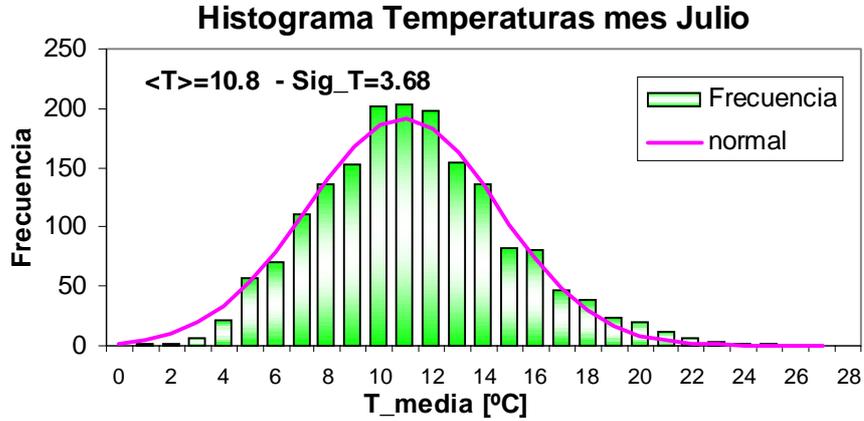


**Figura 8:** Temperaturas medias mensuales para la región del GBA. Las barras de error representan los valores de  $\sigma_{mes}$ . La curva continua es un ajuste a los datos realizada usando la función:  $\langle T \rangle (mes) = a + b \cdot \cos(c \cdot mes + d)$ .

Los valores de  $\langle T \rangle_{mes}$  se presentan en la Figura 8, basada en una base de datos de los últimos 56 años. En la figura 9 se muestra la distribución de temperaturas medias diarias para el mes de julio, usando los datos de los mismos años (1944 a 2000). Vemos que las temperaturas medias efectivamente tienen una distribución que puede ser bien reproducida por una distribución normal.

**Algoritmo:** Si suponemos que la distribución de consumos diarios tiene un comportamiento como el descrito por la ecuación (6) y las temperaturas medias diarias siguen una distribución normal  $(T_{mes}, \sigma_{mes})$ , la distribución de consumos diaria, promediada para un dado mes la designaremos como el consumo mensual y la representamos con  $Q_{mes}$ . Esta magnitud puede obtenerse tomando el promedio pesado del consumo diario para cada temperatura  $T$ , ecuación (6), con un factor de peso dado por la probabilidad que esa temperatura ocurra, es decir la distribución normal  $(T_{mes}, \sigma_{mes})$ . De este modo la distribución de consumo mensual se puede escribir como un promedio pesado (por la distribución de temperaturas diarias) de la distribución de consumo diario para ese mes. Es decir:

$$Q_{mes}(T_{mes}) = Q_0 \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_{mes}} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \left[ 1 - f \cdot \tanh\left(\frac{T - T_0}{\Delta T}\right) \right] \cdot \left[ \exp\left(\frac{T - T_{mes}}{\sqrt{2} \cdot \sigma_{mes}}\right)^2 \right] \cdot dT \quad (9)$$



**Figura 9:** Distribución de temperaturas medias diarias para el mes de julio. Los datos reunidos en este histograma corresponden a todos los meses de julio desde 1944 a 2000, para la zona del Gran Buenos Aires. La curva continua corresponde a una distribución normal con valor medio y desviación estándar indicados en el gráfico.

La integral indicada en (9) puede resolverse usando las propiedades de la transformada de Fourier, ver apéndice A. El resultado de esta expresión es:

$$Q_{mes}(T_{mes}) \cong Q_0 \cdot \left[ 1 - f \cdot \tanh\left(\frac{T_{mes} - T_0}{\Delta T_{ef}}\right) \right] \quad (10)$$

donde el parámetro  $\Delta T_{ef}$ , que determina el ancho de la distribución viene dado por:

$$\Delta T_{ef} = \sqrt{\Delta T^2 + 1.382 \cdot \sigma_{mes}^2} \quad (11)$$

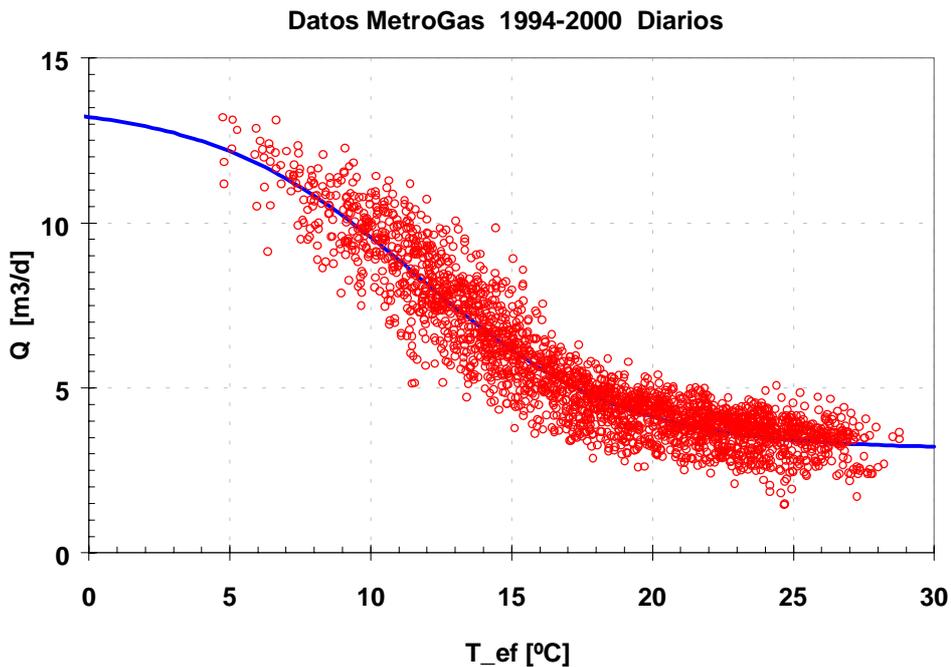
El valor de  $Q_{mes}$  en este caso se refiere al valor del consumo promedio diario para todo el mes en consideración. El valor del consumo mensual será el producto de  $Q_{mes}$  por el número de días en dicho mes. Los resultados indicados por (10) y (11) indican que las distribuciones de consumos mensuales y diarios están relacionadas entre si, pudiéndose obtener una si se conoce la otra. En nuestro caso en particular deseamos estimar el consumo diario máximo,  $Q_{max}$ , para poder calcular los factores de carga. Para ello una posibilidad sería usar los datos de consumos mensuales que pueden ser obtenidos a partir de los datos de facturación, junto a los datos de temperaturas medias mensuales correspondientes, para obtener la distribución mensual (10),  $Q_{mes}(T_{mes})$ . Usando la ecuación (11), junto con los valores de  $\sigma_{mes}$ , podemos obtener la distribución diaria de consumo,  $Q(T)$  dada por la ecuación (6). Finalmente, de los datos históricos de temperaturas podemos

estimar el valor de  $T_{min}$  para un año o conjunto de años de interés. El valor de  $Q_{max}$  para este período de tiempo se puede estimar como:

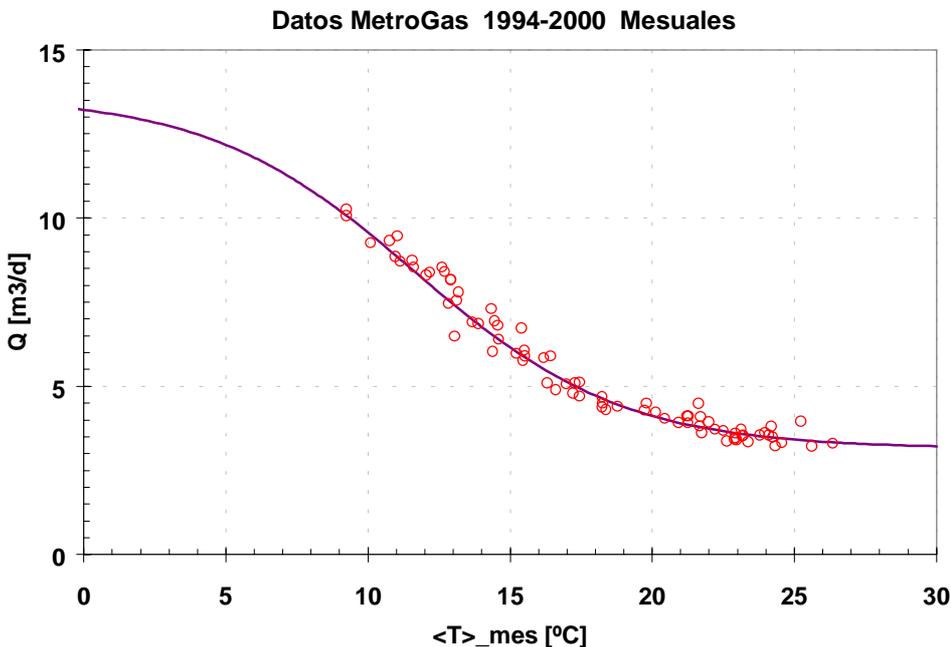
$$Q_{max} \cong Q(T_{min}) = Q_0 \cdot \left[ 1 - f \cdot \tanh\left(\frac{T_{min} - T_0}{\Delta T}\right) \right]. \quad (12)$$

Usando los datos de consumos totales anuales, podemos calcular  $\langle Q \rangle$  como el cociente entre el consumo total dividido por el número de días en este período. Empleando la ecuación (6) podemos obtener los valores de  $FC$  para cada categoría de usuario.

Con el objeto de poner a prueba el formalismo desarrollado aquí, tomamos como ejemplo las distribuciones de consumo ininterrumpibles (residencial, comercial, GNC, etc.) de la zona del GBA abastecida por MetroGas. Para esta zona y esta componente del consumo conocemos los mismos día a día. Por lo tanto también conocemos los valores mensuales, obtenidos sumando los valores diarios. De este modo podemos comparar los valores de consumo diario en función de la temperatura efectiva diaria con la distribución (6). Esta comparación se muestra en la figura 10. En la figura 11, se presentan los datos de consumos mensuales correspondientes en función de la temperatura media mensual. Es útil mencionar que al tomar las medias mensuales la diferencia entre temperatura media y efectiva desaparece. También en la Figura 11 se muestra la predicción del modelo obtenida usando el formalismo propuesto, ecuación (10). Como se ve el ajuste es excelente, lo cual prueba que en este caso el formalismo propuesto para obtener una modelización de los consumos mensuales a partir del modelo diario efectivamente funciona. También puede apreciarse de estos gráficos que las distribuciones mensuales presentan mucho menos dispersión que las distribuciones diarias, siendo por lo tanto muy adecuadas para extraer los parámetros del modelo con poca incerteza y en forma robusta. El valor del factor de carga obtenido de la distribución diaria (figura 10) para esta componente del consumo es  $FC=0.43(\pm 0.03)$ . El mismo factor de carga, obtenido de la distribución mensual, tomando como referencia la temperatura mínima ocurrida en este periodo de tiempo, es  $FC=0.45(\pm 0.02)$



**Figura 10.** Comparación de los consumos ininterrumpibles diarios para la zona del GBA abastecida por MetroGas (círculos) en función de la temperatura efectiva. La línea continua es un ajuste obtenido usando la función (4).

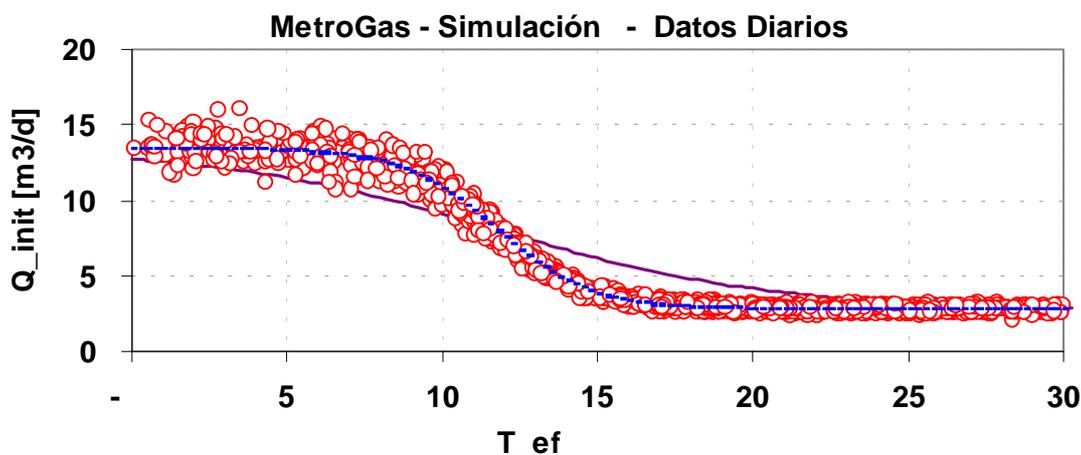


**Figura 11.** Comparación de los consumos ininterrumpibles mensuales para la zona del GBA abastecida por MetroGas (círculos) en función de la temperatura media mensual. La línea continua es un ajuste obtenido usando la expresión (8).

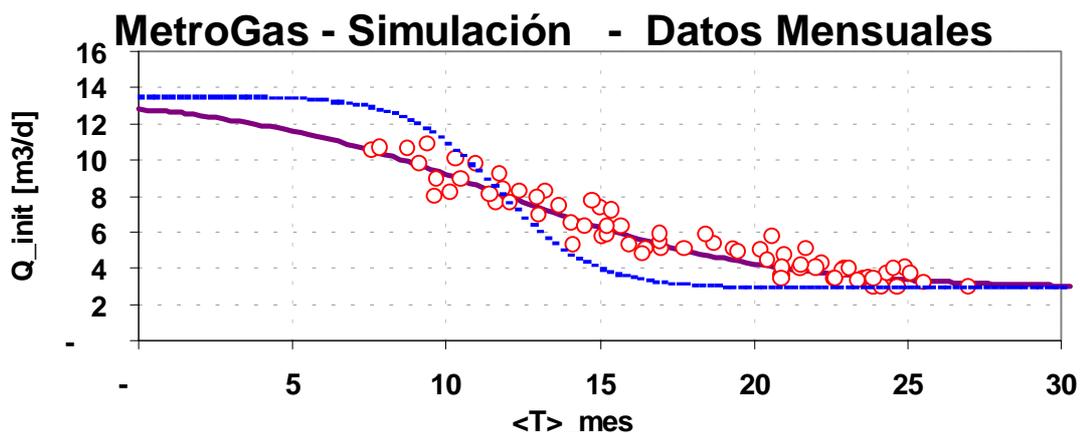
De igual modo es claro que la inversa también es cierta. Es decir si hubiésemos partido de la distribución mensual, podríamos obtener la

distribución diaria. Esto último es precisamente el objetivo que deseábamos lograr.

Finalmente, se realizó una modelización de datos de consumos de una región hipotética usando la técnica de Monte Carlo<sup>5</sup>, y se compararon los consumos mensuales y diarios con los obtenidos con el formalismo propuesto aquí y en todos los casos la correlación fue muy buena. En las figuras 12 y 13 se presentan dos ejemplos de los resultados obtenidos con la simulación Monte Carlo, junto a los predichos por el modelo propuesto para transformar las distribuciones de datos mensuales a distribuciones diarias y viceversa. En resumen, se presentaron tres métodos de validación del formalismo propuesto para obtener la distribución de consumos diarios a partir de distribuciones mensuales: a) justificación matemática empleando el teorema de convolución de las transformadas de Fourier (apéndice A), b) comparación de distribuciones usando datos de consumos ininterrumpibles reales y c) a través de la simulación de distintos escenarios de consumos, usando la técnica de Monte Carlo. En todos los casos los resultados son consistentes con el formalismo propuesto y los resultados de los valores de factores de carga coinciden entre si con una dispersión menor que el 10%. Esta dispersión de los valores de factores de carga es del mismo orden que la variabilidad natural de dichos parámetros por efecto de que la rigurosidad de los inviernos varía de un año a otro.



**Figura 12.** Comparación de los consumos ininterrumpibles diarios, simulados por el método de Monte Carlo, para la zona del GBA (círculos) en función de la temperatura efectiva diaria. La línea de trazos (azul) es un ajuste obtenido usando la expresión (6). La predicción del modelo mensual (10) también se presenta para comparación (línea continua bordó).



**Figura 13.** Comparación de los consumos ininterrumpibles mensuales, simulados por el método de Monte Carlo, para la zona del GBA (círculos) en función de la temperatura media mensual. Estos datos son los que corresponden a los datos diarios mostrados en la figura 12. La línea continua bordó es un ajuste obtenido usando la expresión (10). La predicción del modelo diario (6) también se presenta para comparación en trazos azules.

## VI.- Conclusiones

En este trabajo se presenta un modelo de predicción de consumo de las distintas componentes ininterrumpible de gas natural, a mediano y corto plazo. El modelo puede estimar también la distribución de consumos futuros, esperables en una dada región o localidad. Estas cantidades son útiles para evaluar las proyecciones de demandas picos a futuro y permiten estimar capacidades contratadas adecuadas a distintas regiones del País, discriminadas por categoría de usuario. Las predicciones del modelo a mediano plazo tienen incertezas del orden del 10%, que son del mismo orden o menores que las fluctuaciones intrínsecas de un año a otro debido a las variaciones climáticas.

Una característica interesante y novedosa del modelo descrito aquí, es que permite determinar las distribuciones de consumos diarios a partir de los datos de consumos mensuales. Esta técnica es de mucha utilidad para poder entender las características de consumo por tipo o categoría de usuario en una dada región. La misma permite estimar los factores de carga de dichas componentes del consumo, usando la información de consumos mensuales, disponibles en general a partir de los datos de facturación. Esta posibilidad es de mucha significación económica, ya que sin necesidad de realizar mediciones costosas y técnicas estadísticas sofisticadas, es posible determinar los factores de carga de los distintos tipos de usuarios para todas las regiones de interés.

Deseamos agradecer al Ing. L. Pomerantz por sus valiosos comentarios y sugerencias realizadas durante el desarrollo de este trabajo. También

agradecemos a la Dra. M. Schwint por sus comentarios y lectura de este trabajo.

## Bibliografía

1. *Modelo de Predicción de Consumo de gas natural en la República Argentina.* S.Gil y J. Deferrari. **Petrotecnia** (Revista del Instituto Argentino del Petróleo y del Gas) **XL**, N°3, Sup. Tecn. 1,1 - Junio(1999).
2. *Monitoreo de la Provisión de Gas Natural al Gran Buenos Aires.* S.Gil y E. Fusario. Revista Petroquímica, **Petróleo Gas & Química** - N° **139**, p.11.672, dic. 1997.
3. *Matemáticas Superiores para Ingenieros y Científicos* – M. R. Spiegel – McGraw Hill – México 1971
4. Marco Regulatorio del Gas Ley 24.076 de la Nación Argentina - [www.enargas.gov.ar](http://www.enargas.gov.ar)
5. *Análisis de Fourier* – Hsu Hweii P.– Addison-Wesley Iberoamericana – México 1987
6. *Física re-Creativa* – S. Gil y E. Rodríguez – Prentice Hall – Buenos Aires 2001

## Apéndice A

El propósito de este apéndice es presentar una justificación matemática de la relación entre las distribuciones de consumos diarias y las mensuales correspondientes. Para nuestro fin es conveniente recordar las definiciones de las transformadas de Fourier  $F(\omega)$  de una función  $f(t)$ <sup>3,4</sup>:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot e^{i\omega t} \cdot dt \quad (A1)$$

Según el teorema de Fourier la función original  $f(t)$  puede obtenerse a partir de su transformada  $F(\omega)$  como:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) \cdot e^{i\omega t} \cdot d\omega \quad (A2)$$

Como se discutió en este trabajo las distribuciones de consumo de gas pueden modelarse usando la función tangente hiperbólica de la forma:

$$y_1(T, T_0, \Delta T) = \tanh\left[\frac{T - T_0}{\Delta T}\right] \quad (A3)$$

Esta función tiene la misma forma que la Función Error  $Fer(t)$  definida como<sup>3,4</sup>:

$$Fer(t) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^t e^{-u^2} \cdot du \quad (A4)$$

De hecho la función:

$$y_2(T, T_0, \sigma_T) = Fer\left[\frac{T - T_0}{\sigma_T}\right] \quad (A5)$$

con

$$\sigma_T = \delta \cdot \Delta T \quad (A6)$$

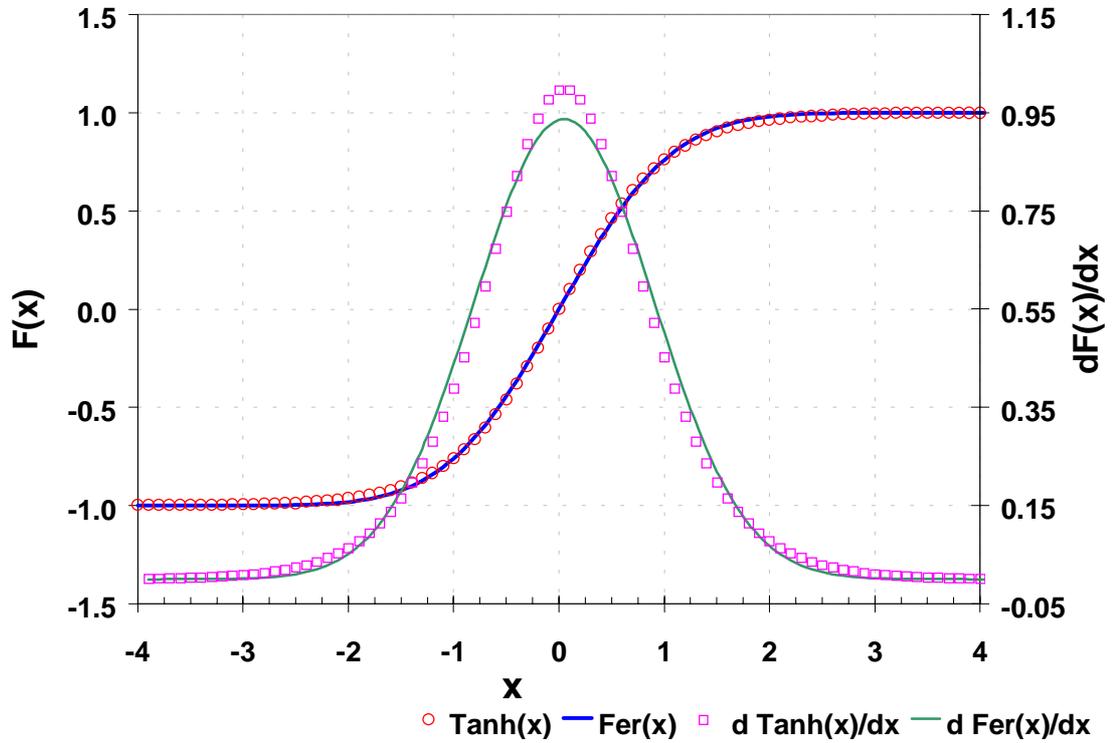
y

$$\delta = 1.203, \quad (A7)$$

tiene características muy similares como se muestra en la figura A1. En esta figura se presentan ambas funciones y sus respectivas derivadas primeras (referidas al eje derecho). La máxima diferencia entre ambas funciones es del orden de 0.04%. Por lo tanto la función  $y_2(T)$  es una muy buena aproximación de  $y_1(T)$ . De hecho cualquiera de las dos podrían haberse usado para describir el consumo de gas. Nuestra elección es en cierto modo discrecional y fue adoptada por la simplicidad de obtener los valores de la función (A3). Sin embargo, para ciertas aplicaciones, es más simple trabajar con la función (A4). De hecho, la función que describe el consumo de gas en función de la temperatura se puede describir con cualquiera de las dos funciones siguientes:

$$Q_1(T) = Q_0 \cdot \left[1 - f \cdot \tanh\left(\frac{T - T_0}{\Delta T}\right)\right] \quad (A8)$$

$$Q_2(T) = Q_0 \cdot \left[1 - f \cdot Fer\left(\frac{T - T_0}{\sigma_T}\right)\right] \quad (A9)$$



**Figura A1.** Comparación de las distribuciones (A3) (círculos) y (A4) línea continua, ambas referidas al eje vertical izquierdo. En esta figura también se muestran las respectivas derivadas de las funciones (A3) y (A4) referidas al eje vertical derecho.

Como se discutió en este trabajo, la distribución de temperaturas a lo largo de un mes puede aproximarse por una distribución normal con una temperatura media mensual  $T_{mes}$  que varía mes a mes y una desviación estándar  $\sigma_{mes}$ , que es aproximadamente constante para la región del Gran Buenos Aires. De este modo la distribución de consumo mensual se puede escribir como un promedio pesado (por la distribución de temperaturas diarias) de la distribución de consumo diario para ese mes. Es decir:

$$Q_{mes}(T_{mes}) = Q_0 \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_{mes}} \int_{-\infty}^{\infty} \left( e^{-\left(\frac{T-T_{mes}}{\sqrt{2} \cdot \sigma_{mes}}\right)^2} \right) \cdot \left[ 1 - f \cdot \tanh\left(\frac{T-T_0}{\Delta T}\right) \right] \cdot dT \quad (A10)$$

Si realizamos la aproximación de la función (A3) por la (A4), haciendo la sustitución:

$$t = \frac{T-T_0}{\sigma_{Ts}} = \frac{T-T_0}{\delta \cdot \Delta T} \quad (A11)$$

tenemos:

$$Q_{mes}(T_{mes}) = Q_0 - Q_0 \cdot f \cdot \frac{\sigma_T}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_{mes}} \int_{-\infty}^{\infty} \left( e^{-\left(\frac{t-x}{\sqrt{2}\sigma}\right)^2} \right) \cdot [Fer(t)] \cdot dt \quad (A12)$$

Donde

$$x = \frac{T_{mes} - T_0}{\sigma_{Ts}} \quad (A13)$$

y

$$\sigma = \frac{\sigma_{mes}}{\sigma_T} \quad (A14)$$

La integral del segundo miembro de (A12) puede calcularse usando las técnicas de las integrales de Fourier, ya que la misma no es otra cosa que la convolución de función  $Fer(t)$  con la función normal<sup>3,4</sup>. Tomando la transformada de Fourier de dicha integral, por las conocidas propiedades de las integrales de Fourier<sup>3,4</sup>, tenemos

$$\begin{aligned} \mathfrak{S}\{I(x)\} &= \mathfrak{S}\left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_s} \int_{-\infty}^{\infty} \left( e^{-\left(\frac{t-x}{\sqrt{2}\sigma}\right)^2} \right) \cdot [Fer(t)] \cdot dt \right\} = \\ &= \mathfrak{S}\{Fer(t)\} \cdot \mathfrak{S}\left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_s} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\sqrt{2}\sigma}\right)^2} \right\} = \frac{2}{i \cdot \omega} \cdot e^{-\frac{\omega^2}{4}} \cdot e^{-\frac{\omega^2 \sigma^2}{2}} = \\ &= \frac{2}{i \cdot \omega} \cdot e^{-\frac{\omega^2}{4}(2\sigma^2+1)}. \end{aligned} \quad (A15)$$

Anti transformando esta expresión obtenemos:

$$I(x) = Fer\left(\frac{x}{\sqrt{1+2\sigma^2}}\right) = Fer\left(\frac{T_{mes} - T_0}{\sigma_T \cdot \sqrt{1+2\sigma^2}}\right). \quad (A16)$$

Si definimos el parámetro  $\Delta T_{ef}$  como:

$$\Delta T_{ef} = \frac{1}{\delta} \cdot \sqrt{\sigma_T^2 + \sigma_{mes}^2} = \sqrt{\Delta T^2 + \frac{2}{\delta^2} \sigma_{mes}^2}, \quad (A17)$$

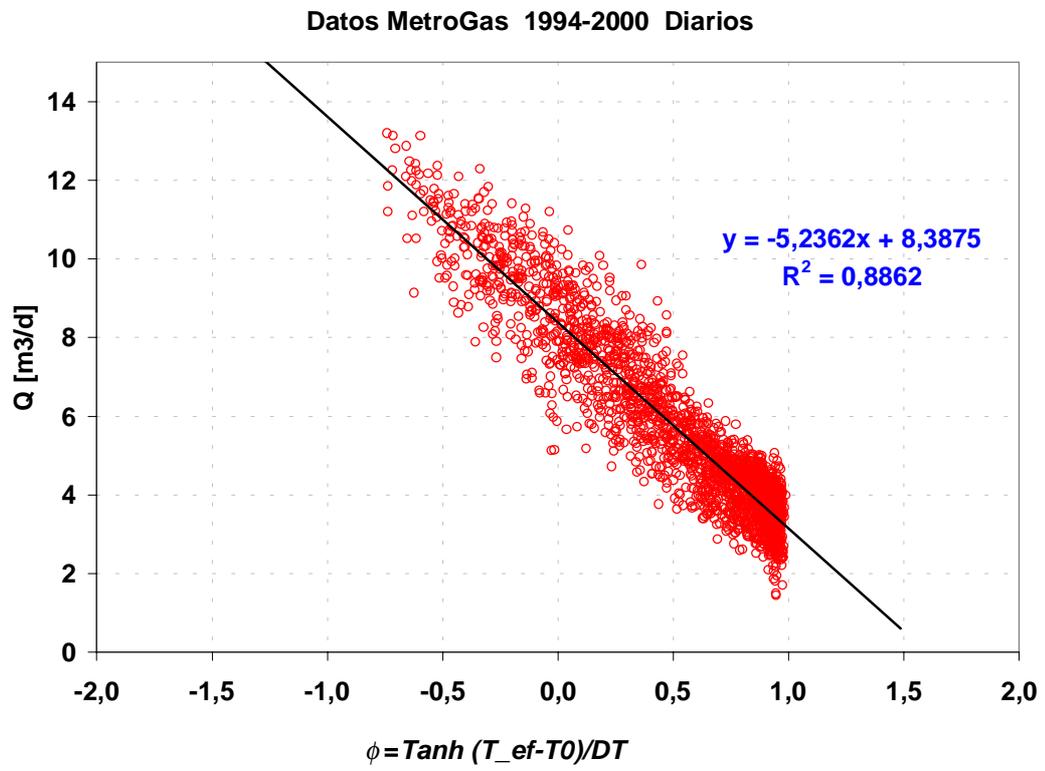
la distribución mensual (A12) puede escribirse como:

$$Q(T_{mes}) \cong Q_0 \cdot \left[ 1 - f \cdot \tanh\left(\frac{T_{mes} - T_0}{\Delta T_{ef}}\right) \right]. \quad (A18)$$

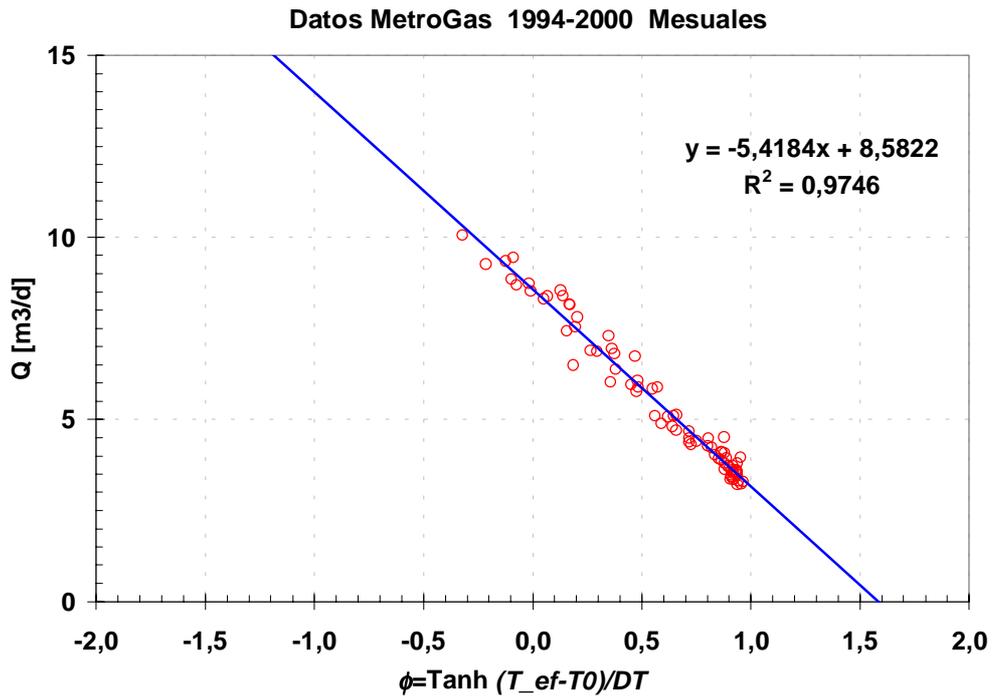
De este modo usando los datos de consumos mensuales y definiendo el parámetro  $\phi$  como:

$$\phi = \frac{T_{mes} - T_0}{\Delta T_{ef}}. \quad (A19)$$

La expresión de  $Q_{mes}(T_{mes})$  en función de  $\phi$  se transforma en:



**Figura A2.** Representación gráfica de datos de consumo ininterrumpible diarios (MetroGas 1996-2000) en función del parámetro  $\phi$ . La línea continua es un ajuste lineal a los datos.



**Figura A3.** Representación gráfica de datos de consumo ininterrumpible mensuales (MetroGas 1996-2000) en función del parámetro  $\phi$ . La línea continua es un ajuste lineal a los datos.

$$Q_{mes}(\phi) = Q_0 \cdot [1 - f \cdot \phi]. \quad (A20)$$

De modo que podemos determinar  $Q_0$  y  $f$  para la componente de consumo en estudio graficando  $Q_{mes}$  en función de  $\phi$ . Aquí suponemos que los valores de  $\sigma_{mes}$ ,  $\Delta T$  y  $T_0$  para la ciudad en estudio se conocen de estudios preliminares o de la caracterización de otras componentes de consumo para la misma localidad y de los estudios de las distribuciones de temperaturas históricas.