

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

EVALUACIÓN COMPARATIVA (BENCHMARKING) ENTRE EMPRESAS ELÉCTRICAS DE DISTRIBUCIÓN DEL ECUADOR

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA EN
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

HILARY VANESSA MALLIQUINGA LAICA

hilary.malliquinga@epn.edu.ec

DIRECTOR: NELSON VICTORIANO GRANDA GUTIÉRREZ

nelson.granda@epn.edu.ec

DMQ, octubre 2022

CERTIFICACIONES

Yo, HILARY VANESSA MALLIQUINGA LAICA declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento



Hilary Malliquinga

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Hilary Vanessa Malliquinga Laica, bajo mi supervisión.



Nelson Granda
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el producto resultante del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

Hilary Malliquinga

Nelson Granda

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi familia quienes son el pilar fundamental y motor en mi vida para poder tener la oportunidad de realizar mis estudios universitarios y cumplir mis metas.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios y la Virgen por permitirme el regalo de la vida, la familia, el amor, el estudio y la amistad.

Agradezco a mis padres quienes sin su constante apoyo y dedicación hacia mí no hubiese podido salir adelante, que sería de mí sin ellos.

Agradezco a mi hermana y mi sobrina que me dan la fuerza para salir adelante y seguir luchando por algo mejor.

Agradezco a mi abuelita quien siempre me dio su bendición y consejos para seguir estudiando y jamás perder la vista en mi meta.

Agradezco al amor por estar a mi lado a lo largo de la carrera y recordarme que si lo quiero lo puedo lograr.

Agradezco a mi tutor Dr. Nelson Granda por la paciencia y la ayuda que me brindo en el trabajo como docente para poder dar el último paso en mi carrera y culminar mis estudios.

Agradezco a mis amigos que me acompañaron en mi vida universitaria: Martin, Sebastián, Santiago e Israel por su amistad que fue una de las mejores cosas de la universidad y por su ayuda en lo largo de la carrera.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN.....	VII
ABSTRACT.....	VIII
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivo general.....	2
1.2 Objetivos específicos.....	2
1.3 Alcance	3
1.4 Marco teórico	4
1.4.1 BENCHMARKING.....	4
1.4.1.1 Definición de benchmarking.....	4
1.4.1.2 Objetivos del benchmarking.....	4
1.4.1.3 Beneficios del benchmarking.....	5
1.4.1.4 Tipos de benchmarking.....	5
1.4.1.5 Niveles de benchmarking.....	6
1.4.2 BENCHMARKING EN EMPRESAS DISTRIBUIDORAS.....	8
1.4.2.1 Metodologías de benchmarking.....	8
1.4.3 FRONTERAS DE EFICIENCIA	9
1.4.3.1 Eficiencia Productiva.....	9
1.4.3.2 Eficiencia Asignativa	10
1.4.4 ANÁLISIS ENVOLVENTE DE DATOS (DEA).....	10
1.4.4.1 Antecedentes de uso del DEA y fronteras de eficiencia.....	10
1.4.4.2 Formulación.....	12
1.4.4.3 Orientación de Modelos	12
1.4.4.4 Otros Modelos DEA.....	14
1.4.5 HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES.....	15
1.4.5.1 pyDEA.....	15
1.4.5.2 DEEOS	16
1.4.5.3 MaxDEA Pro.....	17

2 METODOLOGÍA	18
2.1 Propuesta metodológica	18
2.2 Tratamiento de datos	18
2.3 Aplicación de la herramienta	19
2.4 Análisis de resultados	22
3 APLICACIÓN Y RESULTADOS	23
3.1 Caso Estudio Chile.....	23
3.2 Caso Estudio Ecuador	28
3.2.1 Tratamiento de datos.	28
3.2.2 Aplicación de pyDEA.....	34
3.2.3 Análisis de los resultados.....	36
4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	44
4.1 Conclusiones.....	44
4.2 Recomendaciones	45
5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	45
6 ANEXOS	54

RESUMEN

El presente trabajo de integración curricular tiene como objetivo analizar y estudiar el tema de benchmarking energético entre empresas distribuidoras del país, desde un criterio de eficiencia. Se propone una metodología de evaluación de eficiencia empleando diferentes parámetros característicos de cada empresa distribuidora.

La metodología desarrollada para el benchmarking energético emplea técnicas estadísticas y Análisis Envolvente de Datos (DEA por sus siglas en inglés), las cuales se aplican junto con un conjunto de indicadores relativos a la eficiencia del proceso productivo de las empresas de distribución de energía eléctrica.

Los resultados obtenidos permiten evidenciar que un modelo DEA correctamente configurado es aplicable para el estudio de benchmarking entre empresas distribuidoras.

PALABRAS CLAVE: Análisis de Envolvente de Datos, benchmarking, eficiencia, parámetros.

ABSTRACT

This curricular integration work aims to analyze and study the issue of energy benchmarking among electrical utilities in Ecuador, using an efficiency criterion. A methodology for efficiency evaluation using different characteristic parameters of each distribution company is proposed.

The methodology developed for energy benchmarking uses statistical techniques and Data Envelopment Analysis (DEA), which are applied together with a set of indicators related to the efficiency of the production process of electricity distribution companies.

The results obtained show that a correctly configured DEA model is applicable for the benchmarking study between electricity distribution companies.

KEY WORDS: Data Envelopment Analysis, benchmarking, efficiency, parameters.

1 INTRODUCCIÓN

En el Ecuador, la distribución de energía eléctrica es una actividad altamente regulada, donde se otorgan concesiones monopólicas para una determinada área geográfica; en este proceso interviene un ente regulador que, generalmente, plantea los esquemas de tarifación y supervisa la eficiencia tanto en la inversión de infraestructura y como en la operación y administración de la empresa a cargo de la concesión [1].

Con el propósito de conocer la eficiencia con la que se maneja una empresa aparece la necesidad de comparar diversos indicadores relacionados con el funcionamiento de varias empresas similares. Para realizar una comparación de indicadores se puede utilizar el método de Benchmarking. En el libro “Administración de Operaciones”, Krajewski y Ritzman definen al benchmarking como un proceso continuo y sistemático que mide procesos, servicios y productos de una empresa para compararlos con industrias líderes. Las compañías emplean este método para comprender de mejor manera cómo realizan sus actividades las compañías más destacadas del sector, con miras a mejorar sus propios procesos [2]. El Benchmarking se centra en establecer metas cuantitativas de mejoramiento.

Existen diversas técnicas de benchmarking que se basan en la comparación del funcionamiento presente de la empresa con relación a su funcionamiento en el pasado, o bien con relación al desempeño de otras empresas del sector. Cuando se comparan diferentes empresas, es habitual hacerlo considerando su eficiencia, idea que está rigurosamente ligada a la función de producción tácita en los indicadores de eficiencia y productividad.

No todas las compañías son capaces de dirimir los problemas de optimización que involucran maximizar la producción o minimizar el costo, en consecuencia, no todas las firmas minimizan el costo necesario para alcanzar un determinado nivel de producción. La solución de los economistas al inconveniente expuesto fue el perfeccionamiento del concepto de frontera. De esta forma, la frontera de producción está determinada por las imperceptibles mezclas de insumos requeridos para conseguir otros niveles de producción, manipulando la función de costos; una definición alternativa de la frontera de producción es el máximo producto asequible con desiguales mezclas de insumos, conferida la tecnología, manejando la función de producción. Las empresas que están produciendo en la frontera de producción son llamadas eficientes, y las que se hallan por debajo son consideradas ineficientes [3].

El primero en proporcionar una forma de medición empírica la eficiencia productiva fue Farrel (1957). Dado que es desconocido el mejor comportamiento, planteó estimar como referencia eficiente la mejor práctica contemplada que se halla en la muestra y de esta forma calcular los índices de eficiencia relativos a estas empresas que muestran el principal comportamiento productivo. Las empresas que integran la excelente práctica componen lo que se conoce como “frontera eficiente”. Para el caso en que se desconozca la función de producción, Farrel sugiere estimar una frontera paramétrica valiéndose de modelos de programación matemática [4], [5].

El Análisis Envolvente de Datos (DEA por sus siglas en inglés) es una herramienta no paramétrica que emplea programación matemática para la edificación de una frontera de eficiencia o una superficie envolvente en base de datos de entrada y salida de un conjunto de unidades o empresas [1]. El DEA es una metodología estadística basada en la caracterización de la eficiencia de un conjunto de entidades pares llamadas Unidades de Toma de Decisiones (DMU por sus siglas en inglés) que trasmutan múltiples entradas en múltiples salidas [6]. Se concluye que los estudios de benchmarking se han difundido y aplicado más ampliamente debido a la utilidad que brindan; por ejemplo, a un ente regulador le permiten definir parámetros de eficiencia que servirán de base para regular costos operacionales de manera neutral, real, objetiva y consistente. A las empresas, les permiten conocer su nivel de eficiencia en relación con el conjunto de empresas, posiblemente competidoras, y como resultado, poder tomar decisiones de mejora continua.

1.1 Objetivo general

Realizar un estudio de benchmarking entre las empresas distribuidoras de energía eléctrica del Ecuador aplicando la técnica de Análisis Envolvente de Datos

1.2 Objetivos específicos

1. Realizar una investigación bibliográfica de los métodos de benchmarking aplicados a empresas de distribución de energía eléctrica
2. Recopilar información estadística de las empresas distribuidoras de energía eléctrica del Ecuador, considerando como fuente de información la Agencia de

Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables (ARCERNNR), enfocada en el desarrollo de estudios comparativos

3. Implementar una herramienta computacional, en lenguaje Python, para la evaluación comparativa de las empresas distribuidoras de energía eléctrica del país
4. Aplicar la herramienta computacional desarrollada a las empresas distribuidoras de energía eléctrica del Ecuador y evaluar los resultados obtenidos

1.3 Alcance

Se realiza una revisión bibliográfica acerca de métodos de benchmarking, modelación estadística y métodos de evaluación energética aplicados a empresas de distribución de energía eléctrica; la búsqueda de información se centra en libros, artículos técnicos, revistas especializadas, tesis, internet, etc.

En base a los resultados de la investigación bibliográfica, se elabora un documento resumen con la información más relevante, donde se incluyen: formulación matemática y restricciones del problema, algoritmos y métodos de evaluación, información mínima de entrada.

Adicionalmente, se recopilan y analizan las herramientas computacionales disponibles, de libre acceso y código abierto que permitan realizar estudios de benchmarking. Se recopila información relacionada con el lenguaje de programación, datos de entrada y resultados que entregan cada herramienta.

Se recopila información de las empresas distribuidoras del país de las instituciones del sector eléctrico ecuatoriano como la Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables (ARCERNNR) y El Operador Nacional de Electricidad (CENACE). Con la información obtenida se elabora una base de datos en Excel que permita la exportación de información a la herramienta computacional escogida para realizar el benchmarking. La información estadística recopilada deberá cumplir con los criterios recopilados en la etapa de investigación bibliográfica y la aplicación del Análisis Envolvente de Datos al problema.

En base al análisis de características de las librerías de libre acceso y código abierto, se define una librería en lenguaje Python para la solución del problema DEA aplicado al benchmarking entre empresas de distribución. Se implementan rutinas que permiten la

resolución automatizada del problema DEA y presenten resultados al usuario. Se realiza un análisis y comparación de los resultados obtenidos con la aplicación de la herramienta escogida con un caso de estudio similar entre empresas distribuidoras de Chile, para determinar si se puede obtener una solución adecuada del problema DEA.

Considerando la información estadística recopilada de las empresas distribuidoras del Ecuador, se aplica la herramienta computacional para un estudio de DEA obteniendo parámetros de eficiencia comparables entre cada empresa de distribución. Se evalúan los niveles de eficiencia y determinan las empresas más eficientes.

1.4 Marco teórico

1.4.1 BENCHMARKING

1.4.1.1 Definición de benchmarking

Krajewski y Ritzman definen al benchmarking a modo de un proceso continuo y sistemático que mide procesos, servicios y productos de una empresa para compararlos con industrias líderes. Las compañías emplean este método para comprender cómo realizan sus actividades las empresas más notorias del sector con propósitos a mejorar sus propios procesos [2].

1.4.1.2 Objetivos del benchmarking

Las empresas utilizan el benchmarking con diferentes fines; varias compañías lo utilizan a modo de un proceso global de solución de problemas para mejorar la empresa, otras lo utilizan a manera de un mecanismo activo para conservarse actualizadas en las prácticas más nuevas del mercado [7].

Se mencionan como objetivos también:

- Organización estratégica, perfeccionamiento de planes a corto y a largo plazo
- Predicciones de tendencia de los pronósticos en áreas comerciales
- Optimización de desempeño continuamente
- Identificación de estándares de progreso de una organización.
- Nuevas ideas aprendizaje funcional.
- Cotejos con competidores u organizaciones
- Producto/proceso con los principales resultados

- Implantación de objetivos de desempeño en relación con las prácticas más modernas.

1.4.1.3 Beneficios del benchmarking

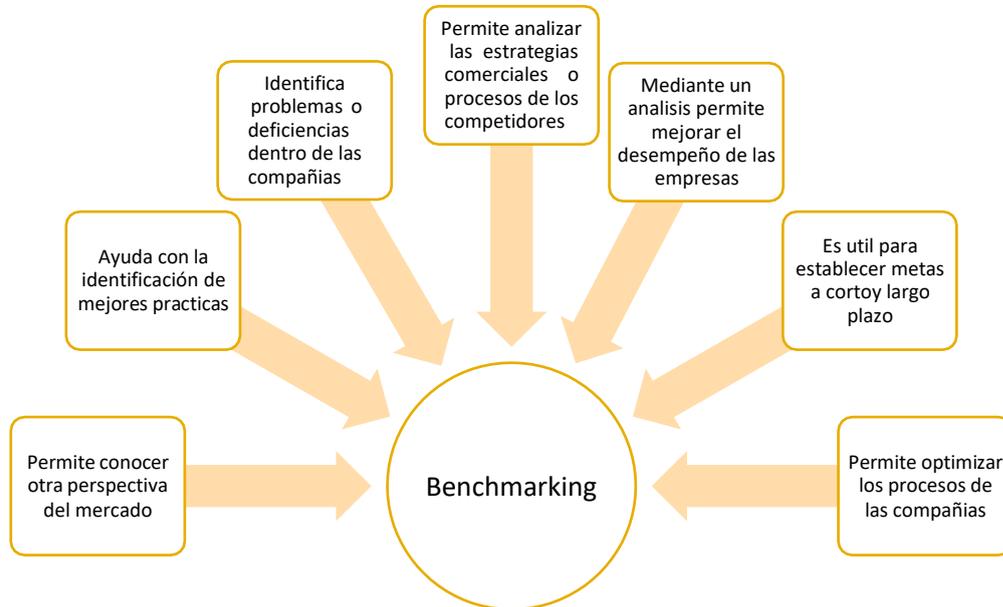


Figura 1. Beneficios del Benchmarking [7].

1.4.1.4 Tipos de benchmarking

El benchmarking tiene varias formas de aplicación para distintos procesos de trabajo en diferentes organizaciones, cada una con una naturaleza diferente, por lo que se tiene diferentes tipos de benchmarking [7].

Benchmarking interno

La meta del benchmarking interno es poder precisar los mejores esquemas de desarrollo de una organización [7].

Michael Spendolini asevera que en el benchmarking interno hay oposiciones en medio de los diferentes procedimientos de trabajo de la organización, esto debido a una disconformidad en puntos de vista como el medio de las administraciones y de los empleados en los atípicos puestos de trabajo, historia local de la organización y la geografía. Igualmente afirma que ciertos procedimientos de trabajo de una organización logran ser más competentes o eficientes que otros procesos de la misma organización. Algunas organizaciones logran percatarse de los frutos inmediatos al reconocer las mejores destrezas comerciales internas y llevar inmediatamente esta investigación a diferentes fragmentos de la misma organización [8].

Benchmarking competitivo

Identificar los productos, servicios y procesos de trabajo de los adversarios directos de la organización es parte del objetivo del benchmarking competitivo [7].

El benchmarking competitivo tiene como objetivo distinguir información detallada referente a los productos, los procesos y los resultados comerciales de sus adversarios y cotejarlos con los propios de la compañía. Este tipo de benchmarking es muy útil y beneficioso cuando se busca insertar o posicionar un producto, servicio o procesos en el mercado [8]. Se debe tener en cuenta que la identificación y recopilación de la información para este tipo de benchmarking se la debe obtener de empresas con características similares a la de la organización, caso contrario no tendría sentido el análisis.

Benchmarking funcional

El benchmarking funcional tiene como meta asemejar productos, servicios, y procesos de trabajo de compañías que pueden o no ser contendientes directos de la organización, identificando las principales destrezas de dichas organizaciones que se hayan posicionado como las mejores teniendo una reputación de excelencia [7].

1.4.1.5 Niveles de benchmarking

Se puede clasificar el benchmarking en dos niveles:

Benchmarking Informal

El benchmarking informal es el más conveniente en duración y recursos. No obstante, las posibilidades cuando son superiores se utilizan las técnicas de Benchmarking planeado [7].

Los pasos básicos del benchmarking informal son:

- **Conocimiento:** Mediante conversaciones con clientes de forma casual o conversaciones de negocios se puede llegar a conocer si alguna organización ya sea competidora o no, está realizando algo extraordinario que le permita tener un mejor rendimiento en sus procesos. Este nivel también se lo puede lograr mediante la realización de encuestas a los clientes con preguntas básicas como ¿Qué cree que nos hace superior a la competencia?, ¿Qué cree que nos hace falta mejorar en comparación con los competidores? Son preguntas que ayudan a tener un conocimiento de qué tan bien está un proceso o qué necesita para ser mejor [7].

- Investigación: En la investigación se revisa o se trata de tener información más profunda del conocimiento que se obtuvo previamente, se lo puede realizar mediante preguntas más detalladas, estudiando un artículo o tener contacto con algunas fuentes ya sea de manera presencial o vía telefónica [7].
- Acción: Este es el paso final en el benchmarking, donde una vez procesada toda la información y mediante varios análisis se pueden incorporar las prácticas de otras organizaciones o de la misma, para así beneficiarse de los procesos que requieren ser optimizados sin necesidad de realizar una acción de mejora desde cero o cambiar todo el proceso.

Se debe considerar que la información que va a ser incorporada en los productos o servicios fue previamente estudiada y arrojó buenos resultados no solo para el proceso al que se le incorpora sino para toda la organización, así el costo de inversión va a valer la pena y no será un desperdicio de tiempo y recursos.

Benchmarking planeado

Se utiliza el benchmarking planeado para perfeccionar aspectos fundamentales en los mercados, suministrando una ventaja competitiva en relación con la inserción de satisfacción, lealtad de clientes y mercado. El benchmarking planeado consta de las siguientes fases:

- Fase I – Planeación: el objetivo de la primera fase es el de realizar el método de Benchmarking [7].
- Fase II – Análisis: en la segunda fase se comprende el poder de los competidores y se valora el desempeño de los mismos [7].
- Fase III – Integración: se utiliza la información para definir las metas o estrategias que permitan ocupar o mantener una superioridad mediante la incorporación de información a los procesos [7].
- Fase IV – Acción: las tácticas y regímenes de acción determinados mediante el benchmarking son incorporados y estimados habitualmente realizando informes del avance en términos de logros [7].
- Fase V – Madurez: se busca comprobar que se ha logrado la optimización de los procesos mediante evaluaciones de liderazgo en el mercado, y así, poder evaluar si el Benchmarking ha alcanzado su objetivo [7].

1.4.2 BENCHMARKING EN EMPRESAS DISTRIBUIDORAS

El benchmarking energético busca establecer mediante parámetros, datos o procesos similares entre las organizaciones de distribución de energía eléctrica, la o las empresas que son líderes del sector. Para determinar la empresa que se puede considerar como un “Benchmark” es necesario recolectar todos los datos e información necesaria para la comparación [9].

Uno de los problemas que pueden aparecer en este proceso de benchmarking es que, aunque las empresas sean del mismo sector, no todas tengan los mismos datos o parámetros ya que son empresas reales que, aunque dan un mismo producto, sus procesos pueden ser muy diferentes y cada una de ellas están bajo la influencia de factores diferentes. Por estas razones, algunas veces la obtención de los datos es tarea difícil y se tenga que cambiar el planteamiento de comparación.

1.4.2.1 Metodologías de benchmarking

Existen varias metodologías de benchmarking, la base de cada una de ellas es la comparación entre los estados actuales de las empresas con su estado pasado o una comparación con otra empresa de características similares.

Al comparar empresas es común hacerlo considerando su nivel de eficiencia, para lo cual se han propuesto algunos métodos [1]:

- **Eficiencia Media:**
 - Mínimos Cuadrados Ordinarios (OLS)
- **Frontera**
 - **No Paramétricos**
 - Análisis de Envolverte de Datos (DEA)
 - Productividad Total de los Factores (TFP)
 - **Paramétricos**
 - Análisis de Frontera Estocástica (SFA)
 - Mínimos Cuadrados Corregidos (GLS)

De los métodos del benchmarking propuestos, la más utilizada en el sector eléctrico es la estimación por frontera utilizando el método de Análisis Envolverte de Datos [12].

1.4.3 FRONTERAS DE EFICIENCIA

Definición de eficiencia

A la eficiencia se le puede definir como un grado o medida de aceptación alcanzado en el resultado del objetivo.

En cuestión de empresas u organizaciones se busca comprobar la eficiencia en la producción en relación con el objetivo planteado. Para medir dicha eficiencia se necesita introducir el concepto de frontera.

Fronteras

La medición de la eficiencia de una empresa se realiza a través de un grado relativo del trayecto en proporción a la frontera que simboliza el límite útil máximo de eficiencia. Las fronteras no son visibles, por lo que la eficiencia se establece en virtud de fronteras empíricas [1].

Como ya se mencionó anteriormente las fronteras se agrupan en paramétricas y no paramétricas. En cada punto, el grado seleccionado de eficiencia se precisa en favor de las prácticas de excelencia probables en un momento dado, por lo que las empresas que se ubican en la frontera son llamadas eficientes y las que se hallan por debajo de la misma son las ineficientes [1] [12].

1.4.3.1 Eficiencia Productiva

El primero en proporcionar una forma de medición empírica la eficiencia productiva fue Farrel (1957). Dado que es desconocido el mejor comportamiento, planteó estimar como reseña eficiente la mejor práctica contemplada que se halla en la muestra y de esta forma calcular los índices de eficiencia relativos a estas empresas que muestran el principal comportamiento productivo. Las empresas que integran la excelente destreza componen lo que se conoce como "frontera eficiente". Para el caso en que se desconozca la función de producción, Farrel sugiere estimar una frontera paramétrica valiéndose de modelos de programación matemática [4], [5].

Farrel propuso para la medición de eficiencia que una empresa puede emplear dos insumos, (entradas x_1 y x_2), para producir un producto (salida y), mediante beneficios constantes a escala y total comprensión de la función de producción, que estimó convexa en x_1 y x_2 [1].

1.4.3.2 Eficiencia Asignativa

La eficiencia asignativa es la postura en la que los factores de producción en una economía se reparten de tal manera que las empresas crean bienes y servicios que solicitan los consumidores. Incluso, los trasladarán al mercado a un precio que maximizará el beneficio de los compradores. En otras palabras, una economía con eficiencia asignativa es aquella en la que los recursos no solo son utilizados de forma óptima por las empresas, sino que también los bienes que se fabrican van a complacer de la mejor manera a los consumidores mediante la asignación de un precio conveniente que maximizará la utilidad de los demandantes [11].

1.4.4 ANÁLISIS ENVOLVENTE DE DATOS (DEA)

Es una herramienta no paramétrica que emplea programación matemática para crear una frontera de eficiencia o una superficie envolvente mediante datos de entrada y salida de un conjunto de unidades o empresas [6].

El DEA es una técnica estadística basada en la caracterización de la eficiencia de un conjunto de entidades pares llamadas Unidades de Toma de Decisiones (DMU) que convierten múltiples entradas en múltiples salidas [6].

El DEA es un método que coteja la eficiencia sin la necesidad de conocer la función de producción, en otras palabras, no se necesita conocer la relación funcional de las entradas y salidas. La respuesta de la eficiencia con múltiples entradas y salidas se lo expresa como [1]:

$$Eficiencia = \frac{\text{suma ponderada de las salidas}}{\text{suma ponderada de las entradas}} \quad (1)$$

La particularidad primordial del DEA es que no demanda una forma funcional específica. Se pueden calcular aisladamente la eficiencia técnica de la asignativa lo que se considera una gran ventaja.

1.4.4.1 Antecedentes de uso del DEA y fronteras de eficiencia

Los métodos de evaluación matemática de fronteras son instrumentos de razonamientos de excelente confianza, en la literatura se evidencia que el uso es amplio, entre los que se muestran resultados eficientes en los sistemas de distribución eléctrica.

Farrel (1957) presentó estimar una frontera paramétrica usando modelos de programación matemática. Este es el primer enfoque para estudiar el DEA [4] [5].

Neuberg (1977) realiza un estudio en el que estimó la función de costo de empresas de distribución, la intención fue cotejar la eficiencia entre las empresas públicas y privadas, al igual que sus rendimientos a escala. La muestra está compuesta de 189 empresas públicas y 182 empresas privadas de los Estados Unidos [1] [12]. El estudio plantea un concepto de los factores que constituyen los costos de la función de distribución, representando la suma de costos de distribución como una variable explicativa, que contiene el aprovechamiento, mantenimiento, costos de facturación y ventas y costos de administración. Las variables aclarativas propuestas en el modelo son: energía total vendida, número de clientes, área total de distribución, longitud total de líneas de distribución aéreas, , costo de capital, costo salarial y una variable "dummy" (ficticia) para diferenciar a las empresas públicas de las privadas [12].

Filippini, Wild y Kuenzle (2001) incluyen progresos a su proposición incorporando un prototipo de fronteras estocásticas que permite evaluar el costo promedio de distribución. Para la propuesta se usó un prototipo de 59 compañías de distribución suizas entre los años 1988-1996. El estudio tuvo la intención de estudiar el arreglo de costos en relación con la eficiencia de costo y escala de producción, datos que pueden usarse en la implantación de montos de paso a la red de distribución [12].

En Australia, el regulador realiza el estudio IPART (1999) donde inspecciona la eficiencia técnica relativa entre 6 empresas de distribución de Nueva Gales del Sur como fundamento para calcular la ampliación de producción de los distribuidores con relación a la especificación del precio de 1996, y determinar las pequeñas conmutaciones que posibiliten tener una mejora en la eficiencia proporcionados los rendimientos a escala y las reglas de servicio señaladas. En el estudio se utilizó la técnica DEA mediante el modelo de rendimientos constantes a escala (CRS por sus siglas en ingles) [12].

Pollitt (1995) inspecciona la eficiencia del sector eléctrico a la altura de generación, transmisión y distribución con el fin de asimilar la analogía entre eficiencia y propiedad, y contestar adecuadamente a la pregunta ¿Son las empresas privadas más eficientes que las públicas?. Pollitt calcula la eficiencia mediante un modelo DEA con entrada orientadas y una función de costo promedio [12].

Jamasb y Pollitt (2001) comparan la eficiencia de 63 empresas de distribución eléctrica de 6 países de Europa. En el análisis se usó las metodologías DEA, COLS y SFA con varias descripciones de modelos y datos de los años 1997-1998 [12].

1.4.4.2 Formulación

El modelo DEA calcula la frontera de un conglomerado de empresas. Las empresas que componen esta frontera delimitan la curva envolvente que incluye dentro de ellos a las empresas menos eficientes, por consiguiente, las que se ubican por arriba de los costos de la frontera. La envolvente es el margen lineal de los separadores inferiores y se calcula a través de métodos de programación lineal. En la literatura a menudo se menciona que DEA calcula la frontera, en lugar de estimarla, puesto que la programación lineal no consigue los parámetros de los límites, tampoco reconoce ejecutar un razonamiento de connotación estadística con el fin de establecer el grado de confianza de los resultados [1].

Se acepta para esta técnica distintas variables aritméticas, entre ellos la verificación de las eficiencias orientadas a los insumos o a los productos, así como supuestos sobre los rendimientos a escala constantes o variables

El modelo DEA básico mide la eficiencia como la suma ponderada de las entradas dividida por la suma ponderada de las salidas, esto es [1] [12]:

$$\text{Max } E_0 = \frac{\sum_r v_r z_{r0}}{\sum_i u_i x_{i0}} \quad (2)$$

Sujeto a:

$$\begin{aligned} \frac{\sum_r v_r z_{rj}}{\sum_i u_i x_{ij}} &\leq 1; \quad j = 1 \dots n \\ v_r, u_i &\geq 0; \quad r = 1..s; i = 1..m \end{aligned} \quad (3)$$

En donde:

- E_0 simboliza el nivel de eficiencia, tomando el valor 1 como máximo.
- x representan las variables de entrada
- z representan las variables de salida
- v y u son ponderaciones que admiten conseguir las medidas óptimas de eficiencia para cada u
- n y m representa el número de veces en que se resuelve el problema

1.4.4.3 Orientación de Modelos

Hay muchas formas de especificar el modelo DEA, pudiendo clasificarse de la siguiente manera [1] [12]:

- a) Según la medición de distancia que se manipula: radial, no radial, aditiva, multiplicativa, hiperbólica, y otras.
- b) La orientación del modelo: orientados a Entradas, a Salidas o No orientado.
- c) El tipo de rendimiento de escala que caracteriza el mercado.

La eficiencia puede ser distinguida según tres orientaciones primordiales:

- Orientado a entradas: Una unidad o empresa no es eficiente si es viable reducir alguna otra entrada sin que se reduzca una salida [1] [12].
- Orientado a salidas: Una unidad o empresa no es eficiente si es viable agrandar cualquier salida sin que se incremente cualquier entrada y sin que se reduzca cualquier otra salida [1] [12].
- Orientación a Entradas – Salidas o No orientado: La medida de eficiencia se da por el movimiento hacia las entradas como también hacia las salidas.

Rendimientos a Escalas

La disposición de eficiencia de una unidad puede estar restringida también por la escala en la que opere. Se tienen comúnmente dos tipos de modelo:

- Rendimientos constantes a escala (CRS): todas las DMUs son cotejadas como si fueran dobladas a rendimientos constantes, sin considerar el evento de presencia de ineficiencias [1] [12].
- Rendimientos variables a escala (VRS): para cada DMU de la muestra se le reconoce su economía de escala, propia de la industria [1] [12].

La Figura 2, muestra la resolución de la técnica DEA, modelos CRS y VRS, para un caso simple en que la tecnología productiva usa una entrada x y una única salida y . Los rectángulos oscuros simbolizan la actividad visible de las unidades. La línea continua es el límite alcanzado con el modelo DEA-VRS y las unidades en las que A, B, C y D muestran la principal relación salida-entrada y aplicando el modelo el resultado efectivo es 1 [12].

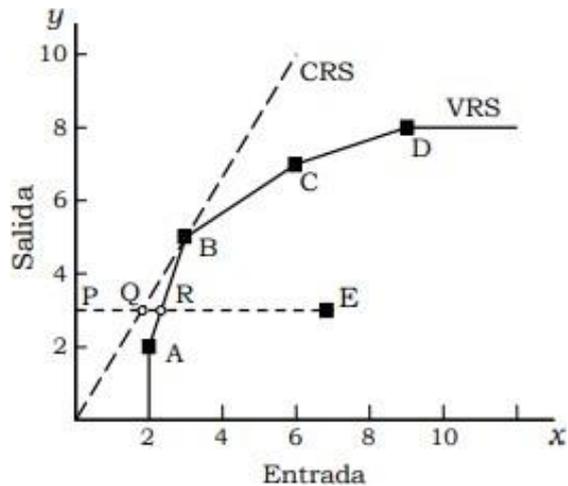


Figura 2. Frontera de eficiencia CRS y VRS [12].

La línea dividida, recta que conecta el inicio con la unidad B, simboliza la frontera de eficiencia definida por el modelo de CRS y representa los rendimientos constantes a escala. En la imagen se distingue que el fragmento denotado por A y B exhiben rendimientos crecientes a escala, esto es, a mayores insumos producirán un gran crecimiento de la producción. De tal forma que la unidad A es en teoría eficiente, pero su escala es ineficaz. La unidad B, se localiza encima de ambas fronteras, en consecuencia, esta unidad muestra eficiencia técnica y eficiencia a escala. El recorrido B, C y D exhiben rendimientos decrecientes a escala, por lo tanto, un engrandecimiento de los insumos causaría equitativamente un mínimo acrecentamiento en la salida. Con esto las unidades C y D son igualmente en principio eficientes, pero ineficientes a escala. Para el modelo CRS sólo B estaría estimada como eficiente, puesto que es la unidad característica que manobra con rendimiento constante a escala [12].

1.4.4.4 Otros Modelos DEA

Aditivo: Este método considera la diferencia máxima entre la salida y la entrada ponderada, en efecto, es un grado para determinar la suma máxima de mejoras absolutas (disminución en la entrada/ extensión en la salida). Es un tipo sin tendencia concreta y está sometido a las propias limitaciones de eficiencia relativa para cada DMU [1].

Super eficiencia: Anderson y Peterson (1993), mostraron una ampliación de los modelos básicos DEA, que contiene la ventaja de clasificar no solo las DMUs inactivas, sino también a las DMU activas. Usualmente, los modelos DEA suelen evaluar la eficiencia de una DMU en correspondencia con una DMU compuesta, que es el conjunto de reseña eficiente, en el que está contenida. Por el contrario, el modelo de super

eficiencia excluye cada DMU de su propio grupo de referencia, lo que permite alcanzar un nivel de eficiencia superior al de la unidad [1].

1.4.5 HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES

A continuación, se detalla la herramienta computacional usada en el estudio de comparación de empresas distribuidoras del país, adicionalmente, se presentarán otras herramientas computacionales que permiten realizar estudios similares.

1.4.5.1 pyDEA

pyDEA es un paquete de software desarrollado en Python para realizar análisis envolvente de datos (DEA). El paquete está disponible en la siguiente dirección: <https://pypi.org/project/pyDEA/>

Interfaz

Consta de ventana principal que esencialmente se divide en dos partes: Datos /Solución y Editor de Parámetros/Pesos.

En la parte Datos/Solución se tiene la pestaña Datos, donde se carga la información de entrada, se seleccionan las entradas y salidas, y, la pestaña Solución, donde se mostrarán los resultados después de cada ejecución de pyDEA.

En la parte de Parámetros/Pesos se tiene la pestaña Parámetros que permite configurar pyDEA, y, el Editor de Pesos para el uso más avanzado de pyDEA, que permite manipular los pesos de las entradas y salidas [13].

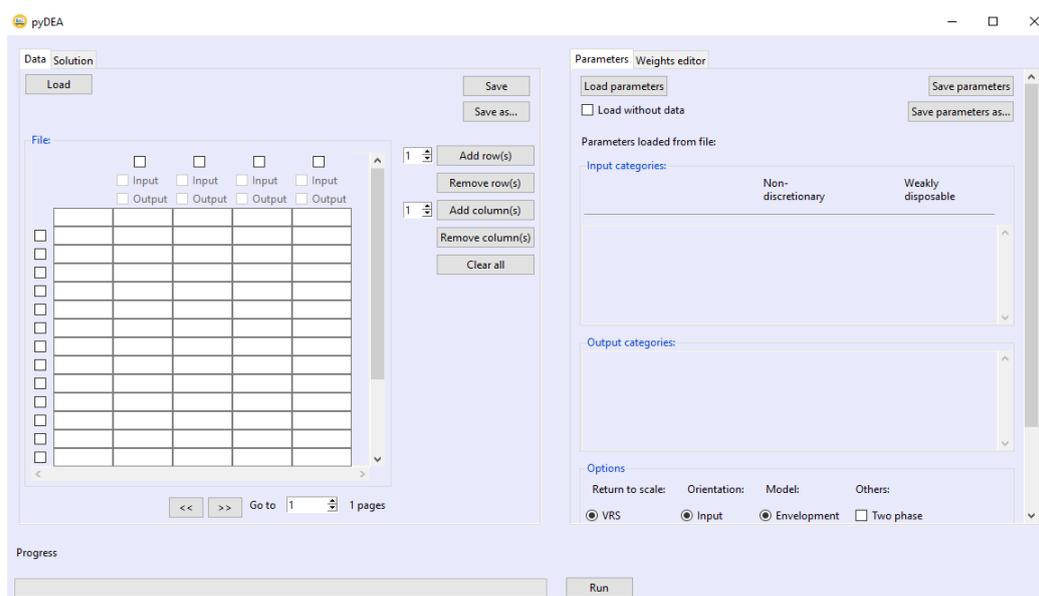


Figura 3. Ventana principal del solucionador de pyDEA [13].

Cuando finaliza una ejecución, la pestaña Solución muestra los puntajes de eficiencia obtenidos. Se otorgan puntajes para todas las DMUs en todas las diferentes opciones de ejecución. También se puede ver otros resultados como: el conjunto de referencia de pares, objetivos, datos ponderados, etc. Se pueden copiar resultados parciales y pegarlos en hojas de cálculo Excel o simplemente cerrar, la ventana sin guardar los resultados [13].

Se debe considerar que ejecutar el análisis puede llevar cierto tiempo. Esto depende principalmente de número de DMUs en el archivo de entrada; a mayor DMUs, más tiempo de ejecución. Además, cuando selecciona Ambos en RTS u orientación, se ejecutarán múltiples análisis DEA en diferentes configuraciones y, por lo tanto, aumenta el tiempo de ejecución [13].

1.4.5.2 DEEOS

Es un paquete para realizar estudios DEA de manera fácil y rápida. El paquete está diseñado para ser extremadamente fácil de usar [14]. El paquete está disponible en la siguiente dirección: <https://www.deaos.com/#pricing>

Características Generales

- Es un software basado en la web y no requiere instalación.
- Tiene una entrada de datos flexible desde archivos Excel y entrada directa
- Tiene múltiples opciones de exportación, incluidos los formatos XLS o XLSX, PDF, XML y HTML.
- Tiene facilidades de comunicación y foros temáticos
- Características específicas
- Se tiene la posibilidad de importar datos de múltiples periodos
- Configuración de sustitución cero, Épsilon y tolerancia
- Control de Orientación y Retornos a Escala (RTS por sus siglas en ingles)
- Variables categóricas y entradas/salidas no discretas
- Tabla de estadística de datos para datos de entradas y salidas
- Gráfico de frontera eficiente para casos de una entrada/ una salida de los datos.
- Funciones de informes
- Eficiencias con la determinación de DMUs eficientes y débilmente eficientes.
- Esquemas de mejora (nivel objetivo) para cada DMU.
- Informes slacks, lambdas, referencia para cada DMU (peer group).
- Reporta la frecuencia de cada DMU eficiente como referencia a otras DMU.
- Permite tener un informe de resumen de resultados para cada DMU.

DEAOS ha sido aplicado en sectores de seguros y banca [14].

1.4.5.3 MaxDEA Pro

MaxDEA Pro es un software DEA fácil de usar, potente y profesional. Dispone de una gama amplia de modelos DEA actualizados [15]. El paquete está disponible en la siguiente dirección: <http://maxdea.com/MaxDEA.htm>

Características principales.

- Fácil de usar. No necesita instalación
- No es necesario que se indique entradas y salidas por nombre de campo o especial disposición de datos
- Tiene la facilidad de crear copias de seguridad de los modelos y conjunto de datos DEA
- No tiene limitación en el número de DMU, y tiene modelos DEA completos
- En MaxDEA se puede ejecutar varios modelos al mismo tiempo
- Permite guardar diferentes escenarios con diferentes modelos manteniendo los datos y configuraciones iniciales.
- Puede abrir y ejecutar varios archivos simultáneamente.
- MaxDEA Pro permite tener valores negativos en entradas o salidas
- MaxDEA puede importar datos de Excel, Access, dBase y archivos de texto delimitados por comas.

2 METODOLOGÍA

2.1 Propuesta metodológica

El objetivo es conocer la función de producción que admita estimar la eficiencia de las empresas de distribución ecuatorianas, por eso se han de definir las entradas y salidas involucradas y, para luego anotar el tipo de analogía que existe entre estas. La identificación y caracterización de entradas y salidas se consigue a través de un análisis de estadística descriptiva que, adicionalmente, admite comprobar su usabilidad en la metodología a desarrollar. Concretamente, el análisis descriptivo se realiza con los siguientes fines: [12]:

- Presentar el grupo de 19 empresas de distribución manejadas a modo de muestra para la resolución de la eficiencia en el valor agregado de distribución.
- Distinguir los componentes de eficiencia que se hallan en los datos y las correspondencias que exhiban mayor sentido estadístico, idóneas de expresar las afinidades y desigualdades entre las empresas.
- Determinar las variables que puntualizan a los factores de eficiencia de forma de utilizarlas en la determinación y el estudio de las fronteras de producción.

2.2 Tratamiento de datos

En el tratamiento de datos se recopilará información sin procesar y se transformará, mediante algunos procesos o criterios matemáticos, en información utilizable y entendible.

Recopilación de datos

La compilación de datos se puede llevar a cabo de manera manual o automática, se extraerá la información de fuentes bibliográficas y agencias gubernamentales que se consideren necesarias, dicha información debe ser de calidad.

Preparación de datos

La información recopilada debe ser organizada y tratada, es decir, se empezará con una verificación de los datos, este tratamiento se lo puede hacer mediante procesos automáticos en herramientas computacionales o criterios de selección.

En los criterios de selección que se emplea están los siguientes:

- Descartar datos incorrectos o inconsistentes, se revisará si dichos datos pueden ser corregidos, caso contrario serán desechados.
- Descartar datos que se repitan.
- No considerar datos que no estén actualizados.
- Considerar datos que se puedan completar o reemplazar con datos similares para el estudio.
- Descartar datos incompletos.

Una vez aplicados estos criterios se tiene menos información, pero con datos completos y correctos, lo que permitirá realizar una selección de variables.

Selección de variables

Para la selección de variables se pueden asociar las variables(datos) conforme a las características que presentan, se puede realizar grupos de 2 o más variables siempre y cuando estas tengan características similares, pertenezcan a una misma área o a un mismo departamento; en caso de que alguna o varias variables no encaje en algún grupo, se creará un nuevo grupo, considerándolas nuevas variables [12].

El agrupamiento de variables es de mucha ayuda para poder aplicar estadística descriptiva, correlación lineal, análisis de componentes principales u otros procesos que permitan conocer la relación que existe entre variables y así seleccionar las más convenientes para el estudio.

En la selección de variables es importante aplicar el criterio de que el número total de empresas comprendidas en el análisis sea mayor o igual a tres veces la suma de las entradas y salidas [12].

Selección de entradas y salidas

Con la selección de variables necesarias y empleando la nomenclatura típica de métodos de frontera se puede identificar las variables de entrada para los recursos y variables de salida para los productos.

2.3 Aplicación de la herramienta pyDEA

Para este estudio se utiliza la herramienta computacional pyDEA, aunque se podría aplicar otra herramienta para el análisis de DEA de las antes mencionadas.

Aplicación y uso de pyDEA

Entradas

Datos de entrada

Todos los archivos de entrada deben ser archivos de Excel (.xls o .xlsx) o CSV. Los archivos .xls y .xlsx pueden generarse con Excel u OpenOffice Calc, etc. Los datos deben estar en el formato que se describe a continuación [13].

Formato de datos

El archivo Excel (.xls/.xlsx) o CSV que contiene los datos para el análisis DEA debe cumplir el siguiente formato [13]:

- Los nombres de las categorías de entrada y salida se encuentran en la primera fila de la hoja de cálculo. Usar solo palabras que contengan letras, sin caracteres especiales ni números.
- Evitar los espacios, especialmente los espacios iniciales
- La primera columna contiene nombres de DMU (a partir de la segunda fila).
- Las columnas que contienen celdas vacías o con valores negativos se cargarán, pero se desactivarán (en gris).
- Las columnas que contienen cero entradas se cargarán y resaltarán. Aún se puede ejecutar pyDEA.
- Las columnas que representan variables categóricas deben estar representadas por números enteros.

Cargar archivo de datos de entrada

Para seleccionar el archivo de Excel (.xls o .xlsx) o CSV que contiene los datos de entrada, se debe hacer clic en Cargar. Esto abrirá una ventana para seleccionar el archivo y se hace clic en Abrir. Se debe tener en cuenta que se debe seleccionar un archivo .xls/.xlsx o .csv, ya que los datos no se podrán leer desde otros formatos de archivo.

Cuando ya se seleccionó el archivo, se debe seleccionar la hoja de trabajo que abarca los datos que se quiere analizar, se debe tener en cuenta que de no seleccionar la hoja el software por defecto seleccionara la primera hoja.

Se debe tener en cuenta que pyDEA no usa ninguna columna de datos que contenga celdas vacías, de haberlas se deshabilitaran automáticamente, al igual que los números deben ser no negativos y estrictamente positivos, caso contrario sucederá lo mismo que en las columnas [13].

Correr

Para ejecutar pyDEA, se pueden seleccionar algunos parámetros en la pestaña Parámetros en la parte izquierda de la ventana principal [13].

Figura 4. Opciones de parámetros [13].

Hay cuatro categorías diferentes para configurar pyDEA:

1. Retorno a escala (RTS)
 - VRS: Modelo de rendimientos variables a escala
 - CRS: Modelo de rendimientos constantes a escala
 - Ambos: selecciona el modelo VRS y CRS, es decir, pyDEA ejecutará el análisis dos veces (una vez con VRS y otra con CRS) y devolverá un conjunto de resultados para cada ejecución.
2. Orientación
 - Entrada: modelo de orientación de entrada
 - Salida: modelo de orientación de salida
 - Ambos: selecciona tanto el modelo de entrada como el de salida, es decir, pyDEA ejecutará el análisis dos veces (una vez con orientación de entrada y otra con orientación de salida) y devolverá un conjunto de resultados para cada ejecución.
3. Modelo
 - Forma envolvente: el modelo se formula y resuelve en su forma envolvente.
 - Forma multiplicadora: el modelo se formula y resuelve en su forma multiplicadora. La tolerancia se puede establecer en el campo Tolerancia del modelo multiplicador.
4. Otros
 - Dos fases: se ejecuta un modelo de segunda fase para maximizar las holguras. Tenga en cuenta que esto solo es posible cuando se elige la forma envolvente.
 - Súper eficiencia: Modelo de súper eficiencia.

- Pelar la cebolla: se ejecuta un modelo DEA en niveles para colocar en capas y clasificar las DMU en una serie de capas de frontera eficiente anidadas.

Se debe seleccionar una de cada una de las tres primeras categorías. La categoría 4 (Otros) es opcional. Existen también configuraciones adicionales, como restricciones de peso, variables categóricas, disponibilidad débil y variables no discrecionales.

Una vez elegidas las opciones se selecciona Ejecutar. El progreso se muestra en la barra de progreso junto al botón Ejecutar [13].

2.4 Análisis de resultados

Para el análisis de resultados se puede graficar los resultados obtenidos de eficiencia y de esta manera analizar y observar el orden de las empresas ya sea de menor a mayor o de mayor a menor y comprobar si los resultados cumplen con la realidad.

Resultados en pyDEA

El archivo de resultados (Excel) contiene información de todas las ejecuciones en varias hojas, mientras que para los resultados en formato *.CSV, los siguientes elementos son archivos *.csv individuales [13].

- Puntuaciones de eficiencia: siempre en la primera hoja: enumera las puntuaciones de eficiencia de todas las DMU en la hoja EfficiencyScores y slacks en la hoja Slacks.
- Parámetros: siempre la última hoja: los parámetros de la hoja enumeran toda la información de los parámetros seleccionados para los resultados. Esto puede ser muy útil como recordatorio.
- Pesos: Inserta las hojas InputOutputWeights y WeightedData.
- Peers: Inserta hojas Peers y Peer Count
- Objetivos: inserta la hoja de objetivos que contiene objetivos de entrada/salida para todas las DMU

Guardar resultados

pyDEA da la opción de guardar los resultados en formatos Excel (xls/xlsx) y CSV. Para guardar el documento se hace clic en el botón Guardar solución. Se selecciona el formato requerido (Excel o CSV) y se ingresa el nombre de archivo de salida. Se guardará el conjunto completo de resultados de la ejecución DEA.

3 APLICACIÓN Y RESULTADOS

3.1 Caso Estudio Chile

Para el caso de estudio Chile se tomó como referencia el análisis de datos, estudios de variables y resultados de [1] y [12].

Se busca obtener resultados similares o cercanos a los obtenidos en las tesis mencionadas, pero utilizando la herramienta computacional pyDEA, para así determinar si es factible el uso de dicha herramienta o si es necesario cambiarla.

Datos

El modelo manejó la información de 33 empresas de distribución presentes en el año 2006, de las que se disponen los datos para las variables que requiere el modelo [1], [12].

ANEXO I **Tabla 3.1.1** Empresas de distribución consideradas en el estudio [12].

Variables

Para la selección de variables se toma en cuenta primeramente el criterio de que el total de empresas comprendidas en el análisis sea mayor o igual a tres veces la suma de las entradas y salidas. Por lo que se motiva a la exclusión inmediata de alguna de ella mediante el procedimiento de agregación. Por lo que se agrupa las variables acorde a las características que se manejan en el diseño de la empresa modelo, determinadas por el CNE [12].

ANEXO II **Tabla 3.1.2** Variables agrupadas

Con las variables agrupadas se procede a realizar una relación de variables mediante una correlación lineal y de los resultados se concluye que se necesita otro procedimiento para confirmar sus respuestas por lo que se aplica un método de estadística factorial llamada Análisis de Componentes Principales (ACP), con dicho procedimiento se define las principales variables de entrada y salida a figurar en un modelo DEA, el cual dirige a la medición de eficiencia técnica y operacional entre modelos de las empresas de distribución eléctrica [1], [12]:

Tabla 3.1.3 Variables de entrada y salida para un modelo de Eficiencia Energética [12].

ENTRADA	SALIDA
Energía comprada	Energía vendida
Km Líneas	Potencia máxima en punta
Costo total	Número de clientes

Con la selección y definición de variables de entrada y salida se puede aplicar el DEA con los datos de cada una.

Tabla 3.1.4 Variables y datos para aplicación del DEA

Empresas	Energía Comprada	Km de Líneas	Costo Total	Energía Vendida	Potencia máxima en punta	Número de Clientes
EMELARI	230.000	827.900	4757.350	213.000	37.900	56.730
ELIQSA	401.400	1070.000	5743.430	371.500	70.800	74.200
ELECDA	716.300	1593.000	10750.770	665.700	131.700	134.360
EMELAT	530.200	1633.800	7578.500	479.900	103.600	77.690
CHILQUINTA	1940.300	6540.300	34639.040	1717.700	331.100	454.030
CONAFE	1284.300	6678.100	26101.320	1175.700	239.100	295.160
EMELCA	12.300	113.900	407.790	10.400	1.900	5.120
LITORAL	69.000	793.900	3018.600	60.500	21.900	41.450
CHILECTRA	10609.200	13339.100	126386.980	10039.500	2047.200	1413.990
COLINA	54.000	180.700	881.190	52.300	9.900	19.310
TILTIL	10.600	110.800	280.250	10.000	2.000	2.900
PUENTE ALTO	204.900	365.900	4098.220	193.500	39.600	43.730
LUZANDES	5.800	24.700	508.180	5.700	2.800	1.650
EMELECTRIC	947.800	9002.100	19603.610	848.800	190.300	199.850
CGE	6616.300	19803.200	71222.330	6080.500	1190.500	1075.760
COPELAN	60.000	1558.000	3027.520	49.800	8.900	12.330
FRONTEL	738.000	14968.200	22808.790	627.700	112.700	267.000
SAESA	1662.900	11733.300	27387.800	1437.600	218.700	299.480
EDELAYSSEN	129.000	1738.600	3014.850	111.000	22.500	25.130
EDELMAG	214.600	808.800	3794.740	200.700	37.100	59.300
CODINER	48.300	1802.700	2676.900	39.600	7.100	8.060
EDECSA.	42.700	499.400	1086.680	38.500	10.100	3.350
COOP. CURICO	80.700	499.400	1119.470	73.600	19.200	7.500
EMETAL	85.600	1735.700	2806.730	77.000	14.800	17.600
LUZLINARES	74.300	1524.400	2533.880	65.000	14.400	20.220

Empresas	Energía Comprada	Km de Líneas	Costo Total	Energía Vendida	Potencia máxima en punta	Número de Clientes
LUZPARRAL	42.700	1862.500	2639.440	36.400	8.700	15.180
COPELEC	99.400	4016.300	6511.300	85.200	20.300	34.810
COELCHA	30.500	1278.100	2288.910	25.800	5.200	9.250
SOCOEPA	24.300	906.200	2472.040	20.600	4.200	5.280
COOPREL	30.900	666.700	985.110	25.300	5.100	5.080
LUZOSORNO	119.300	3128.100	3209.080	107.900	16.300	16.120
CRELL	41.300	1126.800	1741.090	35.600	6.900	11.210
ENELSA	51.300	816.700	1220.680	42.800	15.800	10.590

Aplicación de DEA

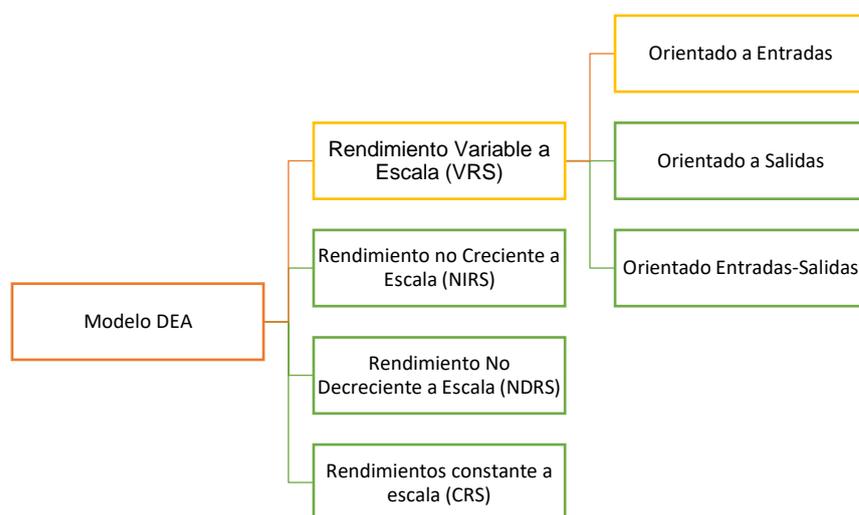


Figura 5. Configuración del modelo DEA [1].

Resultados.

Tabla 3.1.5 Eficiencias de las empresas de Chile

Empresas	Eficiencia
CODINER	0.836
COPELAN	0.844
COOPREL	0.845
SOCOEPA	0.863
COELCHA	0.863
CRELL	0.885
LUZPARRAL	0.887
EDELAYSEN	0.894
COPELEC	0.899

SAESA	0.909
LUZLINARES	0.914
EMETAL	0.925
LUZSORNO	0.935
EDECSA	0.959
EMELAT	0.960
ELIQSA	0.985
EMELARI	0.990
EDELMAG	0.994
ELECDA	1.000
CHILQUINTA	1.000
CONAFE	1.000
EMELCA	1.000
LITORAL	1.000
CHILECTRA	1.000
COLINA	1.000
TILTIL	1.000
PUENTE ALTO	1.000
LUZANDES	1.000
EMELECTRIC	1.000
CGE	1.000
FRONTEL	1.000
COOP.CURICO	1.000
ENELSA	1.000

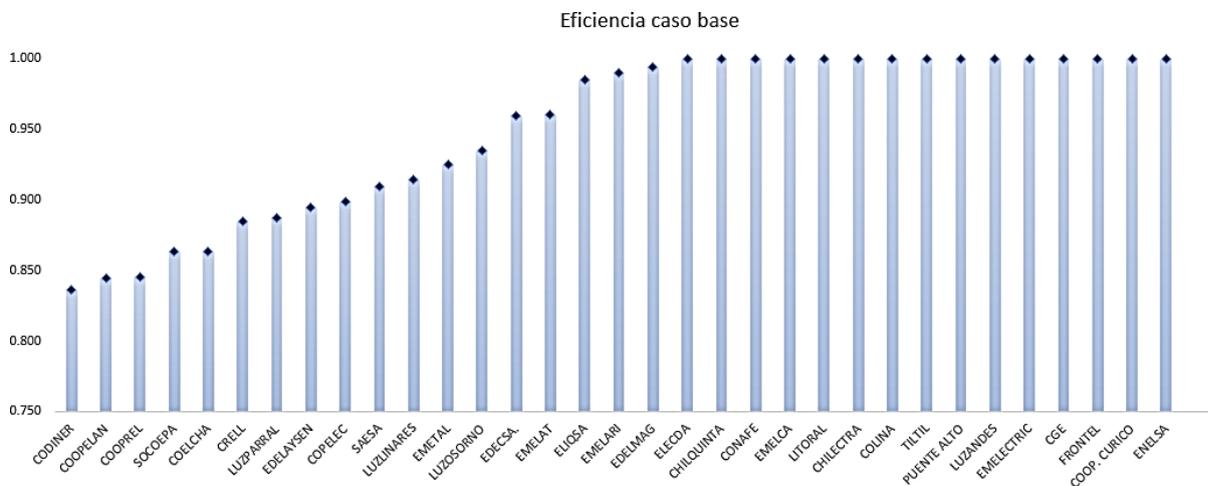


Figura 6. Gráfico de la frontera de eficiencia caso base [12].

Resultados de eficiencia aplicando pyDEA

Tabla 3.1.6 Eficiencias de las empresas de Chile con la aplicación de pyDEA y errores.

Empresas	Eficiencia con pyDEA	Eficiencia	Error relativo [%]
CGE	1.000	1.000	0.000
CHILECTRA	1.000	1.000	0.000

Empresas	Eficiencia con pyDEA	Eficiencia	Error relativo [%]
CHILQUINTA	1.000	1.000	0.000
CODINER	0.846	0.836	1.186
COELCHA	0.872	0.863	0.994
COLINA	1.000	1.000	0.000
CONAFE	1.000	1.000	0.000
COOP. CURICO	1.000	1.000	0.000
COPELAN	0.857	0.844	1.499
COOPREL	0.844	0.845	0.145
COPELEC	0.923	0.899	2.735
CRELL	0.889	0.885	0.537
EDECSA.	0.958	0.959	0.125
EDELAYSEN	0.902	0.894	0.811
EDELMAG	1.000	0.994	0.575
ELECDA	0.998	1.000	0.156
ELIQSA	0.980	0.985	0.546
EMELARI	0.986	0.990	0.434
EMELAT	0.962	0.960	0.143
EMELCA	1.000	1.000	0.000
EMELECTRIC	1.000	1.000	0.000
EMETAL	0.936	0.925	1.156
ENELSA	1.000	1.000	0.000
FRONTEL	1.000	1.000	0.000
LITORAL	1.000	1.000	0.000
LUZANDES	1.000	1.000	0.000
LUZLINARES	0.922	0.914	0.825
LUZOSORNO	0.945	0.935	1.121
LUZPARRAL	0.897	0.887	1.059
PUENTE ALTO	1.000	1.000	0.000
SAESA	0.933	0.909	2.607
SOCOEPA	0.873	0.863	1.155
TILTIL	1.000	1.000	0.000

Promedio	0.540
min	0.000
max	2.735

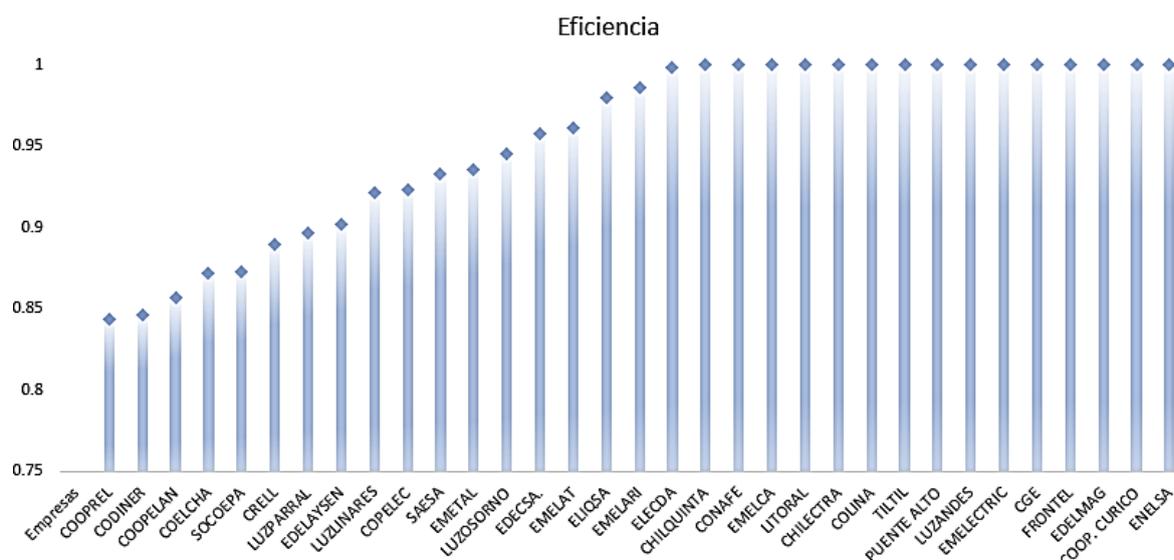


Figura 7. Gráfico de la frontera de eficiencia caso base con pyDEA

Al comparar los valores de eficiencia calculados mediante un error relativo se tiene un error mínimo de 0.000, un error máximo de 2.735 y un promedio de 0.540 con estos resultados se puede decir que los valores obtenidos mediante pyDEA son valores iguales o cercanos a los de la tesis referida por lo que se considera que es factible el uso de la herramienta computacional pyDEA para el caso de estudio Ecuador.

3.2 Caso Estudio Ecuador

3.2.1 Tratamiento de datos.

La recopilación de los datos usados en esta investigación procede fundamentalmente de la Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables (ARCERNR), se los recopilaron de manera manual creando una base de datos. Las 19 empresas de distribución y Corporación Nacional de Electricidad CNEL EP estimadas en la investigación se muestra en la Tabla 3.2.1.1. Se exceptúa a la Empresa Eléctrica Galápagos por ser insular, por tanto, no conectada al Sistema Nacional Interconectados por lo que presenta singularidades no comparables, con los parámetros escogidos

Tabla 3.2.1.1. Empresas de distribución

N°	Empresa	Cobertura
1	CNEL-Guayaquil	Guayaquil
2	CNEL-Guayas Los Ríos	Guayas, Los Ríos, Manabí, parte de Cotopaxi y parte de Azuay

N°	Empresa	Cobertura
3	CNEL-Manabí	Manabí
4	CNEL-EI Oro	El Oro y una parte de Azuay
5	CNEL-Milagro	
6	CNEL-Sta. Elena	Parte de Guayas, Santa Elena
7	CNEL-Sto. Domingo	Santo Domingo y parte de Esmeraldas
8	CNEL-Sucumbíos	Sucumbíos, Napo y Orellana
9	CNEL-Esmeraldas	Esmeraldas
10	CNEL-Los Ríos	
11	CNEL-Bolívar	Bolívar
12	E.E. Quito	Pichincha y parte de Napo
13	E.E. Centro Sur	Azuay, parte de Cañar y Morona Santiago
14	E.E. Ambato	Tungurahua, Pastaza, parte de Morona y parte de Napo
15	E.E. Norte	Carchi, Imbabura, parte de Pichincha y parte de Sucumbíos
16	E.E. Cotopaxi	Cotopaxi
17	E.E. Riobamba	Chimborazo
18	E.E. Sur	Loja, Zamora y parte de Morona Santiago
19	E.E. Azogues	Cañar

Selección de variables

Las variables elegidas para mostrar las características de las empresas son las conseguidas mediante la aplicación de varios criterios de selección como: descartar datos no actualizados, datos incompletos, datos incorrectos y datos repetidos. Algunas variables que no se consideraron bajo dichos criterios: la venta de energía debido a los

subsidios cruzados a nivel de usuarios y a nivel de empresas, costos de energía no suministrada al no tener un estudio actualizado, entre otros.

Así, la preparación de datos proporcionó un número de 17 variables, incluyendo algunas en las actividades de media tensión y baja tensión, ANEXO III Tabla 3.2.1.2 Variables.

Para la selección de variables se empieza con la regla general, para el análisis DEA que dice que el número total de empresas comprendidas en el análisis sea mayor o igual a tres veces la suma de las entradas y salidas o $n \geq 3(m + s)$ [12]. Si se tiene demasiadas variables podrían resultar eficientes todas las de empresas, perdiendo el significado analítico.[12].

Considerando 3 entradas y 3 salidas:

$$19 \geq 3(3 + 3) \quad (4)$$

$$19 \geq 3(6) \quad (5)$$

$$19 \geq 18 \quad (6)$$

Con la consideración de 3 entradas y 3 salidas se cumple la con la ecuación recomendada. Con 2 entradas y 2 salidas también se cumple con el criterio recomendado, pero con mayor margen por lo que más adelante se analizaran los dos escenarios.

Una vez aplicada la regla general, se puede evidenciar que aún se necesita eliminar diversas variables para cumplir dicha regla, lo que se puede hacer de forma directa o a través de un procedimiento de agregación.

Para realizar la siguiente eliminación se agrupa las variables de acuerdo con las características similares de la empresa modelo referida en [12].

Tabla 3.2.1.3. Variables agrupadas.

Clientes y ventas	
Número de clientes	CLTS
Número de clientes Residenciales	CLTSR
Energía Facturada	ENEF
Dimensionamiento de las instalaciones del sistema	
Kilómetros totales de línea	KMT
Kilómetros de líneas de transmisión	KMTR

Kilómetros de líneas de media tensión	KMMT
Kilómetros de líneas de baja tensión	KMBT
Potencia Máxima de Punta	PMW
Transformadores Máximos	TRAFM
Transformadores de Media tensión	TRAFMT
Dimensionamiento de la administración, mantención mantenimiento y operación.	
Costos de Red, Comercialización y Administración	CRCA
Costos de Calidad del Servicio	CCS
Costos de Expansión	CDE
Costos de Confiabilidad	CDC
Costos de Distribución	CDD
Otras variables generales	
Energía comprada	ECOMP
Pérdidas totales	PERT

Relaciones entre variables

Inicialmente para reconocer de los factores de eficiencia y primordiales descriptores se realizó la caracterización de la relación existente entre las variables; la caracterización se ejecutó con la resolución del coeficiente de correlación lineal simple entre las variables, en la Tabla 3.2.1.4 se muestran los valores de Coeficiente de correlación entre las variables [12]. Anexo IV Tabla 3.2.1.4

El análisis de estas medidas de asociación permite tener las siguientes conclusiones:

- Se halla una correlación positiva muy fuerte entre varias variables, mientras que otras se observan que no existe correlación alguna.
- Las variables de PMW y ECOMP tiene una fuerte correlación lineal, aunque pertenecen a distintas variables agrupadas estas se relacionan en el sistema eléctrico ya que entre más potencia se desarrolle en un sistema más energía será de capaz de gastar en ese tiempo.
- Las variables de TRAFM y TRAFMT son variables con alta correlación lineal, esto se puede dar debido a que pertenecen al mismo grupo de dimensionamiento de las instalaciones.

- Otra correlación lineal fuerte se da entre CLTS, TRAFM Y TRAFMT debido a que la capacidad que cada transformador tiene va a abastecer a un número de clientes.
- Se puede decir que no existe una correlación lineal entre las variables ECOMP y KMMT ya que no pertenecen al mismo grupo y, en el sistema eléctrico, no tienen relación alguna.
- En general, para variables que presentan correlaciones positivas muy fuertes, indicaría que entre variables existe una misma información, en el caso de las correlaciones negativas no se manejaría una misma información entre grupos.
- Se puede observar que para las distintas variables se presentan correlaciones tanto positivas, como negativas por lo que es posible tomar este estudio como una opción para determinar y clasificar las variables que se pueden usar para el estudio y análisis de eficiencia.

En caso de no tener resultados concluyentes mediante la técnica de correlación lineal, se puede optar por realizar un análisis empleando la técnica de Análisis de Componentes Principales (ACP), que permite un estudio de asociación entre conjuntos de variables.

Tomando como referencia los estudios realizados en referencias [12] y [1], se toman los resultados obtenidos para determinar las mejores variables de entrada y salida para el modelo DEA.

Una vez reconocidos los datos según las características de las empresas, se inicia el proceso de identificación según la nomenclatura propia manejada en los métodos de frontera, en otras palabras, como variable de entrada para los recursos y variable de salida para los productos [1] [12].

Salidas

Las variables de salida en distribución son elegidas aquellas que representan eficientemente el servicio, en cierta medida el medio y el sistema que enfrentan las distribuidoras, algunas variables de salida son:

- Energía Facturada
- Potencia Máxima de Punta
- Pérdidas totales
- Número de clientes

Entradas

Las variables de entrada contienen los costos en los que inciden las distribuidoras

- Energía comprada
- Kilómetros de línea
- Costos de distribución

Aunque se determinan ciertas variables como entradas y salidas estas no son fijas ya que pueden cambiar según los escenarios.

Modelos y Escenarios

En la selección de variables se aplicó la regla general para el análisis de DEA, esta regla se la aplico considerando 2 opciones en este caso llamados modelos.

Modelo 1

Para el primer modelo se considera 3 entradas y 3 salidas que son las variables consideradas ideales para el estudio.

En primera instancia, se consideró entre las variables de entrada las pérdidas totales como reemplazo de los costos por distribución, ya que representan los costos internos que producen un impacto en las tarifas, por lo que se denominara escenario 1 al análisis con esta variable.

En un segundo escenario se considera como una variable de entrada a los costos por distribución, reemplazando las pérdidas totales.

Se debe mencionar que previo a la comparación de los dos escenarios se realizaron más pruebas con diferentes variables de entrada como reemplazo de costos, variable que había sido identificada como adecuada anteriormente, estas pruebas se las realizo con el fin de comprobar o determinar si se podría reemplazar dicha variable en caso de no contar con los datos suficientes y poder continuar el estudio.

Los escenarios probados con una variable de reemplazo arrojaron resultados erróneos y en otros casos resultados totalmente alejados a la realidad, solo el escenario 1 fue el más similar por lo que se lo compara con la variable original.

Modelo 2

Para el segundo modelo se considera 2 entradas y 2 salidas con variables consideradas ideales para el estudio.

En el tercer escenario planteado se considera la eliminación de los costos y clientes totales, por ser variables relacionadas ya que se considera no habrá un gran cambio en los resultados.

En el cuarto escenario planteado se considera la eliminación de energía comprada y energía facturada, que son variables relacionadas aplicando el mismo criterio del escenario 3.

Se probaron otros escenarios con la eliminación de diferentes variables relacionadas y los resultados eran similares por lo que se escogió los escenarios 3 y 4, para el estudio.

Tabla 3.2.1.5. Entradas y Salidas de los Escenarios

Modelo 1			
Escenarios			
Escenario 1		Escenario 2	
Entradas	Salidas	Entradas	Salidas
ECOMP	ENEF	ECOMP	ENEF
KMT	PMW	KMT	PMW
PERT	CLTS	CDD	CLTS

Modelo 2			
Escenarios			
Escenario 3		Escenario 4	
Entradas	Salidas	Entradas	Salidas
ECOMP	ENEF	KMT	PMW
KMT	PMW	CDD	CLTS

3.2.2 Aplicación de pyDEA

Configuración del modelo DEA

Inicialmente, se seleccionó el modelo VRS ya que permite identificar la presencia de economías de escala al interior del mercado. Para la orientación se elige una orientación a entradas debido al requerimiento natural que poseen las empresas de alcanzar la cúspide de beneficios por medio de la disminución de sus costos. Por tanto, el modelo DEA adoptado para el estudio se representaría como [12]:

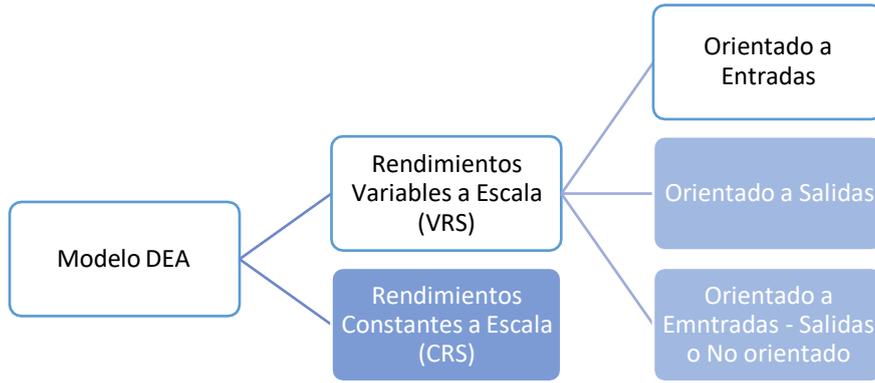


Figura 8. Diagrama de configuración del modelo DEA.

Con dicha disposición el modelo matemático es el siguiente [1], [12]:

$$\min [E_0 - \varepsilon (\sum_{i=1}^m h_i^- + \sum_{r=1}^s h_r^+)] \quad (7)$$

sujeto a:

$$E_0 x_{i0} - \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} - h_i^- = 0 \quad i = 1..m \quad (8)$$

$$-z_{r0} + \sum_{j=1}^n \lambda_j z_{ij} - h_r^+ = 0 \quad r = 1..s \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \quad (10)$$

$$h_i^-, h_i^+, \lambda_i \geq 0 \quad (11)$$

$$j = 1..n \quad (12)$$

Donde

E_0 : Medición de eficiencia de la empresa

x_{ij} : Variable de entrada i para la empresa j

z_{ij} : Variables de salida i para la empresa j

h_i^-, h_i^+ : Variable de holgura solución del modelo

λ_i : Ponderador solución del modelo para cada variable de entrada y salida

ε : Número muy pequeño y mayor que cero

3.2.3 Análisis de los resultados

Los resultados para las variables descritas y el modelo DEA descrito anteriormente, se muestran en las siguientes Tablas:

Modelo 1

Tabla 3.2.3.1 Eficiencias Relativas considerando los escenarios del Modelo 1

Menos a Más Eficiente	Modelo 1			
	Escenario 1		Escenario 2	
	Empresas	Eficiencia	Empresas	Eficiencia
1	CNEL-Sto. Domingo	0.781	CNEL-Sto. Domingo	0.781
2	CNEL-Esmeraldas	0.818	CNEL-Esmeraldas	0.818
3	CNEL-EI Oro	0.826	CNEL-Manabí	0.839
4	CNEL-Manabí	0.839	CNEL-Los Ríos	0.844
5	CNEL-Los Ríos	0.844	CNEL-Sucumbíos	0.892
6	CNEL-Sucumbíos	0.861	CNEL-EI Oro	0.903
7	E.E. Norte	0.892	CNEL-Milagro	0.931
8	CNEL-Milagro	0.934	CNEL-Sta. Elena	0.954
9	E.E. Cotopaxi	0.944	E.E. Centro Sur	0.960
10	CNEL-Sta. Elena	0.954	E.E. Cotopaxi	0.970
11	CNEL-Guayas Los Ríos	0.990	E.E. Norte	0.973
12	CNEL-Guayaquil	1.000	CNEL-Guayas Los Ríos	0.990
13	CNEL-Bolívar	1.000	CNEL-Guayaquil	1.000
14	E.E. Quito	1.000	CNEL-Bolívar	1.000
15	E.E. Centro Sur	1.000	E.E. Quito	1.000
16	E.E. Ambato	1.000	E.E. Ambato	1.000
17	E.E. Riobamba	1.000	E.E. Riobamba	1.000
18	E.E. Sur	1.000	E.E. Sur	1.000
19	E.E. Azogues	1.000	E.E. Azogues	1.000
	Media	0.930		0.940

Modelo 2

Tabla 3.2.3.2 Eficiencias relativas considerando los escenarios del Modelo 2

Menos a Más Eficiente	Modelo 2			
	Escenario 3		Escenario 4	
	Empresas	Eficiencia	Empresas	Eficiencia
1	CNEL-Esmeraldas	0.559	CNEL-Bolívar	0.390
2	CNEL-Los Ríos	0.604	CNEL-Esmeraldas	0.555
3	CNEL-Manabí	0.654	CNEL-Manabí	0.575
4	CNEL-Sto. Domingo	0.672	CNEL-Los Ríos	0.581
5	CNEL-Milagro	0.783	CNEL-Milagro	0.606
6	CNEL-Sta. Elena	0.798	CNEL-Sucumbíos	0.622
7	E.E. Cotopaxi	0.800	CNEL-Sto. Domingo	0.634
8	CNEL-Guayas Los Ríos	0.846	CNEL-Guayas Los Ríos	0.723
9	CNEL-Sucumbíos	0.851	CNEL-Sta. Elena	0.726
10	CNEL-El Oro	0.903	E.E. Centro Sur	0.742
11	E.E. Ambato	0.918	E.E. Cotopaxi	0.797
12	E.E. Centro Sur	0.960	E.E. Ambato	0.816
13	E.E. Norte	0.965	CNEL-El Oro	0.875
14	E.E. Riobamba	0.975	E.E. Sur	0.927
15	CNEL-Guayaquil	1.000	E.E. Norte	0.930
16	CNEL-Bolívar	1.000	E.E. Riobamba	0.936
17	E.E. Quito	1.000	CNEL-Guayaquil	1.000
18	E.E. Sur	1.000	E.E. Quito	1.000
19	E.E. Azogues	1.000	E.E. Azogues	1.000
	Media	0.860		0.760

Los resultados de eficiencia resultan sensibles al tipo de modelo; usualmente, un número superior de variables aumenta los éxitos de eficiencia. Dicho resultado es supuesto debido a que al aumentar el número de variables, aumenta la posibilidad de que el componente de prueba encuentre una combinaciones de pesos de insumos y productos que le ocasione salir eficiente [13].

Análisis de resultados Modelo 1

Con los resultados obtenido en la Tabla 3.2.3.1, Modelo 1 – Escenario 1 se reconocen como eficientes 8 distribuidoras y 11 distribuidoras ineficientes, teniendo un promedio 0.93, es decir, una eficiencia promedio del 93% para dichas empresas.

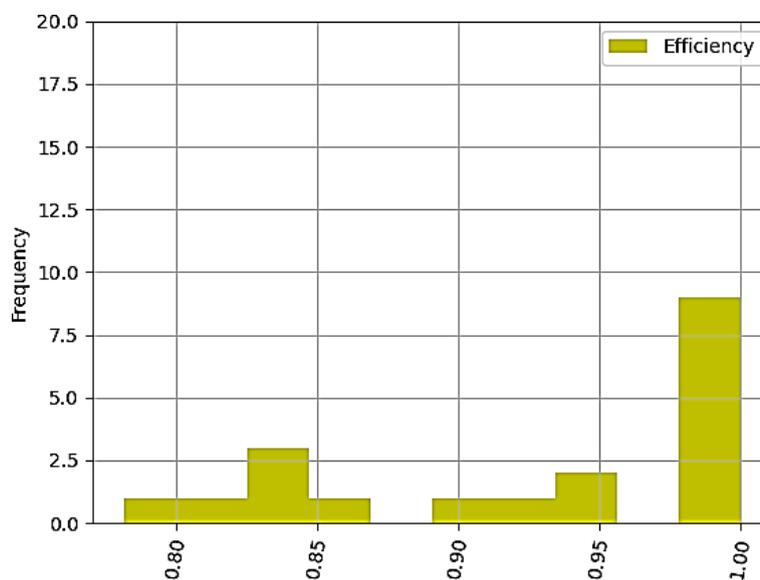


Figura 8. Gráfica de la frecuencia de eficiencias que se tiene para el escenario 1

En la gráfica de frecuencia se aprecian los rangos de eficiencia de las empresas.

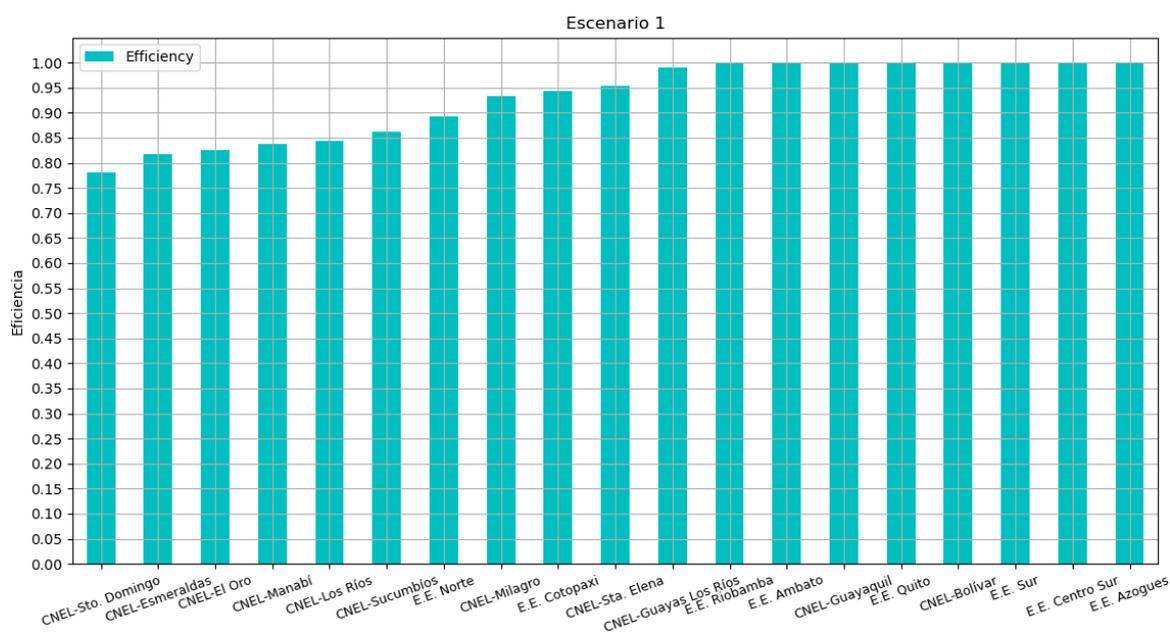


Figura 9. Gráfica de la frontera de eficiencia para el escenario 1 obtenida en Python

En este escenario se utilizan las pérdidas totales de cada empresa en vez de la variable de costos. Los resultados obtenidos se complementan con la experiencia real puesto que las empresas más eficientes son E.E. Quito, E.E. Ambato y E.E. Centro Sur, mientras que las empresas CNEL-Sto. Domingo y CNEL-Esmeraldas son las de menor eficiencia.

Escenario 2

Con los resultados obtenido de la Tabla 3.2.3.1, del modelo 1 escenario 2 se reconocen como eficientes 7 distribuidoras y 12 distribuidoras ineficientes, teniendo un promedio de 0.94, es decir, una eficiencia promedio del 94% para dichas empresas.

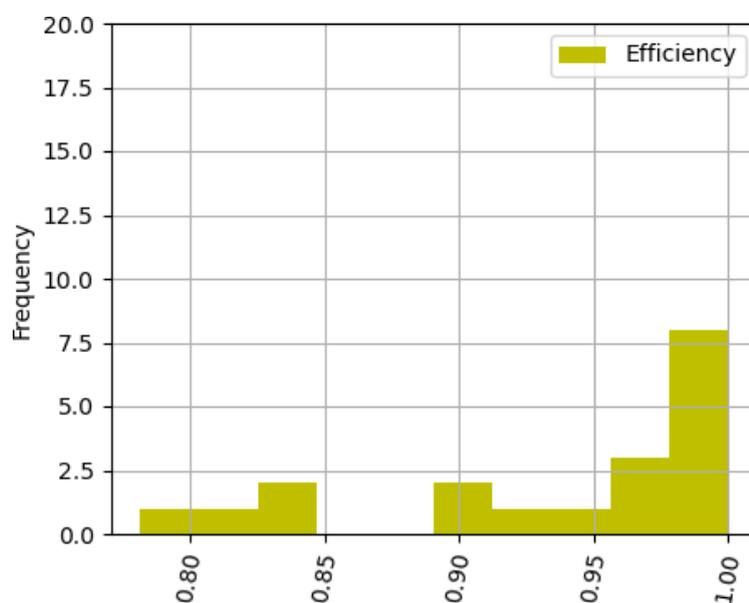


Figura 10. Gráfica de la frecuencia de eficiencias que se tiene para el escenario 2

En la gráfica de frecuencia se aprecian los rangos en que se encuentran los valores de eficiencia de las empresas.

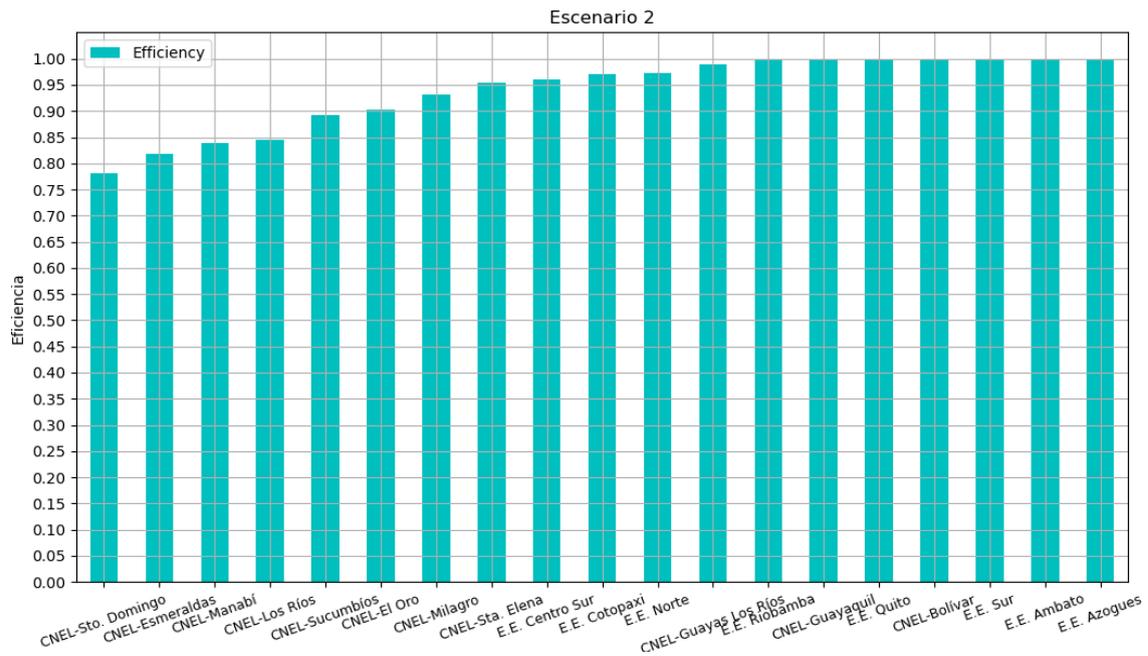


Figura 11. Gráfica de la frontera de eficiencia para el escenario 2 obtenida en Python

En el escenario 2 se utiliza como variable de entrada los costos de distribución, en vez de las pérdidas totales, obteniéndose un porcentaje mayor de eficiencia promedio. De igual forma, los resultados obtenidos mediante pyDEA coinciden con la realidad, ya que las empresas consideradas buenas como E.E. Quito, E.E. Ambato se hallan en la frontera de eficiencia a excepción de la E.E. Centro Sur, que varía un 0.04 de eficiencia del escenario 1, pero aún se la puede considerar como muy cercana a la frontera de eficiencia.

Análisis de los escenarios del Modelo 2

Con los resultados de la Tabla 3.2.3.2, del modelo 2 escenario 3 se reconocen como eficientes 5 distribuidoras y 14 distribuidoras ineficientes, teniendo un promedio de 0.86, es decir, una eficiencia promedio del 86% para dichas empresas.

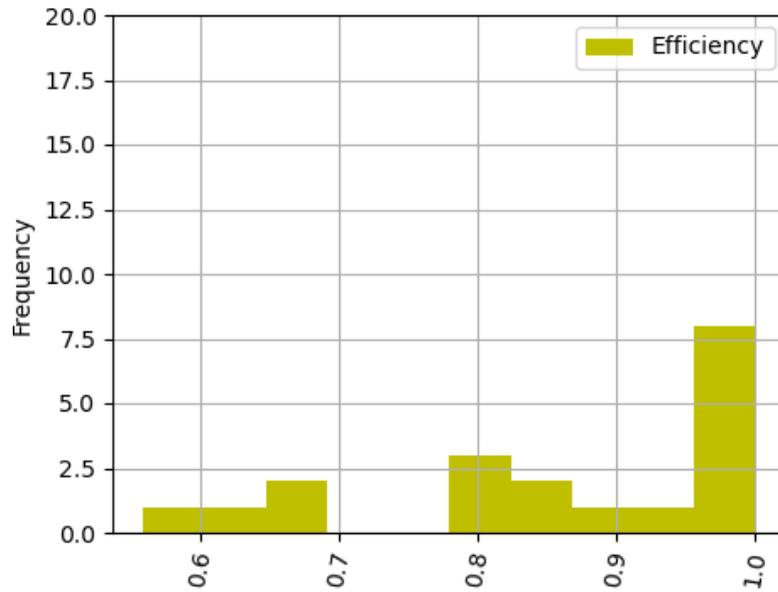


Figura 12. Gráfica de la frecuencia de eficiencias que se tiene para el escenario 3

En la gráfica de frecuencia se aprecian los rangos en que se encuentran los valores de eficiencia de las empresas.

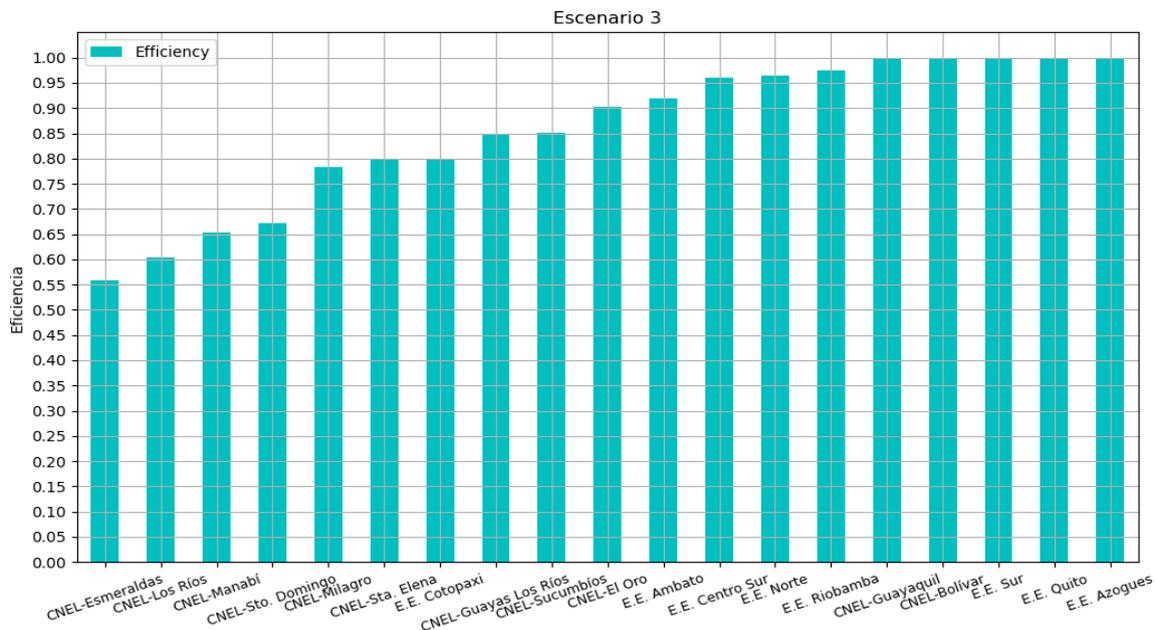


Figura13. Gráfica de la frontera de eficiencia para el escenario 3 obtenida en Python

En el escenario 3 se trabaja con 2 variables para comprobar si al reducir el número de variables, cumpliendo la ecuación general para el análisis de DEA, con un margen mayor, se obtienen resultados favorables o parecidos a la realidad.

Se cumple que, al reducir el número de variables, el número de empresas eficientes también se reduce; se puede comprobar que la eficiencia media baja significativamente,

por tanto los valores obtenidos no serían aceptables. Al comparar con la realidad, algunas empresas consideradas como buenas han bajado su eficiencia en este escenario, mientras que las no tan eficientes han escalado puestos. Se concluye que el escenario 3 no coincide con la realidad y por tanto no es factible para comprobar fronteras de eficiencia.

Escenario 4

Con los resultados obtenidos de la Tabla 3.2.3.2, del modelo 2 escenario 4 se reconocen como eficientes 3 distribuidoras y 16 distribuidoras ineficientes, teniendo en cuenta el promedio de 0.76, es decir, una eficiencia promedio del 76% para dichas empresas.

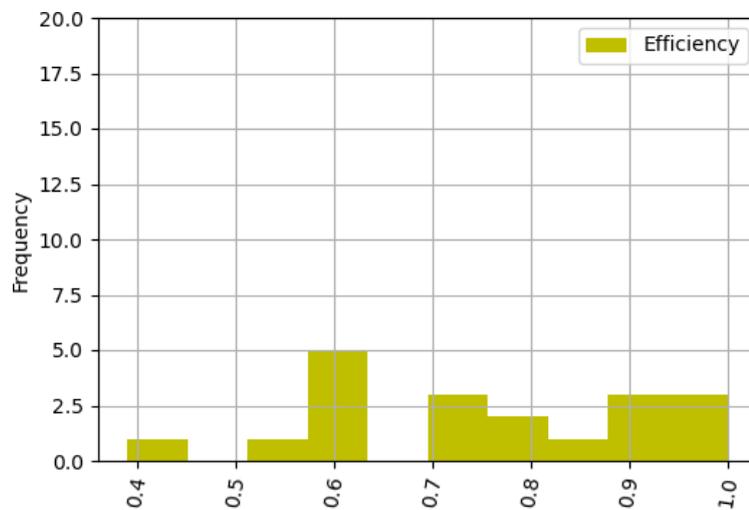


Figura 14. Gráfica de la frecuencia de eficiencias que se tiene para el escenario 4

En la gráfica de frecuencia se aprecian los rangos en que se encuentran los valores de eficiencia de las empresas.

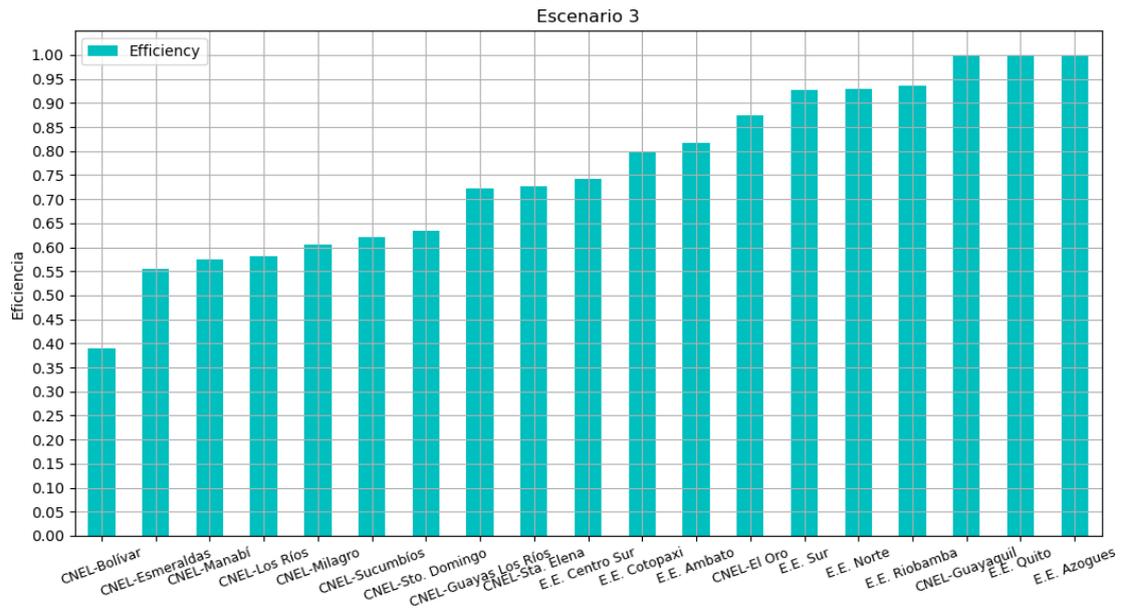


Figura 15. Gráfica de la frontera de eficiencia para el escenario 4 obtenida en Python

En el escenario 4 se comprueba que, reduciendo el número de variables, las empresas distribuidoras eficientes también se reducen. La media de eficiencia también se reduce significativamente. El análisis muestra que el escenario 4 no coincide con la realidad, por lo que no puede ser usado para el estudio de fronteras de eficiencia de las empresas.

El reducir variables no implica que el análisis va a ser más exacto o preciso como se comprobó con los dos últimos escenarios, lo que permite tener un buen estudio y análisis de fronteras de eficiencia es la correcta selección de variables de entrada y salida con datos precisos y reales.

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- El Análisis Envolvente de Datos, permite la identificación de indicadores de eficiencia técnicamente correctos, conceptualmente claros y aplicables para la cuantificación de eficiencia en empresas distribuidoras. Las propiedades de estos indicadores se examinan y ajustan estadísticamente.
- El indicador de eficiencia clasifica cada empresa como eficiente o ineficiente lo que permite estimar el crecimiento potencial de productividad de cada empresa. Para una compañía ineficiente se puede considerar este indicador como una referencia para identificar estrategias y acciones que se pueden aplicar para mejorar y aumentar la productividad.
- Se puede concluir que la identificación de variables es una restricción en el proceso de caracterización de eficiencia, ya que si un estudio previo obtuvo variables incorrectas los escenarios simulados no van a coincidir con la realidad, volviendo inválido el estudio, y en caso de no contar con experiencia y conocimiento relacionado con el funcionamiento de las empresas se obtendría conclusiones erróneas.
- El número de variables también representa una gran contradicción ya que se podría asumir que al tener menor número de variables el estudio podría ser más exacto, pero sucede todo lo contrario al tener un menor número de variables el estudio se vuelve más inexacto, ya que, al querer determinar la frontera de eficiente se tiene menos información para comparar lo que podría volver a una sola variable la frontera de eficiencia, y a partir de esta, determinar las eficiencias de la demás. Esto no va a coincidir con la realidad donde una empresa puede y debe contar con más de una variable como frontera.
- Los resultados obtenidos evidencian que la eficiencia e ineficiencia de una empresa no es necesariamente proporcional al tamaño de la empresa o zona de concesión, ya que puede tener un menor tamaño, pero ubicarse en la frontera de eficiencia como es el caso de E.E. Ambato y E.E. Azogues.
- Aunque se elijan variables correctas en los estudios DEA, los resultados pueden variar respecto de lo observado en la realidad, ya que, aunque una empresa se ubique entre las más eficientes, la misma puede ser considerada en la realidad como no tan eficiente, así que siempre habrá un margen de error en los resultados.

4.2 Recomendaciones

- Se recomienda para estudios futuros analizar los cambios en la información de entrada, ya que el presente trabajo usa datos del 2021 de las empresas distribuidoras.
- Se recomienda realizar un análisis previo de los datos a utilizar y descartar aquellos no relevantes, esto simplificaría el trabajo de selección de variables.

5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] F. Alvarez, "Conciliación entre la Eficiencia Energética y las Empresas de Distribución de Electricidad", M.S. tesis, Dpto. Ciencias de la Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago de Chile, 2008.

[2] L. Krajewski, R. Larry, and M. Malhotra, Administración de operaciones, Naucalpan de Juárez, México: Prentice Hall, 2008.

[3] E. Curi, "Benchmarking de Costos de Operación en el sector Eléctrico", M.S. tesis, Dpto. Ciencias de la Administración., Universidad Católica de Córdoba, Córdoba, Argentina, 2010.

[4] H. Gravelle y R. Rees, Microeconomía, 3ª ed. Madrid, España: Prentice Hall, 2006.

[5] M. Farrell, "The measurement of productive efficiency", Journal of the Royal Statistical Society, vol. 120, no.3, pp.253-290, Oct.1957

[6] W. Cooper, L. Seiford and K. Toune, Data Envelopment Analysis, New York, USA: Springer, 2007.

[7] J. I. Vásquez, "ANÁLISIS DE LA APLICACIÓN DEL BENCHMARKING EN EMPRESAS COMERCIALES DE LA CIUDAD DE GUATEMALA", ING. Tesis, Dpto. Ingeniería Industrial., Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala, 2009.

[8] C. H. Rodríguez, "LA IMPORTANCIA DEL BENCHMARKING COMO HERRAMIENTA PARA INCREMENTAR LA CALIDAD EN EL SERVICIO EN LAS ORGANIZACIONES", Veracruz, México, 21 de noviembre de 2011.

[9] A. A. Pérez, "Revisión de metodologías y aplicaciones de Benchmarking Energético en la industria", ING. Tesis, Dpto. Ingeniería Energética., Universidad de Sevilla, España, 2014.

[10] E. Sierra, S. Lajes, "Evolución de los métodos de evaluación de la confiabilidad para redes eléctricas de distribución", vol. XXXI, No. 3, pags. 42-48, septiembre de 2010.

[11] G. Westreicher, "Eficiencia Asignativa" economipedia (24 de noviembre de 2021), [En línea]. Aavailable: <https://economipedia.com/definiciones/eficiencia->

[asignativa.html#:~:text=La%20eficiencia%20asignativa%20es%20la,el%20beneficio%20de%20los%20compradores.](#) [Último acceso: Mayo 2022]

[12] R. Sanhueza, "Fronteras de Eficiencia, Metodología para la Determinación del Valor Agregado de Distribución" Ph.D. tesis doctoral, Dpto. Ciencias de la Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago de Chile, 2003

[13] A. Raith, F. Fauzi y O. Perederieieva, «pyDEA,» 2016. [En línea]. Available: <https://araith.github.io/pyDEA/>

[14] «DEAOS,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.deaos.com/#features>. [Último acceso: Junio 2022].

[15] MaxDEABook, 2014. [En línea]. Available: <http://maxdea.com/Book/MaxDEABook.pdf>. [Último acceso: Junio 2022].

6 ANEXOS

ANEXO I Tabla 3.1.1 Empresas de distribución consideradas en el estudio [12].

Empresa	Sigla	Cod.	Región administrativa	Área
Empresa Eléctrica de Arica S.A.	EMELARI	1	I	3
Empresa Eléctrica de Iquique S.A.	ELIQSA	2	I	2
Empresa Eléctrica de Antofagasta S.A.	ELECDA	3	II	2
Empresa Eléctrica de Atacama S.A.	EMELAT	4	III	2
Chilquinta Energía S.A.	CHILQUINTA	6	V	3
Compañía Nacional de Fuerza Eléctrica S.A.	CONAFE	7	V y VII	2
Empresa Eléctrica de Casablanca S.A.	EMELCA	8	V	5
Compañía Eléctrica del Litoral S.A.	LITORAL	9	V	5
Chilectra S.A.	CHILECTRA	10	Metropolitana	1
Empresa Eléctrica de Colina S.A.	COLINA	12	Metropolitana	3
Empresa Eléctrica Municipal Til-Til	TILTIL	13	Metropolitana	3
Empresa Eléctrica Puente Alto Ltda.	PUENTE ALTO	14	Metropolitana	2
Luz Andes S.A.	LUZANDES	15	Metropolitana	3
Empresa Eléctrica de Melipilla	EMELECTRIC	17	Metropolitana, VI Y VII	4
Compañía General de Electricidad S.A.	CGE	18	Metropolitana, VI, VII, VIII y IX	2
Cooperativa Eléctrica Los Angeles	COPELAN	21	VIII	5
Empresa Eléctrica de la Frontera S.A.	FRONTEL	22	VIII y IX	5
Sociedad Austral de Electricidad S.A.	SAESA	23	IX y X	4
Empresa Eléctrica de Aisén S.A.	EDELAYSÉN	24	XI	4
Empresa Eléctrica de Magallanes S.A.	EDELMAG	25	XII	3
Compañía Distribuidora de Energía	CODINER	26	VIII y IX	5
Energía de Casablanca S.A.	EDECESA	28	V	4
Cooperativa Eléctrica de Curicó	COOP.CURICO	29	VII	3
Empresa Eléctrica de Talca S.A.	EMETAL	30	VII	6
Luz Linares S.A.	LUZLINARES	31	VII	5

Distribuidora Parral S.A.	LUZPPARRAL	32	VII	5
Cooperativa Eléctrica de Chillán	COPELEC	33	VIII	6
Cooperativa Eléctrica de Charrúa	COELCHA	34	VIII	6
Cooperativa Eléctrica de Paillaco	SOCOEPA	35	X	5
Cooperativa Eléctrica Río Bueno	COOPREL	36	X	5
Compañía Eléctrica Luz Osorno	LUZOSORNO	37		5
Cooperativa Regional Eléctrica Llanquihue	CRELL	38	I, II, III	5
Enel Distribución Chile S.A.	ENELSA	39	Metropolitana	

ANEXO II Tabla 3.1.2 Variables agrupadas – Estudio Ecuador

Clientes y ventas	
Número de clientes	CLTS
Energía total vendida a clientes regulados	EVENDT
Energía vendida en baja tensión	EVENDBT
Energía vendida en alta tensión	EVENDAT
Dimensionamiento de la instalación del sistema eléctrico	
Valor neto retornable Total	VNTR
Valor neto retornable en baja tensión	VNRAT
Valor neto retornable en alta tensión	VNRBT
Kilometro totales de líneas	KMT
Kilómetros de línea en red de baja tensión	KMBT
Kilómetros de línea en de alta tensión	KMAT
Potencia total coincidente Dx	KWT
Potencia total coincidente en red de baja tensión	KWBT
Potencia total coincidente en red de alta tensión	KWAT
Dimensionamiento de la mantención y operación	
Costos totales de explotación	CEXPLT
Costos de explotación en red de baja tensión	CEXPLBT
Costos de explotación en red de alta tensión	CEXPLAT
Dimensionamiento de la actividad de gestión	
Número total de trabajadores	NTRAB
Total de remuneraciones anuales	REMUN
Número de comunas	NCOMU
Dimensionamiento de las instalaciones muebles e inmuebles	

Bienes muebles e inmuebles	BMI
Otras variables generales	
Energía comprada	ECOMP
Costo por energía comprada	CCOMP
Costos por pérdidas de energía y potencia	CPERD

ANEXO III. Tabla 3.2.1.2 Variables – Estudio Ecuador

N°	Empresas	Costos de Red, Comercialización y Administración	Costos de Calidad del Servicio	Costos de Expansión	Costos de Confiabilidad	Costos de Distribución	Energía Comprada [GWh]	KM de Línea de Transmisión, MT, BT	PERDIDAS TOTALES	Energía Facturada [MWh]	Potencia Máxima de Punta [MW]	N° Clientes	KM de Línea de MT, BT	KM de Línea de Transmisión	KM de Línea de MT	N° Clientes Residenciales	TRAFOS [MVA] MAXIMO	TRAFOS DE MT
1	CNEL-Guayaquil	87.110	15.310	8.140	1.240	111.800	5410.820	8406.650	837.900	4570105.750	979.560	719.010	8129.370	277.280	2867.480	634,518	1360.000	2501.610
2	CNEL-Guayas Los Ríos	58.340	9.030	9.620	1.250	78.240	2597.740	14611.940	465.630	2131709.190	483.270	363.030	14112.930	499.020	8466.040	336,222	798.000	1298.060
3	CNEL-Manabí	49.900	16.490	14.410	1.490	82.290	1918.210	15667.620	503.890	1417542.860	314.840	334.460	15186.970	480.650	8256.770	310,035	539.650	873.560
4	CNEL-EI Oro	29.880	6.470	5.470	0.710	42.540	1449.340	9482.610	244.400	1204944.040	222.480	271.020	9190.280	292.330	5588.520	244,186	447.500	743.800
5	CNEL-Milagro	23.120	11.490	4.900	0.780	40.290	1115.650	6853.380	143.980	971873.150	194.590	157.590	6533.880	319.500	4301.000	143,503	252.500	404.760
6	CNEL-Sta. Elena	16.260	6.860	4.360	0.600	28.080	851.860	4417.240	152.720	699136.150	151.930	131.650	4185.550	231.690	2329.890	119,610	282.650	437.630
7	CNEL-Sto. Domingo	33.910	11.190	6.650	0.770	52.520	829.220	14961.730	96.660	732565.860	135.510	258.050	14630.490	331.240	8164.770	229,516	272.750	501.990
8	CNEL-Sucumbíos	15.870	3.010	9.250	0.740	28.860	813.170	10101.830	63.570	749242.900	136.400	103.350	9917.230	184.600	5250.430	88,372	143.750	277.020
9	CNEL-Esmeraldas	20.530	5.800	5.380	0.640	32.350	658.060	8118.770	186.800	471260.990	109.300	131.620	7727.770	391.000	4795.070	120,297	257.000	328.030
10	CNEL-Los Ríos	20.320	4.170	6.310	0.980	31.770	509.680	6095.700	105.560	403826.460	84.670	143.180	5930.500	165.200	3681.110	133,354	164.000	361.170
11	CNEL-Bolívar	11.910	3.820	5.770	0.450	21.950	100.560	6744.820	11.150	89345.720	19.410	68.580	6549.560	195.260	3208.650	63,497	76.250	92.310
12	E.E. Quito	91.020	39.360	27.470	1.490	159.340	3965.090	13283.420	310.950	3616671.030	705.910	1220.860	12685.250	598.170	1784.240	1,052,689	1937.000	2994.820
13	E.E. Centro Sur	44.770	13.680	14.970	0.640	74.050	1178.360	14732.240	80.550	1094568.040	204.180	423.510	14431.560	300.680	1423.780	375,653	505.500	883.590
14	E.E. Ambato	22.070	13.480	10.360	0.550	46.460	728.810	14367.630	42.150	686701.860	161.410	293.460	14219.070	148.560	5991.980	252,651	373.000	453.910
15	E.E. Norte	23.110	7.270	4.450	1.580	36.410	686.170	13640.160	69.660	616671.240	130.950	262.600	13365.990	274.170	6258.270	228,636	257.500	516.990
16	E.E. Cotopaxi	15.940	5.240	4.170	0.230	25.570	549.370	10343.190	52.810	502465.670	112.380	152.430	10214.070	129.120	4351.980	134,521	135.150	291.470
17	E.E. Riobamba	14.990	5.380	4.090	0.650	25.110	446.890	9936.390	33.040	413216.550	101.270	183.340	9762.910	173.480	4307.400	160,496	137.750	298.620
18	E.E. Sur	18.910	5.790	4.730	0.930	30.360	404.090	8608.600	43.540	747635.490	75.290	218.880	8065.860	542.740	2470.070	192,294	181.350	381.070
19	E.E. Azogues	3.790	0.540	0.200	0.180	4.710	81.880	2363.690	7.110	77121.900	17.440	39.860	2336.810	26.880	832.500	36,105	32.500	61.270

ANEXO IV Tabla 3.2.1.4 Coeficiente de correlación entre las variables – Estudio Ecuador

	CRCA	CCS	CDE	CDC	CDD	ECOMP	ENEF	KMT	KMMT Y KMBT	KMTR	KMMT	PMW	CLTS	CLTSR	PERT	TRAFM	TRAFMT
CRCA	1.000																
CCS	0.820	1.000															
CDE	0.750	0.910	1.000														
CDC	0.680	0.570	0.530	1.000													
CDD	0.970	0.920	0.870	0.670	1.000												
ECOMP	0.950	0.690	0.580	0.600	0.880	1.000											
ENEF	0.950	0.720	0.600	0.600	0.890	0.990	1.000										
KMT	0.470	0.490	0.580	0.510	0.520	0.270	0.260	1.000									
KMMT Y KMBT	0.450	0.470	0.570	0.490	0.500	0.250	0.250	1.000	1.000								
KMTR	0.620	0.610	0.600	0.680	0.650	0.470	0.500	0.470	0.440	1.000							
KMMT	0.050	-0.060	-0.020	0.350	0.020	-0.010	-0.060	0.620	0.620	0.220	1.000						
PMW	0.940	0.680	0.570	0.590	0.880	1.000	0.990	0.270	0.250	0.450	-0.010	1.000					
CLTS	0.920	0.930	0.840	0.600	0.960	0.830	0.860	0.420	0.410	0.580	-0.150	0.830	1.000				
CLTSR	0.930	0.930	0.840	0.610	0.970	0.840	0.870	0.430	0.420	0.590	-0.130	0.840	1.000	1.000			
PERT	0.810	0.430	0.340	0.590	0.700	0.900	0.860	0.210	0.200	0.440	0.210	0.890	0.560	0.580	1.000		
TRAFM	0.950	0.880	0.790	0.610	0.960	0.920	0.930	0.350	0.330	0.580	-0.110	0.910	0.970	0.980	0.700	1.000	
TRAFMT	0.970	0.840	0.740	0.630	0.960	0.950	0.960	0.330	0.310	0.560	-0.110	0.950	0.960	0.970	0.740	0.990	1.000

ANEXO V Tabla 3.2.1.5. Escenario 1 – Estudio Ecuador

Empresas	Energía Comprada [GWh]	KM de Línea TOTALES	PERDIDAS TOTALES	Energía Facturada [MWh]	Potencia Máxima de Punta [MW]	N° Clientes
CNEL-Guayaquil	5,410.820	8,406.650	837.900	4,570,105.750	979.560	719.010
CNEL-Guayas Los Ríos	2,597.740	14,611.940	465.630	2,131,709.190	483.270	363.030
CNEL-Manabí	1,918.210	15,667.620	503.890	1,417,542.860	314.840	334.460
CNEL-EI Oro	1,449.340	9,482.610	244.400	1,204,944.040	222.480	271.020
CNEL-Milagro	1,115.650	6,853.380	143.980	971,873.150	194.590	157.590
CNEL-Sta. Elena	851.860	4,417.240	152.720	699,136.150	151.930	131.650
CNEL-Sto. Domingo	829.220	14,961.730	96.660	732,565.860	135.510	258.050
CNEL-Sucumbíos	813.170	10,101.830	63.570	749,242.900	136.400	103.350
CNEL-Esmeraldas	658.060	8,118.770	186.800	471,260.990	109.300	131.620
CNEL-Los Ríos	509.680	6,095.700	105.560	403,826.460	84.670	143.180
CNEL-Bolívar	100.560	6,744.820	11.150	89,345.720	19.410	68.580
E.E. Quito	3,965.090	13,283.420	310.950	3,616,671.030	705.910	1,220.860
E.E. Centro Sur	1,178.360	14,732.240	80.550	1,094,568.040	204.180	423.510
E.E. Ambato	728.810	14,367.630	42.150	686,701.860	161.410	293.460
E.E. Norte	686.170	13,640.160	69.660	616,671.240	130.950	262.600
E.E. Cotopaxi	549.370	10,343.190	52.810	502,465.670	112.380	152.430
E.E. Riobamba	446.890	9,936.390	33.040	413,216.550	101.270	183.340
E.E. Sur	404.090	8,608.600	43.540	747,635.490	75.290	218.880
E.E. Azogues	81.880	2,363.690	7.110	77,121.900	17.440	39.860

ANEXO VI Tabla 3.2.1.5. Escenario 2 – Estudio Ecuador

Empresas	Energía Comprada [GWh]	KM de Línea TOTALES	Costos de Distribución	Energía Facturada [MWh]	Potencia Máxima de Punta [MW]	Nº Clientes
CNEL-Guayaquil	5,410.820	8,406.650	111.800	4,570,105.750	979.560	719.010
CNEL-Guayas Los Ríos	2,597.740	14,611.940	78.240	2,131,709.190	483.270	363.030
CNEL-Manabí	1,918.210	15,667.620	82.290	1,417,542.860	314.840	334.460
CNEL-EI Oro	1,449.340	9,482.610	42.540	1,204,944.040	222.480	271.020
CNEL-Milagro	1,115.650	6,853.380	40.290	971,873.150	194.590	157.590
CNEL-Sta. Elena	851.860	4,417.240	28.080	699,136.150	151.930	131.650
CNEL-Sto. Domingo	829.220	14,961.730	52.520	732,565.860	135.510	258.050
CNEL-Sucumbíos	813.170	10,101.830	28.860	749,242.900	136.400	103.350
CNEL-Esmeraldas	658.060	8,118.770	32.350	471,260.990	109.300	131.620
CNEL-Los Ríos	509.680	6,095.700	31.770	403,826.460	84.670	143.180
CNEL-Bolívar	100.560	6,744.820	21.950	89,345.720	19.410	68.580
E.E. Quito	3,965.090	13,283.420	159.340	3,616,671.030	705.910	1,220.860
E.E. Centro Sur	1,178.360	14,732.240	74.050	1,094,568.040	204.180	423.510
E.E. Ambato	728.810	14,367.630	46.460	686,701.860	161.410	293.460
E.E. Norte	686.170	13,640.160	36.410	616,671.240	130.950	262.600
E.E. Cotopaxi	549.370	10,343.190	25.570	502,465.670	112.380	152.430
E.E. Riobamba	446.890	9,936.390	25.110	413,216.550	101.270	183.340
E.E. Sur	404.090	8,608.600	30.360	747,635.490	75.290	218.880
E.E. Azogues	81.880	2,363.690	4.710	77,121.900	17.440	39.860

ANEXO VII Tabla 3.2.1.6. Escenario 3 – Estudio Ecuador

Empresas	Energía Comprada [GWh]	Costos de Distribución	Energía Facturada [MWh]	N° Clientes
CNEL-Guayaquil	5410.820	111.800	4570105.750	719.010
CNEL-Guayas Los Ríos	2597.740	78.240	2131709.190	363.030
CNEL-Manabí	1918.210	82.290	1417542.860	334.460
CNEL-EI Oro	1449.340	42.540	1204944.040	271.020
CNEL-Milagro	1115.650	40.290	971873.150	157.590
CNEL-Sta. Elena	851.860	28.080	699136.150	131.650
CNEL-Sto. Domingo	829.220	52.520	732565.860	258.050
CNEL-Sucumbíos	813.170	28.860	749242.900	103.350
CNEL-Esmeraldas	658.060	32.350	471260.990	131.620
CNEL-Los Ríos	509.680	31.770	403826.460	143.180
CNEL-Bolívar	100.560	21.950	89345.720	68.580
E.E. Quito	3965.090	159.340	3616671.030	1220.860
E.E. Centro Sur	1178.360	74.050	1094568.040	423.510
E.E. Ambato	728.810	46.460	686701.860	293.460
E.E. Norte	686.170	36.410	616671.240	262.600
E.E. Cotopaxi	549.370	25.570	502465.670	152.430
E.E. Riobamba	446.890	25.110	413216.550	183.340
E.E. Sur	404.090	30.360	747635.490	218.880
E.E. Azogues	81.880	4.710	77121.900	39.860

ANEXO VIII Tabla 3.2.1.7. Escenario 4 – Estudio Ecuador

Empresas	KM de Línea TOTALES	Costos de Distribución	Potencia Máxima de Punta [MW]	N° Clientes
CNEL-Guayaquil	8406.650	111.800	979.560	719.010
CNEL-Guayas Los Ríos	14611.940	78.240	483.270	363.030
CNEL-Manabí	15667.620	82.290	314.840	334.460
CNEL-EI Oro	9482.610	42.540	222.480	271.020
CNEL-Milagro	6853.380	40.290	194.590	157.590
CNEL-Sta. Elena	4417.240	28.080	151.930	131.650
CNEL-Sto. Domingo	14961.730	52.520	135.510	258.050
CNEL-Sucumbíos	10101.830	28.860	136.400	103.350
CNEL-Esmeraldas	8118.770	32.350	109.300	131.620
CNEL-Los Ríos	6095.700	31.770	84.670	143.180
CNEL-Bolívar	6744.820	21.950	19.410	68.580
E.E. Quito	13283.420	159.340	705.910	1220.860
E.E. Centro Sur	14732.240	74.050	204.180	423.510
E.E. Ambato	14367.630	46.460	161.410	293.460
E.E. Norte	13640.160	36.410	130.950	262.600
E.E. Cotopaxi	10343.190	25.570	112.380	152.430
E.E. Riobamba	9936.390	25.110	101.270	183.340
E.E. Sur	8608.600	30.360	75.290	218.880
E.E. Azogues	2363.690	4.710	17.440	39.860