



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA DE SISTEMAS – INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES

ANÁLISIS ENVOLVENTE DE DATOS PARA MEDIR LA EFICIENCIA ECONÓMICA DE LAS
DISTRIBUIDORAS DE GAS NATURAL EN MÉXICO

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
GRISSEL MONTES ROMERO

TUTOR PRINCIPAL
DRA. MAYRA ELIZONDO CORTÉS, FACULTAD DE INGENIERÍA-DIMEI

MÉXICO, D. F., JUNIO 2015



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Manuel Ordorica Mellado

Secretario: Dra. Hérica Sánchez Larios

Vocal: Dra. Mayra Elizondo Cortés

1^{er}. Suplente: Dra. Cozumel Allanec Monroy León

2^{d o}. Suplente: Dra. María Elena Lárraga Ramírez

Lugar donde se realizó la tesis: Ciudad Universitaria, México D.F.

TUTOR DE TESIS:

DRA. ELIZONDO CORTÉS MAYRA

FIRMA

Dedicatorias

Mi inspiración y perseverancia para alcanzar esta meta se la debo a esos seres extraordinarios que me enseñaron que la educación y los valores son la mejor herencia que me pudieron haber dejado, mis amados abuelos (Pedro, Nazaria, Crisóforo y Martina), esperando poder transmitir al menos un poco cada una de sus enseñanzas a esas personitas que un chispa de motivación, mis pequeños sobrinos (Alejandro, Bruno y Alejandra).

También dedico este trabajo y todos los logros alcanzados a mis pilares, a mis padres (Eladio y Orquídea), quienes siempre me han motivado a dar lo mejor de mí y a mis hermanas (Enlly, Brenda y Wendy), por su incondicional apoyo y cariño, indispensable para la culminación de este proyecto.

Agradecimientos

El presente trabajo representa la culminación de uno de los proyectos más trascendentales de mi vida. Sin embargo, este no es el fin del compromiso que adquirí al inicio de la maestría, más bien es el inicio, porque al concluir este trabajo tengo el entusiasmo y la firme convicción de seguir aprendiendo, poner en práctica lo aprendido y poder dar mi aportación a la sociedad, en agradecimiento a mi querida Universidad, que me ha dado la oportunidad de formarme académicamente y superarme en lo profesional.

Este proyecto ni siquiera hubiera iniciado sin el invaluable apoyo de dos grandiosas personas: Eduardo Prud'homme y Mayra Elizondo. Gracias por darme la gran oportunidad de enriquecer y aplicar los conocimientos adquiridos.

También agradezco a cada uno de mis sinodales por sus aportaciones y valiosos comentarios a este proyecto.

Finalmente, agradezco a grandes amigos que no solo me incitaron a alcanzar esta meta, sino que además me brindaron su apoyo desinteresado realizando observaciones que permitieron enriquecer el presente proyecto: Paola, Alejandro y Margarita.

Índice de contenido

INTRODUCCIÓN.....	4
CAPÍTULO I:.....	10
Regulación económica de la distribución de gas natural en México	10
1.1. Antecedentes: monopolios naturales, regulación económica y benchmarking.	10
1.2. Descripción del sistema: regulación económica de la distribución de gas natural en México	17
1.3. Problemática: medición de la eficiencia & determinación del Factor X	21
1.4. Metodologías de cálculo del Factor X.....	23
1.5. Propuesta para determinar el Factor X.....	28
CAPÍTULO II:.....	35
Marco teórico del Análisis Envolvente de Datos.....	35
2.1. Conceptos esenciales: productividad & eficiencia.....	35
2.2. Generalidades del Análisis Envolvente de Datos (DEA)	41
2.3. Formulación matemática del DEA	45
CAPÍTULO III:.....	53
Índices de productividad de Malmquist.....	53
3.1. Medición del cambio productivo y tecnológico a lo largo del tiempo	53
3.2. Cálculo de los índices de Malmquist a partir de la metodología DEA	57
3.3. Descomposición del Índice de Malmquist al considerar rendimientos variables a escala	58
CAPÍTULO IV:	61
Aplicación del DEA para evaluar el desempeño eficiente de las distribuidoras de gas natural en México a través de los índices de Malmquist.....	61
4.1. Distribución del gas natural en México.....	61
4.2. Proceso de obtención de información y definición de variables de interés.	62
4.3. Panorama a diciembre de 2012.	64
4.4. Análisis exploratorio de la información, planteamiento de supuestos y selección de variables.	67
4.5. Definición del modelo.	76
4.6. Presentación e interpretación de resultados.	76
CONCLUSIONES.....	82
BIBLIOGRAFÍA.....	88

Índice de tablas

Tabla 1. Ejemplos de países que utilizan benchmarking en su proceso regulatorio

Tabla 2. Cuadro comparativos de los métodos de fronteras.

Tabla 3. Modelo DEA, forma envolvente.

Tabla 4. Variaciones en la longitud de la red en el periodo.

Tabla 5. Variaciones en el número de usuarios conectados en el periodo.

Tabla 6. Variaciones en el volumen conducido en el periodo.

Tabla 7. Variaciones del indicador Longitud de red / OMA.

Tabla 8. Eficiencia técnica de las distribuidoras.

Tabla 9. Eficiencia a escala de las distribuidoras.

Tabla 10. Eficiencia técnica a escala de las distribuidoras.

Tabla 11. Cambio tecnológico de las distribuidoras.

Tabla 12. Eficiencia económica total – Productividad de las distribuidoras.

Índice de figuras.

Figura 1. Métodos de benchmarking.

Figura 2. Regulación por precios tope RPI-X.

Figura 3. Diagrama esquemático de la metodología.

Figura 4. Eficiencia técnica

Figura 5. Eficiencia asignativa.

Figura 6. Economías de escala.

Figura 7. Eficiencia técnica bajo rendimientos constantes a escala.

Figura 8. Cambio productivo.

Figura 9. Índices de Malmquist.

Figura 10. Índices de Malmquist – rendimientos variables.

Figura 11. Redes de distribución de gas natural en México.

Figura 12. Distribuidoras de Gas Natural en operación.

Figura 13. Distribuidoras de Gas Natural en operación – Muestra sin las 4 más grandes.

Figura 14. Gráficos de dispersión entre las variables.

Figura 15. OMA / km – Promedio 2008-2012.

Figura 16. OMA / Usuario – Promedio 2008-2012.

Figura 17. OMA / Volumen – Promedio 2008-2012.

Figura 18. Mapa de desempeño de las distribuidoras.

INTRODUCCIÓN

El mercado de distribución de gas natural en México a través de ductos es considerado monopolio natural. Por tanto, al ser monopolio y con el objetivo de proteger al usuario evitando que ejerzan poder de mercado, las empresas que proporcionan este servicio (distribución de gas natural a través de ductos) son reguladas por el gobierno a través de sus entes reguladores, específicamente esta obligación le corresponde a la Comisión Reguladora de Energía (la Comisión o CRE).

Actualmente, en México existen 25 permisos de distribución de gas natural de los cuales solo 20 están en operación y se encuentran dispersos en diferentes zonas geográficas¹. Así, las empresas que cuentan con un permiso de distribución otorgado por la CRE (permisionarios o distribuidoras) inicialmente se les confiere una exclusividad de varios años (5, 12) para construir el sistema de distribución, y recibir, conducir y entregar gas por medio de ductos en dicha zona geográfica. De esta forma, los permisionarios ofrecen a los usuarios los servicios de distribución conforme a las tarifas² máximas aprobadas por la CRE.

Con base en el *Reglamento de las actividades a que se refiere el título tercero de la Ley de Hidrocarburos* (el Reglamento), las contraprestaciones, precios o tarifas que apruebe la Comisión serán máximas. La Comisión expedirá, mediante disposiciones administrativas de carácter general, la regulación de las contraprestaciones, precios o tarifas de las actividades reguladas, para lo cual deberá tomar en cuenta los principios que permitan el desarrollo eficiente de la industria y de mercados competitivos, que reflejen las mejores prácticas en las decisiones de inversión y operación y que protejan los intereses de los usuarios.

Adicionalmente, las contraprestaciones, precios o tarifas que autorice la Comisión deberán constituir mecanismos que promuevan un uso racional de los bienes y servicios. Otro aspecto relevante en la determinación de contraprestaciones, precios o tarifas, es que el Reglamento establece que la Comisión podrá emplear las herramientas de evaluación que estime necesarias para lograr sus objetivos

¹ De acuerdo al marco legal regulatorio le corresponde a la CRE, delimitar el área geográfica para fines de distribución de gas natural denominada Zona Geográfica conforme a los criterios establecidos en las directivas.

² Refiriéndose a tarifa como el precio por la prestación del servicio.

regulatorios, para lo cual podrá realizar ejercicios comparativos³ y aplicar los ajustes que estime oportunos, así como emplear indicadores de desempeño para fines de productividad.

No obstante que las reformas constitucionales en materia energética se promulgaron en diciembre de 2013, y su reglamentación secundaria, es decir, leyes y reglamentos en materia energética, se publicaron en el Diario Oficial de la Federación en 2014, queda pendiente emitir las disposiciones administrativas de carácter general para la determinación de las contraprestaciones de las actividades reguladas, por lo cual, prevalecen los principios versados en la actual *Directiva sobre la determinación de tarifas y el traslado de precios para las actividades reguladas en materia de gas natural DIR-GAS-001-2007* (Directiva de Tarifas).

La determinación de utilizar la Directiva de Tarifas se fundamenta legalmente en el artículo tercero transitorio del Reglamento, que a la letra dice:

“La Comisión podrá aplicar las disposiciones jurídicas en materia de otorgamiento y regulación de permisos, incluyendo las disposiciones administrativas de carácter general y demás disposiciones emitidas por la Comisión que se encuentren vigentes, en lo que no se opongan a la Ley de Hidrocarburos y su Reglamento, hasta en tanto se expidan las disposiciones administrativas de carácter general y demás ordenamientos correspondientes”

Por tanto, es legalmente aceptable utilizar la Directiva de Tarifas, la cual determina tarifas de distribución de gas natural con base en una metodología para establecer límites máximos (tarifas máximas). Dicha metodología se basa en una regulación por incentivos, similar a la *regulación por precios tope RPI-X (Retail Price Index)*.

La regulación por precios tope funciona de la siguiente manera: luego de un periodo inicial en el cual las tarifas se mantienen fijas o son fijadas de manera exógena, se ajustan con base en la inflación nacional y un factor denominado “Factor X”, el cual refleja las diferencias de productividad entre la economía y la empresa regulada, tal como ocurriría en un mercado competitivo. El objetivo de este mecanismo es estimular la eficiencia productiva al separar, al menos temporalmente, los precios y los costos, de manera que la reducción en costos y gastos se traduzca en mayor rentabilidad para el regulado, y al mismo tiempo las ganancias en eficiencia sean compartidas con el consumidor a través del ajuste de precios o tarifas por medio

³ Mejor conocidos en el ámbito regulatorio como *Benchmarking*.

del Factor X. En otras palabras, el Factor X refleja la cuantía correspondiente a la productividad a lo largo del tiempo.

Así, las tarifas máximas se calculan y aprueban a cada empresa distribuidora de gas natural al momento en que la Comisión otorga el Permiso correspondiente, dichas tarifas tendrán una vigencia de cinco años (quinquenos). Seis meses antes de concluir el quinquenio, se inicia un proceso global de revisión tarifaria mediante el cual se aprobará un nuevo conjunto de tarifas máximas y se determinará un Factor de eficiencia productiva (Factor X) aplicable al siguiente periodo de cinco años, el cual se mantendrá fijo durante todo ese periodo. Finalmente, las tarifas máximas que la Comisión autorice serán determinadas en términos reales y serán ajustadas anualmente con base en la inflación nacional y a partir del segundo año del segundo quinquenio, las tarifas aprobadas estarán sujetas al ajuste por el Factor de eficiencia (el Factor X será igual a cero durante los primeros cinco años, es decir, comienza a aplicarse a partir del séptimo año de operación).

Con base en el Reglamento y en la disposición 18 de la Directiva de Tarifas, para el cálculo del Factor X es posible apoyarse en estudios comparativos globales (*benchmarking*), los cuales, cuantifican y evalúan el nivel de eficiencia operativa histórica (a lo largo del periodo de cinco años) de cada una de las distribuidoras de gas natural, considerando las principales características de los sistemas de distribución como son:

- Longitud del sistema,
- Eficiencia en los costos y gastos de operación, mantenimiento y administración,
- Tamaño y grado de madurez del sistema medido con base en el número de usuarios, la energía conducida, la demanda pico atendida, entre otros.

Existen varias técnicas para cuantificar las ganancias en eficiencia de una empresa, las cuales van desde simples indicadores parciales (costos por kilómetro de red, costos por usuario, etc.) hasta herramientas más sofisticadas como el Análisis Envolvente de Datos (Metodología DEA, por sus siglas en inglés, *Data Envelopment Analysis*) y las Fronteras Estocásticas. Particularmente, este estudio explora la vía no paramétrica, es decir la Metodología DEA, ya que esta herramienta es muy útil en los análisis económicos cuantitativos que tienen por objeto estudiar el desempeño eficiente de Unidades Productivas (empresas, sectores y países, por citar unos ejemplos). Este instrumento es muy superior al tradicional enfoque basado en el simple cálculo de indicadores de productividad parcial ya que posee la ventaja de facilitar un tratamiento multidimensional de los factores, tanto del lado

de los insumos o factores, como del lado de los productos con que se trabaje, sin que ello implique la necesidad de sistematizar y procesar múltiples indicadores entrecruzados. Por lo tanto, el DEA brinda una perspectiva sistémica e integral para estudiar, en forma comparada, el desempeño de las Unidades Productivas de interés.

La metodología DEA consiste en utilizar toda la información disponible en un momento específico para categorizar el desempeño de las Unidades Productivas que participan en el estudio, también conocidas como Unidades Tomadoras de Decisión (DMU por sus siglas en inglés, *Decisión Market Unit*), mediante la identificación de Unidades pares (eficientes) a partir de las cuales se construyen otras Unidades (virtuales) que resultan comparables y, que a su vez, son la base para el cálculo de los indicadores de eficiencia y sus cambios a lo largo del tiempo. De esta forma, las Unidades Productivas que determinan la frontera óptima son señaladas como Unidades eficientes y aquellas que no permanecen sobre la misma son consideradas ineficientes. Así, el DEA, al comparar cada Unidad Productiva ineficiente con aquellas que son eficientes, permite establecer la cuantía, en términos absolutos o relativos, de la reducción de entradas y/o incremento de las salidas que la Unidad Productiva ineficiente debería promover para convertirse en eficiente.

Sin embargo, el interés de la Comisión va más allá de un análisis transversal de la información, ya que se requiere analizar lo que sucede a lo largo del tiempo para conocer cómo evolucionan, en términos de eficiencia, las distintas distribuidoras (Unidades Productivas). Por lo tanto, la Comisión necesita metodologías que permitan medir la eficiencia desde un enfoque global de producción que le sirva como base para la determinación del Factor X.

Una propuesta es medir el crecimiento de la Productividad Total de los Factores (PTF) a través de los índices de Productividad de Malmquist con la técnica DEA⁴. La formulación del modelo tiene su punto de partida, al igual que el DEA, en el concepto de función de distancias y su aplicación radica en definir índices de productividad; la experiencia empírica sugiere caracterizar la tecnología empleando técnicas de optimización, dando la oportunidad de aplicar el DEA. Este enfoque tiene varias ventajas, entre las que destacan, el no requerir información de precios (lo cual puede representar una mayor cantidad de recursos económicos, así como de tiempo de análisis para la Comisión, situación que no siempre es factible), utilizar datos sobre unidades físicas de insumos y productos (información con la que

⁴ Fare, Grosskopf, Lindgren y Roos,(1989).

cuenta la Comisión, la cual verifica y valida, por ser parte de sus obligaciones como regulador), está libre de errores de especificación en la forma funcional (no es necesario la validación de supuestos estadísticos), y la principal ventaja es que, mediante la aplicación del DEA, es posible discriminar los cambios debidos a incrementos (o caídas) en la eficiencia técnica (es decir, el grado de acercamiento a la frontera óptima, lo que en la económica se denomina como convergencia o “*catching-up*”) del cambio tecnológico (el desplazamiento de la frontera propiamente dicha), dando la oportunidad a la Comisión de identificar las causas de la ineficiencia de cada distribuidora, al mismo tiempo que podría observar el desempeño de toda la industria de distribución de gas natural por ducto.

Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo es medir la eficiencia productiva de las distribuidoras de gas natural mediante el cálculo de los índices de Malmquist obtenidos a través del método DEA, con el fin de brindar una propuesta robusta para la determinación del Factor X a considerar en la determinación de tarifas de cada distribuidora. Si bien el análisis de la productividad tiene varias aristas e involucra una gran cantidad de factores y criterios, los objetivos específicos a cubrir se enumeran a continuación:

- I. Brindar un panorama general de las empresas que brindan el servicio de distribución de gas natural;
- II. Identificar los principales factores que influyen en el desempeño de las distribuidoras de gas natural;
- III. Evaluar el desempeño general de las distribuidoras con base en la frontera o fronteras eficientes de la industria o a través de indicadores;
- IV. Cuantificar el cambio en la eficiencia técnica de cada distribuidora, mejor conocido como “*catching-up*”⁵;
- V. Medir el cambio tecnológico⁶ en la distribución de gas natural;
- VI. Brindar una perspectiva del posicionamiento de cada una de las distribuidoras en cuanto a su productividad, desempeño y eficiencia de tal forma que sea posible identificar las “mejores” y las “peores” empresas, así como el origen o elementos que afectan su buen o mal desempeño (por ejemplo, incrementos en la eficiencia técnica o por efectos del cambio tecnológico).

⁵ Se define como cuan cerca de la frontera de eficiencia se ubica la empresa. El objetivo es reflejar que tan capaces son las empresas para emplear los insumos disponibles a partir de la tecnología de producción existente.

⁶ Se mide según cuanto cambie la frontera en combinación de los componentes observados de cada empresa. Este elemento permite mostrar los incrementos de producto que podrían alcanzarse de un período a otro, sin alterar las cantidades de insumo empleadas.

Con el fin de alcanzar los objetivos planteados, la estructura de la tesis es la siguiente: en el primer capítulo se realiza una breve descripción de la problemática, siendo necesario proporcionar un panorama de las herramientas y metodologías existentes para solucionar el problema, así como el estado de arte que ha contribuido en el desarrollo del mismo. En este mismo capítulo se proporciona una introducción sobre la regulación de la distribución de gas natural en México, con el objetivo de conocer las limitaciones o consideraciones para el desarrollo del estudio.

En el capítulo 2 se presenta el marco teórico de la metodología partiendo desde sus orígenes, transitando a través de las definiciones elementales de productividad y eficiencia, y culminando con la descripción detallada de la metodología del DEA a través de los indicadores de productividad. Una vez que las bases del DEA han sido expuestas, en el capítulo 3 se expone los índices de productividad de Malmquist, mostrando la esencia que hay detrás de estos números índices, para luego estudiar cómo se pueden calcular a partir del método DEA.

En el capítulo 4, se muestra la aplicación de las herramientas presentadas en las secciones anteriores en el sector de distribución de gas natural en México para el periodo de 2008 a 2013, finalmente se presentan las conclusiones.

CAPÍTULO I:

REGULACIÓN ECONÓMICA DE LA DISTRIBUCIÓN DE GAS NATURAL EN MÉXICO

1.1. Antecedentes: Monopolios naturales, regulación económica y benchmarking.

Conforme a la teoría económica, en un mercado competitivo uno de los supuestos básicos es que ninguna empresa impacta en el mercado. Lo anterior implica que el precio del bien o tarifa del servicio es determinado por la intersección de las curvas de oferta y demanda del mercado, por lo que el precio está fuera del control de una sola empresa.

La multiplicidad de oferentes y demandantes imposibilita la manipulación de precios y ofertas, por tanto, en un sentido económico existe un resultado óptimo donde el nivel del precio es igual al costo marginal, maximizando el excedente del consumidor, el excedente del productor y con ello el “bienestar social”⁷. Sin embargo, hay situaciones que imposibilitan la competencia en el mercado, por ejemplo, en aquellas industrias intensivas en capital que enfrentan costos fijos elevados (tal es el caso de las actividades relativas a redes en los sectores energéticos), mantener a más de una empresa sería ineficiente, toda vez que su costo unitario de producción se elevaría injustificadamente.

Por lo anterior, en este tipo de sectores podrían aprovecharse las economías de escala, en donde el costo total promedio disminuye a medida que el volumen de producción aumenta, ante este tipo de fenómenos el monopolio natural es un resultado “inevitable”. Por tanto, existe un monopolio natural cuando las economías de escala son de tal magnitud que resulta más eficiente que una sola empresa satisfaga toda la demanda del bien o servicio que un grupo de empresas en competencia.

Sin embargo, a pesar de las virtudes antes mencionadas, el monopolio natural no está exento a las ineficiencias que genera cualquier monopolio: el monopolista puede ejercer poder de mercado, fijando unilateralmente precios, cantidades

⁷ En un sentido económico, el beneficio social se define como la suma del excedente del consumidor y del productor. Ambos dependen del volumen de producción.

ofertadas y condiciones de venta. De lo anterior, con una menor oferta y un precio mayor se extrae parte del excedente del consumidor y en consecuencia provoca un resultado sub-óptimo y con ello una pérdida general de bienestar social, ante tal situación, es necesario la intervención del gobierno a través de entes reguladores, donde se permite a una empresa existir como monopolio, pero regulando la calidad del servicio y sus precios, entre otros aspectos.

En el caso de la regulación económica (o regulación de precios y tarifas), el objetivo será inducir a la empresa monopólica a que maximice utilidades a un nivel de producción eficiente y a un precio competitivo. Por lo tanto, es tarea de los reguladores promover el desarrollo eficiente del mercado, estimar los verdaderos costos medios de producción y fijar un precio o tarifa que lo cubra y que al mismo tiempo incentive la eficiencia en el monopolio, es entonces cuando se plantea la siguiente pregunta: ¿cuál debe ser el nivel de precios del bien o servicio en cuestión que un monopolio debe cobrar a los usuarios? De la pregunta anterior se plantean dos posibles escenarios:

1. Si un monopolio natural produce en el nivel en que el precio es igual al costo marginal, produce una cantidad eficiente pero no podría cubrir sus costos, condenando a la empresa a la quiebra; y
2. Si produce a un nivel en que el precio es igual al costo medio, cubre sus costos, aunque produce demasiado poco en relación con lo que sería eficiente.

En la mayoría de los casos, el regulador opta por el segundo escenario, (considerado como el segundo mejor escenario) bajo la siguiente argumentación: para que una empresa regulada no requiera de subsidio, debe obtener beneficios no negativos, lo que implica que debe producir en la curva de costos medios o por encima de ella, sin perder de vista la eficiencia económica de la empresa. Por lo tanto, es tarea de los reguladores estimar los verdaderos costos de producción medios y fijar un precio o tarifa que lo cubra y que al mismo tiempo incentive la eficiencia en el monopolio. La tarea se vuelve complicada ante la desventaja que tiene el regulador de desconocer los verdaderos costos implícitos en la actividad regulada, siendo que, uno de los principales problemas que enfrenta el regulador para obtener la verdadera función de costos de la empresa regulada es precisamente la asimetría de la información⁸.

⁸ También conocida como información asimétrica. Se refiere al hecho de que las empresas reguladas poseen mejor información que el agente regulador sobre sus costos, demanda y otros parámetros de su operación, por lo que el regulado posee un elemento de control respecto de la información y tiene motivos para usarla en forma estratégica para inclinar las

Sin embargo, el regulador no debe basarse sólo en la información de la propia empresa, pues anularía los incentivos a la eficiencia al crear un juicio independiente del desempeño de la industria, por lo que el regulador debe incorporar información externa, como otras empresas de la industria, o comparaciones internacionales. Es entonces cuando el *benchmarking* tiene un papel de suma importancia, ya que la realización de este tipo de análisis promueve entre las empresas, la mejora de su desempeño en relación al mercado.

El *benchmarking*, dentro del ámbito regulatorio es un ejercicio de comparación que involucra obtener y analizar información de un cierto número de empresas para derivar conclusiones sobre el nivel de costos que debería tener una compañía eficiente⁹. El regulador puede aprovechar esta información para establecer un *benchmark*¹⁰ del nivel de costos razonables de un monopolio (empresa regulada).

Este tipo de ejercicios comparativos también resuelve el problema de la asimetría de información que enfrentan los reguladores, debido a que para su elaboración se requiere incorporar información externa, como otras empresas de la industria, o comparaciones internacionales, entonces el regulado se ve en la necesidad de revelar información para defender su postura. Por todas las virtudes antes mencionadas, el *benchmarking* es una herramienta cada vez más recurrida por los reguladores de servicios públicos en una gran variedad de sectores y países, incluyendo la industria de gas natural en México.

En algunos países como Irlanda, Noruega y Reino Unido, el *benchmarking* ha sido adoptado como una parte del proceso de la determinación tarifaria, mientras que en otros países como Finlandia, Canadá, Brasil y Colombia, los estudios de *benchmarking* son usados, más que para determinar, para justificar las decisiones regulatorias. Lo anterior se puede apreciar en la siguiente tabla:

decisiones del regulador en su favor. Es importante resaltar que los objetivos del regulado y del regulador son en gran parte divergentes, mientras que el regulado busca maximizar sus beneficios, el regulador tratará de inducirla a actuar en función del interés público, sin embargo, como ya se mencionó el regulador se ve limitado por la falta información de la empresa y sobre las circunstancias que la rodean, por lo que no puede observar su conducta con precisión.

⁹ La eficiencia es un concepto que posee diversas interpretaciones, pero a grandes rasgos, se refiere a la capacidad de obtener más, usando menos.

¹⁰ El *benchmark* es una medida de referencia, el “metro patrón”.

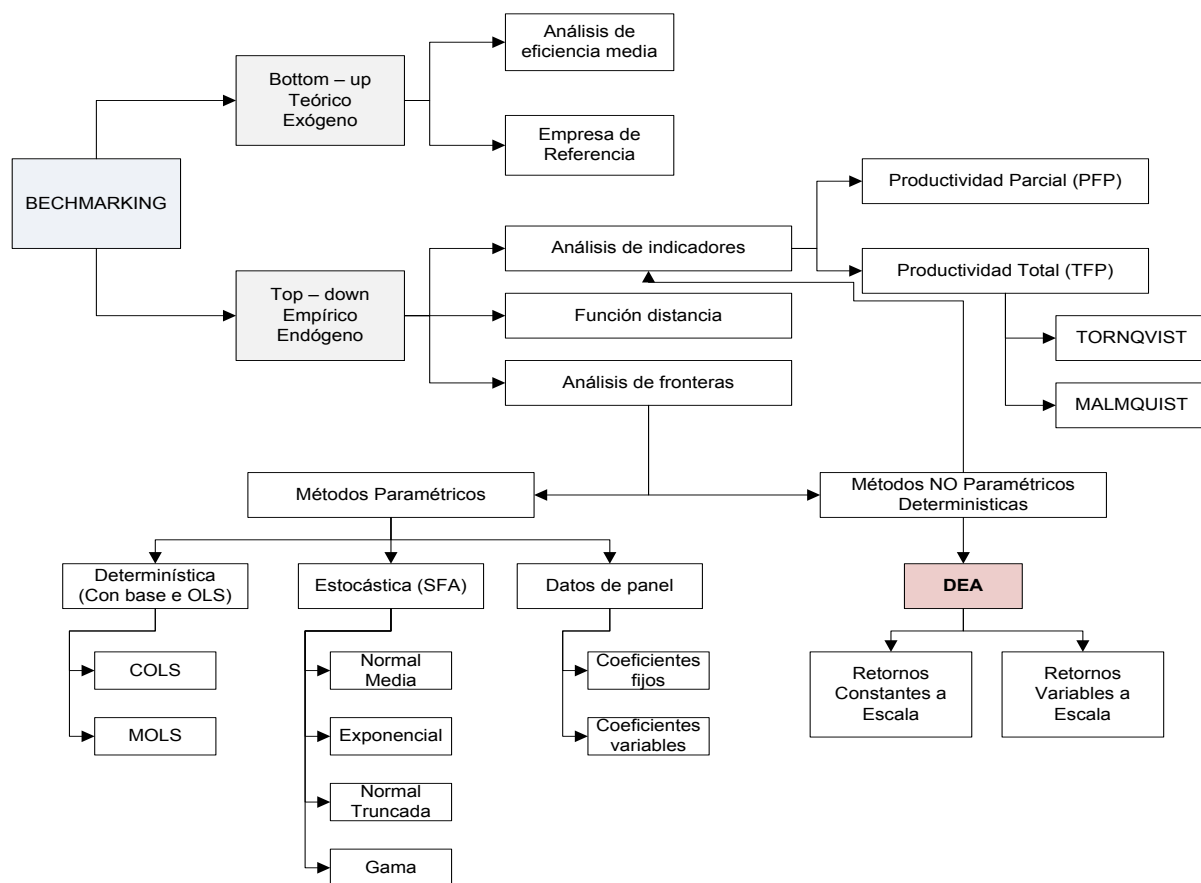
Tabla 1. Ejemplos de países que utilizan *benchmarking* en su proceso regulatorio

País	Tipo de Regulación	Benchmarking como parte del proceso regulatorio	Herramienta o modelo
Australia	<i>Revenue-Cap</i> hasta 2004, en adelante <i>Weighted Average Price Cap</i> (WACC)	No	DEA, SFA, TFP
Chile	Caso especial del <i>Yardstick</i>	Si	Empresa de Referencia
EUA (California)	<i>Price Cap with earnings sharing</i>	No	TFP
EUA (Maine)	<i>Price Cap with earnings sharing</i>	No	TFP
Finlandia	<i>Expenditure-cap</i> y <i>Rate of Return</i>	No	DEA
Irlanda	<i>Yardstick</i>	Si	DEA
Noruega	<i>Revenue- Cap</i>	Si	DEA
Suecia	Caso especial del <i>Yardstick</i>	Si	DEA
Reino Unido	<i>Price Cap</i>	Si	COLS

Fuente: Performance measurement and regulation of network utilities. Tim Coelli.

Existen diferentes enfoques por medio de los cuales se puede llevar a cabo un análisis de esta naturaleza, a continuación se presenta la siguiente clasificación de las diferentes técnicas (modelos) de *benchmarking*:

Figura 1. Métodos de benchmarking



Fuente: Metodologías para la determinación de costos eficientes de comercialización. Aspectos conceptuales (2011). VII Jornada de comercialización de energía, Mercados Energéticos, Consultora. Bogotá, Colombia.

El enfoque *Bottom up*, también conocido como *benchmarking* exógeno o teórico, parte de una función teórica obtenida con base en la tecnología e ingeniería del proceso productivo o bien a partir de considerar un conjunto de empresas eficientes, en este enfoque, la empresa sujeta a análisis no forma parte de la muestra a utilizar para determinar la función de costos o de producción, según sea el caso, y las comparaciones se hacen comúnmente en términos absolutos. Básicamente son dos las herramientas que se emplean bajo este enfoque:

- Análisis de eficiencia media, consiste en determinar los parámetros de referencia partir de un conjunto de empresas “eficientes”. Son varias las ventajas de este enfoque, entre las principales se encuentran la facilidad, flexibilidad y relativa sencillez para obtener los parámetros de interés, sin

embargo, la mayor dificultad radica en obtener muestra de referencia, la cual si no llega a ser representativa limita la extrapolación de resultados.

- Empresa de referencia, consiste en construir o simular la empresa ideal a cargo de la provisión de un servicio público en un área física específica, operando bajo criterios de eficiencia y calidad, dentro del entorno que opera. Las ventajas de este método son principalmente dos: deja a un lado la gestión real de la empresa (lo que permite determinar el nivel eficiente de gestión) y da una mayor flexibilidad para incorporar particularidades de la empresa (variables ambientales). Esta herramienta resulta adecuada cuando no se dispone de datos homogéneos en un país o información internacional consistente. Sin embargo, presenta varias desventajas para su desarrollo: este tipo de análisis es muy demandante en información técnica y de costos a detalle, se requiere un conocimiento técnico especializado, así como una gran cantidad de recursos tecnológicos, financieros y humanos, y el periodo de tiempo para su desarrollo puede ser alto, Por todo lo anterior, su implementación no siempre es factible.

En cuanto al enfoque *Top down* o *benchmarking* endógeno, este se basa en estudios empíricos, es decir, funciones derivadas de los mejores resultados obtenidos en la práctica, donde la empresa en evaluación forma parte de la muestra. este enfoque implica la recolección y análisis de información sobre un grupo de empresas, con el objeto de obtener conclusiones sobre lo que sería, por ejemplo, el nivel de costos de una empresa eficiente, bajo el supuesto de que existe posibilidad de mejoras en la eficiencia, además para realizar comparaciones se utilizan desde herramientas simples como son los *ratios* de productividad física o costos medios, hasta métodos matemáticos y/o estadísticos más avanzados, como son la estimación de fronteras de eficiencia.

Dentro del enfoque *Top down*, se encuentran los *métodos de frontera*, cuyo objetivo es determinar una función de producción (o bien de costos), la cual es considerada como *la frontera de eficiencia*, donde las unidades¹¹ que determinan la frontera son señaladas como unidades eficientes y aquellas que no permanecen sobre la misma son consideradas ineficientes. De esta forma, al comparar cada unidad ineficiente con aquellas que son eficientes, permite establecer la cuantía, en términos

¹¹ Unidades reales observables. En la literatura se denominan Unidades Productivas, las cuales pueden ser empresas, sectores, países, etc.

absolutos o relativos, de la reducción de entradas y/o incremento de las salidas que la unidad ineficiente debería promover para convertirse en eficiente.

Por lo anterior, la relevancia del análisis recae en la forma para determinar dicha frontera. Los métodos preferidos para construir fronteras son básicamente la Metodología DEA y los métodos econométricos, ya sea fronteras econométricas determinísticas y/o análisis de fronteras estocásticas.

Ambas técnicas son generales, brindan una perspectiva sistémica e integral para estudiar, en forma comparada, el desempeño de las unidades de producción bajo análisis y es posible trabajar bajo un enfoque de insumos (dado un nivel de producción, minimizar la cantidad de insumos), o de productos (dado un nivel de costos, maximizar el nivel de producción). Las principales características de cada enfoque son las siguientes:

Tabla 2. Cuadro comparativos de los métodos de fronteras

Análisis Envolvente de Datos	Fronteras Estocásticas
<p>El DEA busca determinar cuáles empresas son las que forman la superficie envolvente eficientes a través de técnicas de programación lineal, básicamente parte del teorema de dualidad.</p> <p><i>Ventajas</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ No requiere establecer un forma funcional explícita. ✓ No obliga a suponer el pleno empleo de los factores productivos. ✓ Le da un tratamiento multidimensional a los datos: múltiples insumos y productos. ✓ Permite identificar los cambios de eficiencia pura respecto de los cambios debido a la modificación de la escala de producción (con el uso de indicadores de productividad). <p><i>Desventajas</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ! No es posible hacer inferencias. No poseen propiedades estadísticas, por lo que aplicar pruebas es imposible. ! Cualquier variación a la frontera, es considerada como ineficiencia, ignorando el efecto estocástico. Por lo tanto, es sensible a datos atípicos. ! Es bueno para estimar eficiencias (o ineficiencias) relativas, pero no absolutas cuyo 	<p>Surgen del supuesto de que las desviaciones respecto a la frontera pueden no estar bajo el control de la unidad analizada. La idea es que los eventos externos, afectan la función de producción, teniendo una distribución normal en lugar de ser constantes; una vez considerada la posibilidad de ruido estadístico, lo que resta es considerado ineficiencia. Así, las fronteras se obtienen a través de métodos econométricos.</p> <p><i>Ventajas</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Tienen en cuenta los efectos del ruido de los datos. ✓ La inclusión de variables ambientales es más "sencilla". ✓ Validez estadística. Permiten usar pruebas estadísticas para evaluar la significatividad de las variables incluidas en el modelo. <p><i>Desventajas</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ! Requiere de una muestra grande de datos. Se necesita contar con un conjunto de datos importante para obtener resultados confiables ! Debe elegirse una forma funcional a priori. Se necesita la especificación de la forma funcional y tecnología de producción. Asimismo, la separación de ruido e ineficiencia se basa en fuertes supuestos sobre la distribución del término de error.

<p>objetivo sea obtener resultados potenciales o ideales.</p> <p>! Utiliza solo un subconjunto de datos disponibles (aquellos que determinan la frontera), mientras que el resto de las observaciones es ignorado.</p> <p>! La utilización de un elevado número de variables en los análisis, puede ocasionar que algunas empresas sean consideradas erróneamente eficientes (pierde poder de discriminar); de forma general, es deseable que la suma de inputs y outputs sea pequeña en relación con el número de unidades evaluadas.</p>	<p>! Pueden llegar a dominar ineficiencia a una mala especificación del modelo. Los resultados son sensibles a la forma funcional si no se interpreta correctamente el término de error, lo que puede generar conclusiones muy variadas.</p> <p>! Los resultados son particularmente sensibles a los valores atípicos, dado que el prestador con “mejor” desempeño en cualquier dimensión sirve para anclar el valor estimado. En consecuencia, los puntajes de desempeño son muy sensibles a los valores atípicos.</p>
--	---

Fuente: *Elaboración propia*

En general, la aplicación de un ejercicio de *benchmarking* en el ámbito regulatorio, mejora la calidad de la evaluación de la empresa prestadora del servicio, además reduce el costo a los órganos reguladores al evaluar la eficiencia de las empresas reguladas, en comparación con otros métodos, sin embargo, la consideración de este tipo de análisis requiere de información, tanto de cantidad como de calidad, así como la obtención de resultados robustos, procesos transparentes, consistencia con el marco regulatorio para que puedan considerarse en la toma de decisiones.

1.2. Descripción del sistema: Regulación económica de la distribución de Gas Natural en México.

En México, a raíz de la reforma a la *Ley Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en el Ramo del Petróleo en 1995*¹², el Estado dejó fundamentalmente en manos del mercado la expansión de las redes de transporte y distribución de gas natural. Es decir, Petróleos Mexicanos (Pemex) conservó el monopolio en las actividades de exploración y producción, pero desincorporó de sus activos a los sistemas de transporte y distribución de los energéticos.

Como resultado de dicha reforma se emitió la *Ley de la Comisión Reguladora de Energía* (la Comisión) y el *Reglamento de Gas Natural* (el Reglamento) durante octubre y noviembre del mismo año¹³. De tal forma, se estableció de manera clara como ámbito regulatorio a cargo de la Comisión, en materia de gas natural, la

¹² Se permitió la participación del sector privado en el sector gasista, únicamente en las actividades no reservadas al Estado a nivel constitucional, es decir, en el transporte, almacenamiento, distribución e importación del hidrocarburo.

¹³ Dichas reformas definieron a la institución como un órgano desconcentrado de la Secretaría de Energía (SENER) pero con autonomía técnica y operativa. Con esta ley se culminaba una primera etapa de concentración de atribuciones regulatorias que previamente, o no existían explícitamente, o bien, se encontraban dispersas entre las de la misma SENER, la Secretaría de Hacienda y Crédito Público y la Secretaría de Economía.

distribución de gas natural, entre otros servicios¹⁴. El objetivo de esta primera reforma era impulsar la utilización de un combustible más limpio y eficiente, promoviendo la ampliación de su cobertura nacional, concentrando las inversiones de Pemex en la parte estratégica y más rentable de la cadena y permitiendo que fuera la inversión privada la que resolviera la falta de inversiones públicas en actividades como almacenamiento, transporte, distribución e importación de gas natural, ello permitiría incentivar la competencia en donde fuera posible, profesionalizar la prestación de servicios en beneficio de los consumidores y fomentar el desarrollo eficiente del sector.

Posteriormente, con la reforma energética del 2013 se modificaron los artículos 27 y 28 constitucionales para permitir la participación de la iniciativa privada en el procesamiento de gas natural y la refinación del petróleo. Para el caso del transporte, almacenamiento, distribución y comercialización del gas natural, el petróleo y sus derivados, el cambio no fue sustancial debido a que ya existía la participación de la iniciativa privada en estos servicios.

En cuanto a la regulación económica, de acuerdo al *Reglamento de las actividades a que se refiere el título tercero de la Ley de Hidrocarburos* (el Reglamento), las contraprestaciones, precios o tarifas que apruebe la Comisión serán máximas. La Comisión expedirá, mediante disposiciones administrativas de carácter general, la regulación de las contraprestaciones, precios o tarifas de las actividades reguladas, para lo cual deberá tomar en cuenta los principios que permitan el desarrollo eficiente de la industria y de mercados competitivos, que reflejen las mejores prácticas en las decisiones de inversión y operación y que protejan los intereses de los usuarios.

Adicionalmente, las contraprestaciones, precios o tarifas que autorice la Comisión deberán constituir mecanismos que promuevan una demanda y uso racional de los bienes y servicios. Otro aspecto relevante en la determinación de contraprestaciones, precios o tarifas, es que el Reglamento establece que la Comisión podrá emplear las herramientas de evaluación que estime necesarias para lograr sus objetivos regulatorios, para lo cual podrá realizar ejercicios comparativos¹⁵ y aplicar los ajustes que estime oportunos, así como emplear indicadores de desempeño para fines de publicidad.

¹⁴ El Reglamento señalaba que la regulación en México debía basarse en un régimen de permisos que se otorgan por un primer período de 30 años, el cual es renovable por períodos subsecuentes de 15 años.

¹⁵ Mejor conocidos en el ámbito regulatorio como *Benchmarking*.

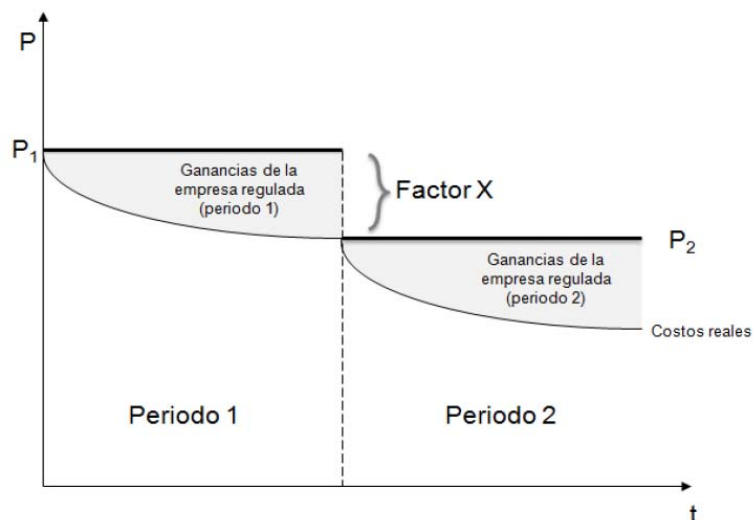
De acuerdo al artículo tercero transitorio del Reglamento, la Comisión podrá aplicar las disposiciones jurídicas en materia de otorgamiento y regulación de permisos, incluyendo las disposiciones administrativas de carácter general y demás disposiciones emitidas por la Comisión que se encuentren vigentes, en lo que no se opongan a la Ley de Hidrocarburos y al Reglamento, hasta en tanto se expiden las disposiciones administrativas de carácter general y demás ordenamientos correspondientes. Por lo tanto, conforme al Reglamento y a la *Directiva sobre la determinación de tarifas y el traslado de precios para las actividades reguladas en materia de gas natural DIR-GAS-001-2007* (Directiva de tarifas), se aprecia que la regulación tarifaria está basada en un esquema de tarifas máximas.

El esquema de tarifas máximas consiste básicamente en que, una vez determinadas las tarifas máximas iniciales en términos reales (tarifas tope), los incrementos sucesivos estarán sujetos a un “nuevo” tope que se determina en función de los incrementos esperados en el precio de los insumos, menos un Factor X que estima el potencial de la empresa para reducir sus costos, incluyendo mejoras en productividad, con el objetivo de reflejar en las tarifas las mejoras esperadas en la eficiencia operativa, tal como ocurriría en un mercado competitivo. Este tipo de regulación se le conoce como *regulación por precios tope RPI-X*¹⁶, el cual busca estimular la eficiencia productiva al separar, al menos temporalmente, los precios y los costos, de manera que la reducción en costos y gastos se traduzca en mayor rentabilidad para el regulado; posteriormente, las ganancias en eficiencia son compartidas con el consumidor a través del ajuste de precios o tarifas. Este ajuste se realiza incrementando los precios o tarifas de acuerdo con un índice inflacionario y después ajustándolo por un Factor X, que captura la transferencia de las ganancias en eficiencia hacia el consumidor, a través de precios o tarifas.

En general, el Factor X es la tasa de declive de los precios reales a lo largo del tiempo y como las tarifas se mantienen fijas entre periodos de cálculo, el monopolista puede conservar todas las ganancias obtenidas. Por lo tanto, esta metodología provee de fuertes incentivos para reducir costos, ya que la empresa buscará maximizar la diferencia entre éstos y sus ingresos, y al mismo tiempo las reducciones de costos (es decir, las ganancias de productividad) son trasladadas a los usuarios en el siguiente periodo en la forma de menores tarifas.

¹⁶ Fue propuesta en 1983 por Stephen Littlechild como una mejor alternativa para regular a la empresa de telecomunicaciones británica. Desde entonces, ha sido adoptada por un creciente número de países, convirtiéndose en la práctica común establecida en las metodologías para fijar tarifas de servicios monopólicos.

Figura 2. Regulación por precios tope RPI-X



Fuente: DEFILIPPI, Enzo (2009). *Estimación del factor de productividad en el cálculo de tarifas reguladas: El demonio está en los detalles. Cuadernos de investigación No. 14. Perú. Instituto del Perú. Pág. 8*

La *Directiva* establece¹⁷ que el Factor X será igual a cero durante los primeros cinco años, una vez iniciada la prestación del servicio y a partir del séptimo año de operación, la Comisión establecerá un Factor X para cada permisionario, que se mantendrá fijo por todo el quinquenio. De acuerdo con el mismo numeral de la *Directiva de tarifas*, para la determinación del factor de eficiencia que le correspondería a cada Permisionario, se debe considerar:

- I. Las mejoras esperadas en su eficiencia operativa a lo largo del periodo de 5 años, considerando entre otros aspectos:
 - a. Factores de la operación del sistema y de la prestación del servicio que puedan ser influenciados por el permisionario para alcanzar mejoras en eficiencia;
 - b. Tendencias históricas de la eficiencia del permisionario;
 - c. Tamaño, etapa de desarrollo, grado de madurez y tiempo de operación del sistema;
 - d. Cumplimiento con el programa de inversiones propuesto en el plan de negocios;
 - e. Nivel de utilización del sistema;
 - f. Estándares internacionales de eficiencia en la industria;

¹⁷ Numeral 18 "Factor de ajuste por eficiencia" de la sección D. "Ajuste de tarifas máximas".

- g. Indicadores de calidad del servicio y confiabilidad del sistema;
 - h. Índices de productividad globales y sectoriales;
 - i. Economías de escala;
 - j. Comparaciones con otros permisionarios establecidos en México.
- II. Los factores que influyan en sus costos por unidad; y
- III. El nivel de eficiencia que se derive de los costos incurridos.

Lo anterior da la pauta para realizar ejercicios de *Benchmarking*, con el propósito de derivar conclusiones sobre el nivel de producción y costos que debería tener una compañía eficiente. Con lo anterior, la Comisión puede aprovechar la información disponible, tanto la que las empresas le entregan como parte de sus obligaciones, así como información pública de interés, para establecer *benchmarks razonables*, que le permita evaluar el desempeño de las empresas reguladas (en este caso de las distribuidoras) desde una perspectiva global y con ello contar con bases sólidas que le permitan determinar el factor de eficiencia productiva X para cada distribuidora.

1.3. Problemática: medición de la eficiencia & determinación del Factor X

Por lo expuesto en la sección anterior, se tiene que una de las tareas relevantes de la Comisión, al momento de determinar una tarifa, es calcular el Factor X. Está no es para nada sencilla, ya que el impacto va directo a la tarifa, y por tanto impacta en la población que utiliza el energético, si el Factor X es sobreestimado podría condenar a la empresa a no recuperar sus costos, mientras que si es subestimado podría generar ganancias extraordinarias a la empresa y los usuarios pagarían tarifas más altas de lo “razonable”. Por lo tanto, la Comisión debe fijar dicho factor con base en un análisis del desempeño global de la industria¹⁸ que arroje resultados robustos y confiables.

En el cálculo del Factor X está implícita la medición de la productividad, y medir la productividad implica dividir, encontrar proporciones que reflejen el valor creado por los insumos:

¹⁸ Si bien el Factor X debe tomar en cuenta los niveles de eficiencia de una empresa, también es cierto que este debe considerar las mejoras en su desempeño en general.

Productividad = Unidades de salida / factores de entrada

Ahora bien, partiendo de la definición antes descrita, la forma de obtener dichos indicadores (medir la eficiencia productiva) para una empresa, puede tener varias aristas y no existe una metodología estándar para su medición. Por ejemplo, el dilema comienza desde el criterio de elección de insumos y productos a considerar. Gran parte de los análisis de productividad consideran de gran relevancia la mano de obra y capital, sin embargo, estos son sólo un componente de la medición de la productividad¹⁹.

Dado el riesgo que existe de medir la productividad de manera acotada, lo que llevaría a que sus usuarios tomen malas decisiones, es importante incluir las diversas capacidades de la empresa en una visión sistémica para obtener el resultado correcto en su conjunto. Así, la medición efectiva de la productividad lleva a la necesidad de un planteamiento sistémico que considere múltiples factores y la combinación entre ellos para comprender la influencia de cada uno en el resultado y poder descubrir las tendencias de la productividad. Por lo tanto, en los análisis de productividad, la misión central es hallar un índice de productividad global y descubrir cómo una unidad productiva puede obtener más unidades de salida por unidades de insumos, que sus competidores.

Se debe ser cuidadoso para establecer mediciones que sean válidas y justas. Por ejemplo, cuando se consideran costos, hay que establecer diferencias en términos de productos de calidad similar. Otro ejemplo es la base de los precios a considerar, es decir, si se compara bajo la base de los precios nominales de cada año, se observará un aumento dramático de la productividad; en cambio, si el enfoque es sobre precios constantes puede que la productividad permanezca igual o incluso que disminuya.

Las tendencias son también clave para comprender lo que está pasando y muchas ocasiones lo que es justo no siempre es obvio. La seriedad del tema de la medición de la productividad obliga a ser cauto y a probar los resultados antes de dar por hecho que el diseño de ciertas mediciones sean las buenas, que si bien conviene atar los estímulos al desempeño por buenos resultados, más vale que su medición sea correcta.

¹⁹ Por ejemplo, a nivel nacional, el indicador de la productividad del INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática) se refiere sólo a la mano de obra y su costo. Pero ahora, para muchas empresas, el costo de la mano de obra directa es muy bajo, apenas llega al 10% del total. Otro ejemplo muy socorrido en los análisis de productividad es la consideración del precio, sin embargo, para un regulador existe otro factor muy relevante, que es la calidad.

En general, la estimación del Factor X es una actividad muy compleja y como se mencionó anteriormente, no hay un mejor enfoque predeterminado para evaluar la productividad (obtener los indicadores); sin embargo, esta no puede ser vista bajo un análisis de factores aislados, sino que debe considerar las relaciones entre los diferentes factores que influyen en la productividad. Lo que se recomienda es que el método escogido sea congruente con la estrategia u objetivo que se persiga y sobre todo que exista una continuidad del mismo.

1.4. Metodologías de cálculo del Factor x

A continuación se describen las metodologías más utilizadas para la estimación del Factor X:

A. Números índice.

Los índices de precios y de volumen son herramientas estadísticas imprescindibles para la descripción de fenómenos económicos que involucran períodos consecutivos de tiempo, los cuales, buscan medir la evolución de precios y cantidades a través del tiempo, esto es, desagregar apropiadamente la evolución observada en los valores de las transacciones en dos partes estructuralmente significativas: un índice de precios y un índice de volumen. Así, para la implementación de esta metodología, es necesario definir como primer punto la Productividad Total de Factores (PTF) como la razón entre la suma ponderada de los bienes producidos ($\sum_{j=1}^m u_j y_{jf}$) y la suma ponderada de los insumos utilizados ($\sum_{i=1}^n v_i x_{if}$):

$$PTF = \frac{\sum_{j=1}^m u_j y_{jf}}{\sum_{i=1}^n v_i x_{if}} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde u_j y v_i son los ponderadores de los bienes producidos (y_j) e insumos utilizados (x_i) por la empresa regulada (f), respectivamente.

En general, los precios y las cantidades de cualquier agregado económico cambian de un modo continuo en el tiempo. El problema de la teoría de los números índices es cómo descomponer ese cambio que han experimentado los valores entre dos períodos cualesquiera de tiempo, en lo que sería la variación de precios y la variación de cantidades.

Existen dos paradigmas: hacer una comparación directa de los dos períodos en cuestión o bien tomar en cuenta la información proveniente de todos los períodos intermedios. Estos paradigmas dan lugar a dos grandes tipos de índices: índices directos o binarios e índices encadenados.

Los **índices directos** se calculan comparando, para todas las observaciones, cada período corriente con un período fijo tomado como base; proveen una medida del movimiento de precios o de volumen entre el período t y el período tomado como base (período 0), pero estrictamente sólo proporcionan información de la evolución de precios o volumen exclusivamente entre dichos períodos, 0 y t . Sólo cuando la fórmula utilizada en el índice implica el uso de ponderaciones fijas, permiten comparaciones de volumen (precios) entre períodos cualesquiera, ya que para todas las observaciones se utilizan las mismas ponderaciones del año base. En las demás formulaciones, las comparaciones de índices binarios interperíodos no son adecuadas, ya que pueden estar muy influenciadas por el cambio de composición del agregado.

Los “índices base fija” suponen la hipótesis de que la composición del gasto y la especificación de los bienes permanecen invariadas en el intervalo de tiempo considerado (en cada uno de los períodos que median entre el período 0 y el t), lo cual puede volverse muy poco realista si los extremos a comparar se encuentran muy lejanos. Esta pérdida de representatividad de los productos de referencia se suele solucionar en la práctica cambiando el año base de los índices y empalmando la nueva serie con la base anterior, un fundamento teórico de los índices binarios puede lograrse efectuando el supuesto de que el orden de preferencias (tecnologías, etc.) de un cierto período permanece estático. Sin embargo, cuanto más largo sea el intervalo entre los dos períodos, menos apropiado resultará este supuesto.

Si existen períodos intermedios entre los dos extremos a comparar, la intuición dice que los precios y cantidades de esos períodos intermedios deberán ser tomados en cuenta para calcular índices bilaterales para todos los períodos adyacentes como eslabones de una cadena que cubra todo el intervalo, ya que la trayectoria temporal que ha presentado el agregado sí importa para determinar la evolución de los precios y cantidades y no solamente los dos datos iniciales y finales de los puntos extremos a comparar. Este procedimiento es el que siguen los índices encadenados. Los **índices encadenados** se construyen comparando el período corriente con el período inmediato más reciente, para todas las observaciones del intervalo para el cual se mide la evolución de precios o volumen; estas

comparaciones, llamadas eslabones, se encadenan multiplicando cada uno de ellos, en forma de índice, por la cadena acumulada hasta el período precedente:

$$I_{t,0} = I_{1,0} * I_{2,1} * \dots * I_{t,t-1} = \pi_{j=1,t} I_{j,j-1} \quad \text{Ecuación 2}$$

Así, la comparación entre, digamos, un período $t + 1$ y un período $t - 1$ se hace, en el caso de un índice encadenado, *a través de la comparación de ambos períodos con el período “interviniente”, período t .*

En los índices encadenados, a diferencia de los índices binarios, los cambios de precios y volúmenes de cada intervalo temporal son estimados más directamente en relación con la transacción efectuada en cada período. Las comparaciones con el período previo inmediato son probablemente más relevantes que las comparaciones con un período base fijo, que puede no capturar adecuadamente los cambios ocurridos en los gustos, patrones de compra, cambios tecnológicos y de las propiedades de los bienes. Esas medidas de los cambios en los volúmenes (o precios), relativas a los períodos previos inmediatos, son encadenadas para obtener una medida más adecuada de los cambios operados con respecto a un período base que puede encontrarse alejado en el tiempo. En principio, si cada eslabón de la cadena satisface mejor la hipótesis de invariabilidad de las ponderaciones en los puntos de comparación, el concatenamiento también producirá mejores resultados para la comparación de períodos alejados.

Por otra parte, los índices encadenados resuelven automáticamente el problema del desfase del panel de productos (apariciones y desapariciones de productos cada vez más frecuentes a medida que se alejan del año base) y de la necesidad de cambiar la base e introducir nuevas ponderaciones, problemas propios de los índices base fija. También resuelve el problema de comparabilidad entre períodos cualesquiera dentro de la serie de índices, ya que está es la esencia misma del índice al producir mediciones significativas acerca de la evolución período a período de las magnitudes evaluadas.

Un aspecto muy importante es que, al construir series de índices encadenados surge un nuevo concepto, el de “período de referencia”. Éste se refiere al período para el cual el número índice se establece igual a 100, o el período para el cual los valores constantes se escalan para ser iguales a los valores corrientes.

En la construcción de los índices, ya sean binarios o encadenados, pueden utilizarse diferentes fórmulas, según cuáles sean las ponderaciones utilizadas como constantes en el par de situaciones a comparar. En 1992, Diewert publica la lista

de los principales axiomas para elegir entre los cuatro índices más usados. Con base en las propiedades deseables de un índice²⁰ (Diewert, 1992), los índices más comunes son:

- **Los índices de Paasche²¹ y de Laspeyres²²:** El índice de Laspeyres sobrevalora sistemáticamente la inflación, mientras que el índice de Paasche la infravalora. Un dato importante es que este índice se utiliza para calcular el IPC (índice de precios del consumo).
- **El índice de Fisher²³:** Intenta mitigar el problema de la sobrevaloración de los índices anteriores, siendo una especie de resultado intermedio de los dos anteriores; es decir, se calcula como el Promedio Geométrico de los dos anteriores.
- **El índice de Törnqvist o Translogarítmico:** Este índice es muy utilizado en comparaciones inter-temporales por ser el apropiado desde un punto de vista económico para el caso de insumos-múltiple y productos-único.

Aunque no pasa todas las pruebas axiomáticas estadísticas como en el caso del índice de Fisher, en general, la literatura económica de medición de productividad recomienda el índice de Tornqvist por las ventajas que ofrece (Coremberg, 2006).

Las consideraciones de tipo económico para la elección de la fórmula de un índice, implican la valoración de la consistencia de las formulaciones con la representación que postula la teoría económica. El análisis de la fórmula apropiada se basa en determinados supuestos acerca de relaciones económicas y comportamientos de los agentes. El índice elegido será la mejor aproximación posible al índice teórico apropiado bajo ciertos supuestos.

Desde este enfoque, los índices de precios y de volumen pueden ser vistos como funciones de los conjuntos de valores de precios y cantidades que toman los n bienes considerados dentro del agregado, entre dos períodos, sujetas a que el índice de precios por el índice de volumen dé por resultado la variación del valor experimentada por el agregado entre los puntos inicial y final.

²⁰ Propiedades axiomáticas deseables de los índices de volumen y Precios: monotonicidad; proporcionalidad; dimensionalidad de precios; conmensurabilidad; reversión temporal; reversión de los factores; test del producto; transitividad (circularidad); consistencia en la agregación.

²¹ Propuesto por el economista alemán Hermann Paasche.

²² Propuesto por el economista alemán Ernst Louis Étienne Laspeyres.

²³ Propuesto por el economista estadounidense Irving Fisher.

Se asume que el consumidor y el productor minimizan costos para alcanzar un determinado nivel de utilidad o producción y que los agentes económicos eligen el máximo nivel de utilidad o producción para determinada restricción presupuestal. En ese caso, el problema es encontrar la fórmula del índice que sea consistente con esa representación. En general, la mejor fórmula dependerá de los supuestos que se efectúen sobre la forma de las funciones de producción y de utilidad.

Todos los índices tienen sus ventajas y desventajas, sin embargo, una de las críticas comúnmente realizadas al uso de estos indicadores, radica en el empleo de los precios de los bienes y factores de producción como ponderadores. Por ejemplo, en el caso de las industrias reguladas, las tarifas no necesariamente reflejan la evolución del precio del mercado. En consecuencia, los cambios en la productividad total de factores podrían tener su origen en decisiones regulatorias, y no necesariamente en ganancias (o pérdidas) de eficiencia. Un segundo problema con esta metodología, es que los números índices no permiten identificar individualmente los factores que explican los cambios en la productividad de la empresa regulada.

B. Índices de productividad de Malmquist.

Una de las técnicas más utilizadas en el ámbito regulatorio para la evaluación de la productividad está basada en los índices de productividad de Malmquist introducidos por Caves, Christensen y Diewert en el año 1982. La propuesta consiste en emplear el DEA para determinar los cambios en la productividad total de los factores, discriminando entre los cambios en la eficiencia técnica (o sea cambios en la distancia a la frontera, lo que se denomina como convergencia o “*catching-up*”) y los cambios tecnológicos (que se manifiestan como desplazamientos de la propia frontera). Este instrumento de análisis permite identificar los cambios de eficiencia pura respecto de los cambios debido a la modificación de la escala de producción. La formulación del modelo se realiza a través del concepto de función de distancias y su aplicación para definir índices de productividad.

La instrumentación empírica exige caracterizar la tecnología empleando la técnica de optimización, habiéndose elegido el procedimiento conocido como DEA. Así, la productividad de una empresa puede medirse por la relación entre el producto obtenido y el consumo de recursos realizado.

La ventaja de calcular el Índice de Malmquist es que, al utilizar funciones de distancia para la agregación de insumos y producción, permite calcular las

variaciones en la productividad de la empresa multi-producto utilizando únicamente datos sobre cantidades de insumos y producción (i.e., el simple cálculo de las funciones de distancia genera implícitamente las ponderaciones adecuadas). Ahora bien, dado que las funciones de distancia se obtienen comparando la actividad de la empresa con un referente que se considera óptimo (*benchmark*), se debe definir un índice de productividad relativo como el cociente entre el índice de productividad absoluto de la empresa (anteriormente definido) y el índice de productividad óptimo (de la empresa tomada como referencia).

Otras ventajas de la metodología son: no requiere información de precios (lo cual puede representar una mayor cantidad de recursos económicos, así como de tiempo de análisis para la Comisión, situación que no siempre es factible), utiliza datos sobre unidades físicas de insumos y productos (información con la que cuenta la Comisión, la cual verifica y puede validar, por ser parte de sus obligaciones como regulador), está libre de errores de especificación en la forma funcional (no es necesario la validación de supuestos estadísticos).

Su principal limitación es que se trata de un modelo determinístico sobre el que no se pueden aplicar pruebas estadísticas. Asimismo, puede ser sensible a la existencia de datos atípicos (*outliers*) que distorsionan la frontera de eficiencia. Ello tiene como consecuencia la reducción aparente de la eficiencia de empresas similares.

1.5. Estado del arte del índice de Malmquist.

De acuerdo a la revisión literaria realizada para el presente trabajo, se aprecia una gran cantidad de trabajos, alrededor del mundo, que consideran la herramienta DEA para medir la eficiencia de las empresas en el sector energético, sin embargo, la gran mayoría de trabajos empíricos realizados corresponden al sector de distribución eléctrica²⁴. No obstante, en la última década se han presentado algunas propuestas para determinar el Factor X a partir del índice de Malmquist para la

²⁴ Por ejemplo, Weyman-Jones (Reino Unido, 1999) realiza un estudio para evaluar la eficiencia de las empresas de distribución en Inglaterra y Gales. Se establece un ranking para doce empresas, donde obtuvo que cinco de ellas pueden considerarse eficientes, concluyendo que el análisis de la eficiencia a través de la Metodología DEA es útil para comparar a las compañías de distribución en un contexto de regulación. Existen otros diversos estudios que analizan la eficiencia en la actividad de distribución de electricidad a través de la Metodología DEA. Los primeros estudios aplicados al sector tienen como objetivo establecer rankings de eficiencia y en otros casos contrastar la existencia de diferencias en eficiencia entre empresas públicas y privadas. Existen también estudios que usan DEA y proponen esta metodología como una herramienta complementaria en los procesos de fijación de las tarifas de distribución de electricidad e incorporan la calidad del servicio dentro del análisis de eficiencia.

actividad de distribución de gas natural, básicamente para el mercado argentino y brasileño.

El trabajo de Valeria J. Blanco (Argentina, 2010) constituye una de las escasas evaluaciones de la evolución de la eficiencia productiva utilizando los índices de productividad de Malmquist para distribuidoras de gas natural en Argentina para el periodo 2000-2009. En el estudio se propone descomponer los cambios de eficiencia interanuales a través de los índices de productividad de Malmquist para el cálculo de un Factor X diferente para cada empresa con el fin de promover la convergencia hacia la frontera productiva.

De esta forma, el estudio se analiza la evolución de la eficiencia económica global de seis de las nueve distribuidoras argentinas en el periodo 2000 a 2009, al mismo tiempo que obtiene la descomposición de la misma en cambios de eficiencia técnica pura, de eficiencia de escala, cambios tecnológicos y variaciones en la productividad total de los factores. Para el estudio, se adaptó la metodología DEA a datos de panel y se desarrolló en tres etapas: en la primera y tercera etapa se utilizaron índices de cambio en la productividad de Malmquist y en la segunda etapa se estimó la frontera SFA. El análisis se enfocó en obtener una frontera de producción, dado que las estimaciones de eficiencia (técnica, asignativa, de escala) provenientes de funciones de costos resultaban sesgadas toda vez que había una desviación sistemática de la eficiencia asignativa, debido a sesgos regulatorios²⁵ y se debía satisfacer la demanda regulada. Así, la frontera de producción se estimó por medio de DEA orientada a los insumos, tomando la cantidad de producto como una variable exógena (insumo) y los metros cúbicos entregados como producto. También se consideraron la cantidad de empleados y los kilómetros de redes operadas como variables representativas de los insumos trabajo y capital respectivamente.

En una segunda etapa se incorporan variables ambientales con el fin de captar los diferentes entornos en que operan las empresas y que pueden influir en la eficiencia de las empresas como lo son densidad del mercado (medida como la cantidad de clientes por kilómetro de redes), la estructura de mercado (obtenida del cociente entre metros cúbicos entregados a usuarios residenciales y total de metros cúbicos entregados) y el clima (se incorporó la temperatura mínima del área de concesión, teniendo en cuenta que la demanda de gas depende fuertemente de la misma dado

²⁵ De acuerdo con la autora del estudio, los cambios en eficiencia asignativa pueden ser el resultado de distorsiones en los mercados de factores que no están bajo el control de las empresas y por las cuales no deberían ser castigadas. Adicionalmente esas distorsiones asignativas romperían la relación dual-primal necesaria para obtener buenas estimaciones de eficiencia.

su alto uso para calefacción). Los resultados conformaron dos grupos, lo cual resulta de interés para el regulador ya que podrían fijarse factores X diferentes para cada empresa con el fin de incentivarlas a acercarse a la frontera y trasladar al usuario, vía tarifa, esa mejora potencial.

Finalmente, a través del análisis de índice de productividad de Malmquist se observó que la eficiencia económica global se vincula a una mejora de eficiencia técnica más que a un cambio tecnológico. De este modo, quizás el planteamiento resulto complejo para el pequeño tamaño de muestra con el que se contaba, sin embargo, el complementar el análisis con otras técnicas, como SFA, resulto crucial para robustecer los resultados obtenidos.

En Brasil, Perin y Legey (2002) estudiaron la eficiencia y el cambio tecnológico de 26 empresas distribuidoras de gas natural a través del DEA aplicado para obtener el índice de Malmquist, debido a que el regulador brasileño establece un nivel de expansión para cada distribuidora. Para el análisis se consideró el enfoque orientado a minimizar los insumos (capital y mano de obra) dado un nivel de producción.

Para el capital se consideró la variable proxy “longitud de la red en kilómetros” y para mano de obra se consideró la variable proxy “número de empleados”. La razón por la cual se elige longitud de la red como una variable proxy de capital es porque para expandir la red, se realizan fuertes inversiones en capital, por lo que este elemento se logra capturar implícitamente en la variable longitud de la red en kilómetros; por el lado de las variables producto, se consideró el total de ventas de gas natural.

La eficiencia técnica de las distribuidoras de gas natural en estudio fue obtenida a través del DEA para el 2004. Sin embargo, debido a la imposibilidad de obtener información de cada distribuidora para el periodo de 2001 a 2004, el cálculo del índice de productividad total de los factores solo pudo obtenerse para siete distribuidoras. Para la modelación se observó la conveniencia de considerar el supuesto de Rendimientos Variables a Escala (VRS, por sus siglas en inglés, Variable Returns to Scale), por lo que se trabajó con modelo DEA-VRS.

Los resultados apuntan a que uno de los principales factores de ineficiencia de las distribuidoras brasileñas está relacionada con el nivel de operaciones (volumen de gas distribuido) de cada compañía. Sin embargo, debido al pequeño tamaño de muestra con el que se realizó el estudio, el modelo DEA se muestra sensible a las características propias de la muestra (factores como el tamaño del país y diferentes

climas y regiones, existe un alto nivel de heterogeneidad entre las empresas que el modelo no logra captar) y a la elección de insumos y productos considerados, por lo anterior, se enfatiza la necesidad de complementar los resultados obtenidos del modelo DEA con juicios cualitativos.

Finalmente, el estudio concluye que el mercado de gas natural en Brasil se está expandiendo rápidamente, debido principalmente a las restricciones ambientales cada vez más estrictas y a las fuentes de producción recién descubiertas. De esta forma, la política en materia de energía en Brasil pretende aumentar la participación de gas natural en su matriz energética y para asegurar un crecimiento sostenible, los reguladores deben proporcionar la legislación y las directrices adecuadas para los agentes implicados, para lo cual el uso de herramientas de *benchmarking* como el DEA son de gran ayuda para evaluar la eficiencia y establecer parámetros de referencia que sirvan esencialmente como indicadores del desempeño de las empresas de distribución y contribuyan a disminuir la asimetría de información entre el regulador y las empresas reguladas.

Para el caso australiano, Carrington, Coelli y Groom (2002), realizaron un estudio de *benchmarking* para el regulador de ese país en donde se complementó la muestra con distribuidoras de gas natural de Estados Unidos, lo anterior debido a la pequeña cantidad de empresas australianas en análisis. En este estudio, se emplearon desde indicadores de productividad parcial, hasta análisis de Fronteras Estocásticas y la Metodología DEA, con el objetivo de robustecer los resultados obtenidos. Para el estudio, se tuvieron ciertas dificultades para contar con la información adecuada, en particular, con la información publicada por cada distribuidora de los costos no relacionados al capital, así como la capacidad de la red. Finalmente derivado del análisis de sensibilidad realizado, se recomienda utilizar los resultados del *benchmarking* en combinación con alguna otra información relevante para el establecimiento del Factor X.

Este es el estado del arte de los estudios de eficiencia productiva utilizando los Índices de Malmquist, particularmente en la actividad de distribución de gas natural a través de ductos. Sin embargo, la aplicación de la herramienta DEA tiene una gran potencial en otros campos. Por citar otro ejemplo, en México, Martínez-Damián, Brambila-Paz y García-Mata (2013) realizaron un estudio de la productividad estatal utilizando índices de Malmquist. Con datos del Producto Interno Bruto por entidad, mano de obra e inventario de capital de 2005 a 2010, se encontró que la productividad nacional está en la frontera eficiente. Respecto a las entidades federativas se encontró que dieciocho están sobre la frontera eficiente, doce la exceden, y sólo dos aparecen por debajo de ella.

Por lo tanto, como se habrá visto en esta sección, la herramienta DEA tiene un gran alcance en estudios de eficiencia-productividad y medición del desempeño, y es precisamente a este fin al cual responde la aplicación empírica que se propone en este trabajo.

1.6. Propuesta para determinar el Factor X.

Como se ha mencionado anteriormente, una de las tareas primordiales de la Comisión, como órgano regulador, es el desarrollo eficiente de la industria, razón por la cual es importante contar con herramientas que permitan medir la eficiencia económica en el sector. Específicamente, para la actividad regulada de distribución de gas natural, se requiere un ejercicio de *benchmarking* para evaluar el desempeño de las distribuidoras con miras a determinar un factor de ajuste por eficiencia productiva X (Factor X), el cual servirá para ajustar las tarifas de cada distribuidora considerando la mejor información disponible, con herramientas que provean resultados robustos y sustentado en el marco legal y regulatorio vigente.

En las secciones anteriores se describieron diferentes opciones para determinar medir la eficiencia productiva en actividades sujetas a regulación económica y se ha planteado la problemática de la que parte esta investigación, por lo tanto, este trabajo tiene por objetivo determinar un factor de ajuste por eficiencia X mediante el índice de Malmquist calculado con base en la metodología del DEA y así determinar no solo la eficiencia de las distribuidoras de gas natural en México, si no en general medir la productividad de cada una de ellas.

Del objetivo planteado es posible desprender los siguientes objetivos específicos que se enumeran a continuación:

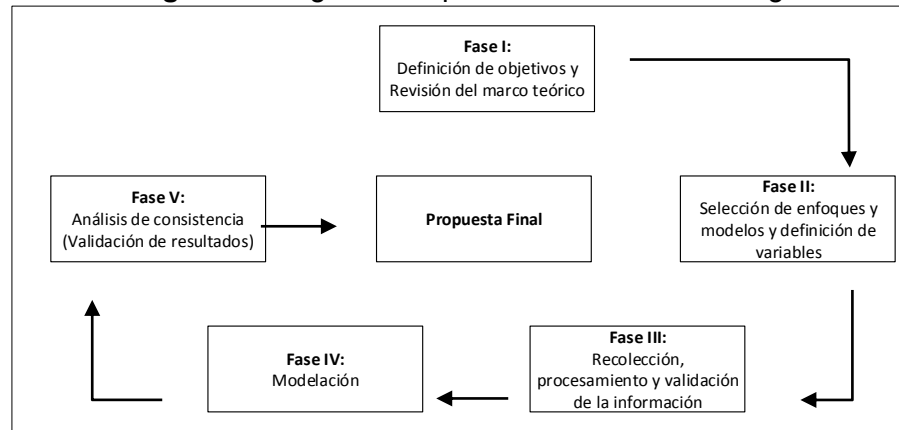
- I. Brindar un panorama general de las principales características de las empresas que brindan el servicio de distribución de gas natural;
- II. Identificar los principales factores que influyen en el desempeño de las distribuidoras de gas natural;
- III. Evaluar el desempeño general de las distribuidoras con base en la frontera o fronteras eficientes de la industria;
- IV. Obtener indicadores que midan la eficiencia de cada distribuidora;
- V. Cuantificar el cambio en la eficiencia técnica de cada distribuidora, mejor conocido como “*catching-up*”²⁶;

²⁶ Se define como cuan cerca de la frontera de eficiencia se ubica la empresa. El objetivo es reflejar que tan capaces son las empresas para emplear los insumos disponibles a partir de la tecnología de producción existente.

- VI. Medir el cambio tecnológico²⁷ de la distribución de gas natural;
- VII. Brindar una perspectiva del posicionamiento de cada una de las distribuidoras en cuanto a su productividad, desempeño y eficiencia de tal forma que sea posible identificar las “mejores” y las “peores” empresas, así como su origen o elementos que afectan su buen o mal desempeño (por ejemplo, incrementos en la eficiencia técnica o por efectos del cambio tecnológico).
- VIII. Presentar una propuesta que sirva como base de cálculo para definir el Factor X a aplicar a cada distribuidora en la determinación de sus tarifas.

Por lo tanto, con el fin de alcanzar los objetivos planteados y conforme al consenso académico y a la experiencia en la realización de este tipo de estudios, la metodología que se siguió para el desarrollo de esta tesis se muestra de manera gráfica a continuación:

Figura 3. Diagrama esquemático de la metodología



Elaboración propia.

Considerando que el objetivo primordial de la tesis, así como sus objetivos secundarios, ya han sido establecidos en este primer capítulo, la primera parte de la fase I ya ha sido realizada. En cuanto a la segunda parte, relativa a la revisión del marco teórico necesaria para la realización del trabajo, está se expondrá en los siguientes dos capítulos: en principio se recogerán las nociones básicas de eficiencia para posteriormente llegar al planteamiento de los diferentes modelos DEA; una vez que se cuenta con las bases, en el tercer capítulo se expondrá la formulación matemática del índice de productividad de Malmquist, mostrando la

²⁷ Se define según cuanto cambie la frontera en combinación de los componentes observados de cada empresa. Es elemento permite mostrar los incrementos de producto que podrían alcanzarse de un período a otro, sin alterar las cantidades de insumo empleadas.

forma en la que pueden obtenerse a través de los modelos DEA y así, estar en posibilidad de aplicarlo para las distribuidoras de gas natural en México.

Finalmente, las siguientes fases (de la segunda a la última) corresponden a la aplicación de la metodología, las cuales se expondrán en el capítulo cuarto de esta investigación.

CAPÍTULO II:

MARCO TEÓRICO DEL ANÁLISIS ENVOLVENTE DE DATOS

Farrell, M.J. (1957) fue uno de los primeros en investigar de manera sistemática el concepto de eficiencia y de establecer una guía para su medición²⁸. Tomando como base el trabajo desarrollado por Farrell, en 1978 Rhodes, Chales, Cooper y Rhodes proponen estimar la frontera de las “mejores prácticas” productivas recurriendo a la programación no lineal paramétrica, para el caso en el que el proceso de transformación se realice a través del empleo de cierto insumos o factores y productos, denominando a esta técnica como Análisis Envolverte de Datos (DEA, del inglés: *Data Envelopment Analysis*). La Metodología DEA es una técnica de programación matemática que permite la construcción de una superficie envolvente, frontera eficiente o función de producción empírica a partir de información disponible de un conjunto de Unidades Productivas o de servicios (denominadas como *Decisión Market Units* ó DMU, de aquí en adelante nos referiremos a ellas como Unidades Productivas o Unidades), de tal forma que las Unidades Productivas que determinan la envolvente son consideradas como Unidades eficientes y aquellas que no permanecen sobre la misma son consideradas Unidades ineficientes. Así, la metodología DEA permite evaluar en términos relativos un conjunto de unidades a partir de información real, es decir, a través de la frontera de referencia es posible definir medidas de eficiencia productiva o establecer cuantías sobre la reducción de entradas y/o incremento de las salidas que la unidad ineficiente debería tratar de promover para convertirse en eficiente (en términos relativos), a través del cálculo de las distancias que median entre cada unidad productiva y dicha frontera.

2.1. *Conceptos esenciales: Productividad & Eficiencia*

2.1.1. *Definición de productividad*

La producción es el acto de transformar insumos en productos. El objetivo de todo proceso productivo es la creación de valor a través de tal proceso de transformación. En estricto rigor, todas las decisiones tomadas sobre la base de

²⁸ Los principales desarrollos de los métodos de estimación de la eficiencia productiva fueron propuestos por Farrell en la discusión de su trabajo. Farrell proporciona una “medida satisfactoria de eficiencia productiva” que tiene en cuenta todos los recursos empleados (inputs), mostrando su aplicación a la producción agrícola de Estados Unidos.

criterios económicos recaen en determinar las combinaciones de canastas de insumos que se utilizarán para producir distintas combinaciones de productos finales. Dicha decisión se debería tomar a partir de algún criterio (o función objetivo) que defina el nivel de desempeño de las distintas opciones posibles. Así, existen dos objetivos complementarios para medir la eficiencia en la utilización de los recursos para la producción a nivel de las Unidades Productivas: 1) producir tanto como sea posible, dados los niveles de insumos disponibles, o bien, 2) utilizar la menor cantidad de recursos posible para transformarlos en un nivel de producción dado.

En términos generales, se entiende por productividad la relación existente entre el (o los) productos y los insumos. Su medición parte de la cuantificación de la producción obtenida y los insumos utilizados en el proceso de transformación productiva.

La representación tradicional para medir la productividad consiste en calcular la relación entre la creación de valor agregado (la producción propiamente dicha: Y) y el valor de los factores productivos x_i , involucrados en el proceso de creación de ese valor. Es así que se pueden definir medidas de productividad parciales (PP):

$$PP_i \equiv \frac{Y}{x_i} \quad \forall i, \text{ factor o insumo} \quad \text{Ecuación 3}$$

Y medidas de productividad total:

$$PT \equiv \frac{Y}{\sum_{i=1}^n \alpha_i x_i} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde α_i es un ponderador, correspondiente a cada insumo. Por ejemplo, si nos restringimos a los factores primarios de producción que considera la teoría económica tradicional (capital K y trabajo L , por ejemplo), tenemos la productividad total de los factores, estaría dada por:

$$PTF \equiv \frac{Y}{\alpha K + \beta L} \quad \text{Ecuación 5}$$

La representación estándar que ofrece la teoría económica neoclásica para medir la productividad, consiste en formular este tipo de relación a través de la función de producción, la cual indica el valor agregado o producto máximo que puede obtenerse a partir de un conjunto de insumos que se utilizan tan eficientemente como sea posible. Un factor objetivo y limitante en la forma que adquiere la función de producción, es la tecnología imperante en el momento al que corresponden los datos con los que se realiza la estimación.

De esta forma, la manera de medir la eficiencia de una Unidad de Producción sería comparar el valor agregado generado por ella con el valor agregado que define la función de producción a idénticos niveles de utilización de los insumos o factores. En tal sentido, la función de producción cumple el rol del ideal teórico con el cual comparar el desempeño de las Unidades. Una aproximación tradicional para realizar este tipo de cálculo, de naturaleza econométrica, es el método de frontera de producción estocástica. En este caso, es necesario suponer una determinada forma funcional explícita (y usualmente parametrizada) para la función de producción. Otra posibilidad es determinar dichos ponderadores a partir de métodos de optimización, la cual es la motivación de este trabajo y se mostrará más adelante.

2.1.2. *Noción de eficiencia*

Una alternativa no paramétrica para calcular la productividad total de los factores, que se basa en el uso de la programación lineal, es a través de la Metodología DEA. Sin embargo, antes de entrar a detallar la metodología, es necesario repasar las nociones de eficiencia productiva y el cálculo de los índices de eficiencia técnica, tal como los planteó Farrell.

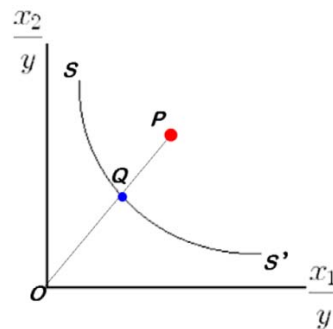
La propuesta de Farrell es visualizar a la eficiencia desde una perspectiva real no ideal, donde cada unidad de producción sea evaluada en relación con otras tomadas de un grupo representativo y comparable. Así, las medidas de eficiencia serían relativas y no absolutas, donde el valor alcanzado por determinada Unidad Productiva, corresponda a una expresión de la desviación observada respecto a aquellas consideradas como más eficientes dada la información disponible. En este sentido, la metodología que propone Farrell es una técnica basada en el concepto de “*benchmark*” o referenciación.

El planteamiento es el siguiente: sea un conjunto más o menos extenso de Unidades Productivas comparables entre sí por la particularidad de que emplean el mismo tipo de insumos o factores para producir una canasta de productos similar o equivalente. Entonces, es posible definir tres medidas de eficiencia: eficiencia técnica, eficiencia asignativa y eficiencia de escala.

- ✓ **Eficiencia Técnica:** Refleja la habilidad de una Unidad Productiva de obtener el máximo nivel de producción dados ciertos niveles en el uso de los insumos o factores (orientación a productos), o bien, dado cierto nivel de producción, minimizar el uso de los insumos (orientación a insumos).

Partiendo del segundo caso (orientación a insumos), supóngase que se produce un sólo producto con dos insumos o factores (ver Figura 4). Considerando la isocuanta unitaria²⁹ (Curva SS'), cualquier Unidad Productiva que utilice combinaciones de insumos que se encuentren por encima de la curva, por ejemplo el punto P , tendrían que ser consideradas como menos eficientes. Por otro lado, el punto Q correspondería a una Unidad Productiva eficiente, puesto que, comparada con P , se reduce la utilización de ambos insumos, en forma equi-proporcional y produce la misma cantidad. Entonces, si medimos la distancia entre P y Q , tendríamos una medida de en cuánto se puede reducir el uso de insumos, sin alterar la producción y calcular el índice de eficiencia técnica.

Figura 4. Eficiencia técnica



Fuente: Schuschny Andrés R..

Matemáticamente, la eficiencia técnica (ET) se define de la siguiente manera:

$$ET \equiv \frac{OQ}{OP} \equiv 1 - \frac{QP}{OP} \in [0,1] \quad \text{Ecuación 6}$$

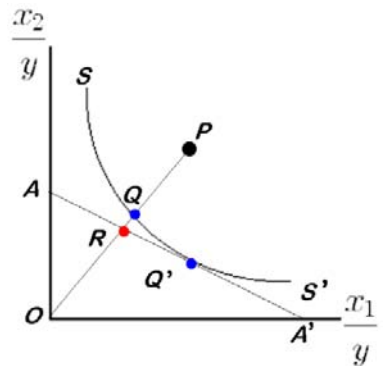
Donde QP es la cantidad en que pueden reducirse equi-proporcionalmente los insumos sin reducir el producto y $\frac{QP}{OP}$ es el porcentaje en que se puede reducir el uso de los insumos.

²⁹ De acuerdo a la teoría económica, la isocuanta es la curva que se deriva de las combinaciones de insumos necesarios para producir una unidad de producto, en condiciones de máxima eficiencia (S).

- ✓ **Eficiencia asignativa:** dados los precios de los insumos, refleja la habilidad de la Unidad Productiva de usar los insumos o factores en proporciones óptimas.

Supóngase ahora, que se cuenta con información de los precios relativos entre los insumos y el producto, entonces sería posible calcular (y graficar) la recta de iso-costos³⁰ (Recta AA' en la Figura 5) para comparar la situación de la Unidad Productiva que estamos analizando con una en la que la adquisición de insumos es económicamente óptima, es decir, aquella en la que la relación de productividades marginales igualan a los precios relativos, o gráficamente, cuando la recta de iso-costos es tangente a la curva (ver Figura 5).

Figura 5. Eficiencia asignativa



Fuente: Schuschny Andrés R..

A partir de allí y, además, calculando distancias se puede definir la eficiencia de asignación. Matemáticamente, la eficiencia asignativa (EA) se define de la siguiente manera:

$$EA \equiv \frac{OR}{OQ} \in [0,1] \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde RQ representa la reducción de los costos de producción si se produce en Q' .

³⁰ Los isocostos son líneas que muestran las combinaciones de los montos de los bienes o de los factores de la producción que se pueden adquirir con el mismo gasto total. Las líneas de isocostos son rectas, afirmándose con esto que la empresa no tiene control sobre los precios de los insumos, aunque los precios sean iguales, no importa cuántas unidades se compren.

Calculados ambos índices de eficiencia, se puede definir el indicador de eficiencia económica³¹:

$$EE \equiv ET * EA \equiv \frac{OR}{OP} \in [0,1] \quad \text{Ecuación 8}$$

Un cálculo similar se puede realizar a partir de una orientación basada en la producción. En este caso, lo que importa es estudiar en cuánto puede expandirse la producción, dados los niveles de uso de los insumos o factores.

En las definiciones anteriores, la comparación de los indicadores de eficiencia técnica se realiza asumiendo que todas las Unidades Productivas se encontraban operando en escala óptima, con rendimientos constantes a escala³². Así, cuando la tecnología es tal que los rendimientos a escala son constantes, el valor del indicador de eficiencia técnica es el mismo independientemente del tipo de orientación (insumo o producto) considerado. Sin embargo, no todas las empresas operan a un nivel óptimo, por lo que es necesaria una última definición de eficiencia:

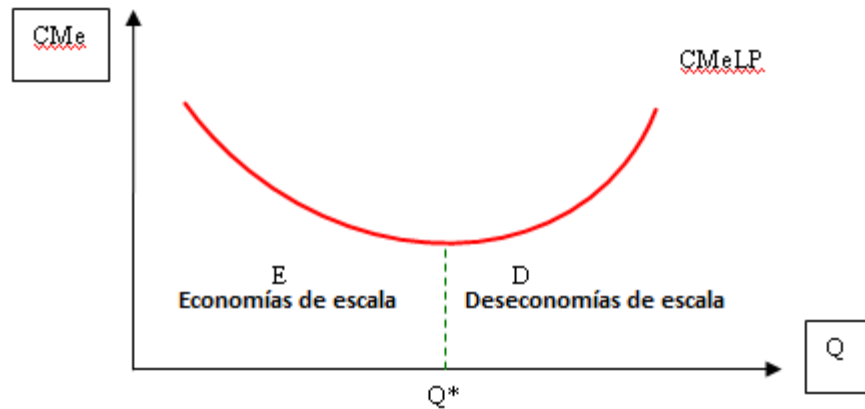
- ✓ **Eficiencia de escala:** se refiere a las empresas técnicamente eficientes cuyo nivel de operación (tamaño) es tal que le permite mejorar su nivel de ingresos o productividad mediante la mejor adecuación de su estructura productiva al volumen de producción. Es decir, se manifiesta según la naturaleza de los rendimientos a escala con que opera una Unidad Productiva. Los rendimientos a escala³³ indican los incrementos de la producción que son resultado del incremento simultáneo y equi-proporcional de todos los factores.

³¹ La eficiencia productiva o económica se define como la capacidad de la empresa para producir un determinado nivel de producto a un costo mínimo.

³² Más adelante, en la identificación de modelos se hablará al respecto.

³³ Este concepto será tratado con mayor detalle en las siguientes secciones.

Figura 6. Economías de escala



Elaboración propia

Los rendimientos a escala pueden ser constantes, cuando la producción se incrementa a la misma proporción que los cambios en los factores, crecientes, cuando el incremento porcentual de la producción es mayor al de los insumos y decrecientes, cuando es menor, tal como se muestra en la Figura 6.

2.2. Generalidades del Análisis Envolvente de Datos DEA.

Conforme con lo visto en la sección anterior, para alcanzar el costo mínimo, la empresa o Unidad Productiva debe emplear sus insumos en forma eficiente (eficiencia técnica) y debe elegir la combinación de los insumos en forma óptima, dado el precio relativo de éstos (eficiencia asignativa). Sin embargo, se observa que todas estas medidas fueron definidas bajo el supuesto de que se conoce la frontera de posibilidades de producción o las isocuantas en condiciones de óptima eficiencia.

La propuesta que sugiere Farrell, es recurrir al uso de “cónicas o poligonales convexas” para construir las isocuantas o fronteras, en forma no paramétrica, y sólo partiendo de la información disponible acerca del comportamiento de numerosas Unidades Productivas comparables, muchas de las cuales serán más eficientes que otras. Así, la propuesta se basa en un enfoque empírico basado en el concepto de referenciación o *benchmark* que consiste de estimar y ubicar Unidades Productivas “virtuales”, a partir de buenas Unidades Productivas comparables con la que deseamos estudiar. Por tanto, el método de Análisis Envolvente de Datos (*Data Envelopment Analysis – DEA*) es una técnica, basada en la programación matemática que, dada una muestra de Unidades Productivas, permite identificar

aquellas otras que sirven para construir la Unidad Productiva “virtual” con la que se comparará la Unidad Productiva bajo análisis.

2.2.1. Criterios de clasificación de los modelos DEA

Los modelos DEA se clasifican conforme a los siguientes criterios:

- a. Por el tipo de medida que eficiencia que proporcionan: modelos radiales y no radiales.
- b. Dependiendo de la orientación del modelo: Orientado a insumos (*input*), orientado a productos (*output*) u orientado a insumos y productos (*input-output*).
- c. Conforme a la tipología de los rendimientos a escala que caracterizan la tecnología de producción³⁴: rendimientos a escala constantes o variables a escala.

A. Modelos en función de la orientación del modelo

De acuerdo a Charnes, Cooper y Rhodes (1981), la eficiencia puede ser caracterizada con relación a dos orientaciones (o direcciones) básicas:

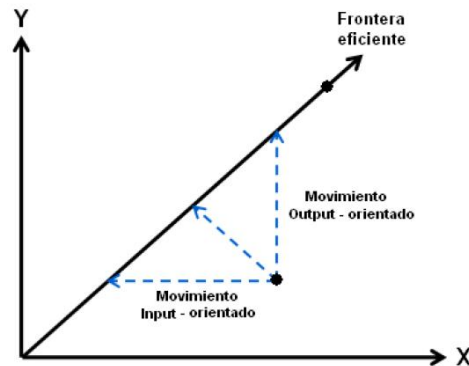
1. Orientados a insumos: dado un determinado nivel de producción, se busca la máxima reducción proporcional en el vector de los insumos, mientras se mantiene en la frontera de posibilidades de producción. En otras palabras, una Unidad de Producción no es eficiente si es posible disminuir cualquier insumo sin alterar su producción.
2. Orientados a productos: dado un determinado nivel de insumos, el máximo incremento proporcional de los productos permaneciendo dentro de la frontera de posibilidades de producción. En este sentido, una unidad de producción no puede ser considerada como eficiente si es posible incrementar cualquier producto sin incrementar ningún insumo y sin disminuir ningún otro producto.

Así, de acuerdo con la orientación del modelo, una Unidad de Producción será considerada eficiente si y solo si no es posible incrementar las cantidades de output manteniendo fijas las cantidades de insumos utilizadas, ni es posible disminuir las cantidades de insumos empleadas sin alterar las cantidades de outputs obtenidas.

³⁴ Esta se entiende como la forma (procedimientos técnicos) en que los factores productivos (inputs) son combinados para obtener un conjunto de productos (outputs).

Supongamos la situación más simple, se obtiene un solo producto con solo un insumo (Figura 7) y dos Unidades Productivas (A y B). Como se puede apreciar, la frontera eficiente ha sido definida por la unidad B, por lo que la unidad A es considerada técnicamente ineficiente.

Figura 7. Eficiencia técnica bajo rendimientos constantes a escala



Fuente: González Robinson A.

Con el fin de aumentar el índice de eficiencia de la unidad A, se plantean las diferentes opciones en las que esta unidad podría alcanzar la eficiencia (ubicarla sobre la frontera eficiente):

- Si el interés de la unidad es el de aumentar su productividad manteniendo constantes los niveles de producto, entonces el único camino es la reducción (minimizar) en los niveles de insumo utilizado: orientación a insumos;
- Por otra parte, si el objetivo es aumentar la productividad manteniendo constante el nivel de insumo, entonces se deberá procurar aumentar (maximizar) la cantidad de producto: orientación a productos; y finalmente;
- Cabe la posibilidad de considerar una tercera opción: modificar simultáneamente los niveles de insumo y producto. Estos corresponden a los denominados modelos no orientados (también conocidos como orientación *input-output*), en donde tanto insumos como productos son controlables, donde se busca simultáneamente la reducción de los insumos y la expansión de los productos equiproporcional y que dan lugar a las medidas de eficiencia “hiperbólica” (Färe, Grosskopf y Lovell, 1985). Sin embargo, en la práctica este tipo de enfoque es de difícil aplicación ya que no siempre es posible controlar de forma simultánea las cantidades de insumos (*inputs*) y productos (*Outputs*).

Una observación importante es que bajo el supuesto de rendimientos a escala constantes, las medidas de eficiencia técnica orientadas a *input* coinciden con las orientadas a *output*.

B. Tipología de los rendimientos a escala

Uno de los primeros pasos para evaluar la eficiencia de un conjunto de Unidades Productivas, es identificar la tipología de los rendimientos a escala que caracteriza la tecnología de la producción.

Los rendimientos a escala, que indican los elementos de la producción que son resultado del incremento de todos los factores de producción (insumos y productos) en el mismo porcentaje, pueden ser constantes, crecientes o decrecientes:

1. Rendimientos constantes a escala: cuando el incremento porcentual del *output* es igual al incremento porcentual de los recursos productivos.
2. Rendimientos crecientes a escala (o economías de escala): se dice que la tecnología exhibe este tipo de rendimientos cuando el incremento porcentual del *output* es mayor que el incremento porcentual de los factores.
3. Rendimientos decrecientes a escala (o des-economías de escala): cuando el incremento porcentual del *output* es menor que el incremento porcentual de los *inputs*.

Matemáticamente, se expresaría de la siguiente manera:

Sea $f(x)$ la función (tecnología) de producción para el vector de insumos x , y c una constante la cual representa la variación porcentual de los factores de producción. Entonces, derivado de considerar la siguiente relación $f(cx) = c^n f(x)$; si $n = 1$ implica Rendimientos Constantes a Escala (CRS); si $n > 1$ se tiene rendimientos crecientes y; si $n < 1$ implica rendimientos decrecientes.

La valoración de los rendimientos a escala tanto variables, como constantes para cada una de las unidades evaluadas, es un aspecto que influye de forma importante en la correcta selección del modelo DEA.

2.3. Formulación matemática del DEA

Como se vio en la sección precedente, los modelos DEA se distinguen, básicamente, por la naturaleza de la medida de eficiencia, la orientación del modelo para calcularla y la tipología de los rendimientos a escala que caracterizan la frontera eficiente.

A continuación se expone tanto el modelo básico DEA-CCR (modelo con Rendimientos Constantes a Escala), como la variación más importante de este DEA-BCC (modelo con rendimientos variables).

2.3.1. Modelo básico: DEA con rendimientos constantes a escala (DEA – CCR)

El primero de los modelos DEA desarrollados fue denominado DEA-CCR en honor a sus desarrolladores, Charnes, Cooper y Rhodes (1978). Este modelo proporciona medidas de eficiencia radial, tanto para modelos *input* como para modelos *output* orientados, supone convexidad y elimina de sobremanera *inputs* y *outputs* a la hora de definir la frontera. Se utiliza cuando las unidades evaluadas presentan rendimientos constantes a escala.

El DEA-CCR puede ser planteado de tres formas distintas: fraccional (cociente), multiplicativa y envolvente. Para la formulación del modelo se considerará el caso con orientación a productos y posteriormente se planteará el modelo para la orientación a insumos.

Sea F , un conjunto de Unidades Productivas a ser evaluadas. Se parte de analizar la situación de la f –ésima Unidad Productiva (UP_f). Supóngase que el proceso de producción es tal que se basa en la utilización de n insumos o factores primarios para producir m productos. Entonces la UP_f utiliza la canasta de insumos: $X'_f = (x_{1f}, \dots, x_{nf})$ para producir $Y'_f = (y_{1f}, \dots, y_{mf})$, con $X_f \in R^{n \times 1}$ el vector de insumos y $Y_f \in R^{m \times 1}$ el vector de productos.

El problema matemático consiste en encontrar los ponderadores (o precios sombra) de los productos e insumos, respectivamente: $U'_m = (u_1, \dots, u_m)$ y $V'_n = (v_1, \dots, v_n)$ y que hacen máxima la productividad total media³⁵ de la unidad productiva $f(UP_f)$, sujeta a la restricción de que (con esos ponderadores) en ningún caso, la productividad media de cualquier otra de las Unidades Productivas del conjunto (UP_z) pueda superar la unidad. Lo anterior asegura que el conjunto de productos (deseables) es menor o igual al conjunto de recursos necesarios para obtener los

³⁵ Es decir, la productividad ponderada por esos valores.

productos. En forma matemática, esto consiste en resolver el siguiente problema de optimización (forma fraccional):

Modelo 1 :

$$\max_{V,U} \left\{ UP_f = \frac{\sum_{j=1}^m u_j y_{jf}}{\sum_{i=1}^n v_i x_{if}} = \frac{U'_m \cdot Y_f}{V'_n \cdot X_f} \right\}$$

Sujeto a

$$\frac{\sum_{j=1}^m u_j y_{jz}}{\sum_{i=1}^n v_i x_{iz}} = \frac{U'_m \cdot Y_z}{V'_n \cdot X_z} \leq 1 \quad \forall 1 \leq z \leq F;$$

$$v_i \geq 0, \quad \forall 1 \leq i \leq n;$$

$$u \geq 0, \quad \forall 1 \leq j \leq m$$

El *Modelo 1* pretende obtener el conjunto óptimo de pesos (o multiplicadores) $\{u_i\}$ y $\{v_j\}$ que maximicen la eficiencia relativa de UP_f , definida como el cociente entre la suma ponderada de los productos (Y_f) y la suma ponderada de los insumos (X_f), sujeto a la restricción de que ninguna UP puede tener una puntuación de eficiencia mayor que uno, usando esos mismos pesos. Evidentemente, los pesos serán diferentes entre las distintas Unidades Productivas.

Si la solución óptima es $UP_f^* = 1$, indicará que dicha Unidad en evaluación es eficiente en relación con otras unidades. Si $UP_f^* < 1$, la Unidad Productiva será ineficiente. En este caso, las UP que con los mismos pesos v_j y u_i asignados a la UP ineficiente que esta siendo evaluada resulten ineficientes se denominan pares. Estos pares constituyen el denominado conjunto de referencia eficiente de la UP ineficiente, es decir, constituyen la referencia para la mejora de la UP ineficiente.

En el *Modelo 1* se puede observar que la función objetivo no es lineal, lo cual complica el cálculo del óptimo. Además, también se aprecia que existen infinitas soluciones del mismo, ya que si se multiplica por un factor cualquiera, por ejemplo k , tanto al vector de ponderadores de los insumos (kV'_n) como al de productos (kU'_m), el problema queda invariante, es decir, el modelo proporciona un número infinito de soluciones, ya que si v^* y u^* son soluciones óptimas también lo serán kv^* y ku^* , para cualquier $k > 0$. El problema anterior puede ser "linealizado" siguiendo la transformación lineal de Charnes y Cooper (1962), que selecciona la solución (μ, δ) tal que $\sum_{i=1}^n \delta_i x_{if} = 1$. Realizando dicho cambio de variable se tiene:

$$\mu_j = k \cdot u_j$$

$$\delta_i = k \cdot v_i \text{ Para } k > 0$$

$$k \equiv \frac{1}{\sum_{i=1}^n v_i x_{if}}$$

Ecuación 9

Sustituyendo lo anterior en el modelo, se obtiene el problema lineal equivalente, conocido como modelo en forma multiplicativa, el cual se escribe como se muestra a continuación:

Modelo 2

$$\text{Max}_{\mu, v} \left\{ UP_f = \sum_{i=1}^m \mu_j y_{jf} \right\}$$

Sujeto a

$$\sum_{i=1}^n \delta_i x_{if} = 1$$

$$\sum_{j=1}^m \mu_j y_{jz} - \sum_{i=1}^n \delta_i x_{iz} \leq 0, \quad \forall 1 < z < F$$

$$\mu_i, \delta_j \geq \varepsilon$$

Así, el insumo virtual ha sido normalizado a la unidad, $\sum_{i=1}^n \delta_i x_{if} = 1$, esta se conoce como restricción de normalización. Por lo tanto, se tiene un problema de optimización lineal estándar, de $F + 1$ restricciones lineales y $n + m$ restricciones de no negatividad, teniendo en cuenta que el problema tiene que ser resuelto para cada una de las UP .

2.3.2. Modelo DEA-CCR en forma envolvente

Teniendo en cuenta que para todo problema lineal original (problema primal) existe su representación dual, que puede ser utilizado para determinar la solución del problema primal, en la siguiente Tabla se presenta la correspondencia entre el modelo primal y el modelo dual:

Tabla 3. Modelo DEA, forma envolvente

Restricción primal Modelo 1	Variable dual Modelo 2	Restricción dual Modelo 2	Variable primal Modelo 1
$\sum_{i=1}^n v_i x_{iz} = 1$	θ	$\sum_{j=1}^m x_{ij}\gamma_j \leq \theta x_{iz}$	$v_i > 0$
$\sum_{j=1}^m \mu_j y_{jz} - \sum_{i=1}^n \delta_i x_{iz} \leq 0$	$\gamma_j \geq 0$	$\sum_{j=1}^m y_{ij}\gamma_j \geq y_{iz}$	$\mu_j > 0$

Fuente: Cooper William

Recordando que existe una variable dual por cada restricción primal y una restricción dual por cada variable primal, el modelo DEA-CCR con orientación a insumos en su forma envolvente se formula de la siguiente manera:

Modelo 3

$$\theta^* = \min_{\theta, \gamma_z} \theta$$

Sujeto a

$$\sum_{j=1}^m x_{ij}\gamma_j \leq \theta x_{if}, \forall 1 < i < n$$

$$\sum_{j=1}^m y_{ij}\gamma_j \geq y_{if}, \forall 1 < j < m$$

$$\gamma_j \geq 0$$

Donde θ es una escalar y γ un vector de constantes. En este caso habrá $n + m$ restricciones lineales y N de no negatividad, es decir, un número menor de restricciones que en la representación primal. Este problema permite determinar las Unidades Productivas a partir de las cuales se construirá la unidad productiva “virtual” a comparar con UP_f . Para conocer las unidades “eficientes” asociadas a las demás Unidades Productivas se debe resolver un problema similar; por esta razón el ejercicio debe repetirse N veces (una vez para cada unidad productiva).

Dado que el problema se resolvió para la f – ésima Unidad Productiva, el vector γ^* (óptimo) representa el vector de coeficientes de la combinación lineal con la que se construye la unidad productiva “virtual” a partir de las demás mejores Unidades Productivas reales y que se compara con la verdadera f – ésima Unidad Productiva, para calcular la eficiencia de esta última. Así mismo, los vectores $\hat{x}_f = \gamma X$ e $\hat{y}_f = \gamma Y$ representan los vectores de insumos y productos de la unidad productiva “virtual”. Por otro lado, se debe cumplir que el valor óptimo, es el que indica el factor de escala por el cual la producción se puede expandir equi-

proporcionalmente. Es decir, este indicador representa el nivel de eficiencia técnica (de acuerdo con Farrell) de la f – ésima Unidad Productiva:

$$ET_f = \theta_f^* \tag{Ecuación 10}$$

Por otra parte, si la solución óptima dada por el *Modelo 3* resulta ser $\theta^* = 1$, entonces la *UP* que está siendo evaluada es eficiente de acuerdo con la definición de Farrell. En caso contrario, si la *UP* es ineficiente, es decir, es posible obtener a partir de los valores una combinación de Unidades Productivas que “funcione mejor” que la *UP* que ha sido evaluada. En esta primera etapa, la solución óptima del problema dual, puede generar eficiencia débil en el caso de que las variables de holgura de entradas (s_i^-) y las variables de holgura de salidas (s_i^+) sean diferentes de cero.

Definición DEA débilmente eficiente: El desempeño de la Unidad productiva f es débilmente eficiente si y solo si se cumple: 1) $\theta^* = 1$ y, 2) $s_i^- \neq 0$ y/o $s_i^+ \neq 0$ para alguna i y j en alguna solución óptima alterna.

Para evitar la existencia de eficiencia débil, se plantea una segunda etapa para la evaluación de la eficiencia, la cual consiste en encontrar una solución que maximice la suma de excesos en las entradas y faltantes en las salidas, mientras se mantiene fijo θ^* . El programa lineal que se plantea es el siguiente:

Modelo 4

$$\max_{\theta, \gamma, s_i^-, s_i^+} = \sum_{i=1}^m s_i^- + \sum_{j=1}^m s_j^+$$

Sujeto a

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} \gamma_j + s_i^- = \theta^* x_{if} \quad \forall 1 < i < n$$

$$\sum_{i=1}^m y_{ij} \gamma_j - s_i^+ = y_{if} \quad \forall 1 < i < n$$

$$\gamma_i, s_i^-, s_i^+ \quad \forall i, j, r$$

En esta segunda fase, una Unidad Productiva es llamada CCR eficiente (eficiencia técnica y eficiencia de mezcla), si una solución óptima $(\theta^*, \gamma^*, s_i^-, s_i^+)$ de las dos fases anteriores satisface que $\theta^* = 1$ y todas las holguras son cero ($s_i^- = s_i^+ = 0$), de lo contrario la Unidad Productiva es ineficiente. Bajo estas condiciones, la solución óptima presenta eficiencia en el sentido de Pareto–Koopmans, la cual

establece que una Unidad Productiva es eficiente si y solo si no es posible desmejorar ninguna de sus entradas y salidas sin desmejorar otra(s) entrada(s) o salida(s).

Definición DEA eficiente: El desempeño de una Unidad Productiva f es totalmente eficiente (100%) si y solo si se cumple: 1) $\theta = 1$ y 2) todas las holguras $s_i^- = s_i^+ = 0$.

El problema dual, al que se refiere como forma envolvente, expresado como un modelo único a resolver en un modelo de dos etapas es:

$$\begin{aligned}
 & \text{Modelo 5} \\
 & \min_{\theta, \gamma, s_i^-, s_i^+} \theta - \varepsilon \left(\sum_{i=1}^m s_i^- + \sum_{j=1}^m s_j^+ \right) \\
 & \text{Sujeto a} \\
 & \sum_{i=1}^n x_{ij} \gamma_j + s_i^- = \theta^* x_{if} \quad \forall 1 < i < n \\
 & \sum_{i=1}^m y_{ij} \gamma_j - s_i^+ = y_{if} \quad \forall 1 < i < n \\
 & \sum_{i=1}^m \gamma_j = 1 \\
 & \gamma_i, s_i^-, s_i^+ \quad \forall i, j, r
 \end{aligned}$$

2.3.3. *Modelo DEA con rendimientos variables a escala (DEA –BCC): descomposición de la eficiencia técnica en eficiencia técnica pura y eficiencia de escala.*

Tal y como se abordó en la primera sección de este capítulo para evaluar la eficiencia de un conjunto de Unidades Productivas es necesario identificar la naturaleza de los rendimientos a escala que caracterizan la tecnología de producción³⁶.

Este modelo fue desarrollado por Banker, Charnes y Cooper (1984). El BCC relaja el supuesto de Rendimientos Constantes a Escala considerado en el modelo CCR

³⁶ Recordando, los rendimientos a escala indican los incrementos de la producción que son resultado del incremento de todos los factores de producción en el mismo porcentaje y pueden ser constantes, crecientes o decrecientes.

y permite, por tanto, la posibilidad de que las UP presenten Rendimientos Variables a Escala.

La formulación dual del modelo BCC orientado a insumos es similar al modelo CCR, pero incluye la restricción adicional $\sum_{i=1}^m \gamma_j = 1$, la cual junto con la restricción $\gamma_j \geq 0$ para toda j , impone una condición de convexidad al conjunto de producción posible. Por tanto, el modelo dual expresado como un modelo único a resolver en un proceso de dos etapas, puede escribirse como:

$$\begin{aligned}
 & \text{Modelo 6} \\
 & \min_{\theta, \gamma, s_i^-, s_i^+} \theta - \varepsilon \left(\sum_{i=1}^m s_i^- + \sum_{j=1}^m s_j^+ \right) \\
 & \text{Sujeto a} \\
 & \sum_{i=1}^n x_{ij} \gamma_j + s_i^- = \theta^* x_{if} \quad \forall 1 < i < n \\
 & \sum_{i=1}^m y_{ij} \gamma_j - s_i^+ = y_{if} \quad \forall 1 < i < n \\
 & \sum_{i=1}^m \gamma_j = 1 \\
 & \gamma_i, s_i^-, s_i^+ \quad \forall i, j, r
 \end{aligned}$$

Esta restricción adicional, además, permite descomponer la eficiencia en dos. Primero, la eficiencia técnica pura para cada Unidad Productiva calculada bajo el modelo BCC y segundo, la eficiencia de escala, que es el resultado del cociente de los coeficientes de eficiencia calculados con el modelo CCR y el modelo BCC. Si existen diferencias entre las dos mediciones de eficiencia para cada Unidad, significa que dicha UP posee ineficiencia de escala. Esta descomposición es única y describe las fuentes de ineficiencias, es decir, si ésta es causada por una operación ineficiente (BCC) o por condiciones desventajosas mostradas por la eficiencia de escala o por ambas.

En conclusión, una UP se considera como BCC eficiente si tiene eficiencia de escala y eficiencia técnica, y una UP se considera CCR eficiente si tiene eficiencia técnica.

Hasta aquí se cuenta con las bases teóricas sobre la Metodología DEA, a través de la cual es posible obtener indicadores de eficiencia para un momento dado en el tiempo. Sin embargo, es de vital relevancia observar los cambios a lo largo de un

periodo y poder identificar las distribuidoras que mejor desempeño ha tenido en términos de su eficiencia. Por lo tanto, el siguiente capítulo está enfocado a presentar los índices de Malmquist, el cual es la propuesta a considerar para estimar los cambios de la productividad a lo largo del tiempo de las distribuidoras de gas natural en México, que como se detallará más adelante, dichos índices pueden ser calculados mediante la metodología DEA.

CAPÍTULO III: ÍNDICES DE PRODUCTIVIDAD DE MALMQUIST

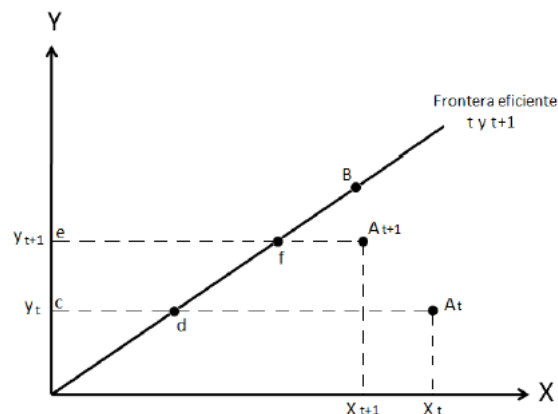
3.1. Medición del cambio productivo y tecnológico a lo largo del tiempo

Suponga que se desea analizar lo que sucede a lo largo del tiempo, durante distintos períodos, para conocer cómo evolucionan, en términos de eficiencia, las distintas Unidades de Producción. Dado que, en este caso, la tecnología imperante no se puede considerar como inmutable, surge la posibilidad de que, además de cambiar los niveles de eficiencia técnica, puede acontecer el cambio tecnológico, es decir el desplazamiento de la frontera tecnológica propiamente dicha.

Con el fin de explicar esta idea de forma simple, se ha supuesto una situación en la cual dos unidades producen un producto a partir de la utilización de un solo insumo. Para este caso, se ha considerado que el proceso productivo está caracterizado por una relación de rendimientos a escala constante.

Considérese una situación en la que se estudian los cambios entre dos períodos de tiempo, digamos los instantes t y el $t + 1$.

Figura 8. Cambio productivo

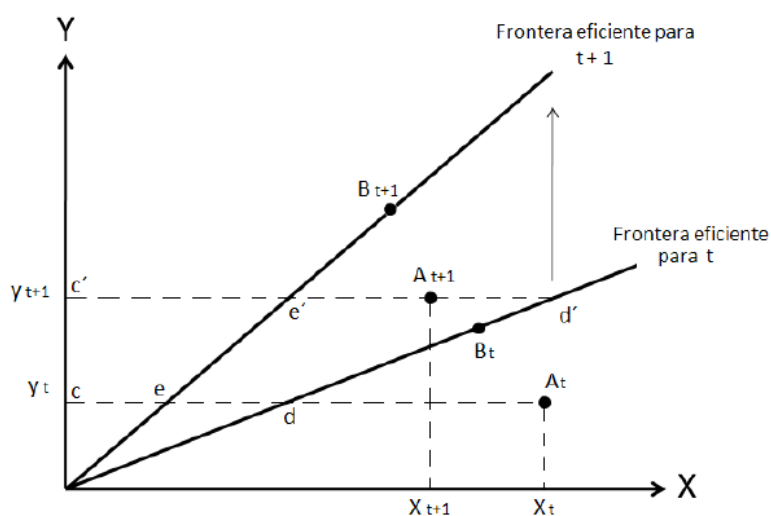


Fuente: González Robinson A.

En ambos casos, la frontera de eficiencia ha sido definida por la unidad B y como se puede ver en la figura de arriba, esta frontera no ha cambiado de un instante al otro. Debido a esto, la variación en la productividad en cualquiera de las unidades evaluadas, se debe exclusivamente al cambio de la eficiencia técnica en el tiempo. En otras palabras, no se ha presentado ningún tipo de mejora tecnológica.

Así, sería posible analizar la información considerando cuatro posibilidades. Por un lado, se podrían comparar los datos de las Unidades Productivas que operaron en t con la tecnología que existía en ese mismo momento t , o con la que surgió en el período siguiente $t + 1$. También sería posible comparar la información de las Unidades Productivas en $t + 1$ a partir de las tecnologías en t ó $t + 1$. Si se pudieran realizar estos cuatro análisis, sería posible discriminar entre aquellos cambios debidos a incrementos (o caídas) en la eficiencia técnica (es decir, el grado de acercamiento a la frontera óptima, lo que en la jerga económica se denomina como convergencia o *catching-up*) y el cambio tecnológico (es decir, el desplazamiento de la frontera propiamente dicha).

Figura 9. Índices de Malmquist



Fuente: González Robinson A.

Es posible realizar este tipo de análisis mediante el uso de los índices de Malmquist. Estos números índice fueron inicialmente desarrollados por Malmquist (1953) con el objetivo de representar relaciones tecnológicas en espacios multi-producto y multi-insumos y permitir analizar los cambios a lo largo del tiempo. Se basan en el cálculo de distancia. Al igual que en la Metodología DEA es posible definir funciones distancia orientadas a insumos (*input distance functions*) que caracterizan una tecnología por la contracción proporcional mínima del vector de insumos dado el de productos u orientadas a la producción (*output distance functions*) que consideran la expansión proporcional máxima del vector de producción, dados los insumos utilizados.

Sea una tecnología de producción que cambia a lo largo del tiempo: S_t , con $t = 1, \dots, T$, representada por el conjunto tecnológico de $n + m$ dimensiones:

$$S_t = \{(x_t, y_t): x_t \in R_+^n, \text{ pueden producir } y_t \in R_+^m\} \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde x_t representa el vector de insumo e y_t el de productos. El conjunto S_t incluye la información que se dispone de todas las Unidades de Producción que operan en el período t . Entonces, considerando la aproximación orientada al producto, es posible calcular la función distancia para un punto dado (una *UP*) que resida dentro del conjunto tecnológico del período t , esto es:

$$D_t^0(x_t, y_t) = \inf \left[\theta: \left(x_t, \frac{y_t}{\theta} \right) \in S_t \right] \equiv \{ \sup [\theta: (x_t, \theta y_t) \in S_t] \}^{-1} \leq 1 \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde $D_t^0(x_t, y_t)$ es la función distancia del punto (x_t, y_t) , dada la tecnología en t . Matemáticamente, esto corresponde a la inversa del incremento maximal equiproporcional de todos los productos dados los insumos. Detrás de esta definición, lo que se está haciendo es comparar dicho punto (*UP*) con aquel que yace en la frontera mediante la expansión equiproporcional de la producción de tal punto.

Análogamente, se puede definir una función distancia a partir de una aproximación orientada a los insumos como:

$$D_t^i(x_t, y_t) = \sup \left[\omega: \left(\frac{x_t}{\omega}, y \right) \in S_t \right] \quad \text{Ecuación 13}$$

En ambos casos, el valor de estas distancias es igual a 1 (uno) si el punto considerado (*UP*), se aloja en la frontera eficiente ya que, en este caso, no sería necesaria ninguna expansión de las producciones o contracciones de los insumos.

Es posible demostrar que bajo rendimientos constantes a escala, ambas medidas son equivalentes, es decir:

$$D_t^0(x_t, y_t) = D_t^i(x_t, y_t)^{-1} \quad \text{Ecuación 14}$$

Con información correspondiente a dos períodos de tiempo es posible calcular las distancias de cada punto, en cada período, considerando las tecnologías disponibles de cada período, es decir, estimar:

$$D_t^0(x_t, y_t), D_{t+1}^0(x_{t+1}, y_{t+1}), D_{t+1}^0(x_t, y_t), D_t^0(x_{t+1}, y_{t+1}) \quad \text{Ecuación 15}$$

Una vez calculadas las funciones distancia, se pueden definir los índices de Malmquist como:

$$M_t^0 = \frac{D_t^0(x_{t+1}, y_{t+1})}{D_t^0(x_t, y_t)} \text{ y } M_{t+1}^0 = \frac{D_{t+1}^0(x_{t+1}, y_{t+1})}{D_{t+1}^0(x_t, y_t)} \quad \text{Ecuación 16}$$

Cada índice mide el cambio de productividad debido a cambios en la eficiencia entre t y $t + 1$ dadas las tecnologías en t (o en $t + 1$), según el caso. Dado que no hay porque priorizar un índice respecto del otro, Färe (1994) calculan la media geométrica entre ambos índices, o sea el índice de Fisher respectivo:

$$M_t^0(x_{t+1}, y_{t+1}; x_t, y_t) = \sqrt{\frac{D_t^0(x_{t+1}, y_{t+1})}{D_t^0(x_t, y_t)} \cdot \frac{D_{t+1}^0(x_{t+1}, y_{t+1})}{D_{t+1}^0(x_t, y_t)}} \quad \text{Ecuación 17}$$

Aplicando un poco de matemática elemental, es muy fácil comprobar que:

$$M_t^0(x_{t+1}, y_{t+1}; x_t, y_t) = \frac{D_{t+1}^0(x_{t+1}, y_{t+1})}{D_t^0(x_t, y_t)} \sqrt{\frac{D_t^0(x_{t+1}, y_{t+1})}{D_{t+1}^0(x_{t+1}, y_{t+1})} \cdot \frac{D_t^0(x_t, y_t)}{D_{t+1}^0(x_t, y_t)}} \quad \text{Ecuación 18}$$

Y rotulando cada factor, tenemos:

$$M_t^0(x_{t+1}, y_{t+1}; x_t, y_t) = E(x_{t+1}, y_{t+1}; x_t, y_t) * T(x_{t+1}, y_{t+1}; x_t, y_t) \quad \text{Ecuación 19}$$

Dado que en el primer factor ($E(x_{t+1}, y_{t+1}; x_t, y_t)$) se comparan las distancias a la frontera de una *UP* en $t + 1$ (dadas las tecnologías en $t + 1$), respecto de los puntos de la misma *UP* en t (supuestas las tecnologías en t), se está midiendo el grado de convergencia relativo a la frontera (*Catch-up*; convergencia a la eficiencia técnica), es decir, se mide el cambio en la eficiencia técnica entre ambos períodos. Si se cumple que $E(x_{t+1}, y_{t+1}; x_t, y_t) > 1$ se registra un incremento de eficiencia (y viceversa). Asimismo, el factor $T(x_{t+1}, y_{t+1}; x_t, y_t)$, mide la derivada relativa de la frontera tecnológica entre t y $t + 1$ (cambio tecnológico o “innovación”) pues compara las distancias de la *UP* en un mismo tiempo, dadas las dos tecnologías, respectivamente.

En general, se tienen los siguientes casos

- A) Si $M_t^0(x_{t+1}, y_{t+1}; x_t, y_t) > 1$, la Unidad productiva está progresando;
- B) Si $M_t^0(x_{t+1}, y_{t+1}; x_t, y_t) < 1$, la Unidad productiva está rezagada; y
- C) Si $M_t^0(x_{t+1}, y_{t+1}; x_t, y_t) = 1$, la Unidad productiva no presenta ningún cambio.

3.2. Cálculo de los índices de Malmquist a partir de la metodología DEA

Aplicando la metodología DEA es posible calcular:

$$D_t^0(x_t, y_t), D_{t+1}^0(x_{t+1}, y_{t+1}), D_{t+1}^0(x_t, y_t), D_t^0(x_{t+1}, y_{t+1}) \quad \text{Ecuación 20}$$

y, a partir de allí, los índices de Malmquist, para cada UP. Según el caso, el tipo de problema de optimización lineal a resolverse será (Färe, 1994):

$$\begin{aligned}
 [D_t^0(x_t, y_t)]^{-1} &= \max_{\theta, \omega} \theta \quad \text{sujeto a} & [D_t^0(x_{t+1}, y_{t+1})]^{-1} &= \max_{\theta, \omega} \theta \quad \text{sujeto a} \\
 -\theta \cdot y_t^f + Y_t \cdot \omega &\geq 0 & -\theta \cdot y_{t+1}^f + Y_t \cdot \omega &\geq 0 \\
 x_t^f - X_t \cdot \omega &\geq 0 & x_{t+1}^f - X_t \cdot \omega &\geq 0 \\
 \omega_j \geq 0, & \quad 1 \leq i \leq N & \omega_j \geq 0, & \quad 1 \leq i \leq N
 \end{aligned}$$

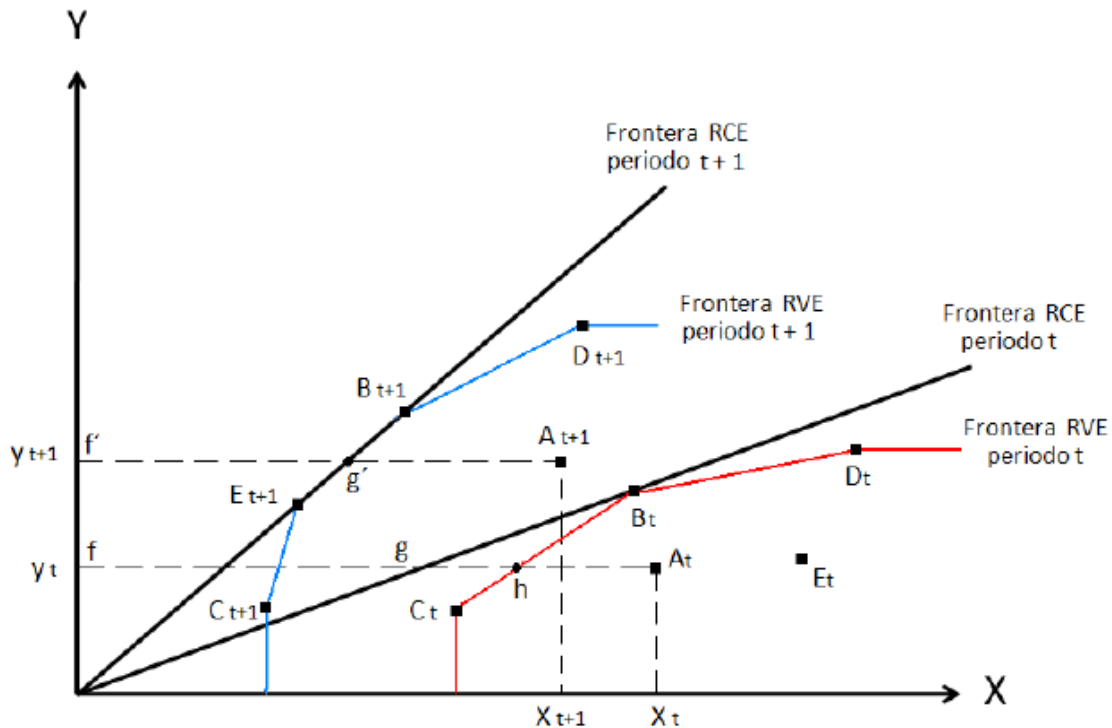
$$\begin{aligned}
 [D_{t+1}^0(x_{t+1}, y_{t+1})]^{-1} &= \max_{\theta, \omega} \theta \quad \text{sujeto a} & [D_t^0(x_t, y_t)]^{-1} &= \max_{\theta, \omega} \theta \quad \text{sujeto a} \\
 -\theta \cdot y_{t+1}^f + Y_t \cdot \omega &\geq 0 & -\theta \cdot y_t^f + Y_{t+1} \cdot \omega &\geq 0 \\
 x_{t+1}^f - X_{t+1} \cdot \omega &\geq 0 & x_t^f - X_{t+1} \cdot \omega &\geq 0 \\
 \omega_j \geq 0, & \quad 1 \leq i \leq N & \omega_j \geq 0, & \quad 1 \leq i \leq N
 \end{aligned}$$

Nótese que en los últimos dos casos el valor en el óptimo de θ^* no necesariamente debe ser mayor o igual a la unidad, dado que se están comparando tecnologías en períodos distintos. Por ejemplo, en el tercer problema de optimización lineal, se está comparando información de insumos-producción del período $t + 1$, con tecnología en t . En este caso, si hubiera progreso técnico, el valor de debería ser inferior a la unidad. Así mismo, debe tenerse en cuenta que se deben analizar $N * (3T - 2)$ problemas de programación lineal si el número de períodos a considerar es T y la el número de UP es N .

3.3. Descomposición del Índice de Malmquist al considerar rendimientos variables a escala.

Apoyados en la Figura 10, y realizando un procedimiento similar al efectuado para el caso de los modelos DEA-CCR, se obtiene la versión equivalente del índice de Malmquist para modelos DEA-BCC.

Figura 10. Índices de Malmquist – rendimientos variables



Fuente: González Robinson A.

En este caso al igual que para el caso anterior, el cambio de productividad se deberá tanto a la variación de la eficiencia técnica como a la variación de la tecnología de producción. Sin embargo, para el caso con Rendimientos a Variables a Escala, el cambio de la Eficiencia Técnica (ET) está definida por dos componentes: el cambio de la Eficiencia Técnica Pura (CETP) y el cambio de la Eficiencia de Escala (CEE), es decir: en la Figura 10 se presenta una situación en la cual, cinco unidades de producción presentan diferentes niveles de productividad para dos instantes de tiempo diferentes t y $(t + 1)$. Como se puede ver, se han incluido tanto las fronteras de producción a escala constante, como las correspondientes a las de escala variable.

Después de realizado el correspondiente tratamiento matemático, la descomposición del índice de Malmquist queda expresada de la siguiente manera;

$$\frac{D_I^t(x_t, y_t)_{RCE}}{D_I^{t+1}(x_{t+1}, y_{t+1})_{RCE}} = \frac{D_I^t(x_t, y_t)_{RVE}}{D_I^{t+1}(x_{t+1}, y_{t+1})_{RVE}} * \frac{\frac{D_I^t(x_t, y_t)_{RCE}}{D_I^t(x_t, y_t)_{RVE}}}{\frac{D_I^{t+1}(x_{t+1}, y_{t+1})_{RCE}}{D_I^{t+1}(x_{t+1}, y_{t+1})_{RVE}}} \quad \text{Ecuación 20}$$

Donde:

$$\frac{D_I^t(x_t, y_t)_{RCE}}{D_I^{t+1}(x_{t+1}, y_{t+1})_{RCE}} \text{ es el cambio de la eficiencia técnica (CE)} \quad \text{Ecuación 21}$$

Si $CE > 1$, existe un aumento en el nivel de eficiencia técnica;

Si $CE < 1$, se ha presentado una disminución en el nivel de eficiencia técnica;

Si $CE = 1$, no se ha presentado variación en el nivel de eficiencia técnica.

$$\frac{D_I^t(x_t, y_t)_{RVE}}{D_I^{t+1}(x_{t+1}, y_{t+1})_{RVE}} \text{ es el cambio de la eficiencia técnica pura (CTP)} \quad \text{Ecuación 22}$$

Si $CTP > 1$, La unidad evaluada ha logrado acercarse en el periodo $t + 1$ a la frontera tecnológica de rendimientos variables a escala, en otras palabras, existe un aumento en la eficiencia técnica pura.

$$\frac{\frac{D_I^t(x_t, y_t)_{RCE}}{D_I^t(x_t, y_t)_{RVE}}}{\frac{D_I^{t+1}(x_{t+1}, y_{t+1})_{RCE}}{D_I^{t+1}(x_{t+1}, y_{t+1})_{RVE}}} \text{ corresponde al cambio de la eficiencia a escala (CEE)} \quad \text{Ecuación 23}$$

Si $CEE > 1$ entonces la distancia entre la frontera eficiente de rendimientos a escala constante y la correspondiente a la de rendimientos a escala variable, se habrá reducido en el periodo $t + 1$ respecto al periodo t .

Con base en lo anterior, el índice de productividad de Malmquist para modelos DEA-BCC - *Input* orientados, quedará entonces de la siguiente manera de acuerdo a lo planteado por Färe, Grosskopf, Norris y Zhang.

$$IPM_{FGNZ}(x_{t+1}, y_{t+1}; x_t, y_t) = \left[\frac{D_I^t(x_t, y_t)_{RVE}}{D_I^{t+1}(x_{t+1}, y_{t+1})_{RVE}} \times \frac{\frac{D_I^t(x_t, y_t)_{RCE}}{D_I^t(x_t, y_t)_{RVE}}}{\frac{D_I^{t+1}(x_{t+1}, y_{t+1})_{RCE}}{D_I^{t+1}(x_{t+1}, y_{t+1})_{RVE}}} \right] \times \left[\frac{D_I^{t+1}(x_{t+1}, y_{t+1})}{D_I^t(x_{t+1}, y_{t+1})} \times \frac{D_I^{t+1}(x_t, y_t)}{D_I^t(x_t, y_t)} \right]^{1/2} \quad \text{Ecuación 24}$$

La expresión anterior puede ser reescrita de forma simplificada como sigue,

$$IPM_{FGNZ}(x_{t+1}, y_{t+1}; x_t, y_t) = CTP * CEE * CT \quad \text{Ecuación 25}$$

Donde:

$CETP$, es el cambio en eficiencia técnica pura;

CEE , es el cambio en eficiencia de escala;

CT , es el cambio tecnológico.

Con el fin de calcular el IPM para el caso de los modelos DEA-BCC, se hace necesario plantear otros dos problemas de optimización lineal. La solución de dichos problemas permitirá establecer el valor de la eficiencia técnica pura, para cada uno de los periodos evaluados:

$$[D_t^{t+1}(x_t, y_t)_{RVE}]^{-1} = \min_{\theta, \omega} \theta \text{ sujeto a}$$

$$-\theta \cdot y_t + Y_t \cdot \omega \geq 0$$

$$x_t^f - X_t \cdot \omega \geq 0$$

$$\omega_j \geq 0, \quad 1 \leq i \leq N$$

$$[D_t^{t+1}(x_t, y_t)]^{-1} = \min_{\theta, \omega} \theta \text{ sujeto a}$$

$$-\theta \cdot y_{t+1}^f + Y_t \cdot \omega \geq 0$$

$$x_{t+1}^f - X_{t+1} \cdot \omega \geq 0$$

$$\omega_j \geq 0, \quad 1 \leq i \leq N$$

CAPÍTULO IV:

APLICACIÓN DEL DEA PARA EVALUAR EL DESEMPEÑO EFICIENTE DE LAS DISTRIBUIDORAS DE GAS NATURAL EN MÉXICO A TRAVÉS DE LOS ÍNDICES DE MALMQUIST.

4.1. *Distribución del gas natural en México.*

A partir de la publicación del *Reglamento de gas natural* en 1995, la Comisión inició la definición de las zonas geográficas de distribución³⁷ y los procesos de licitación para otorgar permisos de distribución de gas natural en dichas zonas. Hasta diciembre de 2013, la Comisión ha autorizado veintidós permisos en diecinueve Zonas Geográficas determinadas por la propia Comisión, de los cuales veinte permanecen activos.

Figura 11. Redes de distribución de Gas Natural en México



Fuente: Comisión Reguladora de Energía.

³⁷ El área delimitada por la Comisión para efectos de distribución de gas natural. Para más referencia consultar la Directiva sobre la determinación de zonas geográficas para fines de distribución de gas natural.

A excepción de las distribuidoras que operan en las zonas geográficas del Valle Cuautitlán-Texcoco y la de Monterrey, cada distribuidora tiene exclusividad de operación en su respectiva zona geográfica.

Tanto la iniciativa pública, como la iniciativa privada tienen la posibilidad de participar en la distribución de gas natural en territorio nacional³⁸. Sin embargo, es importante señalar que la participación en este sector de la iniciativa privada es del 100%. Así, los veinte permisos en operación corresponden a diferentes consorcios privados que cuentan con participación de capital nacional y extranjero para llevar a cabo la distribución del gas natural en distintas zonas geográficas del país.

Con base en la información reportada por los veinte permisionarios de distribución que operan actualmente, en diciembre de 2012 el servicio de distribución atendía a 2,094,314 usuarios; la energía conducida fue de 343.4 millones de Gigajoules y la red de distribución alcanzó una longitud total de 46,312 km.

4.2. Proceso de obtención de información y definición de variables de interés.

Antes de iniciar con el desarrollo del caso de aplicación, es necesario comentar ciertos aspectos relevantes sobre el proceso de obtención y validación de la información.

El crecimiento de la infraestructura de distribución de gas natural ha propiciado que la verificación del cumplimiento de las obligaciones técnicas y económicas de los permisionarios sea una tarea primordial para la Comisión. El control y seguimiento de los permisos constituyen actividades continuas y permanentes que propician que el servicio de distribución se preste bajo condiciones técnicas y de seguridad acordes con la normatividad aplicable; sin embargo, actualmente la Comisión carece de un sistema de indicadores de desempeño de las distribuidoras que le permita evaluarlas año con año. Así, la evaluación integral del desempeño de una distribuidora con respecto a las demás, se realiza una vez que la distribuidora en cuestión ha concluido su periodo quinquenal y presenta su nueva propuesta de tarifas máximas para los siguientes cinco años de operación. Es en ese momento, donde la Comisión, a partir del plan de negocios presentado por la distribuidora, con base en la información histórica de la misma distribuidora de los cinco años anteriores y de la mejor información disponible del resto de las distribuidoras, realiza los análisis de eficiencia correspondientes y con ello determinar el Factor X. La mecánica anterior genera que la obtención y validación de la información sea

³⁸ Dicha participación tiene fundamento legal en las reformas a la Ley Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en el Ramo del Petróleo de 1995 y en la expedición del Reglamento de Gas Natural, tal como se mencionó en la sección 1.2 del capítulo I.

ineficiente, al mismo tiempo que le resta a la Comisión capacidad de reacción para subsanar inconsistencias, y con ello poder estandarizar la información entregada, lo cual es primordial para realizar las respectivas comparaciones.

Como bien se ha mencionado, el principal insumo de un *benchmarking* es la información, tanto en cantidad como en calidad. Para un ejercicio de esta naturaleza necesario contar no solo con un “adecuado” tamaño de muestra, sino que además la información debe ser suficiente y veraz. Por esta razón, se requiere cierto grado de homogeneidad de las variables. Si bien la definición de las variables pareciera ser un proceso sencillo, no lo es tanto, ya que se debe considerar la actual operación y registro de la información de cada distribuidora; por ejemplo, si se desease incluir en el análisis la demanda pico diaria del sistema, es necesario contar con las series de demanda diaria durante todo el año para poder identificar este dato, sin embargo, no todas las distribuidoras cuentan con dichas series, ya que el registro de su demanda se basa en su sistema de facturación el cual es quincenal o mensual.

En resumen, el tipo de información con la que se cuenta para este análisis se divide básicamente en dos rubros: información de los costos relacionados a la prestación del servicio y factores que influyen en el nivel de los costos, mejor conocidos como variables o factores. En nuestro caso, la información de costos con la que se cuenta es la relativa a los costos de operación, mantenimiento y administración (costo OMA) anuales del sistema. Con el objetivo de contar con información financiera confiable, como parte del proceso de la validación de la información, los costos fueron cotejados con Estados Financieros Dictaminados de cada año por un auditor externo a la empresa. Una vez que la información fue verificada y con el fin de que los costos sean analizados bajo la misma base (diciembre de 2012), los costos son ajustados por el Índice Nacional de Precios al Consumidor publicado por el INEGI³⁹.

Respecto a los factores influyentes en el nivel de costos, con base en la información histórica disponible, considerando las sugerencias de los expertos en la operación de estos sistemas (ingenieros encargados de la verificación y supervisión operativa de los sistemas), y a través de la revisión de estudios sobre la medición de la productividad y la eficiencia en este sector, finalmente las variables a considerar son las siguientes:

- Longitud total de la red instalada en kilómetros, corresponde a la longitud total de la red, así como la longitud de las acometidas;

³⁹ La estimación del Factor X requiere la utilización de índices de precios que permitan deflactar diversas series de tiempo. En teoría, se deben utilizar índices compuestos por canastas de productos similares a los que componen las series de tiempo que se pretende deflactar. Al no existir éstos, los reguladores han venido usando como variable proxy el índice global de precios de los insumos (en el caso de México es el Índice Nacional de Precios al Consumidor - INPC), o bien el índice de precios de los insumos de un sector en particular.

- Número de usuarios totales del sistema al final de cada año;
- Volumen total anual conducido en el sistema;
- Número de empleados totales en la empresa, incluyendo directivos y sindicalizados, de cada año.

Por lo tanto, para llevar a cabo este estudio, se consideró la información disponible de las veinte distribuidoras de gas natural operando en México, la cual corresponde a información que se logró recabar de las variables antes mencionadas, para el periodo de 2008 a 2012 (un quinquenio), formando así una base de datos panel balanceada: una matriz de 20×5 (veinte distribuidoras, cinco variables) para cada año t , con $t = 2008, \dots, 2012$.

Otros datos importantes a destacar en esta etapa inicial y que deberán ser considerados para la evaluación de la eficiencia y productividad son los siguientes:

- ✓ Todas las distribuidoras operan en zonas geográficas distintas y tienen exclusividad para operar en su zona geográfica correspondiente, a excepción de cuatro distribuidoras: la 1 y 5 comparten zona geográfica al norte del país, y las distribuidoras 2 y 3, también comparten zona geográfica pero en la parte centro del país;
- ✓ Existen tres distribuidoras que cuentan con sindicato: la 1, 15 y 18;
- ✓ La distribuidora 20 únicamente atiende al sector industrial, por tanto, no tiene usuarios residenciales, ni comerciales.

Es importante señalar que para el análisis, tanto estadístico como de optimización, se trabajó con software libre, R versión 3.1.1⁴⁰.

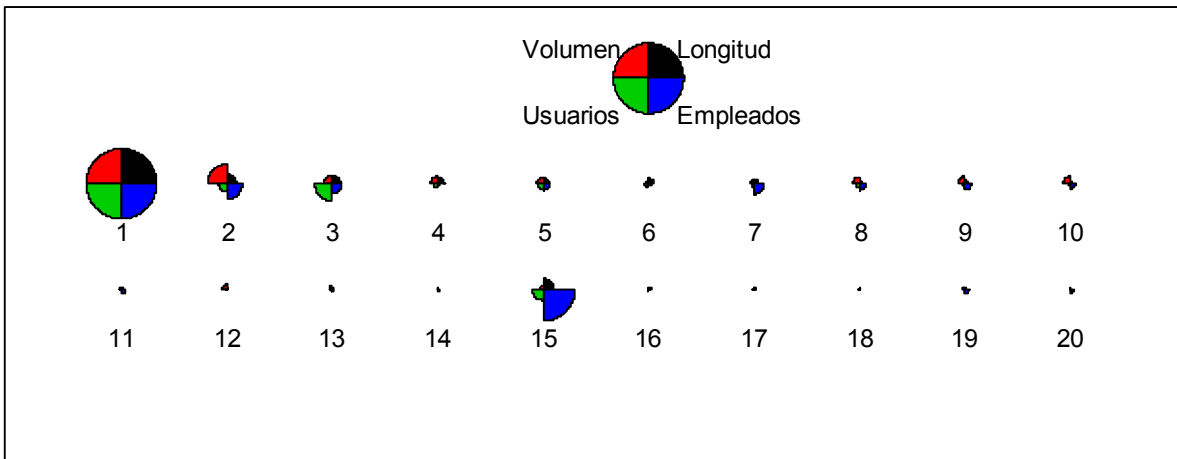
4.3. *Panorama a diciembre de 2012.*

Con el objetivo de dimensionar el “tamaño”⁴¹ y facilitar el reconocimiento de cada distribuidora con base en las variables de interés, dejando fuera la información de costos por el momento, se recurre a gráficos multivariados para representar a las veinte distribuidoras:

⁴⁰ R es creado por Ross Ihaka y Robert Gentleman. R tiene una naturaleza doble de programa y lenguaje de programación y es considerado como un dialecto del lenguaje S creado por los Laboratorios AT&T Bell.

Más información: <http://www.r-project.org/>

⁴¹ Nos referimos a “tamaño” a la combinación de los siguientes elementos: cantidad de volumen que opera, la longitud de la red total, número de usuarios que atiende y número de empleados que tiene cada sistema de distribución o distribuidora.

Figura 12. Distribuidoras de gas natural en operación

Elaboración propia.

En la Figura de arriba, el tamaño de cada fracción del círculo corresponde al nivel (valor) de cada variable para cada una de las distribuidoras. La variable volumen (fracción roja) corresponde al volumen total conducido durante el periodo comprendido, es decir la suma de esta variable desde el 2008 hasta el 2012; la longitud de la red y número de usuarios (fracciones negro y verde, respectivamente) consideran el máximo del periodo⁴², mientras que la fracción azul corresponde al número de empleados promedio⁴³.

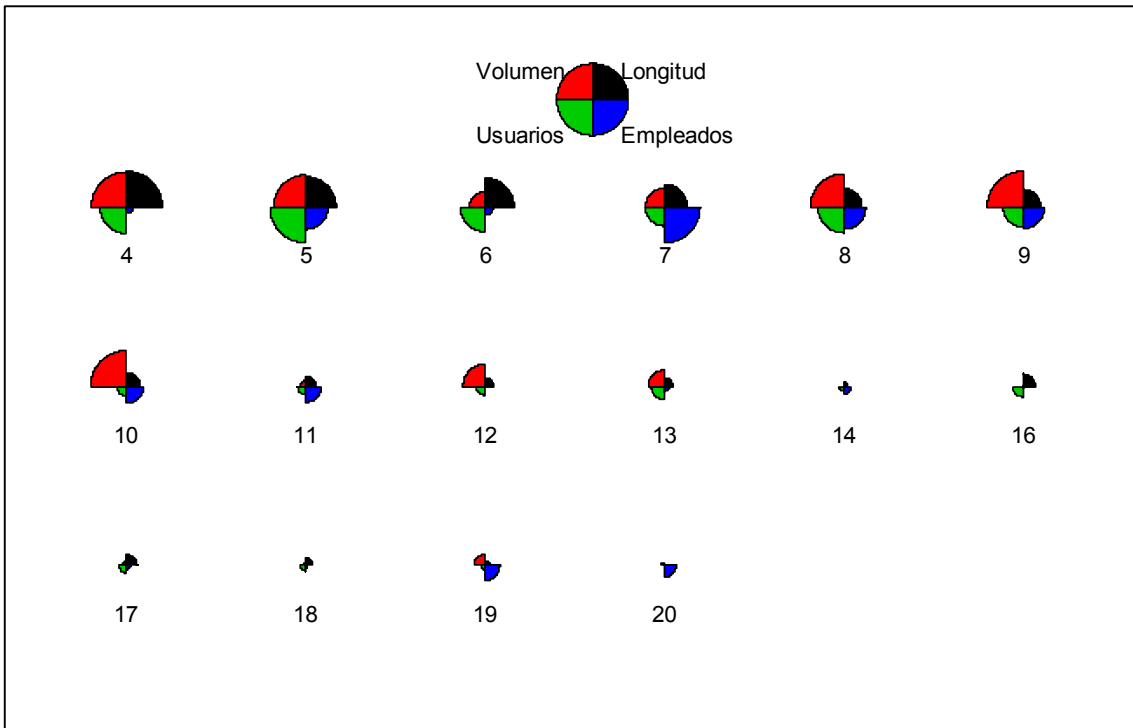
Así, en la Figura 12 se observa que la distribuidora 1 resalta en gran proporción de las demás en todos los aspectos (variables); de hecho esta distribuidora es quien cubre el 30% de toda la industria de distribución de gas natural en México. Después de esta, destacan otras tres distribuidoras: 2, 3 y 15. La distribuidora 2 por el volumen que opera al igual que el número de empleados, la 3 destaca por contar con un gran número de usuarios y la 15 por el número de empleados. Esta última distribuidora es muy peculiar, ya que el número de empleados es muy similar a la distribuidora 1, sin embargo los niveles de las otras variables están muy por dejada, es decir, podría verse afectada en su evaluación de eficiencia al operar para un menor número de usuarios y con menos volumen y una gran cantidad de empleados. También se observa que las distribuidoras más “pequeñas” son las 6, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 18, 19 y 20, ya que apenas y se alcanzan a representar con

⁴² No podría considerarse la suma de estas variables como en el caso del volumen, debido a que su naturaleza en sí es acumulativa, es decir, cada año se inicia con el número de usuarios o longitud de la red existentes al final del año anterior. Por lo tanto, con el fin de contar con una estadística representativa de estas variables, sin causar perjuicio por las caídas que pudieron haber tenido durante el periodo, que en teoría ocurrirían por factores externos y por tanto no controlables por la empresa, se considera al máximo como la mejor elección.

⁴³ Aunque la naturaleza de esta variable también es acumulativa, para propósitos de la evaluación de desempeño, no podría considerarse el mínimo o máximo, debido a que dicha variable si es controlable por la empresa.

un punto. Si excluimos de la muestra a las cuatro distribuidoras más grandes se puede observar mejor las características de las distribuidoras restantes:

Figura 13. Distribuidoras de Gas Natural en operación – Muestra sin las 4 más grandes



Elaboración propia.

De la Figura 13, se puede observar que efectivamente las distribuidoras 11, 12, 13, 14, 16, 17, 18, 19 y 20 son las más “pequeñas”. De este bloque de dieciséis empresas, la distribuidora 7 resalta por un alto número de empleados (fracción azul), mientras que las distribuidoras 4, 5, 8, 9 y 10 destacan por un mayor volumen conducido a través de su sistema. Las distribuidoras 4, 5 y 6 parecen tener una longitud de red similar, pero existe un parecido mayor entre las distribuidoras 4 y 5, ya que a excepción del número de empleados, no se aprecian diferencias significativas entre ellas para los demás aspectos (longitud de su red, volumen conducido a través de sus sistemas y número de usuarios conectados).

De lo anterior, se concluye que no todas las empresas son de “tamaño” similar, lo cual podría repercutir en el nivel de los costos de cada distribuidora si es que se presenta el fenómeno de economías de escala⁴⁴. Es decir, al haber rendimientos de escala crecientes, las empresas “pequeñas” podrían verse en desventaja al ser comparadas con las más grandes, ya que en teoría los costos unitarios de las

⁴⁴ Existen factores que hacen que el coste medio de un producto por unidad caiga a medida que la escala de la producción aumenta. El concepto de “economías de escala” sirve para el largo plazo y hace referencia a las reducciones en el coste unitario a medida que el tamaño de una instalación y los niveles de utilización de *inputs* aumentan. Referencia: Sullivan, Arthur; Steven M. Sheffrin (2003).

primeras serían significativamente mayores a las segundas y no precisamente por cuestiones de eficiencia, si no por las ventajas en términos de costos que una empresa obtiene por su expansión (escala). Como se mencionó en el capítulo I, estamos describiendo empresas que representan monopolios naturales y estos se definen como empresas que disfrutan de economías de escala para todos los tamaños razonables de la empresa. Por lo tanto, para la determinación de las fronteras eficientes tendrán que considerarse modelos DEA-VRS, en caso de presentarse economías de escala en la distribución de gas natural en México.

4.4. *Análisis exploratorio de la información, planteamiento de supuestos y selección de variables.*

Con el objetivo de identificar los factores que influyen en los costos OMA y cuantificar la forma y el grado de asociación entre ellos, como primer punto se analizarán las correlaciones entre las variables para cada año. Una vez identificados dichos factores, se construirán los indicadores de productividad parcial a fin de hacer una primera observación del nivel de eficiencia técnica de cada distribuidora. Más allá de observar el nivel de eficiencia técnica de cada empresa, también se analizarán las variaciones año a año de los indicadores parciales con el fin de tener una idea intuitiva sobre el desempeño de cada distribuidora. Finalmente con el objetivo de definir el tipo de modelos DEA a considerar (CRS o VRS), se probará la hipótesis de la presencia de economías de escala a través de dos herramientas estadísticas: test estadístico de diferencia de medias y mediante un modelo de regresión lineal.

Para la realización de los análisis antes mencionados, como primer punto se definen las variables a considerar. Sean:

OMA_n^t : Costos de operación, mantenimiento y administración totales en pesos de diciembre de 2012 de la distribuidora n para el año t , con $n = \{1, \dots, 20\}$, $t = \{2008, \dots, 2012\}$;

$Longitud_n^t$: Longitud total de la red en kilómetros de la distribuidora n para el año t , con $n = \{1, \dots, 20\}$, $t = \{2008, \dots, 2012\}$;

$Volumen_n^t$: Volumen total de la red en gigajoules de la distribuidora n para el año t , con $n = \{1, \dots, 20\}$, $t = \{2008, \dots, 2012\}$;

$Usuarios_n^t$: Número de usuarios totales de la distribuidora n para el año t , con $n = \{1, \dots, 20\}$, $t = \{2008, \dots, 2012\}$;

$Empleados_n^t$: Número de empleados totales de la distribuidora n para el año t , con $n = \{1, \dots, 20\}$, $t = \{2008, \dots, 2012\}$;

4.4.1. Análisis de correlaciones.

A continuación se muestra la matriz de correlaciones de las variables en cuestión:

	OMA	Longitud	Volumen	Usuarios	Empleados
OMA	1.0000000	0.9142150	0.8523499	0.9670918	0.8357843
Longitud	0.9142150	1.0000000	0.9070441	0.9634401	0.8390550
Volumen	0.8523499	0.9070441	1.0000000	0.8725270	0.7027938
Usuarios	0.9670918	0.9634401	0.8725270	1.0000000	0.8197132
Empleados	0.8357843	0.8390550	0.7027938	0.8197132	1.0000000

De la matriz de correlaciones se aprecia que todas las variables tienen un coeficiente de correlación significativo con los costos OMA, sin embargo, la asociación más fuerte es con las variables Usuarios y Longitud de la red (correlaciones superiores a 0.9), mientras que la variable menos relacionada con los costos es la variable empleados. También se aprecia una fuerte relación entre la longitud de la red y número de usuarios (0.96), por lo tanto las variables más correlacionadas entre sí son Costos OMA, Longitud de la red y número de Usuarios.

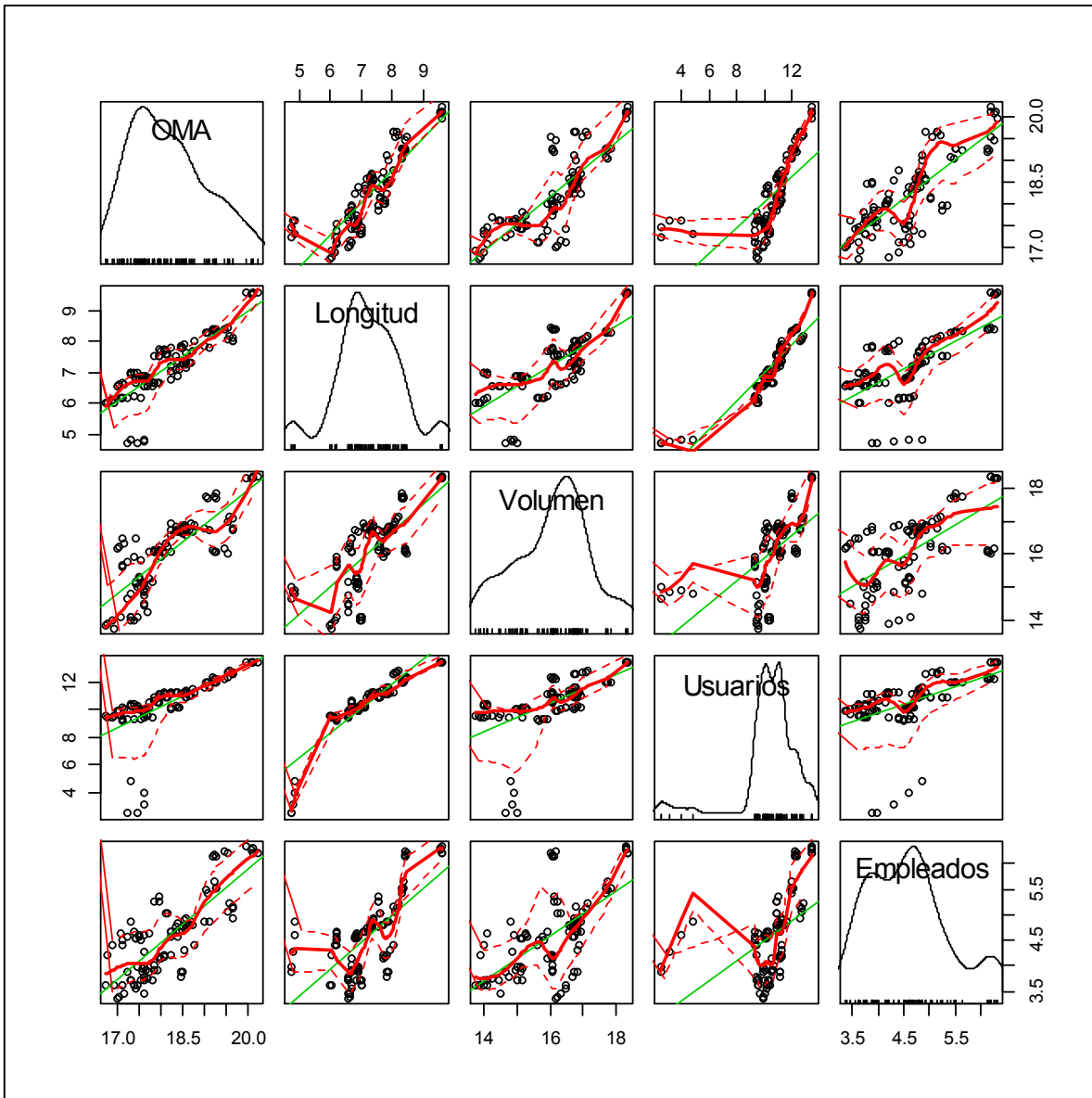
Al examinar la Figura de dispersión en R^2 (Figura 14) entre el logaritmo⁴⁵ de las variables se advierten observaciones atípicas para las relaciones entre OMA vs. Longitud y OMA vs. Usuarios. Todos estos valores corresponden a la distribuidora 20. Hay que recordar, que esta distribuidora únicamente atiende al sector industrial, razón por la cual la longitud y el número de usuarios de su sistema son significativamente inferior al resto. Sin embargo, por esa misma razón⁴⁶, dicha empresa no aparece como atípica cuando los OMA se contrastan con la variable volumen.

Finalmente, como lo revela el coeficiente de correlación y como se observa en la gráfica, la relación de los costos OMA con cada una de las variables es positiva, por lo que es un buen indicio para demostrar la presencia de economías de escala.

⁴⁵ Cuando se transforma de notación aritmética a logarítmica, lo único que se hace es transformar la escala, expresando así las variables en términos relativos o porcentajes.

⁴⁶ Derivado de un análisis exploratorio de las distribuidoras por sector (industrial, comercial y residencial), se observó que en promedio: el 90% del volumen conducido en un sistema de distribución es para atender al sector industrial, el 98% del total de usuarios de una distribuidora corresponde a usuarios residenciales y 80% de la longitud de la red es de polietileno, material que se utiliza para abastecer al sector residencial.

Figura 14. Gráficos de dispersión entre las variables



Elaboración propia.

4.4.2. Indicadores de productividad parcial.

Con el objetivo de evaluar el nivel de los costos de cada una de las distribuidoras y derivado de lo observado en la sección anterior, se proponen como indicadores de productividad parcial los siguientes:

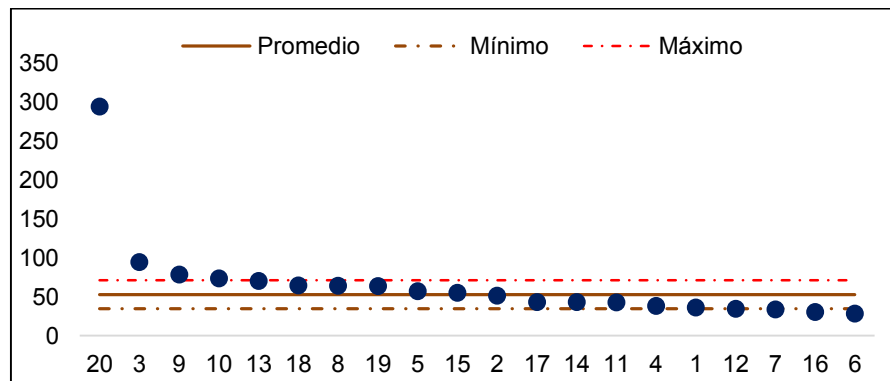
- Costos OMA por kilómetro de red ($OMA / Longitud$) promedio del periodo 2008 -2012;
- Costos OMA por usuario ($OMA / Usuario$) promedio del periodo 2008 - 2012;

- Costos OMA por gigajoule consumido (OMA / Volumen) promedio del periodo 2008 -2012.

Los dos primeros indicadores se sugieren por ser las dos variables que mejor explican el comportamiento de los costos, sin embargo, si el análisis solo se base en estos dos, se tendría que excluir de la muestra a la distribuidora 20 por su comportamiento atípico-influyente, es decir, el incluirla generaría distorsiones en los indicadores parciales promedio, los cuales se toman como referencia para evaluar la eficiencia técnica de todas las distribuidoras. Por lo anterior, y aprovechando que la correlación de los OMA con la variable volumen es significativa. Finalmente, la variable empleados se sugiere sacarla del análisis por dos cuestiones: la correlación de esta variable con la variable de interés (OMA) es la más baja de todas y además, la naturaleza de esta variable es la misma que la variable OMA, es decir, ambas son consideradas insumos, mientras que lo que buscamos son las relaciones insumos-productos.

Siguiendo las definiciones de eficiencia técnica de Farell y asumiendo Rendimientos Constantes a Escala, es decir, suponiendo que el “tamaño” de la empresa no influye en el nivel de costos, a continuación se muestran de manera gráfica los indicadores de productividad parcial propuestos:

Figura 15. OMA / km – Promedio 2008-2012

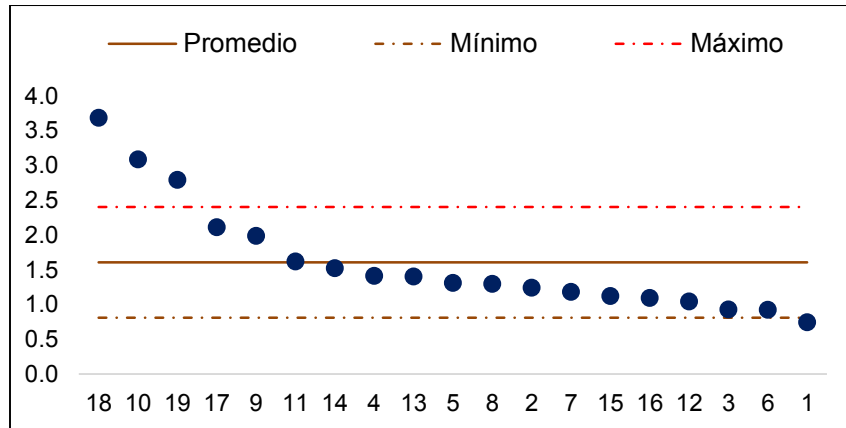


Elaboración propia.

Tal como se esperaba, la distribuidora 20 resulta ser la más ineficiente, con un nivel de costos unitarios por kilómetro exageradamente alto. Si se considera esta empresa dentro de la muestra, el costo promedio de este indicador es de 64.98 pesos por kilómetro, obteniendo un coeficiente de variación del 87%, el cual resulta bastante alto. Al excluir a esta distribuidora de la muestra, los costos OMA por kilómetro promedio de la industria se reducen a 52.9, reduciendo el coeficiente de variación a un 35%, el cual también resulta alto, sin embargo es más aceptable. El mínimo y el máximo corresponden al promedio ± 1 desviación estándar, respectivamente. Por lo tanto, si consideramos como frontera eficiente al mínimo,

solo cuatro empresas serían consideradas eficientes (6, 16, 7 y 12), mientras que las empresas más ineficientes, rebasando incluso el máximo son la 3, 9 y 10.

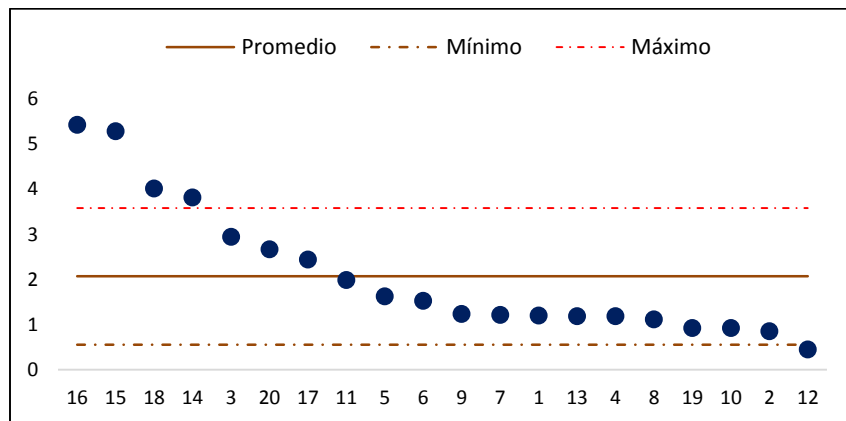
Figura 16. OMA / Usuario – Promedio 2008-2012



Elaboración propia.

Al igual que el indicador anterior, si se considera a la distribuidora 20 dentro del análisis, el costo OMA por Usuario promedio de la industria asciende a 16.21 pesos por usuario con un coeficiente de variación de 403%, mientras que si se excluye de la muestra a esta empresa, este indicador desciende a 1.61 pesos por usuario con un coeficiente de variación del 49%. Sin embargo, considerando el mismo criterio de tomar como frontera eficiente el mínimo, solo una empresa sería considerada como eficiente. Es interesante observar que mientras con el indicador OMA/km, la distribuidora 3 podría considerarse como ineficiente, para este indicador esta misma empresa es la tercera más eficiente.

Figura 17. OMA / Volumen – Promedio 2008-2012



Elaboración propia.

Finalmente, para este último indicador se considera la muestra total, teniendo que el costos OMA por gigajoule consumido es de 2.1, sin embargo el coeficiente de variación es el más alto de los tres indicadores (70%). Al considerar el mínimo como

la frontera eficiente, se observa que solo la distribuidora 12 podría considerarse eficiente, muestra que las distribuidoras 16, 15, 18 y 14 rebasan el máximo, siendo las más ineficientes.

De lo anterior, se concluye lo siguiente:

- ✓ El indicador OMA/km es el que presenta una menor dispersión, seguido del OMA/Usuario; sin embargo, al considerar estos dos indicadores, la empresa 20 resalta como la distribuidora más ineficiente de todas, con costos unitarios exageradamente altos y por lo mismo irracionales.
- ✓ La jerarquía o posicionamiento que se obtiene a través de los dos primeros indicadores son muy similares, coincidiendo en cuatro empresas dentro las cinco más eficientes (1, 6, 12, 16), y en tres empresas dentro de las cinco más ineficientes (9, 10, 18). Sin embargo, al considerar el indicador OMA/GJ, cambia la posición de algunas empresas drásticamente, tal es el caso de las distribuidoras 3 y 16, que de pasar a ser de las más eficientes en los primeros dos indicadores, en el tercer indicador se posicionan entre las cinco empresas más ineficientes.
- ✓ Para cualquiera de los indicadores, la distribuidora 12 se ubica dentro de las cinco empresas más eficientes, mientras que la empresa 18 se ubica dentro de las cinco empresas más ineficientes en cualquiera de los indicadores.

4.4.3. *Desempeño de la industria en términos de indicadores.*

Independientemente de la evaluación del nivel de los costos de cada una de las distribuidoras, también es importante para evaluar la productividad, observar durante el periodo, los cambios positivos y/o negativos que cada distribuidor tuvo, tanto en costos como en las demás variables. Para este propósito, se observarán las variaciones durante el periodo de las siguientes variables:

- Número de usuarios totales / OMA totales;
- Longitud total de la red;
- Volumen conducido en el sistema;
- Número de usuarios totales.

Con el fin de evaluar la variación en costos que tuvo cada distribuidora, se propone el primer indicador (debido a la alta correlación de los costos con esta variable es que se sugiere tomar este indicador), las variaciones de las demás variables es con el fin de poder tener una idea intuitiva de la evolución de cada uno de los sistemas.

Tabla 4. Variaciones en la longitud de la red en el periodo

Distribuidora	Promedio	Var. Total	2008 vs 2009	2009 vs 2010	2010 vs 2011	2011 vs 2012
13	0.69%	2.77%	0.13%	0.82%	0.38%	1.41%
7	0.77%	3.11%	0.54%	1.03%	0.83%	0.67%
19	0.77%	3.12%	1.20%	0.61%	0.89%	0.37%
17	0.86%	3.47%	1.40%	1.00%	0.53%	0.49%
18	1.01%	4.09%	0.35%	0.77%	2.56%	0.37%
15	1.18%	4.79%	0.71%	0.53%	1.36%	2.11%
2	1.26%	5.13%	2.15%	1.48%	0.77%	0.63%
11	1.58%	6.46%	2.80%	1.26%	1.14%	1.11%
16	1.69%	6.94%	1.92%	2.25%	2.13%	0.49%
1	2.23%	9.20%	2.91%	1.86%	1.39%	2.75%
20	2.92%	11.93%	-3.10%	6.44%	4.37%	3.97%
6	2.97%	12.41%	3.20%	3.24%	2.75%	2.69%
12	3.29%	13.79%	4.38%	2.58%	2.08%	4.09%
3	4.23%	17.99%	2.77%	4.07%	4.53%	5.55%
9	4.52%	19.03%	10.93%	2.03%	2.13%	2.98%
8	4.86%	20.54%	11.17%	5.29%	2.26%	0.71%
14	5.07%	21.30%	0.33%	0.51%	12.98%	6.47%
4	5.48%	23.61%	4.38%	3.17%	4.23%	10.13%
5	7.72%	34.58%	9.11%	8.01%	8.75%	5.00%
10	8.68%	38.72%	10.64%	17.33%	4.50%	2.26%
Promedio	2.82%	11.74%	3.34%	2.64%	2.36%	2.92%

Elaboración propia.

En términos de extensión de red, todas las empresas presentan incrementos, siendo las empresas 14, 4, 5 y 10 aquellas que tuvieron el mayor crecimiento de red. En promedio, los sistemas de distribución de gas natural tuvieron un incremento en sus redes del 2.8%.

Tabla 5. Variaciones en el número de usuarios conectados en el periodo

Distribuidora	Promedio	Var. Total	2008 vs 2009	2009 vs 2010	2010 vs 2011	2011 vs 2012
18	-6.08%	-22.48%	-12.92%	-5.49%	-3.20%	-2.69%
17	-2.32%	-8.99%	-0.48%	-3.15%	-4.12%	-1.51%
14	-1.29%	-5.78%	-7.96%	-5.72%	0.53%	8.00%
7	-0.93%	-3.80%	-2.41%	-4.34%	0.62%	2.41%
11	-0.45%	-1.97%	-4.74%	-1.46%	0.42%	4.00%
16	-0.11%	-0.52%	0.26%	1.97%	0.69%	-3.38%
19	0.35%	1.00%	-6.74%	0.67%	2.07%	5.39%
2	0.54%	2.18%	0.45%	-0.14%	0.75%	1.09%
13	1.25%	5.03%	2.07%	-0.40%	3.18%	0.14%
6	2.02%	8.31%	1.77%	3.23%	2.62%	0.46%
1	2.16%	8.92%	1.04%	2.98%	3.18%	1.45%

15	2.39%	9.91%	2.98%	1.66%	2.16%	2.76%
4	3.02%	12.19%	-3.47%	1.03%	6.21%	8.32%
9	3.06%	12.68%	0.53%	0.75%	6.94%	4.03%
8	3.75%	15.82%	5.88%	2.49%	2.70%	3.93%
3	5.66%	24.61%	4.81%	6.20%	5.56%	6.06%
10	7.05%	31.20%	10.58%	5.68%	6.44%	5.48%
12	7.88%	34.83%	0.01%	12.90%	11.48%	7.13%
5	10.28%	47.26%	17.14%	11.13%	10.36%	2.51%
20	89.13%	892.31%	-7.69%	100.00%	120.83%	143.40%
Promedio	2.84%	11.86%	2.08%	2.87%	3.61%	2.81%

Elaboración propia.

Al igual que en la extensión de la red, en promedio, los sistemas de distribución de gas natural tuvieron un incremento de usuarios del 2.8%. Sin embargo, a diferencia de la variable anterior, algunas empresas sí presentaron pérdidas de usuarios durante el periodo (18, 17, 14, 7, 11 y 16). Nuevamente, es la distribuidora 18 quien encabeza la lista de la peor posición. Mientras que la empresa 20 sigue destacando como observación atípica.

Tabla 6. Variaciones en el volumen conducido en el periodo

Distribuidora	Promedio	Var. Total	2008 vs 2009	2009 vs 2010	2010 vs 2011	2011 vs 2012
15	-3.97%	-15.38%	-9.30%	1.37%	0.16%	-8.12%
2	-3.00%	-12.05%	-6.08%	-9.16%	5.77%	-2.54%
13	0.61%	2.41%	-0.93%	2.95%	0.74%	-0.32%
1	0.62%	2.46%	-1.28%	0.09%	2.73%	0.94%
16	0.66%	0.51%	-7.25%	9.35%	-11.77%	12.32%
6	1.32%	3.26%	-11.90%	16.86%	2.15%	-1.81%
11	1.93%	6.61%	-4.53%	12.15%	7.24%	-7.15%
5	2.28%	7.78%	-12.07%	11.17%	4.57%	5.44%
9	3.70%	12.47%	-7.55%	9.37%	-8.30%	21.30%
17	3.81%	15.04%	-6.13%	13.99%	3.64%	3.73%
10	3.88%	12.48%	-2.73%	25.92%	-11.89%	4.23%
4	4.29%	16.87%	-5.43%	16.90%	0.85%	4.82%
7	5.32%	22.03%	-2.83%	12.15%	0.30%	11.64%
20	6.00%	16.84%	41.82%	-12.95%	4.91%	-9.79%
14	6.76%	27.38%	-10.68%	15.39%	10.56%	11.79%
12	7.36%	31.52%	4.88%	8.53%	18.63%	-2.60%
19	7.59%	34.00%	8.09%	6.76%	8.44%	7.08%
8	7.60%	33.96%	8.49%	10.03%	6.94%	4.94%
3	9.62%	41.56%	-3.58%	26.97%	9.46%	5.64%
18	21.70%	97.44%	-19.87%	20.13%	39.15%	47.40%
Promedio	2.14%	8.60%	-3.23%	5.86%	2.94%	2.99%

Elaboración propia.

En promedio, se presenta un incremento del 2.14% en el volumen conducido en los sistemas de distribución. Es interesante observar cómo es que, en general el 2009, fue un mal año para el 80% de las distribuidoras, ya que la demanda (volumen) cayó en promedio 3.2%, sin embargo, para el 2010 se observa en general, un repunte.

De lo anterior, se aprecia que la distribuidora 8 es la que tuvo menos complicaciones en el periodo evaluado, ya que tuvo variaciones positivas con respecto a la evolución de la red como al número de usuarios y volumen conducido. Las empresas 7, 17 y 18 son las que presentaron las mayores variaciones negativas en las variables volumen, usuarios y longitud.

Tabla 7. Variaciones del indicador Longitud de red / OMA

Distribuidora	Promedio	Var. Total	2008 vs 2009	2009 vs 2010	2010 vs 2011	2011 vs 2012
18	-9.74%	-35.34%	-18.51%	3.62%	-3.00%	-21.06%
14	-8.85%	-32.89%	-22.36%	8.22%	-10.03%	-11.23%
11	-7.30%	-26.81%	-2.60%	-10.71%	-0.29%	-15.60%
19	-5.42%	-24.64%	-7.67%	-9.50%	-25.41%	20.92%
5	-5.35%	-23.01%	-5.03%	-4.45%	-24.91%	12.98%
4	-3.71%	-15.07%	1.76%	-0.52%	0.28%	-16.34%
16	-3.58%	-14.24%	1.05%	3.30%	-7.59%	-11.08%
7	-3.48%	-16.35%	11.20%	-16.26%	-16.71%	7.84%
17	-3.19%	-13.18%	-11.83%	4.89%	-9.04%	3.22%
8	-2.77%	-15.23%	-20.00%	16.66%	-16.44%	8.71%
12	-2.40%	-12.97%	-3.70%	1.62%	15.43%	-22.96%
6	-1.24%	-6.66%	11.13%	3.91%	-6.09%	-13.92%
1	-0.38%	-3.36%	4.90%	13.03%	-9.18%	-10.25%
9	-0.06%	-0.27%	-0.58%	-1.47%	0.58%	1.23%
2	2.00%	3.33%	29.06%	-3.56%	-13.53%	-3.99%
15	2.90%	1.57%	33.81%	-5.45%	10.73%	-27.50%
13	4.97%	19.20%	6.68%	19.85%	-8.20%	1.56%
10	5.40%	18.39%	-4.35%	23.84%	-13.66%	15.77%
3	7.46%	30.72%	2.23%	19.62%	-7.14%	15.12%
20	99.71%	827.05%	-27.38%	73.54%	123.38%	229.29%
Promedio	2.99%	31.02%	-0.99%	6.82%	-1.33%	7.47%

Elaboración propia.

En general, no existe una tendencia ni a la alza ni a la baja, sin embargo, solo seis distribuidoras tuvieron una variación promedio positiva, es decir, durante el periodo de 2008 a 2012 lograron atender a su demanda generando ahorros en sus costos OMA. Por el contrario, las distribuidoras 18, 14, 11, 19 y 5 son las que menos ahorros generaron para satisfacer su demanda. Es importante destacar que la empresa 20 nuevamente vuelve a destacar como observación atípica, mientras que la empresa 18 nuevamente encabeza la lista de las peores posiciones.

4.5. *Definición del modelo.*

Derivado de todo el análisis realizado en la sección anterior, se plantean las siguientes:

- ✓ La existencia de economías de escala en la distribución de gas natural,
- ✓ Los factores que influyen en el comportamiento de los costos OMA son la longitud de la red, el número de usuarios conectados al sistema y cantidad de volumen conducido en el sistema.
- ✓ Para cada año existe un conjunto de distribuidoras eficientes las cuales determinan la frontera de eficiencia, es decir, existen empresas que son capaces de atender su demanda obteniendo ahorros en sus costos a partir de la tecnología de producción existente.

Por lo tanto, la productividad de las empresas será el resultado del producto entre el cambio en la eficiencia técnica y el cambio tecnológico, es decir la eficiencia económica.

Para determinar cada uno de los elementos (cambio en la eficiencia técnica y cambio tecnológico) se recurre a la estimación de los índices de Malmquist, los cuales serán determinados a través de la Metodología (DEA) con orientación a insumos, considerando rendimientos a escala variables, (DEA-VRS) haciendo uso de lo planteado en la sección dos del presente estudio.

4.6. *Presentación e interpretación de resultados.*

Los resultados obtenidos de aplicar la Metodología DEA se dividen en dos partes: por un lado se calculan los niveles de eficiencia técnica y de escala de cada período considerado. Luego se presentan los resultados basados en el cálculo de los índices de Malmquist, para analizar los cambios en la eficiencia técnica, cambio tecnológico y la productividad total.

En la Tabla 8 se muestran para las empresas en evaluación, los valores de eficiencia técnica bajo rendimientos variables a escala.

Tabla 8. Eficiencia técnica de las distribuidoras

Distribuidora	2008	2009	2010	2011	2012	Promedio
14	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
6	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
12	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
16	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
1	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
2	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
7	0.9847	1.0000	0.8838	0.7596	0.9724	0.9201
4	0.8162	0.8180	0.8132	0.8376	0.8199	0.8210
19	0.7950	0.8701	0.7835	0.5800	0.8864	0.7830
3	0.7048	0.6898	0.7337	0.7439	0.9580	0.7660
11	0.7726	0.7982	0.7360	0.7598	0.7216	0.7576
17	0.7542	0.6644	0.7220	0.7179	0.8631	0.7443
13	0.6114	0.6547	0.7582	0.6806	0.8527	0.7115
10	0.7216	0.5243	0.9168	0.5487	0.8011	0.7025
15	0.6059	0.7774	0.6581	0.7913	0.6459	0.6957
8	0.7699	0.6016	0.6743	0.5569	0.7543	0.6714
5	0.7643	0.6591	0.5735	0.4470	0.5850	0.6058
20	0.6289	0.5826	0.4577	0.4989	0.8308	0.5998
18	0.5254	0.5087	0.5636	0.5869	0.5794	0.5528
9	0.5968	0.4901	0.5372	0.4240	0.6419	0.5380
Promedio	0.8026	0.7820	0.7906	0.7467	0.8456	0.7935

Elaboración propia.

Basándose en la información utilizada, las distribuidoras que mejor desempeño han tenido durante el período considerado son: 14, 6, 12, 16, 1 y 2. El buen desempeño, se refiere a que son aquellas empresas que minimizan sus costos unitarios para satisfacer su demanda, siempre en comparación con todas aquellas que forman parte de la muestra. Así mismo, las empresas 9, 18, 20, 5, 8 y 15 pueden ser consideradas como las distribuidoras menos eficientes en términos relativos dados los bajos valores que poseen sus índices de eficiencia técnica.

A continuación, se calcula la eficiencia a escala: $D_{t+1}(x_t, y_t)$ y $D_t(x_{t+1}, y_{t+1})$

Tabla 9. Eficiencia a escala de las distribuidoras

Distribuidora	$D_t(x_{t+1}, y_{t+1})$					Promedio	Distribuidora	$D_{t+1}(x_t, y_t)$				Promedio
	2009 a 2008	2010 a 2009	2011 a 2010	2012 a 2011	2008 a 2009			2009 a 2010	2010 a 2011	2011 a 2012		
12	1.06	1.04	1.44	0.76	1.07	12	1.04	1.09	0.96	1.47	1.14	
6	1.14	1.07	0.95	0.89	1.01	14	1.22	0.90	1.12	1.22	1.11	
2	1.23	0.93	0.94	0.93	1.01	2	0.91	1.21	1.10	1.10	1.08	
1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	16	0.99	0.97	1.07	1.11	1.04	
16	1.03	1.03	0.94	0.92	0.98	1	1.00	0.91	1.12	1.12	1.04	
14	0.84	1.15	0.94	0.84	0.95	6	0.91	0.97	1.07	1.15	1.02	

7	1.12	0.91	0.74	0.83	0.90	7	0.89	0.98	0.91	0.89	0.92
81	0.88	0.87	0.80	0.71	0.82	81	0.76	0.77	0.85	0.97	0.84
3	0.72	0.82	0.68	0.85	0.77	19	0.87	0.86	0.79	0.76	0.82
11	0.81	0.73	0.74	0.62	0.72	11	0.78	0.80	0.76	0.89	0.81
17	0.68	0.73	0.69	0.76	0.71	17	0.74	0.66	0.75	0.82	0.74
15	0.81	0.73	0.73	0.57	0.71	3	0.68	0.62	0.80	0.83	0.73
19	0.80	0.79	0.58	0.67	0.71	15	0.58	0.70	0.72	0.89	0.72
13	0.65	0.79	0.69	0.69	0.70	13	0.62	0.63	0.75	0.84	0.71
10	0.60	0.84	0.62	0.65	0.68	10	0.63	0.56	0.86	0.68	0.68
8	0.61	0.72	0.59	0.62	0.64	8	0.76	0.56	0.67	0.68	0.67
5	0.68	0.62	0.42	0.51	0.56	5	0.73	0.61	0.60	0.52	0.61
20	0.51	0.50	0.47	0.67	0.54	20	0.73	0.54	0.49	0.62	0.59
18	0.49	0.56	0.58	0.48	0.53	18	0.54	0.51	0.58	0.70	0.58
9	0.55	0.51	0.47	0.54	0.52	9	0.52	0.49	0.50	0.53	0.51
Promedio	0.81	0.82	0.75	0.73	0.78	Promedio	0.79	0.77	0.82	0.89	0.82

Elaboración propia.

Un valor del índice de eficiencia de escala menor a la unidad ($ES < 1$), significa que el país no ha sido capaz de alcanzar su mayor nivel de eficiencia (en términos comparados) pues no está operando en la escala más productiva que pudiera. La escala en la que opera lleva a reducir su nivel de eficiencia técnica (ET VRS) en un $(1 - ES) * 100 \%$. En este sentido solo las empresas 1, 2, 6, 12, 14 y 16 alcanzan la eficiencia a escala.

Aprovechando la información histórica, es posible estudiar los cambios en los niveles de eficiencia mediante el uso de los índices de productividad de Malmquist y su descomposición en cambios de eficiencia técnica y desplazamiento de la frontera (cambios tecnológicos) como se detalló en capítulo 2. En las Tablas 10, 11 y 12, se muestran los resultados de los cambios en eficiencia técnica, tecnología y productividad total para cada período, respectivamente:

$$\text{Cambio en eficiencia} = \frac{D_{t+1}(x_{t+1}, y_{t+1})}{D_t(x_t, y_t)}$$

Tabla 10. Eficiencia técnica a escala de las distribuidoras

Distribuidora	2008 a 2009	2009 a 2010	2010 a 2011	2011 a 2012	Promedio
10	0.7266	1.7486	0.5985	1.4600	1.1334
20	0.9264	0.7856	1.0900	1.6653	1.1168
13	1.0708	1.1581	0.8977	1.2529	1.0949
3	0.9787	1.0636	1.0139	1.2878	1.0860
19	1.0945	0.9005	0.7403	1.5283	1.0659
9	0.8212	1.0961	0.7893	1.5139	1.0551
17	0.8809	1.0867	0.9943	1.2023	1.0411
15	1.2831	0.8465	1.2024	0.8163	1.0371
18	0.9682	1.1079	1.0413	0.9872	1.0262
8	0.7814	1.1208	0.8259	1.3545	1.0207
7	1.0155	0.8838	0.8595	1.2801	1.0097
4	1.0022	0.9941	1.0300	0.9789	1.0013
14	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
6	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
12	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
16	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
1	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
2	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
11	1.0331	0.9221	1.0323	0.9497	0.9843
5	0.8624	0.8701	0.7794	1.3087	0.9552
Promedio	0.9723	1.0292	0.9447	1.1793	1.0314

Elaboración propia.

Cuando el valor del indicador de cambio de la eficiencia técnica es mayor a la unidad, significa que la distribuidora está acercándose a la frontera, la cual se construye con base en la información de todas las empresas que conforman la muestra. Resultan notables los casos de las distribuidoras 11 y 5, ya que registran, durante el período, un cambio en la eficiencia técnica promedio menor a la unidad. Lo cual indica que no están trabajando en el ahorro de sus costos o bien están teniendo dificultades para mantener la demanda.

$$\text{Cambio tecnológico} = \sqrt{\frac{D_t(x_{t+1}, y_{t+1})}{D_t(x_t, y_t)} * \frac{D_{t+1}(x_{t+1}, y_{t+1})}{D_{t+1}(x_t, y_t)}}$$

Tabla 11. Cambio tecnológico de las distribuidoras

Distribuidora	2008 a 2009	2009 a 2010	2010 a 2011	2011 a 2012	Promedio
9	1.1310	0.9694	1.0870	0.8241	1.0029
6	1.1202	1.0506	0.9422	0.8770	0.9975
10	1.1442	0.9266	1.0992	0.8093	0.9948
3	1.0429	1.1219	0.9140	0.8921	0.9927
7	1.1170	1.0287	0.9716	0.8521	0.9923
15	1.0406	1.1159	0.9198	0.8870	0.9908
4	1.0746	1.0678	0.9515	0.8679	0.9905
8	1.0177	1.0660	1.0363	0.8204	0.9851
1	1.0000	1.0482	0.9450	0.9462	0.9848
5	1.0383	1.0832	0.9510	0.8645	0.9842
12	1.0126	0.9761	1.2270	0.7162	0.9830

16	1.0189	1.0299	0.9332	0.9115	0.9734
2	1.1654	0.8775	0.9241	0.9179	0.9712
17	1.0168	1.0046	0.9579	0.8751	0.9636
13	0.9913	1.0373	1.0143	0.8103	0.9633
11	1.0043	0.9924	0.9701	0.8589	0.9564
18	0.9679	0.9938	0.9773	0.8297	0.9422
14	0.8328	1.1334	0.9190	0.8320	0.9293
20	0.8676	1.0924	0.9318	0.8062	0.9245
19	0.9134	1.0086	1.0018	0.7599	0.9209
Promedio	1.0259	1.0312	0.9837	0.8479	0.9722

Elaboración propia.

Por otro lado, durante el período comprendido por los años de 2008 a 2010, se registra la mayor cantidad de cambios tecnológicos puesto que, en este intervalo se registra un índice promedio superiores a la unidad. Sin embargo, lo interesante es observar como la innovación o cambio tecnológico está en retroceso (el cambio tecnológico promedio va en descenso año con año). Una hipótesis de las causas que provoca lo antes mencionado es un posible comportamiento estratégico de las empresas a subir sus costos OMA en los últimos años de su quinquenio. Es decir, es una práctica común de las empresas reguladas, que al final de su periodo (quinquenio), antes de su revisión quinquenal de tarifas, tiendan a subir sus costos OMA y así poder justificar sus proyecciones de costos a considerar para determinar las tarifas del siguiente periodo. La única forma de poder comprobar esta hipótesis es darle seguimiento a este estudio.

Finalmente, con base en los resultados obtenidos de las Tablas 9 y 10 es posible obtener la eficiencia económica total:

$$\text{Productividad} = \text{Eficiencia económica total} = \text{Cambio en eficiencia técnica} * \text{Cambio tecnológico}$$

Tabla 12. Eficiencia económica total – Productividad de las distribuidoras

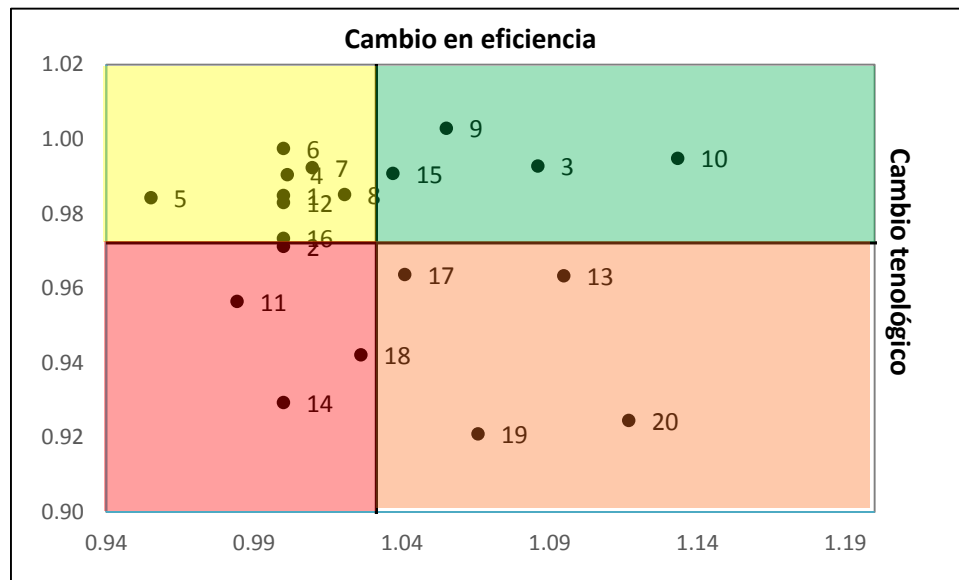
Distribuidora	2008 a 2009	2009 a 2010	2010 a 2011	2011 a 2012	Promedio
10	0.8314	1.6203	0.6579	1.1816	1.0728
3	1.0207	1.1933	0.9267	1.1489	1.0724
13	1.0615	1.2013	0.9105	1.0152	1.0471
15	1.3351	0.9446	1.1060	0.7240	1.0274
9	0.9288	1.0626	0.8580	1.2477	1.0243
20	0.8038	0.8582	1.0156	1.3426	1.0050
17	0.8957	1.0917	0.9525	1.0521	0.9980
6	1.1202	1.0506	0.9422	0.8770	0.9975
7	1.1343	0.9091	0.8350	1.0909	0.9923
4	1.0770	1.0615	0.9801	0.8495	0.9920
8	0.7953	1.1949	0.8559	1.1112	0.9893
1	1.0000	1.0482	0.9450	0.9462	0.9848
12	1.0126	0.9761	1.2270	0.7162	0.9830

16	1.0189	1.0299	0.9332	0.9115	0.9734
2	1.1654	0.8775	0.9241	0.9179	0.9712
18	0.9371	1.1010	1.0177	0.8191	0.9687
19	0.9997	0.9082	0.7416	1.1614	0.9527
11	1.0376	0.9151	1.0015	0.8158	0.9425
14	0.8328	1.1334	0.9190	0.8320	0.9293
5	0.8953	0.9425	0.7412	1.1314	0.9276
Promedio	0.9952	1.0560	0.9245	0.9946	0.9926

Elaboración propia.

Si el valor de productividad total es superior a la unidad, se supone que la distribuidora ha realizado progresos tendientes a lograr un crecimiento de su productividad, disminuyendo sus costos sin dejar de satisfacer su demanda. Tal es el caso de las empresas 10, 3, 13, 15, 9 y 20. Así mismo, es posible identificar el origen o la contribución de estos cambios, ya sea por incrementos en la eficiencia técnica o por efectos del cambio tecnológico, según se muestra en el análisis. Lo anterior es más fácil de apreciarse a través de un mapa de desempeño:

Figura 18. Mapa de desempeño de las distribuidoras



Elaboración propia

Es importante recordar que cuando nos referimos a “tecnología” estamos considerando que esta se define a partir de un conjunto de Unidades Productivas (distribuidoras) que están siendo comparadas entre sí y sobre las que se estima la frontera que se desplaza a lo largo del tiempo.

Finalmente se propone utilizar como base para la determinación del Factor X lo siguiente:

$$\text{Factor X}' = 1 - (\text{Productividad total}/5)$$

CONCLUSIONES

Este trabajo respondió a los objetivos planteados satisfactoriamente, a través del análisis multivariado de la información fue posible observar que las distribuidoras de gas natural no operan en las mismas magnitudes. Existe una empresa que opera a una escala de casi diez veces mayor al resto, en general, se pudo identificar tres grupos de empresas: “grandes”, “medianas” y “pequeñas”. Una característica relevante de las distribuidoras “pequeñas” es que en su mayoría operan en la frontera norte del país, mientras que la característica más relevante de las empresas “grandes” es que son distribuidoras que atienden a zonas de gran actividad comercial e industrial.

La caracterización de las distribuidoras resultó de gran relevancia para definir el tipo de modelos a emplear en el cálculo de los índices de Malmquist. La presencia de economía de escalas observadas a través de un análisis de segmentación y corroboradas al analizar la relación de los costos con las principales variables o factores, determinó utilizar modelos DEA-VRS. Por medio de correlaciones y funciones paramétricas se concluyó que las variables de mayor relación en el comportamiento de los costos son la longitud total de la red y el número de usuarios totales, e incluso la correlación entre ellos es bastante significativa (0.95).

Lo anterior indica que la función de costos está determinada por estas dos variables (longitud total de la red y el número de usuarios totales), sin embargo, dado la que la variable volumen también aporta valiosa información, por ejemplo, para empresas como la 20, la inclusión de esta variable explica una gran parte de la variabilidad de sus costos, para la definición de las fronteras eficientes se consideraron las tres variables: longitud, volumen y usuarios.

Para determinar la frontera eficiente, se consideró la orientación a insumos debido a que las empresas en evaluación están obligadas a atender cierto nivel de demanda, por lo cual, las ganancias en eficiencia ocurren cuando logran satisfacer su demanda minimizando costos. Una vez que se obtuvieron las fronteras para cada año, se observó que las empresas 14, 6, 12, 16, 1 y 2 siempre delinearon la frontera eficiente mientras que las empresas 9 y 18 siempre se ubicaron como las más ineficientes, cayendo incluso para algunos años a niveles inferiores del 50%, en general, la eficiencia técnica promedio para el periodo analizado fue del 79%.

Al aplicar la técnica DEA fue posible distinguir el cambio en la eficiencia técnica de cada distribuidora respecto del cambio tecnológico. En este sentido, se pudo observar que para los cambios en eficiencia la gran parte de las distribuidoras tienen variaciones promedio mayores a uno, a excepción de las distribuidoras 5 y 11. En

cuanto al cambio tecnológico resultó interesante observar una tendencia a la baja, lo cual indica que si bien las empresas, en promedio, están mejorando su eficiencia técnica, en general se presenta un rezago en el proceso técnico, es decir no existe innovación en la industria.

Finalmente, dado que el producto entre el cambio tecnológico y el cambio en eficiencia se interpreta como la eficiencia económica total (a su vez considerada como la eficiencia productiva), se sugiere considerar como factor de ajuste (Factor X) la proporción que le falta a cada empresa para alcanzar su eficiencia económica total, es decir, el umbral existente entre el porcentaje de eficiencia de cada distribuidora y la frontera eficiente. Bajo este criterio, las empresas 10, 3, 13, 15, 9 y 20 resultan ser las más eficientes, desde un enfoque productivo, mientras que las empresas 11, 14 y 5, resultan ser las más ineficientes y por ende les correspondería un mayor ajuste (ajuste de entre 5.8% y 7.2%).

Resulta interesante observar como las empresas que tienen un menor Factor X, son las distribuidoras que tienen los mayores costos en la industria, sin embargo, logran posicionarse entre las mejores debido al cambio en eficiencia técnica que tuvieron durante el periodo. Es decir, estas distribuidoras se ubican por debajo de la eficiencia técnica promedio del periodo, pero han mostrado un desplazamiento hacia la frontera eficiente (cambio de la eficiencia técnica mayores a 1) por encima del promedio de la industria.

El desplazamiento aludido en el párrafo anterior, quizá no se deba a un esfuerzo por generar ahorros en sus costos, sino más bien porque la misma industria permanece rezagada (tendencia a la baja del cambio tecnológico). Ahora bien, este rezago también puede ser causado por factores del mercado ajenos a las empresas (factores no controlables por las empresas). Por ejemplo, hay que considerar que durante 2008 y 2009 se presentó un incremento considerable sobre el precio de gas natural, lo cual provoco impactos negativos en la demanda para gran parte de las distribuidoras (en las variaciones anuales de volumen, para el 2009 se registra la caída más fuerte del volumen conducido en los sistemas), no obstante, para el 2010 se registra una recuperación considerable de la demanda (crecimiento promedio del 5.86%).

Mediante los resultados obtenidos en el presente estudio se puede concluir que los objetivos han sido cubiertos satisfactoriamente, mostrando la gran utilidad y ventajas de la metodología DEA para la realización de este tipo de estudios. Sin embargo, derivado del mismo análisis se abre un abanico de líneas de investigación con el fin de robustecer los resultados, comprobar hipótesis y conocer más sobre los factores que afectan el desempeño de la industria. Los resultados obtenidos deben ser considerados por el Regulador no solo en la determinación del costo de

la contraprestación del servicio sino también en una evaluación más integral (análisis del entorno) del mercado de distribución de gas natural, con el fin de que ello sea considerado a la hora de determinar criterios de aplicación general (metodologías y directivas) y así pueda cumplir con su mandato de promover el desarrollo eficiente de la distribución del gas natural en México.

Si bien se ha demostrado que la metodología DEA tiene grandes bondades para la realización de este tipo de estudios, siendo las principales para este estudio el tratamiento o análisis multidimensional de los datos, el no estar obligado a establecer una forma funcional explícita y sobre todo la de permitir discriminar los cambios en eficiencia pura respecto de los cambios debido a la modificación de la escala de producción. Por otro lado, también es importante resaltar la principal desventaja, sobre la cual se basan la mayor parte de las críticas, que es la de asumir que todas las desviaciones que tienen las empresas respecto a la frontera sean atribuidas a la ineficiencia en su operación.

Por lo anterior, el DEA se basa en la hipótesis de que no todas las firmas son capaces de tomar las mejores decisiones para minimizar los costos y, en consecuencia, no todas están en la frontera, así para cada empresa, la medida relevante de la eficiencia se define en función de las mejores prácticas posibles en un conjunto de empresas particular en un tiempo dado. Finalmente, el grado de ineficiencia de cada empresa se refleja a partir del “score de eficiencia”, que se encuentra en el rango de 0 a 1, siendo que 1, implica que la empresa ha alcanzado su eficiencia, en este sentido, la validez de este supuesto al momento de aplicar la metodología, dependerá de las condiciones en las que las empresas sean comparadas.

Una forma de considerar el “tamaño” de las empresas (factor que influye fuertemente en el nivel de los costos y deja en desventaja a las empresas pequeñas) es utilizar modelos DEA – VRS, que trabajan bajo la consideración de este fenómeno. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, el desempeño de las empresas también puede estar influenciado por factores ajenos a estas, como son el precio del gas, las dificultades en la zona geográfica de operación de cada distribuidora, las condiciones climatológicas, entre otras; que si bien existiera forma de cuantificarlos podrían integrarse en el modelo, en todo caso sería justificable asumir que una parte de la ineficiencia estimada se deba a factores externos de la industria que afectan el desempeño de las empresas.

Es aquí donde los resultados obtenidos a través del DEA tienen que ser reforzados con más estudios y con el apoyo de otras herramientas, por ejemplo, fronteras estocásticas. Sin embargo, para ello se requiere tanto mayor información, como un mayor tiempo de análisis, además, es importante resaltar que no siempre es posible

medir todos los fenómenos que influyen en el mercado, más aún se debe ser precavido de no incluir información irrelevante, esto por dos cuestiones

1. Las empresas ineficientes tienden a justificar ineficiencias específicas como ajenas a su control y por tanto a incluir muchos otros factores que determinan mayor uso de insumos, de tal forma que una empresa ineficiente lucirá eficiente en un ambiente favorable, y
2. Cualquier modelo pierde poder de discriminación al considerar más variables o factores que unidades (empresas) en estudio, debido a la pérdida de grados de libertad.

No obstante, los resultados son consistentes, el estudio está dejando fuera un elemento de vital importancia en la medición de la productividad de las empresas, el cual es la calidad en el servicio. La razón por la que este elemento no fue considerado es debido a que, actualmente no se cuentan con indicadores que midan este parámetro.

En definitiva, se considera que el análisis se vería enriquecido al introducir en el modelo factores que midan la calidad en el servicio, sin embargo, también se requerirá de un estudio profundo para la inclusión de dicho factor. En este sentido vale la pena considerar los estudios de Luenberger (1995), quien realiza una variación al índice de Malmquist introduciendo la función direccional de distancia, la cual es utilizada para calcular el indicador de productividad de Malmquist-Luenberger.

El indicador de productividad de Malmquist-Luenberger tiene la importante propiedad de incorporar como parte de los avances medidos en la productividad, los logros alcanzados por las empresas –u otras entidades económicas– en la reducción de aquellos efectos u outputs no deseados que acompañan a la producción principal, permitiendo así recoger los efectos de los aspectos colaterales no deseados de la actividad económica. Por lo tanto, el primer paso para posibilitar el análisis de esta propuesta, es que la Comisión trabaje en la definición de indicadores de calidad de la prestación del servicio, recabar la información correspondiente, para posteriormente analizar el impacto que tiene este factor dentro de la productividad.

Otro aspecto más a considerar es que la introducción de más variables al modelo puede causar problemas de sobre estimación al tener una muestra relativamente pequeña. Dado que el problema de la dimensión es muy recurrente a la hora de ejecutar la Metodología DEA, en los últimos años se han desarrollado múltiples propuestas para atacar este problema.

Una de las propuestas más atractivas es la combinación de la Metodología DEA con el Análisis de Componentes Principales (ACP), la cual, consiste en aplicar el ACP sobre los insumos a considerar en el modelo, cuando estos se encuentren muy correlacionados, tal como es nuestro caso, lo anterior con el objeto de conformar indicadores (componentes construidos a partir de combinaciones lineales) que logren capturar gran parte de la variabilidad de los datos (al menos un 80%) y correr la Metodología DEA considerando dichos componentes.

Una de las grandes ventajas de esta propuesta es que al considerar menos variables en el análisis (perdiendo un pequeño porcentaje de la variabilidad de los datos a través de los componentes) se tienen más grados de libertad para la modelación. Incluso, una propuesta para posteriores análisis es precisamente esta opción, ya que a través del ACP también se pueden detectar observaciones atípicas y observar lo que motiva esta distinción, así, una vez que se haya detectado dichas empresas de características relevantes se debe indagar sobre el impacto que tienen estas empresas al excluirla de los análisis.

Aunque la metodología aquí expuesta resuelve satisfactoriamente el problema planteado (medición del desempeño de las distribuidoras con fines de determinar el factor de eficiencia productiva X), se sugiere contrastar los resultados obtenidos contra la aplicación de otras metodologías de medición de la productividad diferente a los indicadores de Malmquist, expuestos en el anexo.

Otro aspecto importante, es el tema de la calidad de la información, si bien existe un catálogo de cuentas que sirve de guía para la identificación y clasificación de los costos, al realizar el análisis descriptivo y validación de la información pareciera que existen algunas inconsistencias en la forma de como las empresas clasifican sus costos (operación, mantenimiento y administración). Esta fue una de las razones que dificultó enriquecer y/o robustecer el análisis, optando por considerar los costos totales.

Una propuesta que ayudaría a un mejor análisis comparativo de los costos es clasificar los costos, además de por tipo de actividad, por su naturaleza : materiales, equipo & herramientas, mano de obra, prestaciones, etc. Lo anterior permitiría observar, por ejemplo, que tan eficientes son las empresas que cuentan con sindicato en contraste de las que no tienen.

Otra propuesta para analizar a futuro es realizar el estudio por sectores de consumo (residencial, comercial e industrial) debido a que es posible que parte de la ineficiencia se deba a un sector en específico. Lo anterior, no es posible distinguirlo al considerar la información de manera global, si no cuando el análisis se realice para cada sector.

Finalmente, es importante mencionar que actualmente la Comisión no cuenta con indicadores de desempeño económico para el sector de distribución de gas natural, como en el caso de España (utiliza OMA por usuarios), o como es el caso del transporte (OMA/longitud de la red); más aún no existe una metodología consensuada para la estimación del Factor X, lo que ocasiona en algunas ocasiones que las revisiones tarifarias se lleven a cabo en un ambiente de controversia, situación que podría impactar negativamente sobre la misión y los objetivos de la Comisión (regular de manera transparente, imparcial y eficiente las industrias del gas, de los refinados, derivados de hidrocarburos y de electricidad, generando certidumbre que aliente la inversión productiva, fomentando una sana competencia, propiciando una adecuada cobertura y atendiendo a la confiabilidad, calidad y seguridad en el suministro y la prestación de los servicios, a precios competitivos, en beneficio de los usuarios).

Si el regulador requiere cierto nivel de discrecionalidad que le permita adaptar la estimación a la evolución de la industria y al surgimiento de factores no previstos, la variación de los criterios de cálculo, constituye un cambio de las reglas de juego, lo que incrementa el riesgo de llevar a cabo inversiones de larga maduración.

Por los puntos mencionados con antelación, se hace énfasis en la creación de un sistema de indicadores de desempeño de la industria de distribución de gas natural que le permita a la Comisión estandarizar la información relevante de análisis, realizar un monitoreo continuo del sector, facilitar el análisis para la determinación del Factor X y mejorar la transparencia en sus procesos de revisión tarifaria, entre otros beneficios. Derivado del análisis realizado, se propone un indicador de costos basado en el número de usuarios, por ser este uno de los factores más influyentes en el nivel de los costos.

BIBLIOGRAFÍA

- AGRELL, Per; BOGETOFT, Peter (2007). *Development of benchmarking models for German electricity and gas distribution*. Reporte final a BNetza. Sumicsid.
- ALVAREZ, Inmaculada; BECERRIL, Osvaldo; MORAL, Laura (2011). *The effect of infrastructure on total factor productivity and its determinants: a study on México*. Estudios Económicos, El Colegio de México. México.
- APPA, Gautam; CHAGAS, Manuel (2010). *DEA in X-factor evaluation for the Brazilian electricity distribution industry*. Working paper LSEOR 10-121. The London school of economics and political science. Gran Bretaña.
- BANKER, Rajiv. D.; CHARNES, Abraham; COOPER, William. W. (1984). *Models for estimation of technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis*. Management science No. 30. USA.
- BERG, Sandford (2012). *Benchmarking from PURC Report*. Public Utility Research Center, University of Florida. Florida, USA.
- BERNARD, Jean-Thomas; BOLDUC, Denis; HARDT, Annie (1998). *The marginal costs of natural gas distribution pipelines: the case of société en commandite gas métropolit*. Université Laval. Québec, Canada.
- BOGETOFT, Peter; OTTO, Lars (2011). *Benchmarking with DEA, SFA and R*. Springer. New York, USA.
- CARRINGTON, Roger.; COELLI, Tim; GROOM, Eric (2002). *International benchmarking for monopoly price Regulation: the case of Australian gas distribution*. Journal of regulatory economics, 21, 191-216.
- COELLI, Tim; LAWRENCE, Denis (2006). *Performance Measurement and regulation of network utilities*. Edward Elgar Publishing Limited. Gran Bretaña.
- COELLI, Tim; PERELMAN, Sergio (1999). *A comparison of parametric and non-parametric distance functions: with application to European railways*. European journal of operation research.
- COLL, Vicente; BLASCO, Olga María (2006). *Evaluación de la eficiencia mediante el análisis envolvente de datos. Introducción a los modelos básicos*. Edición electrónica. Texto completo en www.eumed.net/libros/2006c/197/

- COOPER, William; SEIFORD, Lawrence; y TONE, Kaoru (2002). *Data envelopment analysis. A comprehensive test with Models, applications, references and DEA-Solver software*. Kluwer academic publishers. Boston, USA.
- COREMBERG, Ariel. (2006). *La medición de la productividad y los factores productivos*. Tesis por el título de doctorado en economía. Universidad Nacional de la Plata. Argentina.
- CHARNES, Abraham; COOPER, William; GOLANY, Boaz; SEIFORD, Lawrence (1985). *Foundations of data envelopment analysis for Pareto-Koopmans efficient empirical production functions*. Journal of Econometrics No.30.
- CHIRINOS, Alira; URDANETA, Mary (2007). *Medición de la Eficiencia en el sector avícola mediante índices de Malmquist*. Publicación de la series Agroalimentaria No. 25. España.
- D.BARRIO, María José; BEDATE, Ana; HERRERO, Luis César; SANZ, José Ángel (2012). *¿Son eficientes las instituciones culturales? La evaluación de una red de museos como prototipo de estudio*. XV Encuentro de la asociación española de contabilidad y administración de empresas, Portugal.
- DEFILIPPI, Enzo (2009). *Estimación del factor de productividad en el cálculo de tarifas reguladas: El demonio está en los detalles*. Cuadernos de investigación No. 14. Instituto del Perú. Perú.
- DIEWERT, Erwin (2000). *The challenge of total factor productivity measurement*. Department of economics V6T 1Z1. University of British Columbia. Vancouver, Canada.
- ESTRADA, Juan Manuel. *Programación Lineal. Apuntes, Introducción a la programación lineal*. México. Departamento de Sistemas, Sección de Investigación de Operaciones, Universidad Nacional Autónoma de México.
- ERRO, Lourdes; OLINTO, Roberto Luis (2006). *Medidas de volumen recomendadas por el SNC 1993: Aplicación de índices encadenados en América Latina*. Seminario Latinoamericano de cuentas nacionales. Informe final. Guatemala.
- FARAWAY, Julian (2002). *Practical Regression and Anova using R*. USA.
- FÄRE, Rolf; GROSSKOPF, Shawna; LOVELL, C. A. Knox (1985). *The measurement of efficiency of production*. Boston, USA.

- FÄRE, Rolf; GROSSKOPF, Shawna; NORRIS, Mary; ZHANG, Zhenyu (1994), *Productivity growth, technical progress and efficiency changes in industrialized countries*. American economic review, 84, 66-83.
- FARRELL, M.J. (1957). *The measurement of productive efficiency*. Journal of the Royal Statistical Society. Series A (General), Vol. 120, No.3.
- FERRO, Gustavo; ROMERO, Carlos Adrián (2006). *Comparación de medidas de cambio de productividad. Las aproximaciones de Malmquist y Luenberger en una aplicación al método de seguros*. Francia.
- FERRO, Gustavo; ROMERO, Carlos Adrián (2009). *Estudio de fronteras de Eficiencia. Empresas de agua y alcantarillado de América Latina. Base de Datos de ADERESA – Años 2003 a 2008*. Asociación de Entes Reguladores de Agua Potable y Saneamiento de las Américas.
- FRAQUELLI, Giovanni; GIANDRONE, Roberto. (1997). *Costs, technology and ownership of gas distribution in Italy*. Ceris-CNR, W.P. N° 13. Italia.
- GONZALES, Robinson A. (2010). *Utilización del Análisis Envolvente de Datos (DEA) en el desarrollo de una metodología para el establecimiento de costos eficientes de remuneración, en la administración, operación y mantenimiento de los sistemas de distribución eléctrica*. Tesis por el título de Magíster en Ingeniería Eléctrica. Universidad Nacional de Colombia.
- GULDMAN, Jean-Michel (1985). *Economies of scale and natural monopoly in urban utilities: the case of natural gas distribution*. Geographical Analysis, 17, 302-317.
- JAMASB, Tooraj; POLLIT, Michael G. (2001). *Benchmarking and regulation: international electricity experience*. Utilities Policy 9, p. 107-130. Pergamon.
- JAMASB, Tooraj; POLLITT, Michael G. (2003). *International benchmarking and regulation: an application to European electricity distribution utilities*. Energy Policy 31 (15), 1609-1622.
- JAMASB, Tooraj; POLLITT, Michael G.; TRIEBES, Thomas P. (2008). *Productivity and efficiency of US gas transmission companies: A European regulatory perspective*. Energy Policy 36 (9), 3398-3412.
- JAMISON, Mark; SANFORD, Berg (2012). *Utility regulatory fundamentals: A reference handbook from PURC Training Programs*. Public utility research center, University of Florida. Florida, USA.

- KAUFMANN, Lawrence; HOVDE, Dave (2009). *X Factor recommendations for New Zealand electricity distribution price controls*. Pacific Economics Group. Wisconsin, USA.
- LANTERI, Luis N. (2002). *Productividad, desarrollo tecnológico y eficiencia. La propuesta de los índices de Malmquist*. Clasificación JEL: C43, D24, O4. Argentina.
- LOFTI, Hosseinzadeh; GHASEMI, Vaez (2007). *Malmquist productivity Index on Interval data telecommunications firms, application of data envelopment analysis*. Applied mathematical sciences, Vol. 1, 2007, no. 15, 711 – 722. Irán.
- LONDOÑO, Liz Jeanneth; GIRALDO, Yudy Elena (2009). *Análisis envolvente de datos –DEA-: Una aplicación al sector de telecomunicaciones de países de medianos ingresos*. Universidad EAFIT. Medellín, España.
- LOWRY, M.N.; GETACHEW, Lullit (2009). *Econometric TFP targets, Incentive regulation and the Ontario gas distribution industry*. Review of network economics 8 (4), 325-345.
- MALMQUIST, Sten (1953). *Index numbers and indifference curves*. Trabajos de estadística 4.
- MALMQUIST, Sten (1993). *Index numbers and demand functions*. Boston, USA. Journal of Productivity Analysis, 4.
- MEDINA, José Benjamín (2007). *Análisis de eficiencia a través de fronteras no paramétricas: DEA. Aplicación al mercado de las AFORES*. Tesis de licenciatura. Facultad de ciencias, UNAM. México.
- MIESNER, Thomas; LEFFLER, William (2006). *Oil&Gas Pipelines. In nontechnical language*. PennWell. Estados Unidos.
- MARQUEZ, V.; ALMEIDA, P.; CUNHA, M; PACO, M; ROCHA, M.; TRINDADE, A (2012). *What drives efficiency on the Portuguese gas distribution?* IX international conference on the European Energy Market, Italia.
- NAVARRO, José César Lenin; TORRES, Zacarías (2006). *Análisis de la eficiencia técnica global mediante la metodología DEA: evidencia empírica en la distribución eléctrica mexicana en su fase de distribución, 1990-2003*. Revista nicolaita de estudios económicos, Vol. 1, No. 1. México.

- NIESWAND, Maria; CULLMANN, Astrid; NEUMANN, Anne (2009). *Overcoming data limitations in nonparametric benchmarking: applying PCA-DEA to natural gas transmission*. Discussion papers. Diw Berlin, Alemania.
- PORTELA, Maria; THANASSOULIS, Emmanuel (2004). *Measuring productivity by Malmquist Indices in the presence of negative data: an application to bank branches*. Journal of the operational research society, Vol 55, pp 1111-1121
- PRICE, C. W.; WEYMAN-JONES, T. (1996). *Malmquist indices of productivity change in the UK gas industry before and after privatization*. Applied economics 28, 29-39
- RUIZ, E. A. (2008). *Análisis de la eficiencia en la distribución de electricidad: una aproximación no paramétrica al caso peruano*. Tesis para optar por el título profesional de economista. Universidad Nacional del Callao, Perú.
- ROSSI, M. (2001). *Technical change and efficiency measures: the post-privatization in the gas distribution sector in Argentina*. Energy Economics 23, 295-304.
- SABAH, M.; MUSTAFA, A. (2012). *Application of Data Envelopment Analysis to measure the technical efficiency of oil refineries: a case study*. International journal of business administration.
- SCHUSCHNY, Andrés Ricardo (2007). *El método DEA y su aplicación al estudio del sector energético y las emisiones de CO2 en América Latina y el Caribe*. Estudios estadísticos y prospectivos, Serie 46. CEPAL, División de estadística y proyecciones económicas. Santiago de Chile.
- THRALL, Robert (2000). *Measures in DEA with an application to the Malmquist Index*. Journal of Productivity Analysis. Springer link. USA.
- TILLEY, B.; WEYMAN-JONES, T. (1999). *Productivity growth and efficiency change in electricity distribution*. Department of economics, Loughborough University, Reino Unido.
- TOVAR, Beatriz; RAMOS, F.J.; FAGUNDES, Edmar. (2013). *Efficiency and performance in gas distribution. Evidence from Brazil*. Documento de trabajo. Instituto Universitario de desarrollo regional, Facultad de ciencias económicas y empresariales, Universidad de La Laguna, España.
- TRILLO, David. (2002). *La función de Distancia: Un análisis de la eficiencia en la universidad*. Tesis doctoral. Departamento de Economía. Universidad Rey Juan Carlos. España.

Development of benchmarking models for distribution system operators in Belgium (2011). Reporte final a la CREG. Sumicsid.

RIO-GD1: Initial Proposals – Step – by- step guide for the cost efficiency assessment methodology (2012). Consultation- Supporting document OFGEM. Inglaterra.

Top down benchmarking of UK gas distribution network operators. A report by Europe Economics to OFGEM (2007). Europe Economics. Londres, Inglaterra.

FRONTIER Economics (2010). RPI-X@20: The future role of benchmarking in regulatory reviews. Reporte final preparado para la OFGEM. Frontier Economics Ltd. Londres, Inglaterra.

Background to work on assessing efficiency for the 2005 distribution price control review. CEPA's report on Benchmarking (2003). Reporte final preparado para la OFGEM. Cambridge Economic Policy Associates. Londres, Inglaterra.

Propuesta de revisión de tarifas del aeropuerto internacional Jorge Chavez a través de RPI-X (Factor de productividad) para el periodo 2014-2018 (2013). Lima Airport Partners. Ositran. Perú.

Metodologías para la determinación de costos eficientes de comercialización. Aspectos conceptuales (2011). VII Jornada de comercialización de energía, Mercados Energéticos, Consultora. Bogotá, Colombia.

Resumen del estudio de benchmarking distribución de gas natural en América Latina (2008). Quantum América Corp.

Estudio de Benchmarking distribución de gas natural en América Latina (2009). Quantum América Corp.

Introducción a la regulación de tarifas de los servicios públicos (2006). Documento de trabajo No.22. OSINERG. Lima, Perú.

Reglamento del Gas Natural en México.

Directiva sobre la determinación de tarifas y el traslado de precios para las actividades reguladas en materia de gas natural, DIR-GAS-001-2007. Comisión Reguladora de Energía. México.

Directiva de Contabilidad para las actividades reguladas en materia de gas natural, DIR-GAS-002-1996. Comisión Reguladora de Energía. México.

Directiva sobre la determinación de zonas geográficas para fines de distribución de gas natural, DIR-GAS-003-1996. Comisión Reguladora de Energía. México.

Prospectiva del mercado de gas natural, 2012-2026. Publicación anual. Secretaría de Energía. México.

Prospectiva del mercado de gas natural, 2010-2015. Publicación anual. Secretaría de Energía. México.

Prospectiva del mercado de gas natural, 2009-2024. Publicación anual. Secretaría de Energía. México.

Informe denominado “Proceso de fijación de las tarifas de distribución de gas natural de Lima y Callao, periodo 2009-2013”. Anexo I del recurso de reconsideración de la Resolución 262-2009-OS/CD. Osinergmin, Peru.

National association of regulatory utility commissioners (1989). *Gas distribution rate design manual*. Washington, USA.

Páginas de entes gubernamentales consultadas:

Comisión Reguladora de Energía (México): www.cre.gob.mx/

Secretaría de Energía (México): www.sener.gob.mx/

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (México):
www.inegi.org.mx/

Federal Energy Regulatory Commission (USA): www.ferc.gov/

Office of Gas and Electricity Markets (Inglaterra): www.ofgem.gov.uk/

Comisión Nacional de Energía (España): www.cne.es/

Comisión de Regulación de Energía y Gas (Colombia): www.creg.gov.co/

Agencia Nacional de Energía Eléctrica (Brasil): www.aneel.gov.br/

Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (Perú):
www.osinergmin.gob.pe/