

**PREDICCIÓN DEL CONSUMO DE GAS EN UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN
UTILIZANDO DATOS HISTÓRICOS. APLICACIÓN RED DE DISTRIBUCIÓN DE
LA CIUDAD DE VILLAVICENCIO.**

DARÍO ALEXIS RUEDA GARCÍA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS DE FISICOQUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA
2010**

**PREDICCIÓN DEL CONSUMO DE GAS EN UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN
UTILIZANDO DATOS HISTÓRICOS. APLICACIÓN RED DE DISTRIBUCIÓN DE
LA CIUDAD DE VILLAVICENCIO.**

DARÍO ALEXIS RUEDA GARCÍA

**Trabajo de Grado para optar al título de
Especialista en Ingeniería de Gas.**

**Director
Ing. Alexander Montaña Martínez
Especialista en Ingeniería de Gas**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FISCOQUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA
2010**

DEDICATORIA

A Dios, a mis padres, a mi esposa y mi hijo quienes me han brindado el soporte emocional para conseguir mis logros y triunfos.

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos a:

Al Ing. Alexander Montaña Martínez, director de este trabajo, por sus constante y desinteresada colaboración en la realización de este proyecto.

A la empresa Llanogas S.A. E.S.P. por su apoyo en mi crecimiento profesional e intelectual.

A mis familiares, amigos y compañeros de trabajo por su permanente colaboración incondicional.

RESUMEN

TÍTULO: PREDICCIÓN DEL CONSUMO DE GAS EN UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN UTILIZANDO DATOS HISTÓRICOS. APLICACIÓN RED DE DISTRIBUCIÓN DE LA CIUDAD DE VILLAVICENCIO.*

AUTOR: DARIO ALEXIS RUEDA GARCÍA**.

PALABRAS CLAVES: Pronostico, Demanda de gas, Red de distribución, Polinomios de Interpolación, Regresión, Curva de Consumo.

DESCRIPCIÓN:

Este trabajo se realizó para predecir el consumo de gas en un sistema de distribución a través de la descripción del mercado de gas natural de la ciudad de Villavicencio, estableciendo una relación matemática del consumo en función de una variable dependiente y su posterior implementación en una plantilla para su uso diario.

Metodológicamente se trató de la recopilación de datos históricos del medidor de entrega de custodia de la ciudad de Villavicencio, análisis de comportamiento frente a la variación del día de la semana y su posterior regresión a un modelo matemático.

Como parte de los resultados se obtuvo la representación del consumo de gas semanal en una curva polinómica de quinto grado a través del método de polinomios de interpolación.

Se concluyó que este modelo se ajusta a los datos experimentales con un coeficiente de determinación cercano a la unidad y errores promedio día menor al 4%. Adicionalmente el modelo permite controlar la cuenta de balance sin superar el 2% mensual respecto al total de gas pedido.

El modelo se implementó sobre una plantilla en Excel® que permite realizar los pronósticos de gas del municipio de Villavicencio y realizar el control de las desviaciones de energía diarias en una cuenta de balance acumulada minimizando la carga operativa en las actividades de nominación de la empresa sobre la cual se realizó el análisis.

En virtud de esto, se recomienda implementar el modelo matemático de quinto orden para los sistemas de distribución que tengan composición del mercado de gas similar al del sistema analizado.

*Monografía de la Facultad de Ingenierías Físico Químicas. Especialización en Ingeniería de Gas.

**Director: Alexander Montaña Martínez. Ingeniero Civil, Especialista en ingeniería de Gas de la Universidad Industrial de Santander.

SUMMARY

TITLE: PREDICTION OF GAS CONSUMPTION IN A DISTRIBUTION SYSTEM USING HISTORICAL DATA. NETWORK APPLICATION OF THE CITY OF VILLAVICENCIO.*²

AUTHOR: DARIO ALEXIS RUEDA GARCÍA**.

KEYWORDS: Forecasting, demand for gas distribution network, interpolation polynomials, regression, consumption curve.

DESCRIPTION:

This work was performed to predict consumption of gas in a distribution system through the description of the natural gas market in the city of Villavicencio, establishing a mathematical relationship based on consumption of a dependent variable and its implementation in a template for daily use.

Methodologically it was the collection of historical data delivery meter custody of the city of Villavicencio, analysis of performance against the variation of the weekday and its subsequent reversion to a mathematical model.

As part of the results we obtained the representation of the weekly gas consumption in a fifth-degree polynomial curve through the method of interpolation polynomials.

It was concluded that this model fits the experimental data with a coefficient of determination close to unity and daily average errors less than 4%. This approach also lets you control the account balance not to exceed 2% of the total monthly gas demand.

The model was implemented on a template in Excel ® that allows predictions of gas consumption in the municipality of Villavicencio and make the control of the deviation of daily energy balance in an account, minimizing the burden accumulated operational activities associated with the name of the firm on which analysis was performed.

Under this, it is recommended to implement the fifth-order mathematical model for distribution systems with composition of the gas market similar to the analyzed system.

*Monograph of the FACULTY OF ENGINEERING PHISIQUE CHEMISTRY. Expertise in Engineering Gas.

**Director: Alexander Montaña Martinez. Civil Engineering, Gas Engineering Specialist of the Industrial University Santander.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	13
1. OBJETIVOS	14
1.1 OBJETIVO GENERAL	14
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
2. ALCANCE	15
3. TERMINOLOGÍA UTILIZADA	16
4. ASPECTOS GENERALES	19
4.1 DESCRIPCIÓN DE VILLAVICENCIO	19
4.2 SISTEMA DE GAS NATURAL	19
4.2.1 Tipo de usuarios atendidos	20
4.3 ASPECTOS REGULATORIOS Y CONTRACTUALES	23
5. MÉTODOS DE PRONÓSTICO	25
5.1 POLINOMIOS DE INTERPOLACIÓN	25
5.2 COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN	26
6. DEDUCCIÓN DEL MODELO	29
6.1 EVALUACIÓN DEL POLINOMIO DE INTERPOLACIÓN CON LOS DATOS BÁSE AÑO 2008	31
7. APLICACIÓN DEL MODELO	33
8. IMPLEMENTACIÓN DE LA HERRAMIENTA	34
9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	36
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	37
ANEXOS	38

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Características sistema de medición de Villavicencio Llanogas.	20
Tabla 2. Usuarios Registrados a 31 de diciembre de 2008.	21
Tabla 3. Consumo registrado por tipo de usuario.	22
Tabla 4. Polinomios de Interpolación Obtenidos a diferentes grados.	30
Tabla 5. Resultado de la comparación de los métodos de Polinomio n5 y Nominación de Llanogas.	33

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Vista de la Ciudad de Villavicencio.	19
Figura 2. Mapa Topológico Gasoducto Cusian_Apiay_Usme.	20
Figura 3. Mapa Ubicación EDS GNV en Villavicencio.	22
Figura 4. Resolución matricial para hallar los coeficientes del polinomio.	34
Figura 5. Vista Hoja de consolidación de Pronósticos.	35

LISTA DE GRAFICAS

	pág.
Gráfica 1. Distribución de Usuarios por Estrato.	21
Gráfica 2. MBTU por día Entregados en Villavicencio Año 2008.	23
Gráfica 3. Promedio Día semana en MBTU Año 2008.	29
Gráfica 4. Promedio de crecimiento Día semana en % Año 2008.	30
Gráfica 5. Polinomio de Interpolación Grado 5.	30
Gráfica 6. Error Relativo polinomio único grado 5.	31
Gráfica 7. Error Relativo polinomio dinámico grado 5.	32
Gráfica 8. Polinomio n5 Vs Medición.	33

INTRODUCCIÓN

Como consecuencia de la política energética implantada en Colombia desde la década del 90,' la regulación, la inversión y la operación de los sistemas de gas natural han evolucionado en forma exponencial, reflejada principalmente en el crecimiento de los usuarios del servicio y la dinámica del sector.

Es así como a través de la Ley 142 de 1994, se diferenciaron tres agentes en la cadena de suministro del gas, que son: productor, transportador y distribuidor, quienes establecen sus relaciones mediante contratos de suministro y transporte.

En dichos contratos y en concordancia con las disposiciones de la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), se crea como actividad diaria la solicitud de gas al productor y al transportador, desde el distribuidor, denominada nominación; la cual busca que el productor y el transportador armen sus programas diarios de despacho y alisten sus instalaciones para atender las solicitudes de los distribuidores.

Llanogas S.A. E.S.P., empresa dedicada a la distribución de gas natural en los departamentos de Meta, Cundinamarca y Guaviare con sede principal en Villavicencio, tiene relaciones contractuales con Ecopetrol quien le suministra gas del Campo Cusiana, y con la Transportadora de Gas Internacional quien le provee el transporte en el gasoducto Cusiana-Apiay-Usme.

Esta empresa realiza diariamente la nominación a Ecopetrol y a la Transportadora de Gas Internacional, basada en métodos de tanteo y la experticia del personal encargado de la actividad.

No tener un método de pronóstico genera el riesgo de incumplimiento en las cláusulas de los contratos de transporte en lo concerniente a penalizaciones por desviaciones entre lo nominado y lo consumido, insuficiencia en la entregas de gas a los grandes clientes y estaciones de GNV, acumulación de gas no usado por el distribuidor en la red de transporte y una deficiente planeación del sistema de distribución.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Predecir el consumo diario de gas de la ciudad de Villavicencio.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Describir el mercado de gas natural de la ciudad de Villavicencio.
- Establecer una relación matemática del consumo de gas natural en el sistema de distribución de la ciudad de Villavicencio.
- Implementar una plantilla para el pronóstico del consumo de gas en el sistema de distribución de la ciudad de Villavicencio.

2. ALCANCE

El trabajo desarrollado se centrará en los datos recopilados por el autor para la ciudad de Villavicencio a 31 de diciembre 2008 y específicamente los provenientes de la distribuidora Llanogas SA ESP.

Con los datos recopilados se propondrá un modelo matemático para predecir el consumo de gas natural en la ciudad de Villavicencio.

Este estudio pretende dar una herramienta para realizar pronósticos de gas de corto plazo en el mercado de Villavicencio.

3. TERMINOLOGÍA UTILIZADA

Acuerdo Operativo de Balance: Acuerdo comercial celebrado entre dos Agentes dirigidos a atender Desbalances.

BTU (British Thermal Unit): Es la cantidad de calor necesaria para elevar de 59 a 60 grados Fahrenheit (°F) la temperatura de una (1) libra masa de agua a una presión de una atmósfera estándar (14,696 Psia). Un Millón de BTU (MBTU) equivale a 1,055 056 Giga Joule (GJ).

Condiciones Base: Son, para efectos de medición de volumen y cálculo del Poder Calorífico Bruto Real del Gas, una presión absoluta de uno coma cero uno (1,0101) Bar absolutos equivalentes a 14,65 Psia y una temperatura de quince coma cincuenta y cinco (15,55) grados centígrados equivalentes a 60 °F.

CREG: Es la Comisión de Regulación de Energía y Gas, organizada como Unidad Administrativa Especial del Ministerio de Minas y Energía de acuerdo con las Leyes 142 y 143 de 1994.

Cuenta de Balance de Energía: Es la diferencia acumulada entre la cantidad de energía entregada y la cantidad de energía tomada por un remitente durante un (1) mes.

Centros Principales de Control (CPC): Centros pertenecientes a los diferentes gasoductos (Sistemas de Transporte) que hagan parte del Sistema Nacional de Transporte, encargados de adelantar los procesos operacionales, comerciales y demás definidos en el RUT.

Desbalance de Energía: Se define como la diferencia entre cantidad de energía entregada y la cantidad de energía tomada por un remitente en un día de gas.

Día: Se entenderá día calendario cuando no se disponga en forma expresa que es hábil.

Día de Gas: Es un período de veinticuatro (24) horas consecutivas, contado desde las cero horas (0:00 a.m.), hora colombiana de ese Día.

Transportador: Es la persona natural o jurídica que realiza la actividad de transporte de Gas.

Gas Natural: Es una mezcla de hidrocarburos livianos, principalmente constituida por metano, que se encuentra en los yacimientos en forma libre o en forma asociada al petróleo.

Gasoducto: Conjunto de tuberías y accesorios que hacen parte de un sistema de transporte de Gas y que se encuentran a disposición del TRANSPORTADOR, ya sea actuando como propietario en alguno de los tramos del sistema, o como contratante de la capacidad de transporte en el resto de los tramos.

kPC: Equivale a 1 000 Pies Cúbicos (PC).

MBTU: Equivale a 1 000 000 de BTU. Un MBTU equivale a 1,055 056 Giga Joule.

Mes: Es un período que comienza a las 0:00 horas del primer Día de Gas de cualquier mes calendario y que termina a las 24:00 horas del último Día de Gas de ese mismo mes.

Metro Cúbico de Gas (m³): Es el volumen de Gas contenido en un metro cúbico (1 m³) de espacio, cuando el Gas se encuentra a las Condiciones Base. 1 m³ = 35,314 670 PC.

Nominación: Es la solicitud diaria de suministro o de transporte de Gas, presentada por el remitente que especifica la Cantidad de Energía requerida para el siguiente Día de Gas.

Pie Cúbico de Gas (PC): Es el volumen de Gas contenido en un (1) pie cúbico de espacio, cuando el Gas se encuentra a las Condiciones Base.

Poder Calorífico Bruto Real o HHV Real: Es la cantidad de calor producida por la combustión total de un Pie Cúbico de Gas con aire, bajo Condiciones Base a presión constante, donde los reactantes y productos de la combustión se enfrían hasta la temperatura base y el vapor de agua formado por la combustión se condensa al estado líquido. Sus unidades son GJ/m³ (BTU/PC).

Psia: Es la presión absoluta en libras por pulgada cuadrada. Equivale a 0,068 947 Bar absoluto.

Psig: Es la presión manométrica en libras por pulgada cuadrada. Equivale a 0,068 947 Bar manométrico.

Punto de Salida: Punto en el cual el remitente toma el gas natural.

Remitente: Persona natural o jurídica con la cual un Transportador ha celebrado un contrato para prestar el servicio de transporte de gas natural. Puede ser alguno de los siguientes agentes: productor-comercializador, comercializador, distribuidor, almacenador, usuario no regulado, usuario regulado.

RUT: Es el Reglamento Único de Transporte contemplado en la Resolución CREG 071 de 1999.

Sistema de Transporte: Conjunto de gasoductos del Sistema Nacional de Transporte que integran los activos de una empresa de Transporte.

4. ASPECTOS GENERALES

4.1 DESCRIPCIÓN DE VILLAVICENCIO

Villavicencio es una ciudad colombiana, capital del departamento del Meta, ubicada a 90 km de Bogotá, con una altitud promedio de 467 msnm y 27°C, con una población urbana de 384,131 habitantes (CENSO DANE 2005).

Figura 1. Vista de la Ciudad de Villavicencio.



Fuente: Google Earth

La agricultura, la ganadería y la minería son los pilares de la economía desarrollada por un importante comercio que la convierten en polo de desarrollo de la región de los llanos orientales.

4.2 SISTEMA DE GAS NATURAL

El gas natural proviene de los campos Cusiana y Apiay, suministrado por Ecopetrol SA, transportado hasta Villavicencio a través del sistema de gasoductos propiedad de la Transportadora de Gas Internacional. El siguiente mapa topológico del gasoducto Cusiana_Apiay_Usme ilustra el sistema.

Figura 2. Mapa Topológico Gasoducto Cusian_Apiay_Usme.



Fuente: Llanogas S.A. E.S.P.

El gas recibido en Villavicencio se distribuye a Llanogas sa esp y Madigas en el Centro Operacional de Gas de Villavicencio. Para el registro de los volúmenes de gas se utilizan dos sistemas de medición independientes para cada distribuidora, siendo el sistema que utilizaremos para este estudio, el que tiene las siguientes características:

Tabla 1. Características sistema de medición de Villavicencio Llanogas.

TAG:	FQI 30301
Elemento Primario:	Medidor Tipo Placa y Orificio
Instrumento:	Placa y Orificio
Fabricante:	Daniel
Diámetro Orificio:	1,9992 in
Material:	316 SS
Montaje:	Portaplacas Daniel Senior 6 in ANSI 300
Elemento Terciario:	Computador de Flujo
Fabricante:	Fisher Control Inc
Modelo:	Floboss 103
Alcance de Medición:	0 psi a 500 psi / 0 a 700 psi in H2O / 40 °F a 70°F.
Serie	17957449

Fuente: Llanogas S.A. E.S.P.

4.2.1 Tipo de usuarios atendidos. Los usuarios atendidos por las dos distribuidoras se distribuyen de la siguiente forma:

Tabla 2. Usuarios Registrados a 31 de diciembre de 2008.

Tipo de Usuario	Llanogas sa esp	Madigas	Total
Usuarios Residenciales y Comerciales	89897	0	89897
Industriales	21	0	21
Estaciones de GNV	16	1	17
Total	89934	1	89935

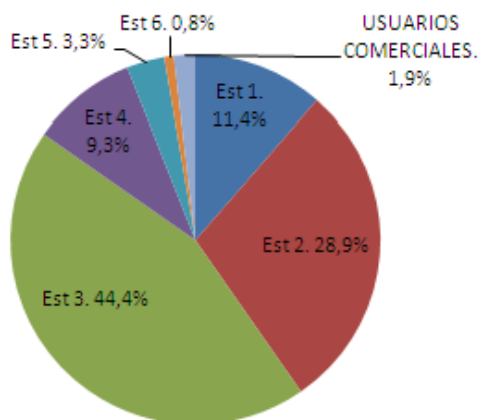
Fuente: Llanogas S.A. E.S.P.

Es importante anotar que no se atienden usuarios del sector térmico directamente por las distribuidoras y los usuarios industriales están clasificados como usuarios regulados por su bajo consumo.

La distribución de usuarios residenciales por estrato socioeconómico y comercial es el siguiente:

Gráfica 1. Distribución de Usuarios por Estrato.

Gráfico 1. Distribución de Usuarios por Estrato.



Fuente: Llanogas S.A. E.S.P.

Cerca del 85% de los usuarios residenciales están concentrados en los estratos 1,2 y 3 cuyo uso del gas está asociado a cocción de alimentos.

Aunque el mayor porcentaje de usuarios se ubican en el sector residencial y comercial, la distribución del mercado de acuerdo al consumo es diferente tal como se muestra a continuación:

Tabla 3. Consumo registrado por tipo de usuario.

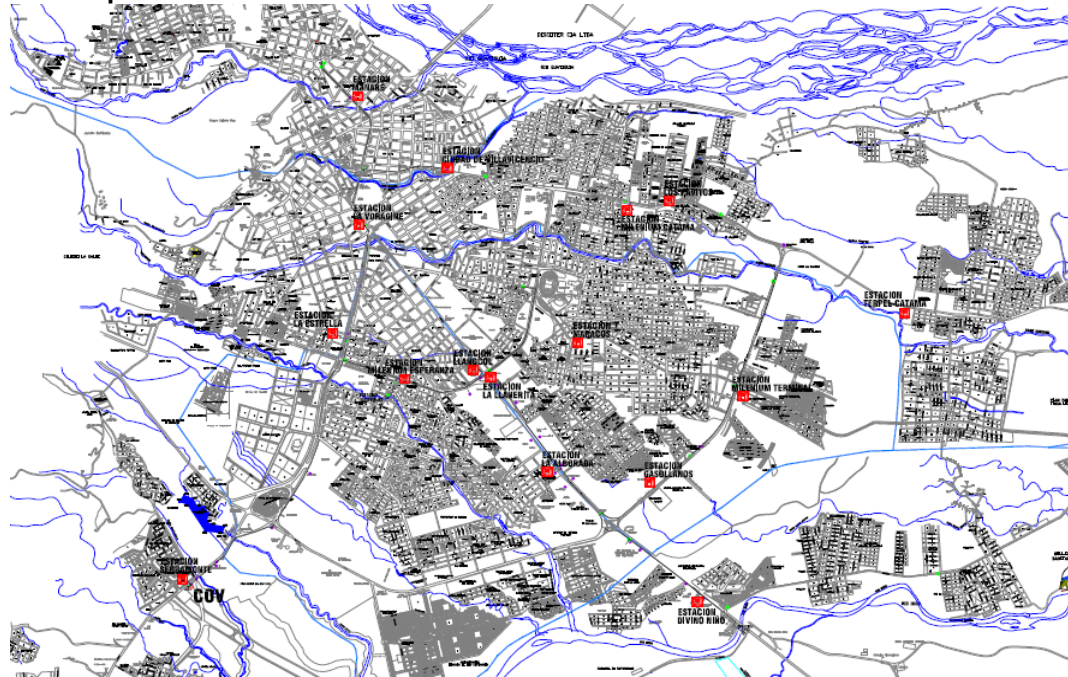
	Residencial y Comercial	Industrial	GNV
Consumo Total Año 2008 (m3)	19.390.793	1.210.525	26.147.724
Distribución de Consumo (%)	41,48%	2,59%	55,93%

Fuente: Llanogas S.A. E.S.P.

Como se aprecia, el mayor consumo está en el GNV, conformado por 10540 vehículos convertidos a 31 de diciembre de 2008 (UPME), principalmente transporte público tipo taxi.

Las estaciones de servicio que distribuyen Gas Natural Vehicular se encuentran distribuidas en la ciudad como lo muestra el siguiente plano.

Figura 3. Mapa Ubicación EDS GNV en Villavicencio.



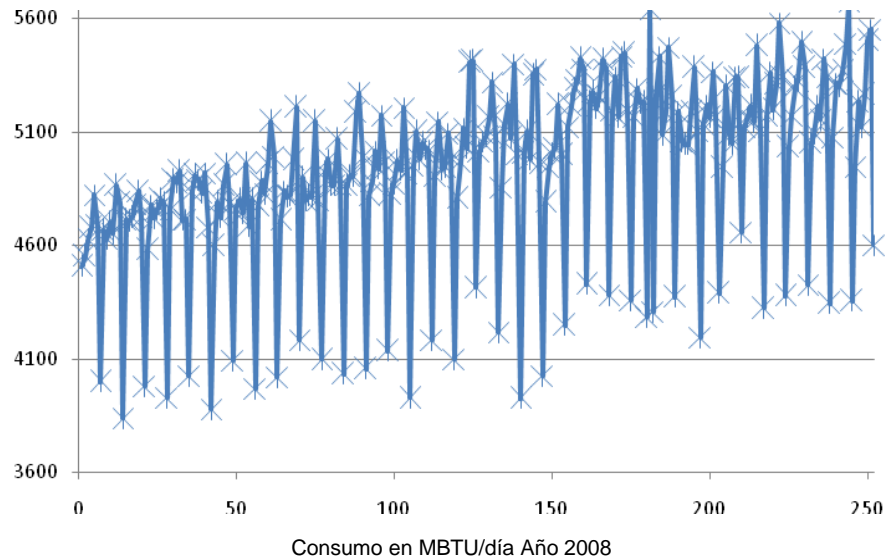
Fuente: Llanogas S.A. E.S.P.

En general el mercado de gas de Villavicencio no tiene grandes clientes que generen variaciones representativas sobre el consumo global del municipio.

Como mencionamos el consumo residencial es dirigido a actividades de cocción que son apreciables en las curvas horarias de consumo como lo mostró Delvasto G en 1999.

Los datos del consumo de Villavicencio registrados por el medidor de Llanogas para el año 2008 en millones de BTU son presentados a continuación:

Gráfica 2. MBTU por día Entregados en Villavicencio Año 2008.



Fuente: Llanogas S.A. E.S.P.

4.3 ASPECTOS REGULATORIOS Y CONTRACTUALES

El marco regulatorio de las transacciones de gas natural en Colombia está enmarcada en las disposiciones emanadas por el Ministerio de Minas y Energía y la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG).

Principalmente la resolución CREG 071 de 1999, denominada Reglamento Único de Transporte, delimita la actividad de nominación entre los remitentes transportadores y productores comercializadores. Puntualmente el capítulo cuarto referente a las condiciones de operación del sistema de transporte de gas natural posee un numeral dedicado a nominaciones de suministro y transporte.

En el numeral 4.5 se fija la obligación de las empresas distribuidoras de nominar la cantidad de gas a transportar para cada día de gas de acuerdo al ciclo de nominación de transporte.

En el numeral 4.6.5. se fija la obligación de llevar Cuenta de Balance de Energía,

donde se registran los acumulados de los desbalance diarios de energía para cada remitente.

Como aspecto relevante a la predicción de la cantidad de gas requerida por la distribuidora, en el numeral 4.7.1. de la citada resolución, se establecen compensaciones por variaciones de entrada y salida.

Las compensaciones por variaciones de entrada están referidas a las diferencias entre las cantidades nominadas al CPC y la cantidad de gas solicitada a los productores, siendo este un punto de manejo operativo y sin interés para el objeto de este estudio.

Las compensaciones por variaciones a la salida, están referidas a la diferencia entre la cantidad de gas solicitada y la cantidad de gas tomada realmente en un punto de salida, que es exactamente la registrada por el sistema de medición de ese punto de salida.

En adición, el contrato de transporte genera obligaciones sobre la predicción de gas fundamentados en el RUT, que resumimos así:

- Variaciones a la Salida: No generar desbalances de energía superiores al 4%.
- Cuenta de Balance: No generar cuenta de balance superior al 2% sobre la energía transportada efectivamente en el mes.

Sobre el contrato de suministro no se generan obligaciones sobre la predicción de gas en el corto plazo debido a que entre el Productor y el Transportador se suscribe un acuerdo operativo de balance en el que el Transportador asume la obligación de balancear a los remitentes.

5. MÉTODOS DE PRONÓSTICO

Dentro de la revisión realizada se distinguieron numerosos métodos dirigidos a predecir el consumo en redes de gas y de energía. Principalmente podemos dividir los métodos en lineales, como polinomios de interpolación, y no lineales como las redes neuronales.

L.P.J., Veelenturf, sugirió utilizar un modelo de redes neuronales en 2004 para predecir el consumo de gas en una ciudad del norte de Holanda aplicada sobre dos estaciones de recibo (Gas Ontvang Stations). En este caso identificó como variables de influencia la temperatura, el porcentaje de luz del sol y velocidad del viento.

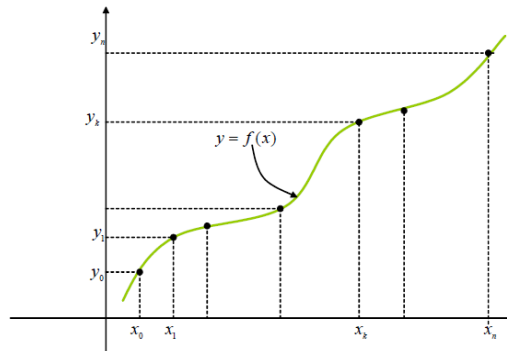
N.H., Viet, utilizó un método similar para predecir el consumo de gas en el corto plazo para una región de Polonia considerando como variable de influencia la temperatura promedio. N.H. Viet identificó las condiciones climáticas como fuertes influencias en el comportamiento de la demanda de gas natural.

Delvasto, G, en 1999 realizó una revisión de varios métodos para el sistema de distribución de Llanogasa esp. Dentro de las principales conclusiones están los resultados obtenidos con un modelo de pronóstico en base al comportamiento de la demanda de gas con el cambio de día de la semana.

A. Pitarque, en su artículo "*Redes neuronales vs modelos estadísticos: Simulaciones sobre tareas de predicción y clasificación*", realizó una comparación entre los modelos de redes neuronales y los de regresión clásica o estadísticos en 1998. Los resultados mostraron que los dos modelos se comportan con niveles de precisión cercanos cuando se utilizan para predicciones cuantitativas.

5.1 POLINOMIOS DE INTERPOLACIÓN

Si se tiene un conjunto de datos experimentales $(x_0, y_0), (x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_k, y_k), \dots, (x_n, y_n)$, tal que $x_i \neq x_j$ ($i \neq j$) $i, j = 0, 1, 2, \dots, n$, es posible encontrar una función $y = f(x)$, cuya gráfica coincida con los puntos dados.



La función $f(x)$ es un polinomio de la forma $f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n$, tal que $f(x_i) = y_i$.

Los coeficientes $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$, se obtienen resolviendo la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}
 a_0 + a_1x_0 + a_2x_0^2 + \dots + a_nx_0^n &= y_0 \\
 a_0 + a_1x_1 + a_2x_1^2 + \dots + a_nx_1^n &= y_1 \\
 a_0 + a_1x_2 + a_2x_2^2 + \dots + a_nx_2^n &= y_2 \\
 &\vdots \\
 a_0 + a_1x_n + a_2x_n^2 + \dots + a_nx_n^n &= y_n
 \end{aligned}$$

5.2 COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN

Estableciendo la hipótesis de que la forma de describir la relación entre X e Y es mediante una línea recta de la forma;

$$Y_i = \beta_1 + \beta_2 X_i + u_i$$

Es posible obtener los valores numéricos de los parámetros β_1 y β_2 que determinan la ecuación lineal concreta que expresa la relación de Y con X;

$$\hat{Y}_i = \hat{\beta}_1 + \hat{\beta}_2 X_i = b_1 + b_2 X_i$$

Básicamente el método de mínimos cuadrados, partiendo de un sistema de dos ecuaciones, permite estimar los parámetros de la relación.

$$\sum_i Y_i = nb_1 + b_2 \sum_i X_i$$

$$\sum_i Y_i X_i = b_1 \sum_i X_i + b_2 \sum_i X_i^2$$

La primera medida de la dispersión de las \hat{Y}_i observadas respecto a la Y_i , calculada como la suma media de desviaciones cuadráticas entre ambas variables recibe el nombre de varianza residual;

$$S_e^2 = \frac{\sum_i (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n}$$

Valores elevados de esta varianza indican que los residuos son grandes, lo que significa que la línea de regresión estimada se aleja mucho de los valores observados y por lo tanto el polinomio es poco representativo. Cuando la varianza es pequeña, la representatividad es alta.

Los valores de la varianza residual están acotados superiormente por el valor de la varianza observada Y así:

$$0 \leq S_e^2 \leq S_Y^2$$

La cota superior se demuestra con el modelo de regresión lineal verificando la siguiente relación de varianzas:

$$S_Y^2 = S_R^2 + S_e^2$$

Donde S_R^2 es la varianza explicada por la regresión y cuya expresión matemática es la siguiente:

$$S_R^2 = \frac{\sum_i \left(\hat{Y}_i - \bar{Y}_i \right)^2}{n}$$

A partir de esta varianza se define una medida de dispersión relativa para la ecuación de regresión, comparando la misma con la varianza total de Y.

La siguiente es la definición matemática del coeficiente de determinación:

$$R^2 = \frac{S_R^2}{S_Y^2}$$

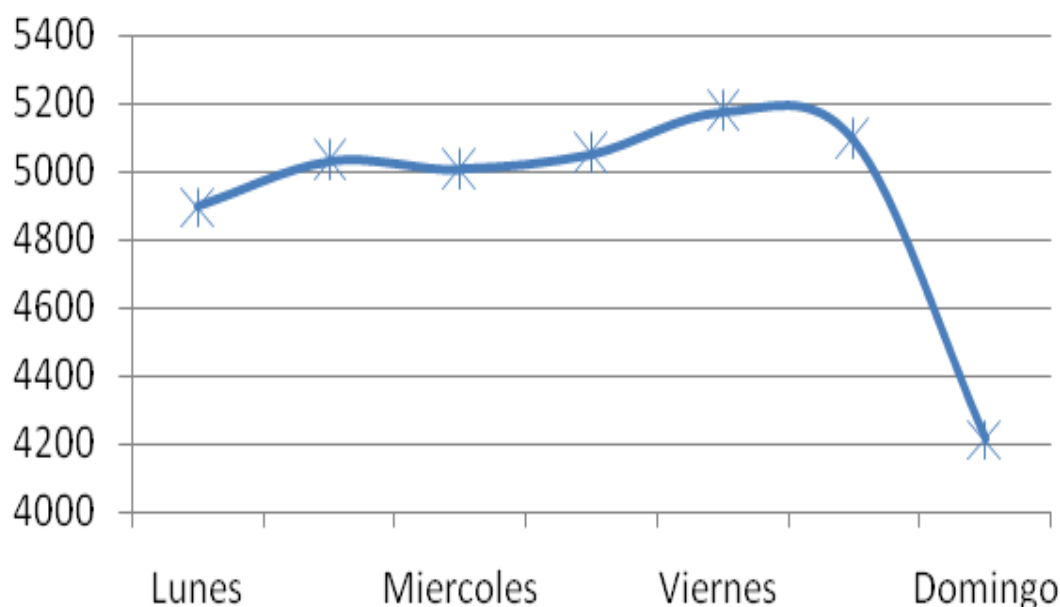
Los valores de R^2 están acotados, siendo sus límites $0 \leq R^2 \leq 1$, donde valores de 1 significan un ajuste lineal perfecto y 0 la no representatividad del modelo.

6. DEDUCCIÓN DEL MODELO

Teniendo en cuenta que el mercado analizado no tiene estaciones climáticas que afecten la demanda de gas, el estudio se centrará en un modelo lineal con variable de influencia en el día de la semana.

De los datos presentados en el gráfico 2, con los promedios de cada día de la semana es posible obtener la siguiente gráfica que muestra el comportamiento semanal característico del sistema de distribución de Villavicencio:

Gráfica 3. Promedio Día semana en MBTU Año 2008.



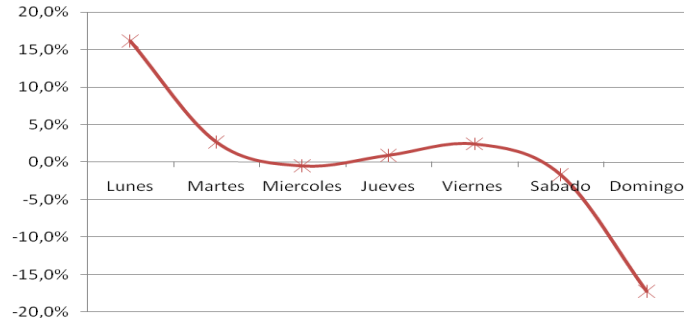
Fuente: El estudio.

De estos datos es posible representar el crecimiento porcentual que tiene un día respecto al anterior así:

$$\text{Porcentaje de Crecimiento}_{\text{Día } i} = \text{Consumo}_{\text{Día } i} / \text{Consumo}_{\text{Día } i-1}$$

La aplicación de esta fórmula a los datos origina la siguiente grafica para el mismo grupo de datos:

Gráfica 4. Promedio de crecimiento Día semana en % Año 2008.



Utilizando los polinomios de interpolación desde $n=1$ hasta el valor de n que minimice varianza residual sobre los datos de porcentaje de crecimiento diario promedio, con variable de influencia el día de la semana ($\%Crecimiento = f(\text{Día de la semana})$), se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 4. Polinomios de Interpolación Obtenidos a diferentes grados.

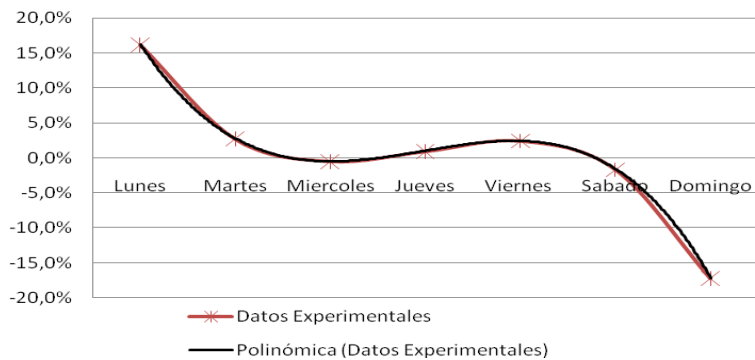
Grado n	Polinomio Obtenido	Coficiente R^2
1	$0,0379x + 0,1557$	0,6986
2	$-0,0018x^2 - 0,0238x + 0,1345$	0,7032
3	$-0,0089x^3 + 0,1048x^2 - 0,388x + 0,4543$	0,9998
4	$-0,0001x^4 - 0,0071x^3 + 0,0951x^2 - 0,3678x + 0,4416$	0,9999
5	$-6E-05x^5 + 0,001x^4 - 0,0155x^3 + 0,1234x^2 - 0,41x + 0,463$	1

Fuente: El estudio.

Vemos como, con $n=5$ se obtiene un valor de R^2 de 1, con lo que se elige este grado para el polinomio.

La curva de regresión de orden 5 obtenida es la siguiente:

Gráfica 5. Polinomio de Interpolación Grado 5.



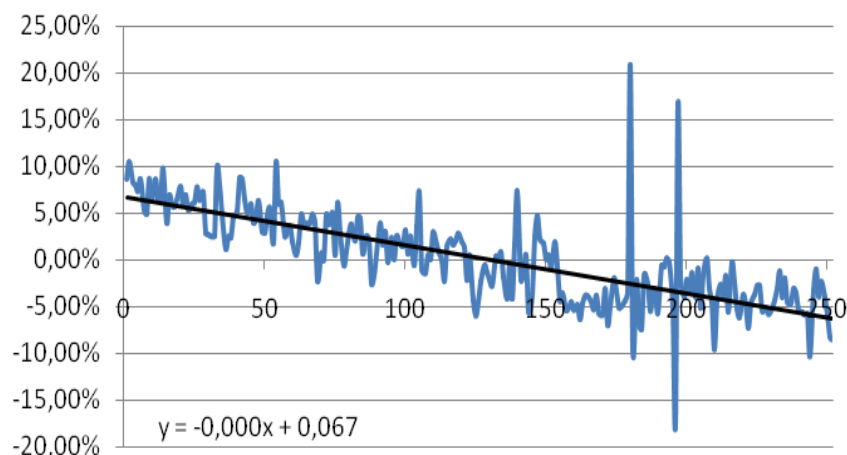
Fuente: El estudio.

6.1 EVALUACIÓN DEL POLINOMIO DE INTERPOLACIÓN CON LOS DATOS BÁSE AÑO 2008

Los parámetros de evaluación del polinomio son los establecidos en el numeral 5.2 de este estudio, afectación en la cuenta de balance y desbalance diario que es igual al error o desviación de la predicción.

Al aplicar el polinomio de grado 5 presentado en la tabla 4 sobre los datos del año 2008 se obtiene un porcentaje del error variable a lo largo del periodo con una tendencia decreciente.

Gráfica 6. Error Relativo polinomio único grado 5.



Fuente: El estudio.

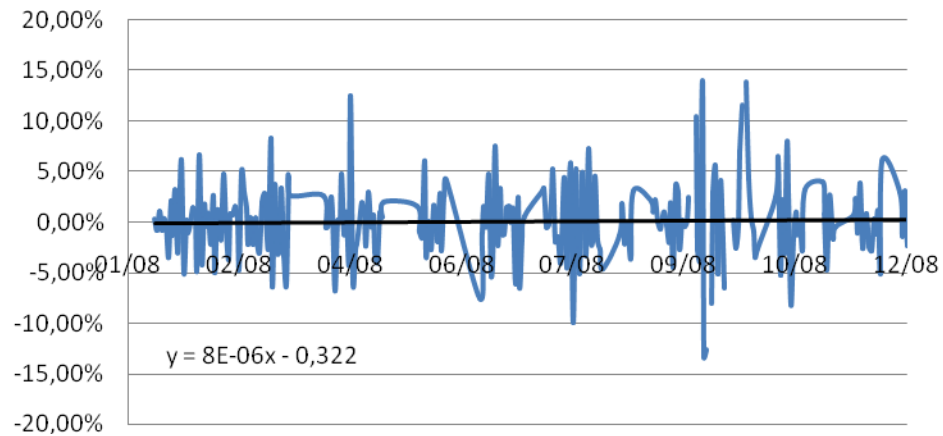
El porcentaje de desbalance obtenido en la cuenta de balance de energía evaluada en el último periodo es de -0,18%.

El 55% de las predicciones se ubican dentro del 4% de error máximo con un error promedio de 0,24%.

El aumento del consumo por el crecimiento del mercado, especialmente el de vehículos convertidos con 1253 a lo largo del año, hace que el polinomio único no capture el comportamiento cambiante del periodo.

La deducción de un polinomio que se actualice periódicamente elimina esta influencia como lo vemos en la siguiente gráfica:

Gráfica 7. Error Relativo polinomio dinámico grado 5.



Fuente: El estudio.

El porcentaje de desbalance obtenido en la cuenta de balance de energía evaluada en el último periodo es de 0,28%.

El 74% de las predicciones se ubican dentro del 4% de error máximo con un error promedio de 0,13%.

Con la elaboración de una curva para cada día es posible mejorar el comportamiento del modelo de regresión.

7. APLICACIÓN DEL MODELO

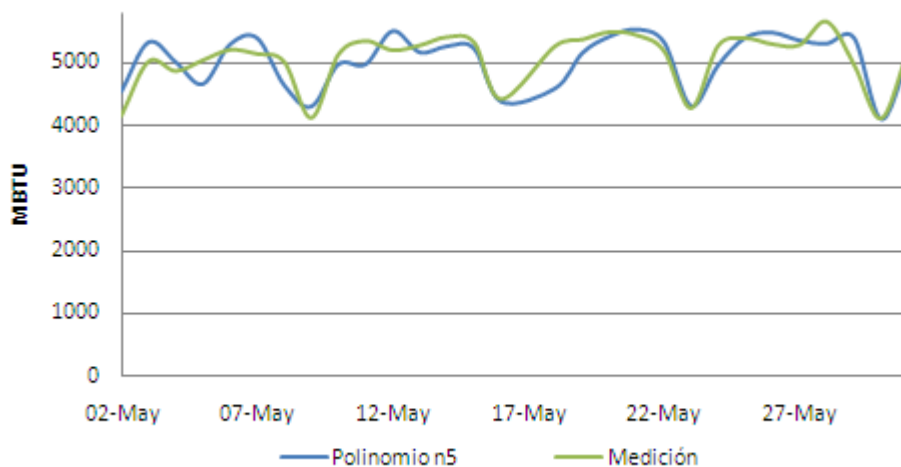
El polinomio de interpolación de grado 5 dinámico se evaluó en el mes de mayo de 2010 contra los datos oficiales de nominación reportados por Llanogas sa esp obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 5. Resultado de la comparación de los métodos de Polinomio n5 y Nominación de Llanogas.

Método de Predicción	Error Promedio	Cuenta de Balance
Polinomio n5	-0,30%	-0,45%
Nominación Llanogas	-2,21%	-2,29%

Fuente: El estudio.

Gráfica 8. Polinomio n5 Vs Medición.



Fuente: El estudio.

8. IMPLEMENTACIÓN DE LA HERRAMIENTA

Se desarrollo una plantilla en Excel® que permite estimar para cada día de gas el polinomio de orden 5 con los datos más recientes de acuerdo a la evaluación.

En la hoja '6.Calculos' de la plantilla, se desarrolla el cálculo matricial para encontrar los coeficientes a_0 , a_1 , a_2 , a_3 , a_4 y a_5 del polinomio. El código de visual basic® requerido para el cálculo es presentado en el anexo A.

Figura 4. Resolución matricial para hallar los coeficientes del polinomio.

Orden: 5 n: 7								
X_i	Y_i	EstPol						
1	0,26							
2	0,04							
3	-0,02							
4	0,00							
5	0,07							
6	-0,12							
7	-0,17							
		7	28	140	784	4676	29008	0,06
		28	140	784	4676	29008	184820	-1,30
		140	784	4676	29008	184820	1200304	-10,82
		784	4676	29008	184820	1200304	7907396	-76,56
		4676	29008	184820	1200304	7907396	52666768	-528,41
		29008	184820	1200304	7907396	52666768	353815700	-3628,60
		244	-463	299	-86	11	-1	
		-463	889	-580	168	-22	1	
		299	-580	382	-111	15	-1	
		-86	168	-111	33	-4	0	
		11	-22	15	-4	1	0	
		-1	1	-1	0	0	0	
		a_0 :	-0,0110					
		a_1 :	0,9168					
		a_2 :	-0,9348					
		a_3 :	0,3357					
		a_4 :	-0,0504					
		a_5 :	0,0027					

Fuente: El estudio.

Con los coeficientes se evalúa el polinomio y se obtiene el porcentaje de crecimiento respecto al día $i-1$, que multiplicado al consumo del día anterior predice el consumo del día i .

La información es consolidada en la hoja '3.Nominación', donde se realizan los respectivos ajustes.

Figura 5. Vista Hoja de consolidación de Pronósticos.

INFORMACIÓN CONSOLIDADA					
PRONOSTICO DE CONSUMO POR PUNTO DE ENTREGA					
20 de Octubre de 2010					
DÍA DE GAS	Punto de Entrega	Nominación Apiay	Nominación Cusiana	Pronóstico	Acumulado cents
20-10-10	Villavicencio GNV	1000	2400	2629	-
20-10-10	Acacias GNV	0	90	72	-
20-10-10	Villavicencio	0	2000	4869	1300
20-10-10	Acacias	0	170	263	107
20-10-10	Barranca de Upia	0	12	12	-13
20-10-10	Base Militar	0	9	10	-314
20-10-10	Casquez	0	27	31	-58
20-10-10	Chipaque	0	13	13	-52
20-10-10	CiudadPorfia	0	113	114	348
20-10-10	Cumaral	0	115	126	-3012
20-10-10	Fanara	0	139	74	3215
20-10-10	Fosca	0	9	10	-4
20-10-10	Guagabetal	0	9	9	4
20-10-10	Improarroz	0	14	15	351
20-10-10	La Cuncia	0	7	7	15
20-10-10	Pompeya	0	16	17	-142
20-10-10	Quetame	0	11	13	20
20-10-10	Restrepo	0	58	62	-71
20-10-10	Une	0	20	20	71
20-10-10	Usme	0	155	154	34
20-10-10	Ariari	0	40	40	-
20-10-10	Ariari GNV	0	110	110	-

*Valores en MBTU

NOMINACION DE SUMINISTRO		
20 de Octubre de 2010		
MEDIDOR	DESCRIPCIÓN	Nominación
DU LLANOGAS	GAS CUSIANA	2.742 MBTU
GNV LLANOGAS	GAS CUSIANA GNV	2.645 MBTU
UF LLANOG APIAY	GAS APIAY	1.000 MBTU
ENERGÍA TOTAL		6.387 MBTU

Fuente: El estudio.

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Se estableció una relación lineal entre el consumo de gas de la ciudad de Villavicencio respecto a la variación del día de la semana.
- Se obtuvo un polinomio de interpolación de orden 5 con el que se predicen los consumos de gas de la ciudad de Villavicencio de forma diaria con errores promedio inferiores al 4% y que logran un manejo de la cuenta de balance de energía con cierres menores al 2%.
- Se implementó una herramienta sobre Excel® para administrar las nominaciones de la empresa Llanogas S.A. E.S.P. de forma eficiente.
- La herramienta de predicción de consumo de gas diario a partir de datos históricos minimiza el error humano al requerir como únicos datos de entrada la fecha y los consumos más recientes registrados por el medidor de Villavicencio.
- La estacionalidad del consumo fue parametrizable al incluir dentro del polinomio la actualización de los datos fuente y el recálculo de los coeficientes a .
- Se recomienda utilizar un polinomio de interpolación de quinto orden en los sistemas de distribución que tengan composiciones de mercado similares a la ciudad de Villavicencio.
- Para la empresa Llanogas S.A. E.S.P., se recomienda su utilización en los sistemas de distribución de Cumaral, Restrepo, Acacias, Guayabetal, Fosca, Quetame, Puente Quetame, Chipaque, Uña y Barranca de Upía.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

(1) DELVASTO, G. (1999). Desarrollo de una metodología para procesos de nominación en una red de distribución de gas natural. Colombia: tesis de grado no publicada. Universidad Industrial de Santander.

(2) GUTIÉRREZ, R., Nafidi, A. y Gutiérrez, R. (2004). Forecasting total natural-gas consumption in Spain by using the stochastic Gompertz innovation diffusion model. España: tesis de grado no publicada. Universidad de Granada

(3) ALLEVI, E., Bertocchi, M.I., Innorta, M., Vespucci, M.T. (2004). The natural gas market an optimization model for gas sales companies, Working paper, 21, Department of Mathematics, Statistic, science an Applications. University of Bergamo.

(4) HERNÁNDEZ, M., Fernandez, S. y Baptista, A. (2003). Metodología de la Investigación. Mexico: Mc Graw Hill.

(5) N. H., Viet, Mandziuk, J., (2004). Neural and Fuzzy Neural Networks in Prediction of Natural Gas Consumption, Working paper, 21, Department of Mathematics and Information Science. Warsaw University of Technology.

(6) L.P.J Veelenturf., H.A. Lankels, E.N Tromp, (2004). Prediction gas demand using neural networks, Working paper, Department of Electrical Engineering. University of Twente.

ANEXO AA. Código de visual basic requerido para el cálculo

Sub estpol()

orden = Hoja2.Cells(2, 2)

N = Hoja2.Cells(3, 2)

For k = 0 To orden

For i = 0 To orden

suma = 0

For j = 0 To N

suma = suma + Hoja2.Cells(5 + j, 2) ^ (i + k)

Next

Hoja2.Cells(6 + N + i, 2 + k) = suma

Next

Next

For i = 0 To orden

suma = 0

For j = 0 To N

suma = suma + Hoja2.Cells(5 + j, 2) ^ (i) * Hoja2.Cells(5 + j, 3)

Next

Hoja2.Cells(6 + N + i, 3 + orden) = suma

Next

Hoja2.Cells(6 + N, 2) = N

End Sub