

EVALUACIÓN DE PROYECTOS PARA EL APROVECHAMIENTO DE
FUENTES

NO CONVENCIONALES DE ENERGÍA UTILIZANDO EL

ANÁLISIS ENVOLVENTE DE DATOS

NIXON ADRIAN BARÓN SUÁREZ

HOLMAN ANDRÉS CHAPARRO FLÓREZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA

2016

EVALUACIÓN DE PROYECTOS PARA EL APROVECHAMIENTO DE
FUENTES

NO CONVENCIONALES DE ENERGÍA UTILIZANDO EL
ANÁLISIS ENVOLVENTE DE DATOS

NIXON ADRIAN BARÓN SUÁREZ

HOLMAN ANDRÉS CHAPARRO FLÓREZ

*Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Electricista*

Director

IVÁN DAVID SERNA SUÁREZ

Magister en Ingeniería Eléctrica

Codirectores

GABRIEL ORDÓÑEZ PLATA

Doctor en Ingeniería Industrial

GILBERTO CARRILLO CAICEDO

Doctor en Ingeniería Industrial

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA

2016

A Dios nuestro Señor por darme la oportunidad de alcanzar este logro tan anhelado, mi hijo Cristian Felipe que fue un pilar importante en los momentos mas difíciles, a mi esposa Milena Alarcón, a mis padres (Orlando Barón y Olga Suárez), mis hermanos, y demás familiares.

Nixon Adrian Barón Suárez.

A Dios por darme fuerza de luchar y seguir adelante para hacer este sueño posible. A mi madre Marina Flórez y mi padre Ignacio Chaparro (†) y hermanos por su amor, dedicación, confianza y apoyo. Y a todos aquellos que me ayudaron y me guiaron en este proceso.

Holman Andrés Chaparro Flórez

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander a la Escuela de Ingeniería Eléctrica Electrónica y Telecomunicación y a sus docentes por la formación brindada durante la carrera profesional.

Agradecemos especialmente por su acompañamiento y apoyo en el desarrollo de este trabajo de grado, a nuestro director de proyecto Iván David Serna Suárez, a nuestros codirectores Gabriel Ordóñez Plata y Gilberto Carrillo Caicedo por la confianza depositada en nosotros, su dedicación y apoyo a lo largo de este proceso. A cada uno de los docentes y compañeros que nos acompañaron en este proyecto.

A nuestras familias por brindarnos la oportunidad de ser profesionales y ofrecernos un apoyo incondicional para tan importante logro.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	18
<hr/>	
1. ANÁLISIS ENVOLVENTE DE DATOS	20
<hr/>	
1.1. OPTIMIZACIÓN	20
1.1.1. Definición de optimización	20
1.1.2. Declaración de un problema de optimización	21
1.1.3. Vector de diseño.	21
1.1.4. Restricciones de diseño	22
1.1.5. Restricciones.	22
1.1.6. Función objetivo	23
1.2. EFICIENCIA Y PRODUCTIVIDAD	25
1.2.1. Definición de productividad	25
1.2.2. Definición de eficiencia	26
1.2.3. Eficiencia técnica y productividad	29
1.3. FUNDAMENTACIÓN DEL ANÁLISIS ENVOLVENTE DE DATOS	30
1.3.1. Definición del Análisis Envolvente de Datos (DEA)	30
1.3.2. Formulación matemática	31
1.4. MODELOS DEA	32
1.4.1. Modelo DEA-CCR	32
1.4.2. Modelo BCC	32
1.4.3. Modelo Super-Eficiencia	33
1.4.4. Modelo eficiencia cruzada	34
1.5. DETERMINACIÓN DEL MEJOR MODELO DEA SEGÚN INDICADORES CARACTERÍSTICOS	35
<hr/>	
2. COSTOS Y ANÁLISIS FINANCIERO	39
<hr/>	
2.1. ANÁLISIS FINANCIERO	39
2.1.1. Aspectos iniciales para el análisis del precio de la energía:	39

2.1.2. Costos pre operativos y costos operativos:	40
2.1.3. Costo nivelado de la energía:	40
3. ESTIMACIÓN DE COSTOS MEDIOAMBIENTALES Y EFICIENCIA	42
<hr/>	
3.1. ANÁLISIS MEDIOAMBIENTAL COSTO-BENEFICIO	43
3.1.1. Ilustración del método DEA para análisis costo beneficio CBA (Adaptado de Kuosmanen and Kortelainen (2007))	45
3.2. EFICIENCIA DE LOS PROYECTOS POR MEDIO DE DEA SÚPER-EFICIENCIA	51
3.2.1. Tipo de proyectos	52
3.2.2. Método de análisis	52
3.2.3. Sitio de estudio	53
3.2.4. Tecnologías	53
3.2.5. Análisis	53
3.2.6. Evaluación de la eficiencia paso a paso	53
4. CASO DE ESTUDIO	57
<hr/>	
4.1. DESCRIPCIÓN DE LA REGIÓN E INFORMACIÓN UTILIZADA	57
4.2. CÁLCULOS PREVIOS PARA HOMOGENIZAR TODOS DATOS NECESARIOS	59
4.2.1. Cálculos del recurso Energético (input)	59
4.2.2. Cálculo de la demanda. Procedimiento tomado de la norma ESSA (Ayala Rodrí- guez et al. (2005))	66
4.2.3. Cálculo del beneficio económico (output)	68
4.2.4. Indicadores de impacto medioambiental (Output)	70
4.3. RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE PROYECTOS PARA EL APROVECHAMIENTO DE FUENTES NO CONVENCIONALES DE ENERGÍA	70
4.3.1. Resultados de la estimación de costos medioambientales	71
4.3.2. Resultados evaluación de la eficiencia	72
5. CONCLUSIONES	75
<hr/>	
6. RECOMENDACIONES	77
<hr/>	
BIBLIOGRAFÍA	78
<hr/>	
ANEXOS	85
<hr/>	

LISTA DE FIGURAS

1.1.	Figura 1: Superficies de restricción en un espacio hipotético bidimensional tomado de:(Rao and Rao, 2009)	23
1.2.	Figura 2: Esquema de representación de la eficiencia técnica	27
1.3.	Figura 3: Esquema de representación de la eficiencia por asignación	28
3.1.	Figura 4: Análisis paralelo DEA	42
3.2.	Figura 5: Ilustración de las opciones de plantas eléctricas	45
3.3.	Figura 6: Esquema inputs y outputs DEA	52
3.4.	Figura 7: Salida de resultados por cada tipo de proyecto y en cada municipio .	55
3.5.	Figura 8: Modelo para la eficiencia máxima de toda la región	56
3.6.	Figura 9: Código para obtener resultados en la programación DEA	56
3.7.	Figura 10: Selección pueblo	56
3.8.	Figura 11: Porcentaje del máximo obteniendo dos resultados según código . . .	56
3.9.	Figura 12: Salida de resultados, para dos opciones	56
4.1.	Figura 13: Departamento de Santander, dividido en Provincias	58
4.2.	Figura 14: Resultado final	73
C.1.	Figura 15: Tipos de fuentes energías	136

LISTA DE TABLAS

1.1. Tabla 1: Resultados de efectividad de los modelos DEA	36
1.2. Tabla 2: Porcentajes de favorabilidad	37
3.1. Tabla 3: Resultados de las evaluaciones de impacto económico y ambiental . . .	47
3.2. Tabla 4: Resultados de DEA basados en CBA	51
3.3. Tabla 5: Salida de resultados	54
4.1. Tabla 6: Densidad de energía eólica a $20(m)(W/m^2)$ (parte 1)	62
4.2. Tabla 7: Densidad de energía eólica a $20(m)(W/m^2)$ (parte 2)	62
4.3. Tabla 8: Energía eólica total mensual $[kWh]$	62
4.4. Tabla 9: Parámetros para la planta hidráulica	63
4.5. Tabla 10: Índice de recurso hídrico	64
4.6. Tabla 11: Resultados de caudal en $[m^3/s]$ de la operación mostrada en la ecuación 4.30 (parte 1)	64
4.7. Tabla 12: Resultados de caudal en $[m^3/s]$ de la operación mostrada en la ecuación 4.30 (parte 2)	64
4.8. Tabla 13: Resultados de la energía hídrica total anual en $[kWh/año]$ (parte 1) .	64
4.9. Tabla 14: Resultados de la energía hídrica total anual en $[kWh/año]$ (parte 2) .	64
4.10. Tabla 15: Cálculo para determinar la energía anual de la red según la cantidad de viviendas $[kWh/año]$	65
4.11. Tabla 16: Recurso solar inicia (kWh/m^2) (parte 1)	65
4.12. Tabla 17: Recurso solar inicia (kWh/m^2) (parte 2)	65
4.13. Tabla 18: Resultados de aplicar la ecuación $[kWh/año]$ 4.32 (parte 1)	66
4.14. Tabla 19: Resultados de aplicar la ecuación $[kWh/año]$ 4.32 (parte 2)	66
4.15. Tabla 20: Factores de demanda	68
4.16. Tabla 21: Factores de diversidad	69
4.17. Tabla 22: Resumen de resultados del beneficio social neto de cada proyecto en cada población	72

4.18. Tabla 23: Resultados de la evaluación de eficiencias de los diferentes proyectos en la primera etapa	74
A.1. Tabla 24: Distancia Barrancabermeja a municipio	87
A.2. Tabla 25: Recurso energético disponible por cada municipio para Biomasa . . .	88
A.3. Tabla 26: Densidad de energía eólica a 20 (m) (kWh/m^2)	89
A.4. Tabla 27: Información sobre datos disponibles en [demanda/oferta] de recurso hídrico	90
A.5. Tabla 28: Demanda hídrica en cada municipio	91
A.6. Tabla 29: Datos de recurso solar en (kWh/m^2)(parte 1)	92
A.7. Tabla 30: Datos de recurso solar en (kWh/m^2) (parte 2)	93
A.8. Tabla 31: Información disponible de las viviendas sin electrificar	94
A.9. Tabla 32: Datos necesarios para determinar el costo nivelado de la energía (parte 1)	95
A.10. Tabla 33: Datos necesarios para determinar el costo nivelado de la energía(parte 2)	96
A.11. Tabla 34: Matriz de impactos medio ambientales	97
C.1. Tabla 35: Costos de capital de una planta eólica	138
C.2. Tabla 36: Ventajas e Inconvenientes de las plantas eólicas	138
C.3. Tabla 37: Ventajas e Inconvenientes de la tecnología solar fotovoltaica	139
C.4. Tabla 38: Costos de capital de una planta Solar	139
C.5. Tabla 39: Ventajas e Inconvenientes de las plantas de biomasa	141
C.6. Tabla 40: Costos de capital (USD/kW) para la planta de generación eléctrica con Biomasa	141
C.7. Tabla 41: Con base en el factor de capacidad, la vida de la planta los costos de O&M se estima el costo de generación de la siguiente forma	142
C.8. Tabla 42: Ventajas e Inconvenientes	142
C.9. Tabla 43: Costos de capital para plantas Hidráulicas a pequeña escala, proyecto de costos de capital micro/pico hidroeléctrica (USD/kW)	143
C.10. Tabla 44: Costos por capacidad	143
C.11. Tabla 45: Ventajas e Inconvenientes	144
C.12. Tabla 46: Costos de plantas diésel para diferentes capacidades	144
C.13. Tabla 47: Ventajas e Inconvenientes	145
C.14. Tabla 48: Media tensión (parte 1)	146
C.15. Tabla 49: Media tensión (parte 2)	147

C.16.Tabla 50: Media tensión (parte 3)	148
C.17.Tabla 51: Media tensión (parte 4)	149
C.18.Tabla 52: Media tensión (parte 5)	150
C.19.Tabla 53: Media tensión (parte 6)	151
C.20.Tabla: 54 Baja tensión	152

LISTA DE ANEXOS

Anexo A: Información utilizada	89
Anexo B: Aspectos físicos para la implementación	101
Anexo C: Características y costos de las tecnologías utilizadas en los proyectos.....	138

GLOSARIO

Beneficio neto: Es la diferencia entre los ingresos y los costos económicos, que tienen un valor positivo en los períodos en los que el ingreso total supera el costo total y un valor negativo cuando los costos superen los ingresos.

CREG: Es la Comisión de Regulación de Energía y Gas, es una Unidad administrativa especial del Ministerio de Minas y Energía, creada por las Leyes 142 y 143 de 1994, eminentemente técnica y cuyo objetivo es lograr que los servicios de energía eléctrica, gas natural y gas licuado de petróleo (GLP) se presten al mayor número posible de personas, al menor costo posible para los usuarios y con una remuneración adecuada para las empresas que permita garantizar calidad, cobertura y expansión. CREG (2015)

DEA: Es el Análisis Envolvente de Datos es una Técnica no paramétrica determinista para análisis de eficiencia por comparación de Unidades organizacionales DMUs, por sus siglas en inglés- contra puntos de referencia de las mismas unidades observadas. Surge a partir del trabajo de Farrell de 1957 y fue presentada como metodología por Charnes, Cooper y Rhodes, en su trabajo “Measuring the Efficiency of Decision Making Units”, publicado en 1978 (Coll & Blasco, s.f).

DMU: (“Decision Market Unit”, en español: Unidad de Toma de Decisiones), estas son las Unidades objeto de estudio del Análisis Envolvente de Datos. Considerada como una entidad responsable de convertir entradas en salidas y cuyo desempeño es evaluado (Coll & Blasco, s.f).

Energía solar fotovoltaica: Es una fuente de energía que produce electricidad de origen renovable, obtenida directamente a partir de la radiación solar mediante un dispositivo

semiconductor denominado célula fotovoltaica, o bien mediante una deposición de metales sobre un sustrato denominada célula solar de película fina lhusurbil (2015).

ESSA: Es la Electrificadora de Santander, que distribuye y comercializa la energía eléctrica en 92 municipios de los departamentos de Cesar, Bolívar y Santander ESSA (2015).

Impactos ambientales: Son los efectos que se producen por la actividad humana sobre el medio ambiente. El concepto puede extenderse a los efectos de un fenómeno natural catastrófico. Técnicamente, es la alteración de la línea de base ambiental.

PYTHON: Es un lenguaje de programación interpretado cuya filosofía hace hincapié en una sintaxis que favorezca un código legible. Se trata de un lenguaje de programación multiparadigma, ya que soporta orientación a objetos, programación imperativa y, en menor medida, programación funcional.

SSPD: La Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, es un organismo de carácter técnico. Creado por la Constitución de 1.991 para que, por delegación del Presidente de la República, ejerza el control, la inspección y la vigilancia de las entidades prestadoras de servicios públicos domiciliarios superservicios (2015)

UPME: Es la Unidad de Planeación Minero Energética es una unidad administrativa especial del orden Nacional, de carácter técnico, adscrita al Ministerio de Minas y Energía, regida por la Ley 143 de 1994 y por el Decreto número 255 de enero 28 de 2004, cuyo objetivo es planear en forma integral, indicativa, permanente y coordinada con las entidades del sector minero-energético, tanto entidades públicas como privadas, el desarrollo y aprovechamiento de los recursos energéticos y mineros, producir y divulgar la información minero energética requerida. Piedráhita (2007).

Uso Eficiente de la Energía: Consiste en tener menos gastos, al reducir el monto de la factura de energía. Preservar los recursos naturales de nuestro planeta. Disminuir el consumo de combustibles fósiles utilizados para generar electricidad y la consecuente reducción de emisores contaminantes al medio ambiente.

RESUMEN

TÍTULO:

EVALUACIÓN DE PROYECTOS PARA EL APROVECHAMIENTO DE FUENTES NO CONVENCIONALES DE ENERGÍA UTILIZANDO EL ANÁLISIS ENVOLVENTE DE DATOS¹

AUTORES:

Holman Andrés Chaparro Flórez, Nixon Adrian Barón Suárez²

PALABRAS CLAVE:

DEA, Análisis Costo Beneficio de los Impactos Medioambientales, Eficiencia Relativa , Evaluación de Proyectos, Evaluación de Potencial Eléctrico.

DESCRIPCIÓN:

La evaluación de proyectos para el aprovechamiento de fuentes no convencionales de energía utilizando el análisis envolvente de datos se desarrolla por medio de un procedimiento para identificar proyectos de inversión candidatos a ejecutar.

Este procedimiento se realiza con base en la técnica llamada Análisis Envolvente de Datos (DEA), que recurre a la programación matemática la cual se ha empleado con éxito para evaluar el rendimiento relativo de un conjunto de Unidades de Toma de Decisiones (DMU, por sus siglas en inglés). Dentro de la técnica DEA se desarrollan múltiples modelos, los cuales se evalúan y se comparan por sus características, ventajas y desventajas evaluadas en diversos trabajos de investigación. En este caso las DMU son los proyectos de diferentes tecnologías de generación.

En cuanto a los proyectos a evaluar se consideran dos entradas y dos salidas todos datos conocidos. Las entradas (la demanda energética y la oferta de recurso en la zona), las salidas (los beneficios económicos por costos de implementación e impactos ambientales). Para implementar esta propuesta se realiza el análisis con datos reales de una región la cual está dividida en zonas, cada una con datos de recurso energético para todas las tecnologías consideradas, así como sus respectivos impactos, demanda de energía y los costos de implementación de cada una de las diferentes tecnologías.

Finalmente, se hace un análisis de resultados luego de implementar la propuesta, así como un resumen de la ubicación de los mejores proyectos, qué tecnologías son más apropiadas en estas ubicaciones, cuál es el costo de la energía para las opciones de tecnologías seleccionadas, sus impactos, el análisis costo beneficio de los impactos medioambientales y su eficiencia a partir de los parámetros inicialmente considerados.

¹ Trabajo de grado.

² Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Iván David Serna Suárez. Codirector: Gabriel Ordóñez Pláta, Gilberto Carrillo Caicedo.

ABSTRACT

TITLE:

EVALUACIÓN DE PROYECTOS PARA EL APROVECHAMIENTO DE FUENTES NO CONVENCIONALES DE ENERGÍA UTILIZANDO EL ANÁLISIS ENVOLVENTE DE DATOS ³

AUTHORS:

Holman Andrés Chaparro Flórez, Nixon Adrian Barón Suárez⁴

KEY WORDS:

DEA, Cost-Benefit Analysis of Environmental Impacts, Relative Efficiency, Project Evaluation, Evaluation of Electric Potential.

DESCRIPTION:

The project evaluation for the utilization of unconventional sources of energy using the data envelopment analysis is developed through a process to identify candidates to run projects investment.

This procedure is performed based on a technique called Data Envelopment Analysis (DEA), which uses mathematical programming which has been used successfully to assess the relative performance of a set of Decision Making Units (DMU, for their acronym in English). Within the technique DEA multiple models are developed, which are evaluated and compared for their characteristics, advantages and disadvantages evaluated in several research. In this case the DMU are projects of different generation technologies.

As for projects to evaluate are considered two inputs and two outputs, all known data. Inputs (energy demand and supply resource in the area), outputs (the economic benefits from implementation costs and environmental impacts). To implement this proposal analysis with real data from a region which is divided into zones, each with data on energy resource for all technologies considered and their respective impacts, demand of energy and the costs of implementation of each one of the different technologies.

Finally, an analysis of results is done after implementing the proposal, as well as a summary of the location of better project, what technologies are more adapted in these locations, which is the cost of the energy for the options of selected technologies, their impacts, cost-benefit analysis of environmental impacts and efficiency from the initially considered parameters.

³Research work.

⁴Faculty of Physical-Mechanic Engineering. School of Electrical, Electronical and Telecommunications Engineering. Advisor: Iván David Serna Suárez. . Co-advisor: Gabriel Ordóñez Pláta, Gilberto Carrillo Caicedo.

INTRODUCCIÓN

Las últimas tecnologías en plantas de generación eléctrica están tomando un papel importante como una alternativa a las fuentes convencionales de energía en el ámbito mundial. Esto en gran medida por sus beneficios al medio ambiente y por la independencia energética que pueden brindar. Con estas ventajas y otras que traen estas nuevas tecnologías se desarrollan a su vez nuevas maneras de implementarlas de forma eficiente. Toda planta de generación eléctrica es ubicada en un sitio si el recurso energético es favorable en dicho sitio. Sin embargo, además del recurso a la hora de implementar un proyecto de gran inversión se requiere revisar otros factores trascendentales en la selección del tipo de fuente como: costos, beneficios financieros, impactos ambientales, entre otros. Para considerar tanto los factores propios del sitio, así como características propias de la tecnología, la demanda energética u otros, existen metodologías que se desarrollan por medio de un proceso completo mediante el cual determinan valoraciones que permiten hacer una selección adecuada de cualquier proyecto bajo múltiples condiciones.

El objeto de este trabajo de grado es desarrollar una propuesta que tenga en cuenta factores que deben ser contemplados simultáneamente para la ubicación óptima de los proyectos de generación distribuida, y contabilizar objetivamente los beneficios ambientales y la rentabilidad de los proyectos, para determinar cuáles son los proyectos más eficientes, dentro de un banco de proyectos elegibles a ejecutarse. Los proyectos buscan satisfacer una demanda energética mediante la generación local de energía, y por ende, el conjunto inicial de proyectos se determinan según el potencial energético y características propias de la zona de interés. La elección se realizará fundamentada en la metodología de Análisis Envolvente de Datos (DEA, por sus siglas en inglés). Tomando en cuenta impactos ambientales y beneficios financieros

para determinar una eficiencia de cada proyecto de generación considerado. Los factores en DEA deben ser contemplados simultáneamente para la ubicación óptima de los proyectos de generación distribuida, y contabilizar objetivamente los beneficios ambientales y la rentabilidad de los proyectos, para determinar cuáles son los proyectos más eficientes, dentro de un banco de proyectos elegibles a ejecutarse. Ya que dentro de una región se cuenta con múltiples ubicaciones, recursos, demandas energéticas y tecnologías, la metodología se realiza en forma de “árbol” donde inicialmente se aplica DEA a todos los proyectos en cada zona de la región, y luego se hace un análisis global también usando DEA.

De esta manera se realiza una clasificación de eficiencias las cuales reflejan la idoneidad de cada proyecto y de cada zona, donde la mayor eficiencia considera que el recurso energético es bueno, que sus beneficios financieros también lo son, que los impactos ambientales por implementar un proyecto son mínimos y que entregan la energía necesaria para suplir la demanda en sitio. En el Capítulo 2 se presenta la descripción teórica del método DEA; su fundamentación, ventajas y desventajas, y los modelos más utilizados. El Capítulo 3 muestra el análisis financiero, donde se determinan los costos nivelados de la energía o (LCOE por sus siglas en inglés), arrojando un indicador que permite comparar los costos unitarios del valor de la energía de diferentes tecnologías de producción para observar los beneficios financieros de los proyectos. En el Capítulo 4 se presentan los planteamientos de los procedimientos para determinar el beneficio social neto de los proyectos por medio del DEA-CBA para costos medioambientales y las eficiencias de los proyectos por medios de DEA Súper-eficiencia. El primer planteamiento determina los costos medioambientales considerando los beneficios económicos y la valoración de los diferentes impactos considerados en el estudio mientras que el método Súper-eficiencia determina la eficiencia de los proyectos en estudio considerando demanda eléctrica, recurso energético, impactos ambientales y beneficio financieros. Finalmente en el Capítulo 5 se realiza la implementación de los procedimientos planteados en el Capítulo 4 en un caso específico, donde se calcula la eficiencia de cada proyecto en cada zona, así como sus beneficios sociales netos, tipo de tecnología para cada zona y para toda la región.

ANÁLISIS ENVOLVENTE DE DATOS

El Análisis Envolvente de Datos es parte fundamental en este trabajo, por lo cual a continuación se muestran los puntos importantes que constituyen el método. Entre los conceptos fundamentales se tienen la optimización, el concepto de eficiencia y productividad. En el primer párrafo se presentan los puntos importantes relacionados con la optimización, según lo encontrado en (Rao and Rao, 2009). Seguidamente se ilustra brevemente lo relacionado a eficiencia y productividad según lo descrito en (Coll Serrano et al. (2000) y Schuschny (2007)). Seguido a esto se enumeran algunas de las ventajas y desventajas del método, hasta llegar a la descripción de los modelos más utilizados en la práctica, donde se realiza un resumen citando los aportes de diferentes autores respecto a las características de cada modelo (Adler et al. (2002a), Hosseinzadeh et al. (2013)). Y al final de este capítulo se muestra cómo y por qué se escoge el modelo de Súper-eficiencia, como el modelo a implementar en esta propuesta.

1.1 OPTIMIZACIÓN

1.1.1 Definición de optimización La optimización se puede definir como el proceso de encontrar las condiciones que dan el valor máximo o mínimo de una función dadas unas restricciones expresadas a modo de igualdades y desigualdades. Dicho de otra manera, es el proceso de ajustar las entradas a las características de un dispositivo, proceso matemático o experimento para encontrar la salida o resultado mínimo o máximo. Con esto se busca en minimizar el esfuerzo necesario o maximizar el beneficio deseado en un proceso o sistema. Por otra parte, se expone una serie de componentes dentro del proceso de optimización de un sistema, los cuales se consideran importantes para este proyecto.

1.1.2 Declaración de un problema de optimización La optimización de un problema de programación matemática puede establecerse de la siguiente manera:

$$\text{Encontrar } X = \left\{ \begin{array}{c} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{array} \right\} \text{ que minimiza } f(X) \quad (1.1)$$

La función X , se llama optimización sin restricciones. Donde X es un vector n -dimensional llamado vector de diseño, $f(x)$ se denomina función objetivo.

En determinados sistemas existen restricciones para establecer un valor cuyo peso hace que la función del problema esté determinada por características especiales con salidas mínimas o máximas; tales restricciones delimitan o condicionan un trabajo de optimización.

$$\text{Encontrar } X = \left\{ \begin{array}{c} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{array} \right\} \text{ que minimiza } f(X) \quad (1.2)$$

Dado que:

$$g_j(x) \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, m \quad l_j(x) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, p \quad (1.3)$$

Donde $g_j(x)$ y $l_j(x)$ se conocen como restricciones de desigualdad e igualdad, respectivamente. El número de variables n y el número de restricciones m y/o p no necesitan estar relacionadas (Azadeh et al., 2008).

1.1.3 Vector de diseño. Cualquier sistema o componente de ingeniería se define por un conjunto de cantidades algunas de las cuales son vistas como variables durante el proceso de diseño. En general, ciertas cantidades se fijan generalmente en el principio y se denominan parámetros pre-asignados. Todas las cantidades son tratadas como variables en el proceso de diseño y se llaman variables de diseño o de decisión x_i . Las variables de diseño se representan en una lista llamada vector de diseño.

$$X = \left\{ \begin{array}{c} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{array} \right\} \quad (1.4)$$

Los parámetros pre-asignados se establecen con la cantidad de datos que puedan obtenerse de un sistema antes de iniciar un proceso de optimización .

1.1.4 Restricciones de diseño En muchos problemas prácticos, las variables de diseño no pueden ser elegidas arbitrariamente, dado que tienen que reunir una serie de requisitos funcionales y otros específicos. Las restricciones que se deben cumplir para producir un diseño aceptable son colectivamente llamadas restricciones de diseño. Las restricciones que presentan limitaciones en el comportamiento y/o rendimiento del sistema se denominan restricciones de comportamiento o limitaciones funcionales. Las restricciones que representan limitaciones físicas sobre las variables de diseño tales como la disponibilidad, fabricabilidad y transportabilidad se conocen como restricciones geométricas o secundarias. Es decir existen límites mínimos hasta donde variar un valor. Tales limitaciones son debido a características propias del diseño, algunos valores se definen con números enteros o positivos y demás dependiendo de la forma del sistema.

1.1.5 Restricciones. Para las restricciones se considera el ejemplo de un problema de optimización con restricciones de desigualdad presentado en (Rao and Rao, 2009). El conjunto de valores de x que satisface la ecuación $g_j(x) = 0$ forman una hiper-superficie en el espacio de diseño y se llama una superficie de restricción.

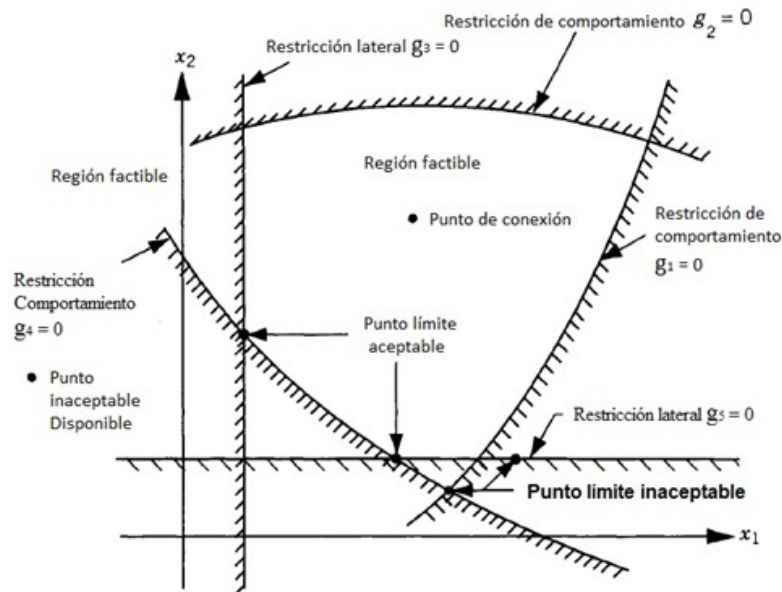


Figura 1.1.: Figura 1: Superficies de restricción en un espacio hipotético bidimensional tomado de:(Rao and Rao, 2009)

La superficie se divide en dos regiones: una en la que $g_j(x) < 0$ y otra en la que $g_j(x) > 0$. Así, los puntos que se encuentran sobre la hiper-superficie satisfacen la restricción $g_j(x) = 0$, mientras que los puntos que se encuentran en la región donde $g_j(x) > 0$ son inviables o inaceptables, y los puntos que se encuentran en la región donde $g_j(x) < 0$ son viables o aceptables. La colección de todas las superficies $g_j(x) = 0$, $j = 1, 2, \dots, m$, que separan la región aceptable se denomina la superficie compuesta, la figura 1.1 muestra un espacio de diseño hipotético en el que la región factible es indicada por líneas. Un punto de diseño que se encuentra en una o más restricciones de una superficie se llama punto límite, y la restricción asociada se denomina una restricción activa. Los puntos de diseño que se encuentran sobre la superficie se conocen como puntos libres. Dependiendo de si un punto en particular pertenece a la región aceptable o inaceptable, puede ser identificado como uno de los siguientes tipos (ver figura 1.1):

1. Punto libre y aceptable
2. Punto libre e inaceptable
3. Punto límite y aceptable
4. Punto límite e inaceptable

1.1.6 Función objetivo Los procedimientos convencionales de diseño tienen como objetivo la búsqueda de un diseño aceptable o adecuado que satisfaga los requisitos funcionales. En general, habrá más de un diseño aceptable, y el objetivo de la optimización es elegir el mejor de los muchos diseños aceptables disponibles. Así, un criterio tiene que ser elegido para la comparación de los diferentes diseños alternativos aceptables y para seleccionar el mejor. El criterio con respecto al cual un diseño es óptimo, se conoce como el criterio de mérito o función objetivo. La elección de la función objetivo se rige por la naturaleza del problema. Por ejemplo: En problemas de diseño estructural aeroespacial, la función objetivo para la minimización se toma generalmente como el peso de los aviones. En los diseños estructurales de ingeniería civil, el objetivo generalmente se toma como la minimización de costos. La máxima eficiencia mecánica es la opción obvia de un objetivo en el diseño de sistemas de ingeniería mecánica. Por lo tanto la elección de la función objetivo parece ser sencilla en la mayoría de los problemas de diseño. Sin embargo, pueden haber casos en los que la optimización con respecto a un criterio particular logra conducir resultados que puedan no ser satisfactorios con respecto a otro criterio. Por ejemplo, en el diseño mecánico, una caja de cambios de la transmisión de la potencia máxima no alcanza a tener el peso mínimo. Del mismo modo, en el diseño estructural, el diseño del peso mínimo no corresponde al diseño mínimo de estrés, y el diseño mínimo de estrés, de nuevo, no corresponde con la máxima frecuencia. Por lo tanto la selección de la función objetivo puede ser una de las decisiones más importantes en todo el proceso de optimización. En algunas situaciones, se logran más de un criterio a satisfacer simultáneamente. Por ejemplo, un par de engranes pueden ser diseñados para un peso mínimo y una máxima eficiencia mientras se transmite una potencia específica. Un problema de optimización que implica una función objetivo se conoce como un problema de programación multi-objetivo. De los múltiples objetivos surge una posibilidad de conflicto, y una manera sencilla de manejar el problema, es construir una función objetivo global como una combinación lineal de funciones múltiples y objetivos contradictorios. Así, si $f_1(x)$ y $f_2(x)$ denotan dos funciones objetivo, la construcción de una nueva función (global) objetivo para la optimización se pudiera definir así:

$$f(x) = \alpha_1 f_1(x) + \alpha_2 f_2(x) \quad (1.5)$$

Donde α_1 y α_2 son constantes cuyos valores indican la importancia relativa de una función objetivo con respecto a la otra.

1.2 EFICIENCIA Y PRODUCTIVIDAD

1.2.1 Definición de productividad El objetivo de todo proceso productivo es dar valor a un conjunto de productos y resultados a partir de unos insumos o entradas. Todas las decisiones tomadas para un proceso a base de criterios económicos recaen en determinar las combinaciones ideales de la cantidad de insumos que se utilizarán para producir distintas combinaciones de productos finales. El objetivo básico para mejorar la productividad de un proceso es medir la eficiencia en la utilización de los recursos para la producción a nivel de las unidades productivas, en este contexto lo ideal sería producir tanto como sea posible, dado los niveles de insumos disponibles o utilizar la menor cantidad de recursos posibles para transformarlos. En términos generales, se entiende por productividad la relación existente entre el (o los) productos y los insumos. Algunas consideraciones importantes de la productividad son:

- La medición de la productividad está estrechamente ligada con la rentabilidad y/o desempeño de las unidades productivas.
- Una vez cuantificada la productividad se cuenta con bases sólidas para la planificación estratégica. El seguimiento del comportamiento histórico de la productividad puede revelar áreas problemáticas en las unidades productivas y promover las mejoras y el uso eficiente de los recursos disponibles.
- Mediante la medición, se adquiere una dimensión concreta que admite la comparación con unidades comparables.

La representación tradicional para medir la productividad consiste en calcular la relación entre la creación de valor agregado, la producción propiamente dicha y el valor de los factores productivos x_i involucrados en el proceso de creación de ese valor.

La productividad parcial está dada por:

$$PP_i = \frac{Y}{x_i} \quad \forall i \in 1, 2, 3..n \quad (1.6)$$

donde , Y son los factores de producción , PP es la productividad parcial, PT son las productividades totales

$$PT = \frac{Y}{\sum_{i=1}^n \alpha_i x_i} \quad (1.7)$$

Para medir la productividad se formula una relación a través de la función de producción, la cual indica el valor agregado o producto máximo que puede obtenerse a partir de un conjunto de insumos que se utilizan tan eficientemente como sea posible.

$$TFP = \frac{Y}{\alpha K + \beta L} \quad (1.8)$$

donde: K es el capital y L es el trabajo.

Un factor objetivo y limitante en la forma que adquiere la función de producción, es la tecnología imperante en el momento en que corresponden los datos con los que se realiza la estimación. De esta forma, la manera de medir la eficiencia de una unidad de producción sería comparar el valor agregado generado por ella con el valor agregado que define la función de producción a idénticos niveles de utilización de los insumos o factores. En tal sentido, la función de producción cumple el rol del ideal teórico con el cual compara el desempeño de las unidades. Una aproximación tradicional para realizar este tipo de cálculo, de naturaleza econométrica, es el método de frontera de producción estocástica. En este caso, es necesario suponer una determinada forma funcional explícita (y usualmente parametrizada) para la función de producción. Para nuestro caso los proyectos de generación distribuida se modelan como las unidades de producción donde por ejemplo en vez de insumos contamos entre otros aspectos con el recurso energético y cuyo producto es entre otros es la confiabilidad energética Schuschny (2007).

1.2.2 Definición de eficiencia Una opción para calcular la productividad de las unidades productivas es el método de Análisis Envolvente de Datos (DEA¹, por sus siglas en inglés). Este método proporciona una medida de eficiencia relativa de cada unidad de producción o unidad de Toma de Decisiones (DMU², por sus siglas en inglés). El DEA está basado en el trabajo seminal de Farrell (1957) e introducido formalmente por Charnes, Cooper y Rhodes (1978). Para comprender este modelo, se debe comprender mejor el concepto de eficiencia. La propuesta de Farrell es visualizar la eficiencia desde una perspectiva real no ideal, donde cada unidad de producción sea evaluada en relación con otras, tomadas de un grupo representativo y comparable. Así, las medidas de eficiencia serían relativas y no absolutas, donde el valor alcanzado por determinada unidad productiva, corresponda a una expresión de la desviación observada respecto a aquellas consideradas como más eficientes dada la información disponible. En este sentido, la metodología que propone Farrell es una técnica basada en el concepto de “Benchmark” o referenciación. Donde un conjunto más o menos extenso de unidades productivas comparables entre sí por la particularidad que emplean el mismo tipo de insumos o factores para producir un conjunto de productos similares o equivalentes. Entonces, es posible definir tres medidas de eficiencia: la eficiencia técnica, la eficiencia de asignación y eficiencia global (o económica).

¹Data Envelopment Analysis

²Decision Making Units

Eficiencia Técnica: Esta eficiencia muestra una clasificación de las DMU, donde con el uso de los insumos o factores es posible obtener el máximo nivel de producción. Considérense las unidades A , B , C y D de la figura 1.2 cada una de las cuales obtiene un único Output (y) empleando para ello dos Inputs (x_1 y x_2). Las unidades eficientes vienen representadas por la curva $V-V'$, de tal modo que aquellas que se encuentran por encima de la misma resultan ineficientes, esta curva cuantifica las combinaciones de insumos x_1 y x_2 necesarios para producir una unidad de producto, en condiciones de máxima eficiencia. En la figura 1.2 cada punto (\bullet) representa las coordenadas del “plan de producción” ($\frac{x_1}{y}$, $\frac{x_2}{y}$) observado para cada una de las unidades. Los puntos A y C correspondería a una DMU eficiente, puesto que, comparados con los puntos B y D , se reduce la utilización de ambos insumos, en forma equi-proporcional y produce la misma cantidad. Entonces, si medimos la distancia entre D y R , tendríamos una medida de en cuánto se puede reducir el uso de insumos, sin alterar la producción y calcular el índice de eficiencia técnica.

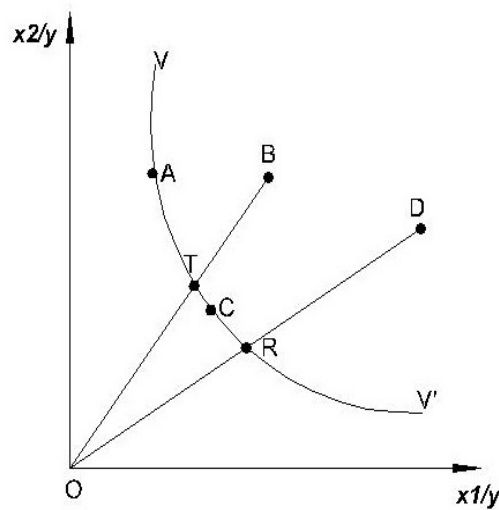


Figura 1.2.: Figura 2: Esquema de representación de la eficiencia técnica

Fuente:Elaborado por los autores

Donde:

TB y RD son la cantidad que puede reducirse equi-proporcionalmente los inputs sin reducir el output.

TB/OB Y RD/OD son el porcentaje que puede ser reducido el uso de inputs.

$ET_B = OT/OB$; $ET_D = OR/OD$; grado de la eficiencia técnica de la DMU.

Una unidad con valor óptimo es representada por la frontera de producción estimada (isocuanta eficiente). En la figura 1.2 puede verse que tanto la unidad B como la D son ineficientes técnicamente, puesto que ambas podrían reducir la cantidad de Inputs consumidos y seguir produciendo una unidad de Output. La ineficiencia de estas unidades vendrá dada por la distancia BT y RT, respectivamente. Por el contrario, las unidades A y C son técnicamente eficientes puesto que operan sobre la isocuanta eficiente. Numéricamente puede obtenerse la puntuación de eficiencia (relativa) como la relación entre la longitud de la línea desde el origen hasta el punto proyectado sobre la isocuanta eficiente de la unidad considerada y la longitud de la línea que une el origen a la unidad considerada.

La eficiencia técnica así definida sólo puede tomar valores comprendidos entre cero y uno. Una puntuación cercana a cero debe entenderse como que la unidad que está siendo evaluada se encuentra muy lejos de la isocuanta eficiente y, en consecuencia, se trata de una unidad muy ineficiente técnicamente. Todo lo contrario sucede si la eficiencia técnica está próxima a uno Coll Serrano et al. (2000), Schuschny (2007).

Eficiencias de asignación o de precio: La eficiencia precio (también denominada signativa) refleja capacidad de una DMU para usar los distintos Inputs en proporciones óptimas dados sus precios relativos. La pendiente de la línea de isocoste PP' representa la relación entre los precios de los inputs x_1 y x_2 .

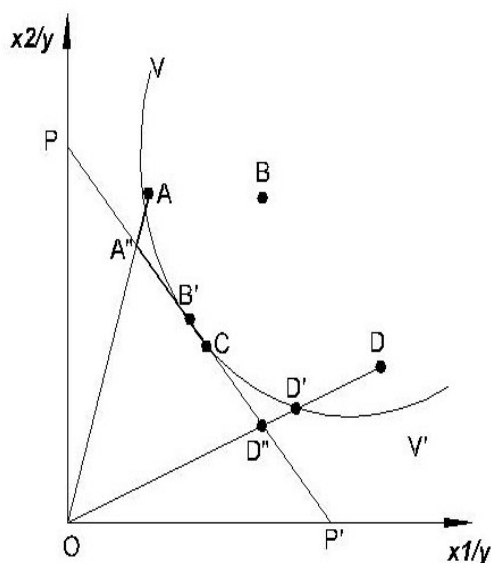


Figura 1.3.: Figura 3: Esquema de representación de la eficiencia por asignación
fuente:Elaborado por los autores

Donde:

AA'' ; representa la reducción de los costos de producción si se produce en C

$EP_A = OA''/OA$; Grado de eficiencia precio o de asignación

Las unidades A y C presentan eficiencia técnica puesto que operan sobre la isocuanta eficiente. Sin embargo, como se observa en la Figura 2.3, únicamente la unidad C resulta ser también eficiente en precios, en tanto que la unidad A debería reducir los costos totales en la distancia A-A". La puntuación de eficiencia precio (o asignativa) puede obtenerse como la relación entre la longitud de la línea desde el origen hasta el punto proyectado sobre la isocoste eficiente de la unidad considerada y la longitud de la línea que une el origen al punto proyectado sobre la isocuanta eficiente de la unidad considerada.

El indicador que se acaba de definir con objeto de proporcionar una medida de la eficiencia precio puede tomar valores comprendidos entre cero y uno, de manera que si la puntuación de eficiencia precio es distinta de uno se dice que la unidad considerada es ineficiente en precios.

Eficiencia global (o económica): Calculados ambos índices de eficiencia, se puede definir el indicador de eficiencia económica que, como se muestra en la figura 2.3, combina ambos tipos de eficiencia en un solo índice. Dado que el modelo trabaja con información de numerosas DMU, suele no ser posible conocer la estructura de precios relativos con la que se está operando, por lo que se complica el cálculo de estos dos indicadores adicionales. Para una DMU dada, la eficiencia global, también llamada eficiencia económica, se obtiene mediante el cociente entre la longitud de la línea que va desde el origen hasta el punto proyectado sobre la isocoste eficiente y la longitud de la línea que va desde el origen hasta el punto que representa a la unidad considerada

$$EE_A = ET_A * EP_A = OA''/OA \quad (1.9)$$

1.2.3 Eficiencia técnica y productividad Es importante diferenciar entre estos términos, productividad y eficiencia técnica que habitualmente son usados como sinónimos. La productividad es aquella medida que toma en cuenta todos los factores de producción (y todos los Outputs producidos). La eficiencia técnica refleja la habilidad de una DMU de obtener el máximo nivel de producción dados ciertos niveles en el uso de los insumos o factores.

La eficiencia global se compone de eficiencia técnica y eficiencia precio. La mayoría de trabajos en base al Análisis Envolvente de Datos (DEA) como metodología de análisis se han centrado en la evaluación de la eficiencia técnica, siendo mucho más reducido el número de estudios

que abordan la medición de la eficiencia significativa, dada la dificultad adicional que supone el conocimiento de los precios de los Inputs y Outputs Coll Serrano et al. (2000).

Cuando se habla de productividad, se hace referencia al concepto de productividad media de un factor, es decir, al número de unidades de Output producidas por cada unidad empleada del factor, En la figura 1.2 , se han representado tres unidades (A, B y C) y la frontera de producción que representa el máximo Output alcanzable para cada nivel de Input de un proceso productivo que emplea un único Input en cantidad x para producir un único Output en cantidad y .

Según la ilustración de Coelli et al. (1998), Coll Serrano et al. (2000, 32). reproducida en la figura 1.2 , las unidades B y C son técnicamente eficientes puesto que operan sobre la frontera, en tanto que la A es ineficiente al situarse por debajo de ésta. la productividad de una unidad, entendida como producto medio se mide como la pendiente de la línea recta desde el origen hasta el punto que lo representa. Ahora, la unidad A podría ganar en eficiencia y productividad al moverse hacia B, mientras que ésta última, técnicamente eficiente, podría ganar en productividad si se moviese hacia el punto que representa a la unidad C (punto de escala óptima), el de máxima productividad, de esta forma desplazando las unidades, hacia el punto C se logra que una empresa pueda ser técnicamente eficiente y pueda mejorar su productividad Coelli et al. (1998).

Partiendo de un conjunto de unidades, cada una de las cuales produce una única Output usando una única Input, fácilmente puede obtenerse un indicador de eficiencia para cada una de las n unidades consideradas. La tradicional definición de eficiencia entiende ésta como el cociente entre Output y Input, la unidad más eficiente será aquella cuyo cociente sea mayor. Evidentemente también se podrá comparar las unidades y determinar la eficiencia relativa de éstas respecto de las calificadas como más eficientes Coll Serrano et al. (2000, 32).

1.3 FUNDAMENTACIÓN DEL ANÁLISIS ENVOLVENTE DE DATOS

1.3.1 Definición del Análisis Envolvente de Datos (DEA) El análisis envolvente de datos (DEA) es una técnica no-paramétrica, determinista, que se ha empleado con éxito para evaluar el rendimiento relativo de un conjunto de unidades de Toma de Decisiones (DMU, por sus siglas en inglés) o también llamadas unidades productivas (para este trabajo cada proyecto de generación es una DMU). Estas unidades son sistemas que emplean el mismo tipo de entradas para producir un conjunto de salidas con características similares entre ellas pero en diferente magnitud.

Esta metodología establece una frontera eficiente, de forma tal que las DMUs que determinan

la frontera son denominadas eficientes y aquellas que no permanecen sobre la misma son consideradas ineficientes. Una DMU será eficiente si, y solo si, no es posible incrementar las cantidades de productos manteniendo fijas las cantidades de insumos utilizadas, ni es posible disminuir las cantidades de insumos empleadas sin alterar las cantidades de productos obtenidas Coll Serrano et al. (2000).

1.3.2 Formulación matemática A continuación se presentan algunos casos simples para comprender mejor la técnica de Análisis Envolvente de Datos. Muchos de estos conceptos han sido adaptados de Coll Serrano et al. (2000).

$$\frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{rj}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij}} \leq 1 \quad (1.10)$$

Donde:

y_{rk} : Es la salida r del proyecto k (conocida).

x_{ik} : Es la entrada i del proyecto k (conocida).

u_r : Es el factor de ponderación para las salidas.

v_i : Es el factor de ponderación para las entradas.

Los pesos $u_r, v_i \geq \varepsilon$, el término ε es un número positivo arbitrariamente pequeño introducido para asegurar que todas las entradas y salidas conocidas tengan valores de peso positivas. El valor óptimo de la función objetivo del modelo dado por la ecuación 1.10, es el puntaje de eficiencia DEA asignado a la DMU. Es difícil de resolver el modelo anterior, debido a su función objetivo fraccionada. Sin embargo, si el denominador o numerador del cociente se ve obligado a ser la unidad, entonces la función objetivo será lineal. Ajustando el denominador del cociente igual a la unidad, podemos obtener el siguiente problema de programación lineal de maximización de salida, indicado en la ecuación 1.12.

$$\max. \left\{ \sum_{r=1}^s u_r y_{rk} \right\} s.t. \quad (1.11)$$

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} \leq 0 \quad (1.12)$$

para $j = 1, \dots, n$.

Un ejercicio completo de DEA involucra solución de n modelos, cada uno por una base DMU, produciendo N conjuntos diferentes de pesos. En cada modelo, las limitaciones son las mismas

mientras se cambia la proporción a ser maximizada, por lo tanto, el DEA tiene la capacidad de dar un solo índice de rendimiento, comúnmente denominado el puntaje de eficiencia, sintetizando diversas características de las diferentes DMU. Debido a esta capacidad, DEA ha recibido numerosas solicitudes en las últimas dos décadas. Las aplicaciones incluyen el sector de la educación (Bessent and Bessent, 1980; Olesen and Petersen, 1995), sector de los bancos (Yeh, 1996), salud (J.M. et al., 1996), y transporte (Ramanathan, 2001; Picazo-Tadeo et al., 2011). Este proyecto se realiza para incorporar DEA en el formato de un algoritmo para la evaluación de proyectos para el aprovechamiento de fuentes no convencionales de energía (Azadeh et al., 2008).

1.4 MODELOS DEA

1.4.1 Modelo DEA-CCR El modelo DEA-CCR es así denominado por haber sido desarrollado por Charnes, Cooper y Rhodes (1978) con base en los conceptos de eficiencia inicialmente planteados por Farrell (1957). Este modelo proporciona medidas de eficiencia tipo radial, orientadas a salidas y/o entradas y rendimientos constantes a escala, supone convexidad y libre disposición de entradas. El modelo DEA-CCR puede escribirse, en términos generales, de tres formas distintas: fraccional (cociente), multiplicativa y envolvente.

En DEA-CCR, la eficiencia técnica (relativa) de cada una de las unidades se define como la relación de la suma total ponderada de salidas y la suma total ponderada de entradas. Mediante la comparación de n unidades con s salidas denotados por y_{rk} para $r = 1; \dots; s$ y m entradas denotados por x_{ik} , $i = 1; \dots; m$. La eficiencia para la DMU_k es

$$\eta_k = \text{Max} \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{rk}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ik}} \quad (1.13)$$

dentro de sus ventajas y desventajas están:

- Proporciona medidas de eficiencia tanto para los modelos de entrada como salida.
- Calcula la eficiencia a escala constante de las DMU trabajando con retornos constantes.
- Una desventaja es que trabaja con retornos variables a escala y presentan problemas de no factibilidad al momento de realizar la clasificación de las DMU.

1.4.2 Modelo BCC Este modelo es desarrollado por Banker, Charnes y Cooper (1984) aquí se introduce el supuesto de que la escala de rendimiento no es constante, es decir, que cualquier incremento en los recursos no representa un aumento proporcional en los resultados.

Además, el modelo construye una frontera más flexible adaptada a las distintas escalas de producción de cada DMU mientras que simultáneamente identifica su ineficiencia técnica, por lo que adiciona una restricción a los requerimientos, esto implica que el punto de referencia para la DMU₀ debe ser una combinación convexa de las DMU'S eficientes observadas. La restricción que Banker incluye es la siguiente:

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \quad (1.14)$$

Lo que hace esta restricción es que hace que las unidades ineficientes son comparadas únicamente con otras que están en la misma escala Cooper et al. (2003). La eficiencia en el modelo BCC se obtienen cuando para una DMU la función objetivo es igual a 1.

Este modelo tiene las mismas ventajas que el modelo CCR ya que es una extensión del modelo CCR, la única diferencia son las restricciones de convexidad.

1.4.3 Modelo Super-Eficiencia En este trabajo se aplica el análisis envolvente de datos (DEA) como la herramienta para la selección de eficiencia de proyectos orientados mediante la técnica de super eficiencia, este presenta dos tipos super eficiencia orientado a salidas y el otro orientado a entradas. Se eligió la orientación a salidas porque en el caso generación de los proyectos a estudiar es mejor que aumenten su producción (salidas) en vez de reducir sus entradas, además si se trabaja con un modelo CCR el resultado de la eficiencia es el mismo sin importar la orientación, seguidamente se presenta la ecuación característica de cada uno de ellos Andersen and Petersen (1993b).

Super eficiencia orientada a las entradas

$$\min \eta_0$$

sujeto a :

$$\sum_{j \in J}^n \lambda_j X_{ij} - \eta_0 X_{i0} \leq 0 \quad (1.15)$$

para $i = 1, \dots, m,$

$$Y_{r0} - \sum_{j \in J}^n \lambda_j Y_{ij} \leq 0 \quad (1.16)$$

para $r = 1, \dots, s,$

$$\lambda_j \geq 0 \quad (1.17)$$

para $j = 1, \dots, n$

Super eficiencia orientada a las salidas

máx. η sujeto a :

$$\sum_{j=1, j \neq 0}^n X\lambda_j - X_{i_0} \leq 0 \quad (1.18)$$

$$i = 1, \dots, m$$

$$\eta_0 Y_{r_0} - \sum_{j=1, j \neq 0}^n Y_{r_j} \lambda_j \leq 0 \quad (1.19)$$

$$r = 1, \dots, s$$

$$\lambda_j \geq 0 \quad (1.20)$$

$$j = 1, \dots, n$$

$$\eta_0 \text{ libre} \quad (1.21)$$

1.4.4 Modelo eficiencia cruzada El método basado en la eficiencia cruzada fue el primero de los enfoques desarrollados en DEA para clasificar las DMU Hougaard (1999b) y se ilustra ampliamente en Doyle y Green Andersen and Petersen (1993b). Este método calcula los puntajes de DEA n veces para cada DMU, utilizando para ello los pesos óptimos obtenidos al evaluar cada una de las n DMU. Los resultados pueden resumirse usando una matriz de eficiencia cruzada, cuyos elementos se calculan aplicando la siguiente expresión

$$E_{kj} = \frac{\sum_{r=1}^s U_{rk} y_{rj}}{\sum_{i=1}^m v_{ik} x_{ij}} \quad (1.22)$$

El valor de E_{kj} se obtiene al evaluar la DMU $_j$ con los pesos óptimos para la DMU k . Así, en la diagonal de la matriz se tienen los valores de eficiencia originales. El puntaje de eficiencia cruzada para la DMU j se define como:

$$CE_j = \frac{1}{n-1} \sum_{k \neq 0}^n E_{kj}, j = 1, \dots, n \quad (1.23)$$

Donde CE_j es el promedio de las eficiencias cruzadas obtenidas por la DMU $_j$ al utilizar los pesos óptimos de las demás DMU. Este método permite evaluar un grupo de investigación no

solo con sus ponderaciones si no también con las ponderaciones óptimas de otros grupos. Este método permite calcular los puntajes de n veces DEA para cada DMU y así poder maximizar o minimizar de una manera eficiente el ingreso o gasto entre un recurso o un producto.

Una desventaja es la utilización de un gran número de variables que puede ocasionar que una empresa sea considerada erróneamente ineficiente por su complejidad matemática.

1.5 DETERMINACIÓN DEL MEJOR MODELO DEA SEGÚN INDICADORES CARACTERÍSTICOS

Dentro de las diferentes técnicas DEA, se encuentran factores característicos de cada modelo. Para evaluar y escoger un modelo u otro se consideran las ventajas y desventajas así como su aplicación y comparación con otros modelos que ya han sido implementados en diferentes aplicaciones alrededor del mundo. En este caso se aplica la metodología DEA, para establecer una clasificación de diferentes proyectos en distintas zonas dentro de una región, teniendo en cuenta el estudio de los modelos básicos. Para la obtención de resultados se tendrá en cuenta un modelo de los considerados, este será seleccionado por sus ventajas, por la facilidad de manejo, y por sus resultados en otros trabajos.

A continuación se presenta la Tabla 1.1 , que presentan los modelos básicos de DEA, especificando si cuentan o no (S o N respectivamente) con los siguientes indicadores característicos:

- C1: Clasificación unidades extremadamente eficientes
- C2: Complejidad en el cálculo
- C3: Inestabilidad
- C4: Solución óptima múltiple
- C5: La dependencia de teta y holguras
- C6: No dependencia del número de unidades.
- C7: Clasificación solamente unidades eficientes
- C8: Clasificación por un nuevo concepto
- C9: Conjunto de pesos comunes
- C10: Problemas por no factibilidad

En la Tabla 1.1 describe en su totalidad las clasificaciones realizadas en los artículos «Review of ranking methods in the data envelopment analysis context» Adler et al. (2002a) y «A Review of Ranking Models in Data Envelopment Analysis» Hosseinzadeh et al. (2013).

TABLA 1.1.: Tabla 1: Resultados de efectividad de los modelos DEA

MODELO	INVESTIGACIÓN	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
		Fuente 1: Adler et al. (2002a)						Fuente 2: Hosseinzadeh et al. (2013)			
CCR	Andersen and Petersen (1993b)	N	S	N	S	S	N				
BCC	Bardhan et al. (1996)							S	N	N	N
	Mehrabian et al. (1999c)	N	S	S	S	S	S				
	Li et al. (2007a)	N	S	S	S	N	S				
Super-Eficiencia	Sexton et al. (1986a)							S	S	N	S
	Mehrabian et al. (1999b)							S	S	N	S
	Sueyoshi (1999a)							S	N	N	S
	Tone (2002a)	S	N	S	S	N	S				
	Chen et al. (2011a)	S	N	S	S	S	N				
	Ashrafi et al. (2011a)	S	N	S	S	N	S				
	Hashimoto (1986)							S	S	N	S
Eficiencia-Cruzada	Adler and Golany (2001)							S	S	N	N
	Sexton et al. (1986b)	N	S	S	S	S	S				
MCDM	Troutt (1995a)							N	S	N	N
	Li and Reeves (1999)							N	S	N	N
	Karsak (1999)							N	S	N	S
	Hougaard (1999a)							S	S	N	N
	Sinuany-Stern et al. (2000)							N	S	N	N
Bechmarking	Torgersen et al. (1996a)							S	S	N	N
Statistics-based	Friedman and Sinuany-Stern (1997a)							N	S	S	S
	Sinuany-Stern et al. (1994a)							N	S	S	S
	Sinuany-Stern and Z. (1998)							N	S	S	N
	Friedman and L. (1998)							N	S	S	N

1.5. Determinación del mejor modelo DEA según indicadores característicos

En la Tabla 1.2 se hace un resumen del porcentaje de la cantidad de indicadores favorables para cada modelo DEA, puesto que se tienen datos de trabajos realizados en base a esta clasificación, cada valoración, se hace sobre la base de cada tabla, y no del total, para hacer más imparcial esta valoración. El procedimiento empleado para que determinar esta valoración es como sigue:

Para el modelo Super-Eficiencia en el indicador C1 se tienen tres «S» entonces procedimiento a seguir es:

$$Puntuación = \frac{Cantidad\ de\ S}{Total\ (N + S)} = \frac{3}{3} = 1 \quad (1.24)$$

Para el modelo MCDM en el indicador C7 se tiene:

$$Puntuación = \frac{Cantidad\ de\ S}{Total\ (N + S)} = \frac{1}{5} = 0,2 \quad (1.25)$$

TABLA 1.2.: Tabla 2: Porcentajes de favorabilidad

Indicador	CCR	BCC	Super-Eficiencia	Eficiencia-Cruzada	MCDM	Bechmarking	Statistics-based
C1	0	0	1	0	0	0	0
C2	1	1	0	1	0	0	0
C3	0	1	1	1	0	0	0
C4	1	1	1	1	0	0	0
C5	1	0,5	0,33	1	0	0	0
C6	0	1	0,66	1	0	0	0
C7	0	1	1	1	0,2	1	0
C8	0	0	0,75	1	1	1	1
C9	0	0	0	0	0	0	1
C10	0	0	1	0	0,2	0	0,5
Total	3	5,5	6,75	7	1,4	2	2,5

La Tabla 1.2 muestra que los modelos con la mayor cantidad de indicadores favorables son: el modelo *BCC*, el modelo de *Super – eficiencia* y el modelo *Eficiencia – Cruzada*; de los resultados obtenidos en la Tabla 1.2 se observa que el modelo con la máxima puntuación es el modelo de *Eficiencia-Cruzada*, lo cual lo hace ideal y uno de los mejores modelos para implementar el DEA

En este caso el modelo DEA más apropiado por sus ventajas y considerando el indicador característico mencionado anteriormente el (C2) que es el de complejidad en el cálculo, el cual es importante puesto que facilita la obtención de resultados. Se puede concluir que el mejor modelo para la EVALUACIÓN DE PROYECTOS PARA EL APROVECHAMIENTO DE FUENTES NO CONVENCIONALES DE ENERGÍA UTILIZANDO EL ANÁLISIS ENVOLVENTE DE DATOS es el modelo de SÚPER-EFICIENCIA ya que cuenta con la segunda mejor puntuación y tiene facilidad en el cálculo. Luego entonces por cumplir con los criterios necesarios para esta metodología este modelo DEA se escoge en este trabajo como complemento fundamental en la metodología planteada

COSTOS Y ANÁLISIS FINANCIERO

Para analizar la viabilidad financiera de un proyecto de generación eléctrica se debe realizar una evaluación de la información monetaria disponible de éste, analizar su financiamiento y a partir de estos puntos realizar su evaluación. En este caso en particular es la generación de energía, se establece una comparación de la energía generada contra sus costos de generación. Para tal propósito se hace uso del método para calcular el costo nivelado de la energía teniendo en cuenta aspectos iniciales del precio de la energía a partir de los costos de inversión de una planta eléctrica, se hace una descripción de los costos operativos variables y fijos, por último se presenta la formulación para el costo nivelado de la energía.

2.1 ANÁLISIS FINANCIERO

2.1.1 Aspectos iniciales para el análisis del precio de la energía: El precio de generación eléctrica, está compuesto por dos partes: la planta eléctrica y la red de distribución de la energía. Donde estas tienen costos de inversión, operación y mantenimiento, costos fijos y variables, en cuanto a la red de distribución se considera el costo de inversión y los costos de operación y mantenimiento.

Es importante tener en cuenta que los proyectos a los cuales está orientada esta metodología son proyectos de generación distribuida a pequeña escala, además en algunas plantas como son diésel, se considera el costo de combustible necesario para su funcionamiento. En resumen las características del tipo de proyectos que acá se evalúan son las siguientes: Capacidad instalada máximo de $1000[kW]$, fuentes de energía alternativa (ocasionalmente se pueden considerar otro tipo de fuentes). Red de distribución en baja tensión trifásica de $(127/208[V])$ o

media tensión trifásica (13,2[kV]) para la evaluación de costos de los proyectos se consideran las siguientes variables para las diferentes tecnologías a evaluar.

1. Capacidad [kW].
2. Factor de planta.
3. Costos de inversión total instalado [USD/kW].
4. Costos fijos de operación y mantenimiento [USD/kW – año].
5. Costos variables de operación y mantenimiento [USD/kW – año].
6. Combustible (en caso de ser usado) [USD/kWh].
7. Costo de red [USD/km].
8. Vida útil [años].
9. Tasa de interés [%]

2.1.2 Costos pre operativos y costos operativos: Los primeros corresponden básicamente a inversiones realizadas una sola vez antes de entrar en operación el proyecto, y los segundos corresponden a costos periódicos, fijos o variables, que garantizan la operación de la planta de energía. Dentro de los costos operativos se distinguen los siguientes componentes generales a la mayoría de plantas típicas: estudios e investigaciones predios, obras de infraestructura, obras civiles, equipos, inversiones ambientales, ingeniería, imprevistos en obras y equipos, costos financieros, costos de ley. De otro lado, las principales componentes de los costos operativos son: administración, operación y mantenimiento (AOM), operación y mantenimiento (AOM), componente variable. combustible, seguros, manejo ambiental, cargos de ley operativos.

Si se suman todos los costos fijos del sistema, y se calcula la demanda previsible anual, añadiendo lo que cuesta producir esa demanda, y añadiendo los márgenes para los operadores, se podría calcular fácilmente cual sería el costo del kWh

2.1.3 Costo nivelado de la energía: El costo nivelado de energía (LCOE, por sus siglas en inglés), es un indicador que permite comparar los costos unitarios de diferentes tecnologías de producción de energía a lo largo de la vida del proyecto. Este método calcula los costos con base en la cantidad de electricidad neta generada en la planta, generando un valor presente del costo de generación de energía por unidad de energía generada, que es la razón entre el

total de gastos durante la vida útil del proyecto y el total de la energía que se espera generar. Este es un análisis de costo de todo el sistema eléctrico que incluya la inversión inicial, tasa de descuento, así como los costos de operación y mantenimiento, costo de combustible, vida útil del proyecto tasa de descuento. Su formulación es la siguiente:

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + Cr + O\&Mf + O\&Mv + fuel}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{Et}{(1+r)^t}} [USD/kWh] \quad (2.1)$$

Donde:

$LCOE$, es el Levelized costs of energy (costo nivelado de energía)

t , es la vida estimada de la instalación en años

I , es la inversión inicial [USD/kWh]

$O\&Mf$, es el costos de operación y mantenimiento fijos [USD/kWh]

$O\&Mv$, es el costos de operación y mantenimiento variables [USD/kWh]

Et , es la energía generada durante la vida del sistema [kWh]

r , es la tasa de descuento

Cr , es el costo total de inversión de la red [USD]

$fuel$, es el costo del combustible [USD/kWh]

ESTIMACIÓN DE COSTOS MEDIOAMBIENTALES Y EFICIENCIA

La determinación de los impactos ambientales, es una de la principales maneras de determinar qué tan rentable y beneficioso es un proyecto de inversión; más el tema de costos medioambientales no es tan conocido en la literatura actual. Acá se aborda este tema desde una óptica de optimización para determinar los costos de los impactos los cuales influyen directamente en la rentabilidad del proyecto. A continuación se muestra la metodología propuesta en Kuosmanen and Kortelainen (2007) para determinar los costos medioambientales. En la metodología global se considera un análisis paralelo con DEA, de manera que se obtienen resultados de eficiencia y de beneficio medioambiental por medio de dos procesos simultáneos.

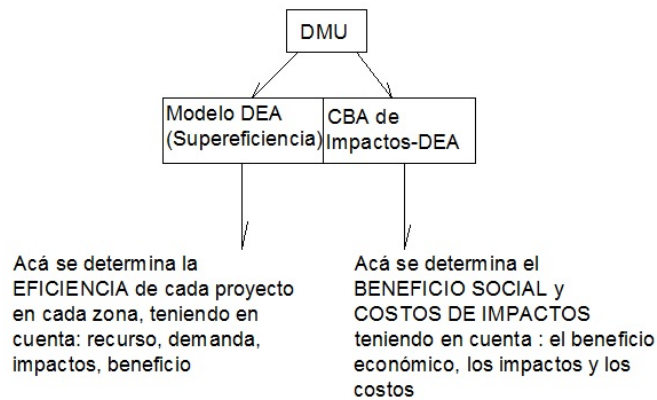


Figura 3.1.: Figura 4: Análisis paralelo DEA

Fuente: Realizado por los autores

3.1 ANÁLISIS MEDIOAMBIENTAL COSTO-BENEFICIO

El Análisis Costo-Beneficio o CBA por lo general se refiere a la evaluación social de los proyectos de inversión. En este caso se hace referencia a los costos que implican impactos ambientales significativos, por ejemplo, la construcción de un nuevo proyecto de generación de energía. Supóngase que hay N proyectos candidatos alternativos (por ejemplo, diferentes tipos de fuentes de energía). El CBA se centra en la identificación de un proyecto óptimo (o la combinación óptima de los proyectos) para ser implementados. Aunque sin omitir ningún candidato de proyecto se supondrá en adelante proyectos mutuamente excluyentes, es decir, sólo uno de los proyectos puede ser implementado.

El CBA consiste en un conjunto de múltiples etapas como se describen a continuación:

1. Definición del problema (es definir cuáles son los objetivos, cuáles son las alternativas, cuáles son los beneficios y el tiempo de duración).
2. Identificación de los impactos ambientales de cada proyecto (es decir, el análisis de impacto ambiental), y la valoración de dichos impactos.
3. Identificación de los flujos de costos y beneficios.
4. Selección del proyecto para ser ejecutado teniendo en cuenta el valor presente neto.

Se presenta la valoración de la etapa 3 suponiendo que las etapas 1 y 2 se han terminado, el ajuste se ha definido y los costos económicos y los beneficios de cada proyecto se han estimado, se procede a determinar el beneficio económico neto del proyecto n , en el período t , que se denota por B_{nt} , M impactos ambientales relevantes que se deben considerar. Los impactos del proyecto n en el período t se pueden representar numéricamente por el vector $Z_{nt} = (Z_{1nt} \dots Z_{Mnt})'$ y B_{nt} , Z_{nt} , que representan los beneficios netos y los impactos ambientales, respectivamente. Los pesos desconocidos para los impactos ambientales son $p = (p_1, \dots, p_M)$.

Calcular el valor de estos pesos es una de las partes clave en la economía ambiental, y que constituye la etapa 3 de la rutina habitual CBA. Los enfoques convencionales tratan de parametrizar los pesos en base a la información importante declarada o revelada, tratando los pesos como variables desconocidas del modelo. Por lo tanto, el próximo paso antes de la etapa 4 es dejar determinados los pesos de las etapas posteriores.

Por lo general, los beneficios económicos y los impactos ambientales varían con el tiempo de manera que se hace un descuento entre los costos y beneficios que se producen con el tiempo, para expresarlos en términos de valor actual neto, que es importante porque la mayoría de

proyectos tienen considerables costos económicos de establecimiento mientras que los beneficios y los impactos ambientales se acumulan durante un período más largo. Por ejemplo, un pago único de un millón de dólares hoy, vale más de un millón de dólares de beneficios que se acumulan en los próximos diez años debido al costo de oportunidad de los ingresos por intereses no percibidos. Descontando las formas del paso 4 de la rutina habitual CBA.

Denotando la tasa de interés por r , el valor presente neto de los beneficios económicos del proyecto n se puede calcular como:

$$NPV(B_n) = \sum_{t=0}^{\infty} (1+r)^{-t} * B_{nt} \quad (3.1)$$

Del mismo modo, el valor actual neto de los costos medioambientales del proyecto n se puede calcular como:

$$NPV(C_n) = \sum_{t=0}^{\infty} \sum_{m=1}^M (1+r)^{-1} p_m * Z_{nmt} \quad (3.2)$$

Si los pesos de los impactos ambientales (p) son constantes en el tiempo (como se supone acá), entonces es posible que primero se descuenten los impactos y hacer la conversión a costos económicos más tarde. Observar que la ecuación 3.2 puede ser reescrita como:

$$NPV(C_n) = \sum_{t=0}^{\infty} p \left(\sum_{m=1}^M (1+r)^{-1} * Z_{nmt} \right) \quad (3.3)$$

La suma expresada en los paréntesis es el descuento total m de impacto ambiental para el proyecto n . Tener en cuenta que aunque se descuenta el impacto presente, los impactos medioambientales del futuro se consideran igualmente valiosos como los impactos ambientales de la actualidad (es decir, no hay preferencia en el tiempo por los impactos ambientales).

La ecuación 3.2 presenta la necesidad de descontar los costos monetarios del costo de oportunidad de los intereses no percibidos. Descontando los costos o impactos se obtiene el mismo valor presente neto, cuando el vector de pesos p es constante en el tiempo. Para mantener la coherencia, la misma tasa de interés r se debe aplicar en el descuento de los beneficios económicos y los impactos ambientales.

La etapa 4 de descuento proporciona los impactos ambientales totales reducidos denotados por Z_{nm} (es decir, el índice de tiempo t se elimina). Del mismo modo, se utiliza B_n para el total del valor presente neto de los beneficios económicos netos. Si B tiene un valor negativo¹, entonces el proyecto n no tiene sentido económico incluso si no tenemos en cuenta los

¹ El beneficio neto es la diferencia entre los ingresos y los costos económicos, que tiene un valor positivo en los períodos en los que el ingreso total supera el costo total, y un valor negativo cuando los costos superen los ingresos.

impactos ambientales. Estos proyectos pueden ser desechados de forma segura en esta etapa. Se presume que todos los proyectos candidatos restantes tendrán un beneficio financiero neto positivo.

A continuación se realiza la selección del proyecto socialmente óptimo a implementar. Primero, se ilustra con un ejemplo sencillo el método considerando. Este ejemplo representa cuatro plantas de generación eléctrica con varios tipos de fuentes alternativas, candidatas a ser implementadas.

3.1.1 Ilustración del método DEA para análisis costo beneficio CBA (Adaptado de Kuosmanen and Kortelainen (2007)) Supóngase por simplicidad que la administración municipal de un municipio x en Colombia, considera la aplicación de uno de cuatro proyectos de plantas de energía etiquetados como A , B , C y D . La opción A es la mejora de una planta diésel existente, y por lo tanto implica sólo los costos y beneficios pequeños. La opción B es la construcción de una nueva planta solar fotovoltaica, en medio de un bosque virgen que tiene buen recurso solar. Esta opción tiene grandes beneficios económicos, y también grandes costos ambientales. La opción C es la construcción de una planta eólica ubicada entre las zonas urbanas y el bosque. Esta opción tiene grandes beneficios económicos, aunque implica un alto costo de deterioro del entorno urbano. La opción D es la construcción de una planta geotérmica. Esta opción tiene costos y beneficios económicos altos, pero menos impactos ambientales.

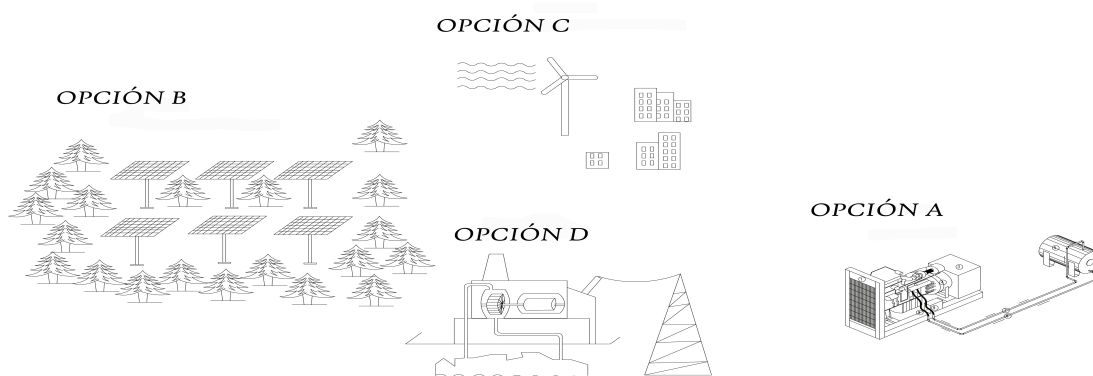


Figura 3.2.: Figura 5: Ilustración de las opciones de plantas eléctricas
Fuente:Elaborado por los autores

El estudio de impacto ambiental indica que sólo dos impactos ambientales deben ser considerados: la pérdida de suelo de bosque y contaminación visual. Para mantener el ejemplo

sencillo, acá se asume que los diversos efectos a los humanos se pueden agregar mediante el uso de factores de conversión significativos y bien definidos (en la realidad, se tienen en cuenta la mayoría de los diversos impactos medioambientales).

Los resultados de las evaluaciones de impacto económico y ambiental se resumen en la Tabla 3.1. Se han agregado los costos económicos y los ingresos a valor presente neto de los beneficios. En los impactos ambientales, se expresa la pérdida de bosques en hectáreas de terreno y la contaminación visual en las ciudades como un índice donde cero es el valor actual, teniendo en cuenta el número estimado de personas afectadas, la gravedad de los efectos, y luego aplicar los mismos factores de descuento como los beneficios económicos netos.

El enfoque estándar del análisis de costo-beneficio es utilizar cualquiera de las técnicas de preferencias declaradas (por ejemplo, de valoración contingente) o técnicas de preferencias reveladas (método del viajero) para estimar los pesos "económicos" de los impactos ambientales para los cuales no existen pesos de mercado. Enfoques alternativos incluyen múltiples análisis de criterios y métodos participativos. Acá se estudia este problema de valoración utilizando DEA.

El beneficio social neto del proyecto n (SB_n) es el beneficio monetario que queda después de restar el costo de los impactos ambientales de los beneficios económicos netos (ambos expresados en términos de valor actual neto). Formalmente, SB_n se puede expresar como:

$$SB_n = B_n - \sum_{m=1}^M p_m Z_{nm} \quad (3.4)$$

En la etapa 4, se identifica el proyecto que ofrece el más alto beneficio social neto. Ahora, la variables de pesos p deben ser determinadas.

Tener en cuenta que para evaluar una propuesta de proyecto dentro de un conjunto de propuestas, se pueden presentar comportamientos oportunistas dentro de los proponentes y estos pueden solicitar un estudio falso de valoración en el que puedan manipular las estimaciones de pesos p , para mostrar el proyecto k como la mejor opción (por ejemplo, mediante el pago de sobornos a los encuestados). Esto evidentemente es un problema grave en la identificación del proyecto óptimo entonces ¿Cómo valorar los impactos ambientales? ¿Cuál es la ventaja comparativa máxima que los proponentes de proyecto k pueden demostrar sobre proyectos en competencia si pudieran elegir los pesos p a voluntad? Si bien las preguntas anteriores son extremadamente subjetivo, se considera si vale la pena preguntarlas puesto que las respuestas a estos interrogantes pueden ayudar a ajustar una política más objetiva en el sentido de que no es recomendable la valoración subjetiva de los pesos p . Específicamente, si los proponentes oportunistas del proyecto k no pueden demostrar que su proyecto ofrece el óptimo social, entonces se tiene un fuerte argumento para rechazar este proyecto. Si los proponentes

TABLA 3.1.: Tabla 3: Resultados de las evaluaciones de impacto económico y ambiental

	A	B	C	D
	Mejora de Planta diésel existente	Nuevo parque Solar FV en medio del bosque	Nueva planta Eólica cerca al área urbana	Nueva planta Geotérmica
Diferencia: beneficios y costos de construcción y mantenimiento				
Beneficios (tiempo, etc) [Millones de Dolares]	50	200	190	250
Menos Costos (construcción y mantenimiento) [Millones de Dolares]	-10	-30	-60	-200
Resultado: beneficio neto [Millones de Dolares]	40	170	130	50
Total de los efectos ambientales				
1. Pérdida de superficie forestal [valoración puntual]	1	120	2	10
2. Contaminación visual [valoración puntual]	2	3	60	12

demuestran con éxito los beneficios de su proyecto, se puede identificar objetivamente una gama de pesos en virtud de cual proyecto k es la opción socialmente óptima.

El problema del proponente oportunista del proyecto k puede abordarse mediante el uso de DEA. Determinando la máxima ventaja comparativa del proyecto k (CA_K) donde los proponentes de cada proyecto deben demostrar el rendimiento de su proyecto si los pesos p son no negativos y sujetos a la condición de que proyecto k debe ser socialmente beneficioso. Formalmente, el CA óptimo y \hat{p}^* se obtienen como la solución óptima para el siguiente problema de programación lineal

$$\begin{aligned}
 & \max CA_K \\
 & \hat{p} \\
 & \text{s.t.} \\
 & CA_k \leq [B_k - (\hat{p}_1 Z_{k1} + \hat{p}_2 Z_{k2} + \dots + \hat{p}_M Z_{kM})] - [B_1 - (\hat{p}_1 Z_{11} + \hat{p}_2 Z_{12} + \dots + \hat{p}_M Z_{1M})] \\
 & CA_k \leq [B_k - (\hat{p}_1 Z_{k1} + \hat{p}_2 Z_{k1} + \dots + \hat{p}_M Z_M)] - [B_2 - (\hat{p}_1 Z_{21} + \hat{p}_2 Z_{22} + \dots + \hat{p}_M Z_{2M})] \\
 & \quad \cdot \\
 & \quad \cdot \\
 & \quad \cdot \\
 & CA_k \leq [B_k - (\hat{p}_1 Z_{k1} + \hat{p}_2 Z_{k2} + \dots + \hat{p}_M Z_{kM})] - [B_{k-1} - (\hat{p}_1 Z_{k-1,1} + \hat{p}_2 Z_{k-1,2} + \dots + \hat{p}_1 Z_{k-1,M})] \\
 & CA_k \leq [B_k - (\hat{p}_1 Z_{k1} + \hat{p}_2 Z_{k2} + \dots + \hat{p}_M Z_{kM})] - [B_{k+1} - (\hat{p}_1 Z_{k+1,1} + \hat{p}_2 Z_{k+1,2} + \dots + \hat{p}_1 Z_{k+1,M})] \\
 & \quad \cdot \\
 & \quad \cdot \\
 & \quad \cdot \\
 & CA_k \leq [B_k - (\hat{p}_1 Z_{k1} + \hat{p}_2 Z_{k2} + \dots + \hat{p}_M Z_{kM})] - [B_N - (\hat{p}_1 Z_{N1} + \hat{p}_2 Z_{N2} + \dots + \hat{p}_M Z_{NM})] \\
 & \quad B_n - (\hat{p}_1 Z_{n1} + \hat{p}_2 Z_{n2} + \dots + \hat{p}_M Z_{nM}) \geq 0 \\
 & \quad \hat{p}_1, \hat{p}_2, \dots, \hat{p}_M \geq 0.
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

Los pesos estimados $p > 0$ son las variables desconocidas del problema (3.5), los beneficios económicos netos son B_1, B_2, \dots, B_N y los vectores de impacto ambiental Z_1, Z_2, \dots, Z_N los cuales se conocen en este problema de programación lineal. Las $N - 1$ restricciones se comparan de manera apareada, los beneficios netos del proyecto k respecto a todos los proyectos en competencia. Debido a que se elige sólo uno de los proyectos en competencia, la función objetivo debe maximizar la ventaja comparativa que depende del desempeño en relación a sus competidores del proyecto k . Por lo tanto, sólo el valor más pequeño de las diferencias netas de los beneficios cuenta. Para calificar como la elección socialmente óptima, el beneficio neto del proyecto k debe ser mayor o igual a cero.

Si la solución óptima de CA_k^* a este problema es cero o un número negativo, entonces los pesos

no negativos $p^* > 0$ de los impactos ambientales del proyecto k , que puede producir el mayor beneficio social neto, no existen. Cualesquiera que sean los pesos de los impactos ambientales que sean, existe otro proyecto que obtiene un beneficio neto social más alto, por lo tanto, los proyectos con una puntuación negativa en (3.5) se pueden designar como "ineficientes". Por otro lado, si la solución óptima CA_k^* es un número positivo, entonces existen pesos no negativos $p^* > 0$, que hacen al proyecto k^* socialmente óptimo. En este caso, el proyecto k es potencialmente un proyecto atractivo de inversión, así que se designa como "eficiente".

Si CA_k es grande, entonces el proyecto k puede presentarse como un candidato superior para determinados pesos. Si CA_k es pequeño, entonces el proyecto k puede mejorar.

Al clasificar los proyectos, las puntuaciones de CA no son lo único a tener en cuenta, en general es más importante evaluar si los pesos p_k son realistas o no. En la práctica, por lo general existen varios proyectos candidatos que puedan demostrar una CA positiva para algunos pesos sin embargo todos los proyectos dejan de ser rentables en algún momento cuando se incrementan los pesos p . Para hacer la elección final del proyecto se implementará, DEA que ofrece una plataforma para la serie de enfoques alternativos.

El primer enfoque es el de imponer restricciones de dominio en los pesos p , como en los enfoques de DEA pesos restringidos. En el problema (3.5) sólo se postula que los pesos deberían estar en algún lugar entre cero y más infinito. A menudo es posible reducir este intervalo a una gama más específica por razones objetivas o subjetivas. Por lo general, la especificación de un rango determinado por el peso admisible es considerablemente más fácil que encontrar una estimación puntual específica. Si el límite inferior para el peso de impacto m es Lm y el límite superior es Um , podemos simplemente insertar en (3.5) las restricciones lineales adicionales: Cuando los rangos de pesos se estrechan gradualmente hacia abajo, entonces alguno de los proyectos se distingue a sí mismo como el único proyecto que puede mostrar un resultado positivo CA .

El segundo enfoque es el de presentar directamente a los tomadores de decisiones todo el rango de pesos en los que un determinado proyecto es la opción socialmente óptima. La presentación de estos rangos de pesos objetivos permitiría a los tomadores de decisiones tantear las posibles ventajas comparativas de los proyectos contra la robustez del conjunto total de proyectos respecto a sus pesos. Sin embargo, la identificación y la presentación de los dominios de los pesos de apoyo puede llegar a ser técnicamente difícil, especialmente cuando hay múltiples impactos ambientales.

El tercer enfoque es la combinación de la evaluación de DEA con las técnicas de valoración más tradicionales. Podemos comprobar los rangos de los pesos objetivos de los pesos estimados decaen en otras técnica. En este sentido, DEA puede ser una herramienta de apoyo

para el análisis de sensibilidad de los métodos de valoración tradicionales: podemos ver si un pequeño cambio en los pesos estimados cambia la política recomendada. DEA también podría ahorrar el costo de los estudios de valoración tradicionales. Si el análisis DEA se lleva a cabo antes del estudio de valoración, podemos diferenciar entre los impactos ambientales que son de importancia crítica para la decisión y deben ser evaluados mediante técnicas de valoración más costosas (como CV), y aquellos impactos que no son importantes para la decisión.

Para ilustrar la técnica presentada, ir al ejemplo de la construcción de plantas de generación eléctrica. Se realiza a continuación la consideración de los valores numéricos de la Tabla 3.1 en la formulación (3.5) para evaluar la planta B (en el bosque), obtenemos

$$\begin{aligned} \widehat{CA}_B &= \max_{\hat{p}} CA_B \\ &s.t. \end{aligned} \tag{3.6}$$

$$\begin{aligned} CA_B &\leq [170 - (120 * \hat{p}_1 + 3 * \hat{p}_2)] - [40 - (1 * \hat{p}_1 + 2 * \hat{p}_2)] \\ CA_B &\leq [170 - (120 * \hat{p}_1 + 3 * \hat{p}_2)] - [130 - (2 * \hat{p}_1 + 6 * \hat{p}_2)] \\ CA_B &\leq [170 - (120 * \hat{p}_1 + 3 * \hat{p}_2)] - [50 - (10 * \hat{p}_1 + 12 * \hat{p}_2)] \\ 170 - (120 * \hat{p}_1 + 3 * \hat{p}_2) &\geq 0 \\ \hat{p}_1, \hat{p}_2 &\geq 0 \end{aligned} \tag{3.7}$$

pesos sombra $\hat{p} \geq 0$ que hacen de la \widehat{CA}_B es decir, hacer la ventaja comparativa del proyecto B, lo más grande posible. La solución óptima para este problema da la ventaja comparativa de los 128,4 millones de dólares, que se basa en los pesos iguales a cero por la pérdida de las tierras forestales y 1,55 dólares por unidad de la contaminación visual. Para la comparación, las soluciones óptimas para todos los proyectos se reportan en la Tabla 3.2.

La primera fila de la Tabla 3.2 reporta las ventajas comparativas (CA), estos son los puntajes obtenidos como la solución óptima para el problema (3.5) para cada proyecto. Se observa que el proyecto D tiene una puntuación CA negativa. Esto significa que el proyecto D (es decir, la opción de la planta geotérmica) nunca va a probar la solución óptima, uno de los proyectos en competencia siempre va a proporcionar un mayor beneficio social neto. Por lo tanto, se puede descartar el proyecto D por razones objetivas, sin decir nada acerca de los pesos de los impactos ambientales. Para las variantes A, B y C el marcador CA es un número positivo. El proyecto A puede presumir con la mayor ventaja comparativa de los 300 millones de dólares, pero está basada en esas grandes pesos de los impactos ambientales por lo cual su beneficio social neto cae a cero, el beneficio social neto se indica en la cuarta fila etiquetada como SB. Proyecto B puede mostrar una considerable ventaja comparativa si la pérdida de superficie forestal se considera que es de bajo costo. Del mismo modo, el proyecto C muestra

una gran ventaja si la contaminación visual es de poco interés. En este caso, es relativamente fácil de identificar toda la gama de pesos a los que el proyecto A , B , o C proporciona el mayor beneficio social neto (sujeto a la restricción de que este beneficio debe ser no negativo)

TABLA 3.2.: Tabla 4: Resultados de DEA basados en CBA

[Millones de Dolares]	A	B	C	D
CA	300	128,4	87,8	-15,9
$p1$	27,50	0,00	1,08	1,07
$p2$	6,25	1,55	0,00	1,51
SB	0,0	165,3	127,8	21,1

La opción A se descarta, dado que ofrece el más bajo beneficio social netos. La alternativa B sería óptima si tubiera un peso pequeño por la pérdida de suelo forestal. Del mismo modo, alternativa C es la opción óptima si el peso de la contaminación visual en las ciudades fuera muy bajo. La alternativa D se descarta por no proporcionar el beneficio social neto máximo a cualquier peso.

3.2 EFICIENCIA DE LOS PROYECTOS POR MEDIO DE DEA SÚPER-EFICIENCIA

El Análisis Envolvente de Datos calcula la eficiencia de las Unidades de Toma de Decisiones (DMU, por sus siglas en inglés) dentro de un conjunto de ellas; estas unidades pueden ser: empresas, instituciones, proyectos, entre otros. Esta eficiencia se halla con base en indicadores de producción o funcionamiento de la DMU, los cuales son datos ya definidos por el funcionamiento propio de la DMU. A continuación se presentan los conceptos y pasos que determinan la metodología para hallar la eficiencia de los proyectos, de fuentes energéticas, considerando indicadores propios del sitio como demanda energética, costos de impactos ambientales y recurso energético.

Para la evaluación de proyectos de fuentes de energía se consideran dos factores:

1. Impactos ambientales
2. Beneficios financieros

Para el desarrollo de esta evaluación se ha propuesto un procedimiento basado en aspectos del funcionamiento de una planta de eléctrica, como son: su recurso de funcionamiento, sus costos de funcionamiento, la energía que debe suministrar y los impactos ambientales ocasionados

por esta. La base matemática de esta metodología está en el uso del método DEA.

Este procedimiento se puede distribuir en cuatro pasos así:

1. Información inicial del sitio y proyecto
2. Adaptación de la información inicial a “inputs” y “outputs” que son la forma estándar para aplicar el método DEA
3. Aplicación del modelo DEA ver figura 3.3
4. Obtención de resultados



Figura 3.3.: Figura 6: Esquema inputs y outputs DEA

Fuente: Elaborado por los autores

3.2.1 Tipo de proyectos Los proyectos sobre los cuales se va a desarrollar este procedimiento son proyectos de generación eléctrica o plantas de generación eléctrica. Estos proyectos son con base en energías renovables, y su propósito es suplir eléctricamente demandas ubicadas en sitios donde existan recursos renovables aprovechables. Estos proyectos tienen unos costos de inversión, los cuales serán incluidos en el análisis de eficiencia, así como los impactos medioambientales generados por estos proyectos. Otro tipo de datos que entra en el análisis de eficiencia de un proyecto es el recurso disponible en el sitio y la demanda de energía. Todos estos datos se organizan por medio de una valoración a modo de indicador.

3.2.2 Método de análisis El método para determinar la eficiencia de cada proyecto es análisis envolvente de datos, este método evalúa todos los proyectos, y según sus indicadores, determina una eficiencia del proyecto, así de esta manera, se obtiene una valoración que indica

la idoneidad de un proyecto respecto a los demás. En este caso se utiliza el análisis envolvente de datos a través del método de Súper-eficiencia

3.2.3 Sitio de estudio El lugar donde se implementa este procedimiento debe cumplir varios requisitos:

- Disponibilidad de datos de los diferentes recursos relevantes en el sitio de interés.
 - El sitio de interés es una extensión de territorio llamada región, donde hay información disponible de varios tipos de recurso energético. Uno de los objetivos de este análisis es facilitar el estudio cuando se encuentran varias opciones de proyectos.
 - Para facilitar el manejo de información y poder realizar una referenciación geográfica, se realiza una división de la región, estas subregiones se denomina zonas.
-

3.2.4 Tecnologías Las tecnologías son los equipos disponibles para transformar el tipo de recurso disponible en corriente eléctrica. Estas tecnologías tienen asociados unos costos de inversión y mantenimiento, así como unos impactos medioambientales. Esta información es de vital importancia para el análisis de eficiencia, por lo cual se hace indispensable que cada tecnología o planta candidata, cuente con la información necesaria. Dentro de los costos de cada tecnología se incluye un costo adicional que es el costo de redes de distribución, en esta parte se distinguen tres tipos de redes caracterizados por sus distancias y sus costos de inversión.

3.2.5 Análisis El análisis completo permite conocer la eficiencia relativa de cada proyecto de manera tal que el proyecto con la mayor puntuación es el mejor dentro del grupo de proyectos estudiados, este análisis considera como entradas en la demanda energética de la zona y los recursos disponibles y las salidas como el beneficio económico y los impactos ambientales ocasionados por la implementación de un tipo de fuente de energía para suplir la demanda de la zona.

3.2.6 Evaluación de la eficiencia paso a paso En esta sección se describe paso a paso el procedimiento para la obtención de un indicador de eficiencia de los proyectos de generación teniendo en cuenta, la necesidad energética de cada zona (una región se divide en zonas), el recurso energético de dicha zona, impactos ambientales generados por la implementación de una planta eléctrica y los beneficios económicos obtenidos de la diferencia entre la energía

total obtenida en valor presente neto de un proyecto y los costos de inversión y mantenimiento en valor presente neto .

Paso 1, En este paso se incluye toda la información reunida según el formato de tabla establecido para:

- Recurso según tablas: A.2, A.1, A.3, A.4, A.8 y A.6
- Demanda energética :A.11
- Impactos ambientales:A.11
- Costos :A.9

Paso 2, Realizar los procedimientos para los datos de entradas como se muestra en la sección 4.2

Paso 3, Configurar el programa del análisis completo DEA, aquí se selecciona si se desea que en la última etapa del análisis se haga con uno, dos o tres de los mejores proyectos por cada zona. También se escoge un valor entre “0” a “1” para determinar el rango de valores de eficiencia admitidos. es decir , si se escoge 0,95 entonces el programa escogerá todos los proyectos que tengan una eficiencia entre 95 % y 100 % sobre el proyecto con la mejor ponderación .

Paso 4, Los resultados que se obtienen al final son de dos tipos:

1. Eficiencia de los proyectos por cada zona para tres opciones de distancias de red de distribución ver figura 3.4. A continuación se muestra como se representan la salida de resultados en tablas:

TABLA 3.3.: Tabla 5: Salida de resultados

	Columnas
Proyecto con biomasa	0, 6, 12
Proyecto planta diésel	1, 7, 13
Proyecto aerogenerador	2, 8, 14
Proyecto gen. minihidraulica	3, 9, 15
Proyecto red existente	4, 10, 16
Proyecto panel FV	5, 11, 17

2. En los proyectos con el máximo de eficiencia de toda la región

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
0	1.03	0	0.71	0.65	1.15	1.04	1.03	0	0.71	0.65	1.15	1.04	1.03	0	0.71	0.65	1.15	1.04
1	1.03	1.62	0.71	16.26	1.18	1.04	1.03	1.59	0.71	16.26	1.18	1.04	1.03	1.59	0.71	16.26	1.18	1.04
2	1.03	0	0.71	0.61	1.13	1.04	1.03	0	0.71	0.61	1.13	1.04	1.03	0	0.71	0.61	1.13	1.04
3	1.04	1	0.77	12.97	0.96	1.07	1.04	0.96	0.77	12.96	0.96	1.07	1.04	0.96	0.77	12.96	0.96	1.07
4	1.03	0	0.71	0.66	1.04	1.04	1.03	0	0.71	0.66	1.04	1.04	1.03	0	0.71	0.66	1.04	1.04
5	1.03	0	0.71	0.65	1.05	1.04	1.03	0	0.71	0.65	1.05	1.04	1.03	0	0.71	0.65	1.05	1.04
6	1.03	0	0.71	0.65	1.14	1.04	1.03	0	0.71	0.65	1.14	1.04	1.03	0	0.71	0.65	1.14	1.04
7	1.03	0	0.71	0.65	1.15	1.04	1.03	0	0.71	0.65	1.15	1.04	1.03	0	0.71	0.65	1.15	1.04
8	1.03	0	0.71	0.66	1.14	1.04	1.03	0	0.71	0.66	1.14	1.04	1.03	0	0.71	0.66	1.14	1.04
9	1.03	1.49	0.71	9.79	1.18	1.04	1.03	1.46	0.71	9.8	1.18	1.04	1.03	1.46	0.71	9.8	1.18	1.04
10	1.03	1.4	0.72	3.9	1.18	1.04	1.03	1.37	0.72	3.9	1.18	1.04	1.03	1.37	0.72	3.9	1.18	1.04
11	1.03	1.96	0.71	2.88	1.18	1.04	1.03	1.94	0.71	2.88	1.18	1.04	1.03	1.94	0.71	2.88	1.18	1.04
12	1.03	1.86	0.71	20.8	1.18	1.04	1.03	1.83	0.71	20.83	1.18	1.04	1.03	1.83	0.71	20.83	1.18	1.04
13	1.03	1.74	0.71	41.93	1.18	1.04	1.03	1.72	0.71	41.99	1.18	1.04	1.03	1.72	0.71	41.99	1.18	1.04
14	1.03	1.47	0.71	13.74	1.18	1.04	1.03	1.45	0.71	13.76	1.18	1.04	1.03	1.45	0.71	13.76	1.18	1.04
15	1.03	1.65	0.71	1.48	1.18	1.04	1.03	1.62	0.71	1.48	1.18	1.04	1.03	1.62	0.71	1.48	1.18	1.04
16	1.35	1	0.71	3.05	1.11	1.04	1.37	0.88	0.71	3.05	1.11	1.04	1.37	0.88	0.71	3.05	1.11	1.04
17	1.04	1	0.71	5.48	1.14	1.04	1.05	0.98	0.71	5.47	1.14	1.04	1.05	0.98	0.71	5.47	1.14	1.04
18	1.62	1	0.71	1.27	1.09	1.04	1.65	0.98	0.71	1.27	1.09	1.04	1.65	0.98	0.71	1.27	1.09	1.04
19	1.03	1.73	0.71	5.01	1.18	1.04	1.03	1.7	0.71	5.01	1.18	1.04	1.03	1.7	0.71	5.01	1.18	1.04

Resultados de eficiencias para los proyectos que corresponden a la distancia "1" de red de distribución

Resultados de eficiencias para los proyectos que corresponden a la distancia "2" de red de distribución

Resultados de eficiencias para los proyectos que corresponden a la distancia "3" de red de distribución

Figura 3.4.: Figura 7: Salida de resultados por cada tipo de proyecto y en cada municipio

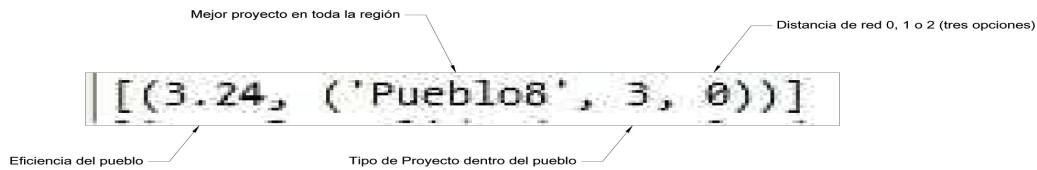


Figura 3.5.: Figura 8: Modelo para la eficiencia máxima de toda la región

Configuración para obtener resultados en la programación DEA

Figura 3.6.: Figura 9: Código para obtener resultados en la programación DEA

```
5
6 num_max = 1 # de uno en adelante entero
7 criterio = 1 #de cero a uno-- Los proyectos con un factor limite sobre el maximo
8 output_file = "salida.xls"
```

Figura 3.7.: Figura 10: Selección pueblo

```
[[ (3.24, ('Pueblo8', 3, 0)) ]]
```

Configuración para el 15

```
6 num_max = 1 # de uno en adelante entero
7 criterio = 0.15 #de cero a uno-- Los proyectos con un factor limite sobre el maximo
8 output_file = "salida.xls"
```

Figura 3.8.: Figura 11: Porcentaje del máximo obteniendo dos resultados según código

```
[(1.58, ('Pueblo9', 2, 1)), (9.6, ('Pueblo15', 3, 2))]
```

Figura 3.9.: Figura 12: Salida de resultados, para dos opciones

CASO DE ESTUDIO

Aquí se establece un caso específico para implementar un procedimiento mediante el cual se determina la idoneidad de un proyecto de generación a partir de los recursos disponibles en sitio. A continuación se hace una descripción de los pasos realizados entre los cuales está: descripción de la región a realizarle el estudio energético con diferentes opciones de proyectos, seguidamente se establece la información disponible necesaria para el análisis, luego de esto se hace una adaptación de la información de manera que pueda ser empleada en la formulación de la metodología DEA, después se realiza el estudio de cada tecnología de generación con sus respectivas ventajas y desventajas para cada zona, se calcula paso a paso la eficiencia de los proyectos y costos de implementación de cada uno de estos. Por último se efectúa un análisis de resultados obtenidos, conclusiones y observaciones.

4.1 DESCRIPCIÓN DE LA REGIÓN E INFORMACIÓN UTILIZADA

El Departamento de Santander está situado al noreste del país en la región andina, entre los $05^{\circ}42'34''$ y $08^{\circ}07'58''$ de latitud norte, y los $72^{\circ}26'$ y $74^{\circ}32'$ de longitud oeste. Cuenta con una superficie de $30,537\text{km}^2$ lo que representa el 2,7 del territorio nacional. Limita por el Norte con los departamentos de Cesar y Norte de Santander, por el Este y por el Sur con el departamento de Boyacá y por el Oeste con el río Magdalena que lo separa de los departamentos de Antioquia y Bolívar martinez (2013). El departamento se subdivide en provincias una de esas provincias es la seleccionada en este caso pasa su evaluación de potencial energético y evaluación de proyectos adecuados según el características en sitio (No hay un criterio para la selección de este caso de estudio, la selección de esta región se realiza al azar). La provincia de Vélez

está situada al sur del departamento de Santander, tiene una superficie de 18.512 km² y un total de habitantes de 183 466. Los municipios de esta provincia son: Aguada, Albania, Barbosa, Bolívar, Cimitarra, El Peñón, Chipatá, Florián, Guavatá, Güepsa, Jesús María, La Belleza, La Paz, Landázuri, Puente Nacional, Puerto Parra, San Benito, Sucre y Vélez. Como requerimiento fundamental en la implementación de la propuesta se requiere que la región este dividida en zonas, dichas zonas serán los municipios, esto con el fin de facilitar el manejo de la información.



Figura 4.1.: Figura 13: Departamento de Santander, dividido en Provincias

- La información utilizada de los recursos energéticos se obtiene de los atlas del IDEAM: Escalante Hernandez et al. (2011); de Planeación Minero Energética UPME and Javeriana (2015); UPME and IDEAM (2005), de estaciones meteorológicas que se encuentra ubicadas dentro de la región de estudio, en documentos de la base de datos de la UIS y paginas web especializadas.
- La información de la demanda eléctrica fue suministrada por la electrificadora de Santander ESSA, dicha información especifica la cantidad de viviendas con y sin servicio eléctrico en cada municipio de la provincia de Vélez.

- La información concerniente a costos de las energías renovables y plantas diésel se encuentra disponible en páginas especializadas en internet como: Mostajo Veiga et al. (2013), González-Longatt and M. (2004)
- Por otro lado los costos de un proyecto de red de distribución en BT y MT fueron suministrados según plantilla utilizada por la ESSA como se observa en el anexo A información utilizada, En cuanto a los impactos ambientales se realiza una matriz de impactos medioambientales simple, la cual refleja un indicador de impactos por cada tipo de proyecto.

4.2 CÁLCULOS PREVIOS PARA HOMOGENIZAR TODOS DATOS NECESARIOS

Para para implementar DEA en este caso se van a considerar dos entradas y dos salidas también llamadas inputs y outputs. Para realizar el cálculo con la formulación DEA, toda la información disponible se debe reducir o adaptar para poder implementar, por lo cual se realizan unos procedimientos previos al cálculo de DEA donde se obtiene una lista de datos organizados que representan toda la información de todos los proyectos en todas las zonas a evaluar.

4.2.1 Cálculos del recurso Energético (input) Ya que el recurso energético para las diferentes tecnologías varía, se procede a hacer una homogenización de los recursos por medio de una normalización que consta de dos pasos:

1. Para convertir cada tipo de recurso a la unidad de energía anual: kWh por año. Equivalente para todos los recursos.

$$E_K = \frac{E_{BASE} * Re_K * K}{Re_{BASE}} \quad (4.1)$$

Donde:

E_K : Valor en kWh por año de energía de cualquier tipo de recurso

E_{BASE} : 3154 $kWh/año$ (Tomado de norma ESSA para una vivienda en zona rural con demanda mayor a 50 viviendas)

Re_{BASE} : Se obtiene a partir del E_{BASE} y según el tipo de indicador de recurso energético

Re_K : Es el indicador de recurso energético real disponible

K : Factor indicador adicional especificado en algunos caso, para el resto de los casos es 1

2. Posteriormente se determina qué valor es el máximo, a ese valor se le asigna una ponderación de uno de manera tal que el resto de valores tendrá su estimación equivalente menor o igual a uno bajo la base del valor máximo.

Nota: Tener presente que lo que se pretende obtener con estos procedimientos es un indicador del recurso presente en cada zona, este indicador representa un valor equivalente global del recurso energético presente en la zona de interés en un año. Esto no es útil para calcular una planta eléctrica, solamente para reflejar el probable valor del potencial energético de la zona.

Cálculos de normalización para los datos del recurso energético de la biomasa :

Para el municipio de Aguada

$$E_{Kbiomasa} = \frac{E_{BASE} * Re_{Kbiomasa} * K_{biomasa}}{Re_{BASEbiomasa}} [kWh] \quad (4.2)$$

$$Re_{Kbiomasa} = 90 [TJ] \quad (4.3)$$

$$K_{biomasa} = FP = 0,65 \quad (4.4)$$

$$Re_{BASEbiomasa} = \frac{E_{BASE} * 3,6 \times 10^6}{1 \times 10^{12}} = 0,0113544 [TJ] \quad (4.5)$$

$$E_{Kbiomasa} = 16500000 [Kwh/año] \quad (4.6)$$

Cálculos de normalización para los datos del recurso energético de las plantas diésel:

Para estos datos se tomaron en consideración los siguientes aspectos:

1. Se tomó la ciudad de Barrancabermeja como referencia ya que allí se encuentra la refinería de petróleo y desde allí se surte de combustible a muchos sitios en todo el país.
2. En este caso ya que esta tecnología funciona con combustible y no con un recurso directo del ambiente propio del sitio, se realiza el siguiente procedimiento para combustible diésel transportado según dos factores importantes:
 - a) Cantidad de viviendas sin electrificar, este parámetro se considera acá ya que le da un valor de prioridad según la cantidad de potenciales usuarios. En otras palabras

si la cantidad usuarios es importante, entonces el transporte de combustible tendrá mejor respaldo financiero, mejores garantías de estabilidad y continuidad en el transporte y administración de este. Mientras que si la cantidad de usuarios es baja, no existe garantía para demanda de combustible constante lo que genera incertidumbre y poca favorabilidad de esta tecnología.

- b) Distancia desde la ciudad de Barrancabermeja hasta los municipios de interés. Este factor se considera por razones financieras, entre mayor sea la distancia de transporte, mayores los costos por flete.

(Para el municipio de Aguada)

$$E_{Kdiesel} = \frac{E_{BASE} * Re_{Kdiesel} * K_{diesel}}{Re_{BASEdiesel}} [kWh] \quad (4.7)$$

$$Re_{Kdiesel} = 90 [viviendas sin electrificar] \quad (4.8)$$

$$Re_{BASE} = 1 [vivienda] \quad (4.9)$$

$$K = (1/230) [Km/Km] \quad (4.10)$$

$$E_{Kdiesel} = \frac{E_{BASE} * 90 * 0,004347}{1} \quad (4.11)$$

$$E_{Kdiesel} = 1233,94 [kWh/año] \quad (4.12)$$

Cálculos de normalización para los datos del recurso energético eólico :

Los datos iniciales que se tienen para este caso están dados para una altura de 20m y se dan en $[W/m^2]$. Los datos están dados en promedios mensuales por lo tanto se procede a realizar algunos cambios para estimar un solo indicador del potencial eólico anual por cada municipio.

(Para el municipio de Aguada)

$$Area \ de \ barrido = 10 [m^2] \quad (4.13)$$

$$t = 8760 [h] \quad (4.14)$$

$$\eta = 60 \% \quad (4.15)$$

$$FP = 35 \% \quad (4.16)$$

$$K = FP \quad (4.17)$$

$$E_{Keolico} = \frac{E_{BASE} * Re_{Keolico} * K_{eolico}}{Re_{BASEeolico}} [kWh] \quad (4.18)$$

TABLA 4.1.: Tabla 6: Densidad de energía eólica a 20(m)(W/m²) (parte 1)

municipio	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio
<i>Aguada</i>	8	8	8	8	5	8	8

Fuente:

TABLA 4.2.: Tabla 7: Densidad de energía eólica a 20(m)(W/m²) (parte 2)

municipio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre
<i>Aguada</i>	5	8	8	8	8

$$Re_{BASEeolico} = \frac{E_{BASE} * 1000}{t * Area \ de \ barrido} \quad (4.19)$$

Se aplica la fórmula de la ecuación 4.18 para cada valor de la Tabla 4.1 donde dicho valor representa el $Re_{Keolico}$

nota: $[E_{Keolico}]$ representa la implementación de la misma ecuación para el valor en esa casilla.

TABLA 4.3.: Tabla 8: Energía eólica total mensual [kWh]

municipio	enero	febrero	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre
AGUADA	$\frac{E_{BASE} * 8 * K_{eolico}}{Re_{BASEeolico}}$	$\frac{E_{BASE} * 8 * K_{eolico}}{Re_{BASEeolico}}$	$E_{Keolico}$	$E_{Keolico}$	$E_{Keolico}$	$E_{Keolico}$	$E_{Keolico}$

La sumatoria de los valores obtenidos durante un año mes a mes del cuadro anterior da como resultado:

$$E_{Keolico} = 2759,4 [kWh] \quad (4.20)$$

4.2. Cálculos previos para homogenizar todos datos necesarios

Cálculos de normalización para los datos del recurso energético hidráulico :

(Para el municipio de Aguada)

$$E_{Khidrico} = \frac{E_{BASE} * Re_{Khidrico} * K_{hidrico}}{Re_{BASEhidrico}} [kWh] \quad (4.21)$$

TABLA 4.4.: Tabla 9: Parámetros para la planta hidráulica

	valor	unidades
<i>Ebase</i>	3154,00	<i>kWh/año</i>
ρ	1000,00	$[kg/m^3]$
<i>g</i>	9,80	$[m/s^2]$
<i>altura por defecto</i>	5,00	$[m]$
η	0,75	
<i>t</i>	8760,00	$[h/año]$
<i>logitud cause utilizado</i>	500,00	$[m]$
<i>pendiente por defecto</i>	0,01	m/m
<i>FP</i>	0,30	

$$Re_{Khidrico} = [\text{Valor tomado de la Tabla 4,6}]$$

$$Re_{BASEhidrico} = Q \quad (4.22)$$

$$K_{hidrico} = FP \quad (4.23)$$

$$t = 8760[h] \quad (4.24)$$

$$h = 5[m] \quad (4.25)$$

$$Re_{BASEhidrico} = \frac{E_{BASE}}{a} \quad (4.26)$$

$$E_{Khidrico} = 1233,94[kWh/año] \quad (4.27)$$

$$P_{hidrica} = \frac{E_{BASE} * 1000}{t} \quad (4.28)$$

$$Q = \frac{P_{hidrica}}{\eta * g * h * \rho} = 0,0098 [m^3/s] \quad (4.29)$$

A continuación se presentan los datos de entrada para el municipio de Aguada Santander en cuanto a recurso energético hídrico, que consisten en un índice de la oferta sobre la demanda de agua disponible en el municipio.

TABLA 4.5.: Tabla 10: Índice de recurso hídrico

índice [de- manda /ofer- ta]*100	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	dem [$\frac{m^3}{s}$]
AGUADA	2,67	2,23	2,33	1,62	0,74	1,14	2,77	1,74	1,80	1,26	1,01	1,25	0,02

$$Operación = \frac{dem * 100}{[x]} \quad (4.30)$$

[x] es el valor índice para mes, de la Tabla 4.5

TABLA 4.6.: Tabla 11: Resultados de caudal en [m^3/s] de la operación mostrada en la ecuación 4.30 (parte 1)

Municipio	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio
<i>Aguada</i>	0,75	0,90	0,86	1,23	2,70	1,75	0,72

TABLA 4.7.: Tabla 12: Resultados de caudal en [m^3/s] de la operación mostrada en la ecuación 4.30 (parte 2)

Municipio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre
<i>Aguada</i>	1,15	1,11	1,59	1,98	1,60

Ahora se aplica la fórmula de la ecuación 4.21

TABLA 4.8.: Tabla 13: Resultados de la energía hídrica total anual en [$kWh/año$] (parte 1)

Municipio	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio
<i>Aguada</i>	72343,82	86617,94	82900,43	119233,33	261024,32	169436,84	69732,13

TABLA 4.9.: Tabla 14: Resultados de la energía hídrica total anual en [$kWh/año$] (parte 2)

Municipio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre	total anual en
<i>Aguada</i>	111010,34	107310,00	153300,00	191245,54	154526,40	1578681,11

4.2. Cálculos previos para homogenizar todos datos necesarios

$$E_{Khidrico} = 1578681,11[kwh/año]$$

Cálculos de normalización para la opción de conexión a red existente :

$$E_{Kred} = \frac{E_{BASE} * Re_{Kred}}{Re_{BASEred}} [kWh] \quad (4.31)$$

$$Re_{BASEred} = 1[vivienda]$$

TABLA 4.10.: Tabla 15: Cálculo para determinar la energía anual de la red según la cantidad de viviendas [kWh/año]

municipio	viviendas totales	viviendas electrifica- das	RE _{kred} viviendas sin electrificar	E _{kred} oferta de energía de red
<i>Aguada</i>	654	564	90	283860

Cálculos de normalización para los datos del recurso energético solar :

$$E_{Ksol} = \frac{E_{BASE} * Re_{Ksol} * K_{sol}}{Re_{BASEsol}} [kWh] \quad (4.32)$$

$$Re_{BASEsol} = \frac{E_{BASE}}{AREA * t} [kW/m^2] \quad (4.33)$$

$$AREA = 50 [m^2] \quad (4.34)$$

A continuación se presentan los datos de Re_{ksol}

TABLA 4.11.: Tabla 16: Recurso solar inicia (kWh/m²) (parte 1)

municipio	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio
<i>Aguada</i>	4,2	4	4	4	3,5	4

TABLA 4.12.: Tabla 17: Recurso solar inicia (kWh/m²)(parte 2)

municipio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre
<i>Aguada</i>	4,5	4	4	3,5	3,5	4

Se aplica la ecuación 4.32

TABLA 4.13.: Tabla 18: Resultados de aplicar la ecuación $[kWh/año]$ 4.32 (parte 1)

municipio	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio
<i>Aguada</i>	1839600	1752000	1752000	1752000	1533000	1752000	1971000

TABLA 4.14.: Tabla 19: Resultados de aplicar la ecuación $[kWh/año]$ 4.32 (parte 2)

municipio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre	E_{Ksol} total
<i>Aguada</i>	1752000	1752000	1533000	1533000	1752000	20673600

$$E_{Ksol} = 20673600[kWh]$$

4.2.2 Cálculo de la demanda. Procedimiento tomado de la norma ESSA (Ayala Rodríguez et al. (2005)) Características de la demanda

La determinación de la demanda máxima en el diseño de instalaciones eléctricas internas para viviendas unifamiliares o multifamiliares, se realiza de acuerdo a los parámetros establecidos por la norma técnica NTC 2050, dentro de la cual se puede considerar la carga mínima instalada (s_l) por usuario como sigue:

- $32VA/m^2$ para cargas de alumbrado general
- carga mínima para lavadora y plancha : $1500VA$
- carga mínima par uno o mas circuitos de pequeños apartos : $1500VA$ por circuito

demanda máxima total :

$$D_{max} = \frac{S_R}{F_{div_{res}}} + S_{ACR} + \frac{S_c}{F_{div_{com}}} + s_{ACC} \quad (4.35)$$

donde Ayala Rodríguez et al. (2005)

S_R : carga de demanda sector residencial

$$: S_R = [S_M + (S_I - S_M) * F_d] * N \quad (4.36)$$

S_M : carga apartado mayor potencia

S_I : carga mínima instalada por usuario

S_{ACR} : carga de áreas comunes sector residencial

N : número de usuarios

F_d : factor de demanda

$f_{div-res}$:factor de diversidad sector residencial

S_C : carga de demanda de sector comercial

S_{ACC} : carga de áreas comunes sector comercial

$f_{div-com}$: factor de diversidad sector comercial

en zonas rurales, para usuarios en estrato 1 y 2, la demanda máxima, puede ser estimada como se indica a continuación: Ayala Rodríguez et al. (2005)

$$D_{max-rural} = \frac{\left(S_M + \left(\left(32 \frac{VA}{m^2} \right) * \right) \text{ÁREA} \left((m^2) * 0,5 \right) * N \right)}{F_{div-res}} \quad (4.37)$$

Factores de demanda

Factores de diversidad

La demanda energética de una sola vivienda para un conjunto mayor a 50 viviendas con las características mencionadas anteriormente, según metodología ESSA es de 3154kWh por año.

Cálculo tipo para la demanda:

Para este caso se toma el municipio de Aguada y de la Tabla A.8 se procede de la siguiente manera :

Vivienda totales=654

Viviendas electrificadas=564

Viviendas sin electrificar=654 – 564

Viviendas sin electrificar=90

El factor de diversidad se toma de la Tabla 4.16 para estratos 1, 2, 3, y 4 donde:

$$F_{div-res} = \frac{1}{0,2 + 0,8 * e^{\left(\frac{1-90}{6}\right)}} = 4,999$$

La demanda máxima para ese grupo de viviendas será entonces:

aparato_de_mayor_potencia=1200[VA]

area_de_vivienda=50[m2]

factor_de_potencia=0,9

Entonces:

TABLA 4.15.: Tabla 20: Factores de demanda

Descripción	carga (VA)	factor de demanda(%)
Residencial		
estrato 1 y 2	carga aparato mayor potencia	100
	resto	50
estrato 3 y 4	carga aparato mayor potencia	100
	resto	40
estrato 5 y 6	carga aparato mayor potencia	100
	resto	30
carga áreas comunes	motores	100
	resto	60
Comercial		
tomas comunes	primeros 5000	100
	sobre 5000	50
Alumbrado	primeros 5000	100
	sobre 5000	50
Cargas especiales y áreas comunes	total	100
Industrial	según proyecto particular	

fuentes: norma técnica de la ESSA

$$D_{max-rural} = \frac{(1200 + ((32 \frac{VA}{m^2}) * 50 ((m^2) * 0,5) * 90) * 0,9)}{4,999} = 32,40[kW]$$

La demanda de energía anual para Aguada:

$$D_{max} * 8760 = 283824,4103[kWh/año]$$

4.2.3 Cálculo del beneficio económico (output) En este punto lo que se busca es determinar un indicador de beneficio económico, este beneficio se compone de la diferencia entre el costo de la energía actual y el LCOE o costo nivelado de la energía, según la formulación mostrada en la sección 2.1.3. Como resultado de este procedimiento se determina un indicador, que refleja cuan beneficioso puede llegar a ser un proyecto a partir de sus costos de inversión y mantenimiento respecto a los costos actuales ofrecidos por los operadores de red que venden este servicio. A continuación se muestra un cálculo tipo para determinar este indicador.

TABLA 4.16.: Tabla 21: Factores de diversidad

sector	factor de diversidad
estratos 1,2,3,y 4	$F_{div-res} = \frac{1}{0,2+0,8*e^{\left(\frac{1-N}{6}\right)}}$
estratos 5 y 6	$F_{div-res} = \frac{1}{0,3+0,7*e^{\left(\frac{1-N}{6}\right)}}$
comercial usuarios monofásicos bifilares	$F_{div-com} = \frac{1}{0,2+0,8*e^{\frac{1-N}{4,5}}}$
Comercial usuarios trifilares y tetrafilares	$f_{div-com} = \frac{1}{0,3+0,7*e^{\frac{1-N}{4,5}}}$

fuelle: norma técnica de la ESSA

Cálculo del costo nivelado de la energía LCOE

De la Tabla A.9 se toma la primera fila que corresponde a una planta de biomasa de 100 Kw se implementa la formulación planteada en la sección 2.1.3. En esta parte el costo de las redes se integra a los cálculos del costo nivelado de la energía para cada tecnología planteada. Se establecieron previamente tres opciones de red caracterizadas por su distancia, lo que se traduce en tres costos diferentes, los cuales se integran al valor del LCOE dependiendo de la distancia de red más apropiada en cada caso.

Entonces se tiene que:

distancias de red de distribución :

$$red1 = 1[km];$$

$$red2 = 5[km];$$

$$red3 = 10[km]$$

$$LCOE1 = \frac{\sum_{t=1}^{30} \frac{100*5,792+1*6867,3+0,098+0,00004+0,649529472}{(1+0,0739)^t}}{\sum_{t=1}^{30} \frac{100*0,65*8760}{(1+0,0739)^t}} = 0,761 [USD/kWh] \quad (4.38)$$

$$LCOE2 = \frac{\sum_{t=1}^{30} \frac{100*5,792+5*6867,3+0,098+0,00004+0,649}{(1+0,0739)^t}}{\sum_{t=1}^{30} \frac{100*0,65*8760}{(1+0,0739)^t}} = 0,8095 [USD/kWh] \quad (4.39)$$

$$LCOE3 = \frac{\sum_{t=1}^{30} \frac{100*5,792+10*6867,3+0,098+0,00004+0,6495}{(1+0,0739)^t}}{\sum_{t=1}^{30} \frac{100*0,65*8760}{(1+0,0739)^t}} = 0,871 USD/kWh \quad (4.40)$$

A continuación se determina la diferencia del costo del kilo vatio- hora en el mercado y el valor de LCOE para esa tecnología con las tres opciones de red . el valor del kilo vatio- hora

actual sería en este caso de $2[USD/Kwh]$ entonces:

$$beneficio1 = 2 - 0.761 = 1,24$$

$$beneficio2 = 2 - 0.8096 = 1,19$$

$$beneficio3 = 2 - 0,871 = 1,13$$

Como se observa a medida que los costos aumentan el beneficio económico representado por la diferencia entre el costo actual de la energía en el mercado y el costo proyectado de la planta con tres opciones de red, da como resultado una reducción en el beneficio, así también se puede concluir que si un proyecto tiene un beneficio negativo, entonces se puede descartar, ya que es viable realizarlo. De esta manera se obtienen los indicadores necesarios para realizar el cálculo con la formulación DEA.

4.2.4 Indicadores de impacto medioambiental (Output) Estos indicadores se determinan teniendo en cuenta que la formulación DEA lo que realiza es una optimización maximizando los pesos asignados, de manera que un proyecto esté representado por sus parámetros máximos, teniendo esto en cuenta, la valoración de los impactos deben mostrar que entre menor sean los impactos, mejor debe ser el proyecto por lo tanto se tiene el siguiente procedimiento:

De la Tabla A.11 para una planta de Biomasa se tiene una valoración total de impactos de: *32 puntos*

Como lo que interesa acá es reducir los impactos, este valor se invierte:

$$indicador\ de\ impacto\ biomasa = \frac{1}{32} = 0,03 \quad (4.41)$$

4.3 RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE PROYECTOS PARA EL APROVECHAMIENTO DE FUENTES NO CONVENCIONALES DE ENERGÍA

A continuación se muestran los resultados obtenidos por medio de dos procedimientos en base a la metodología DEA. Los resultados obtenidos por medio de DEA son de dos tipos:

1. Por medio de la metodología planteada en la sección 3.1.1 para determinar los costos generados por los impactos medioambientales. Los costos de los impactos se determinan a partir de los beneficios generados por cada proyecto junto con sus impactos.

4.3. Resultados de la evaluación de proyectos para el aprovechamiento de fuentes no convencionales de energía

2. Según el procedimiento planteado en la sección 3.2 para determinar la eficiencia de los proyectos. Los indicadores de eficiencia se determinan por medio de los recursos la demanda en el sitio, los beneficios y los impactos generados por cada proyecto.

4.3.1 Resultados de la estimación de costos medioambientales En esta sección se muestran las tablas de resultados obtenidos en la implementación de DEA según la metodología planteada en la sección 3.1.1 para el caso considerado, estos resultados reflejan los costos de los impactos generados por cada proyecto en cada zona de la región, como se menciona anteriormente la región está constituida por zonas en este caso y para facilitar los cálculos y la obtención de datos se toma por región la Provincia de Vélez en Santander y las zonas son los municipios que conforman dicha provincia.

A continuación en la Tabla 4.17 se presentan los resultados obtenidos para cada pueblo, donde SB representa en beneficio social neto. Este valor indica es el beneficio monetario que queda después de restar el costo de los impactos ambientales de los beneficios económicos netos (ambos expresados en términos de valor actual neto).

TABLA 4.17.: Tabla 22: Resumen de resultados del beneficio social neto de cada proyecto en cada población

Municipio		Biomasa	Diésel	Eólica	Hidráulica	Red Ex	Fv
Aguada	SB	1,86265E-09	- 1299630,681	7626644,972	3225201,469	222123895,3	-1056684,248
Albania	SB	0,519042667	1672232,201	3036,208914	538033,4187	61533138,51	9,31323E-10
Barbosa	SB	0,519042667	0,04004153	3036,208914	538033,4187	38255734,04	9,31323E-10
Bolívar	SB	3,12515E-14	5268063,236	- 0,013150856	1,11759E-08	222123700,8	-13985456,57
Chipatá	SB	- 0,000261721	4,65661E-09	- 0,013150856	10924228,52	222123700,8	-13985456,57
El Peñón	SB	-3,2041E-13	1430183,858	- 0,013150856	766567,7877	222123700,8	-13985456,57
Florián	SB	1,86265E-09	- 4867,293409	7626644,972	3225201,469	222123895,3	-1056684,248
Guavatá	SB	1,86265E-09	- 881055,5035	7626644,972	3225201,469	222123895,3	-1056684,248
Guepsa	SB	1,86265E-09	- 1299630,681	7626644,972	3225201,469	222123895,3	-1056684,248
Jesús María	SB	1,86265E-09	- 1299630,681	7626644,972	3225201,469	222123895,3	-1056684,248
La Belleza	SB	-3,2041E-13	1430183,858	- 0,013150856	766567,7877	222123700,8	-13985456,57
La Paz	SB	1,86265E-09	- 881055,5035	7626644,972	3225201,469	222123895,3	-1056684,248
Puente Nacional	SB	1,86265E-09	- 1299630,681	7626644,972	3225201,469	222123895,3	-1056684,248
San Benito	SB	0,519042667	0,04004153	3036,208914	538033,4187	38255734,04	9,31323E-10
Sucre	SB	- 0,125926494	1917919,468	- 0,013150856	11758195,44	222123700,8	-13985456,57
Vélez	SB	- 0,125926494	1917919,468	- 0,013150856	11758195,44	222123700,8	-13985456,57
Cimitarra	SB	0,519042667	1672232,201	3036,208914	538033,4187	61533138,51	9,31323E-10
Landázuri	SB	0,519042667	1672232,201	3036,208914	538033,4187	61533138,51	9,31323E-10
Puerto Parra	SB	- 0,125926494	1917919,468	- 0,013150856	11758195,44	222123700,8	-13985456,57
Santa Helena De Opón	SB	0,519042667	0	3036,208914	538033,4187	157598910,2	9,31323E-10

4.3.2 Resultados evaluación de la eficiencia En esta sección se muestran las Tabla de resultados obtenidos en la implementación de DEA para el caso considerado, estos resultados reflejan la eficiencia de cada proyecto en cada zona de la región, como se menciona anteriormente la región está constituida por zonas en este caso. A continuación se presentan dos etapas para la presentación de resultados en la primera etapa se evalúan todas las eficiencias de los seis proyectos en los veinte pueblos, luego entonces se obtienen 120 evaluaciones, además, de esto se tienen tres opciones de red de distribución por lo cual al final de la primera etapa se tiene 360 evaluaciones para este caso. La etapa dos retoma los mejores resultados de cada pueblo y se aplica DEA nuevamente, de manera que al final se tiene un único resultado del mejor proyecto de toda la región.

Etapa 1, En esta etapa se muestran los resultados de las eficiencias de todas las tecnologías propuestas en todos las zonas consideradas, luego entonces los resultados totales serán un total del número de tecnologías consideradas por el total de zonas, para el caso considerado en este trabajo se tienen 6 tipos de tecnologías, y 20 poblaciones o zonas, lo que da un total de 120 resultados obtenidos. Dentro de la metodología además se evalúan las eficiencias variando algunos parámetros para tres extensiones de red (las exenciones de red suman costos a cada proyecto según la distancia, se debe tener en cuenta que la red va desde la fuente hasta las cargas o demandas).

En este punto se pueden establecer las mejores tecnologías en cada pueblo.

La Tabla 4.18 muestra los resultados de las eficiencias obtenidas para cada una de las 6 tecnologías en cada población. Estos datos se dividen en tres partes, las cuales representan cada una de las distancias de red de distribución consideradas, (1 km, 3 km y 5 km) de red en baja tensión. ver Figura 3.4.

Etapa 2, En esta etapa se retoman los datos de los mejores proyectos y se le asignan al pueblo, es decir se representa esté como un proyecto, el algoritmo da la facilidad de escoger hasta los dos mejores proyectos en cada pueblo. Con estas nuevas condiciones se vuelve a evaluar, pero esta vez toda la región donde las nuevas DMU ya no serán los proyectos en cada zona si no los mismosseleccionados. Al final lo que se obtiene es un proyecto, el mejor en toda la región, además el algoritmo tiene la ventaja de seleccionar los proyectos con eficiencias sobre una base de la mejor es decir puede escoger los mejores hasta por ejemplo el 95 % del mejor.

[(3.24, ('Pueblo8', 3, 0))]

Figura 4.2.: Figura 14: Resultado final

TABLA 4.18.: Tabla 23: Resultados de la evaluación de eficiencias de los diferentes proyectos en la primera etapa

Municipio	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Aguada	0,85	0,88	1	20,9	1,4	1,04	0,85	0,88	1	20,86	1,39	1,04	0,85	0,88	1	20,9	1,29	1,04
Albania	0,85	1,01	1	25,63	1,28	1,04	0,85	1,01	1	25,59	1,28	1,04	0,85	1,01	1	24,72	1,22	1,04
Barbosa	0,85	0,92	1	0,99	3,27	1,04	0,85	0,92	1	0,99	2,74	1,04	0,85	0,92	1	0,99	1,47	1,04
Bolívar	0,85	0,82	1	16,64	1	1,07	0,85	0,82	1	16,59	1	1,07	0,85	0,82	1	16,62	1	1,07
Chipatá	0,85	0,86	1	48,45	1,18	1,04	0,85	0,86	1	48,37	1,18	1,04	0,85	0,86	1	48,46	1,18	1,04
El Peñón	1,32	0,87	1	7,66	1,12	1,04	1,32	0,87	1	7,55	1,12	1,04	1,32	0,87	1	6,33	1,08	1,04
Florián	0,85	0,93	1	9,08	1,39	1,04	0,85	0,93	1	9,07	1,38	1,04	0,85	0,93	1	9,09	1,28	1,04
Guavatá	0,85	0,87	1	12,72	1,42	1,04	0,85	0,87	1	12,7	1,41	1,04	0,85	0,87	1	12,72	1,29	1,04
Guepsa	0,85	0,89	1	135,691,4	1,04	0,85	0,89	1	135,451,38	1,04	0,85	0,89	1	135,721,28	1,04	135,721,28	1,04	1,04
Jesús María	0,87	0,89	1	15,43	1,38	1,04	0,87	0,89	1	15,4	1,37	1,04	0,87	0,89	1	15,43	1,28	1,04
La Belleza	0,85	0,93	1	6,14	1,23	1,04	0,85	0,93	1	6,13	1,22	1,04	0,85	0,93	1	6,15	1,19	1,04
La Paz	0,85	0,9	1	4,54	1,42	1,04	0,85	0,9	1	4,53	1,41	1,04	0,85	0,9	1	4,54	1,29	1,04
Puente Nacional	0,85	0,88	1	32,79	1,4	1,04	0,85	0,88	1	32,73	1,39	1,04	0,85	0,88	1	32,8	1,28	1,04
San Benito	0,85	0,92	1	66,09	1,36	1,04	0,85	0,92	1	65,97	1,35	1,04	0,85	0,92	1	66,11	1,26	1,04
Sucre	0,85	0,87	1	21,66	1,27	1,04	0,85	0,87	1	21,62	1,27	1,04	0,85	0,87	1	21,66	1,23	1,04
Vélez	0,85	0,85	1	2,33	1,34	1,04	0,85	0,85	1	2,33	1,33	1,04	0,85	0,85	1	2,33	1,26	1,04
Cimitarra	1,11	0,84	1	6,82	1,21	1,04	1,11	0,84	1	6,73	1,21	1,04	1,11	0,84	1	5,64	1,14	1,04
Landázuri	0,89	0,84	1	9,04	1,22	1,04	0,89	0,84	1	9,02	1,22	1,04	0,89	0,84	1	9,04	1,16	1,04
Puerto Parra	1,29	0,82	1	2,84	1,18	1,04	1,29	0,82	1	2,8	1,18	1,04	1,29	0,82	1	2,35	1,12	1,04
Santa Helena De Opón	0,85	1,04	1	7,89	1,34	1,04	0,85	1,04	1	7,88	1,33	1,04	0,85	1,04	1	7,34	1,25	1,04

CONCLUSIONES

- El Análisis Envolvente de Datos es una excelente herramienta para la evaluación de la eficiencia de proyectos de inversión, además su implementación en diferentes aplicaciones lo catalogan como confiable.
- El procedimiento DEA-CBA de los costos medioambientales empleado en este trabajo considera los costos generados por los impactos medioambientales al implementar un proyecto de generación con cualquier tipo de fuente de energía, con los resultados obtenidos por medio de los procedimientos planteados en este proyecto, se tiene una visión más clara del beneficio social obtenido de proyectos de inversión para el aprovechamiento de fuentes renovables.
- Este proyecto se perfila entre otros como una base informativa para la selección de proyectos de inversión a partir de nuevas tecnologías que generen menor impacto ambiental y tengan un beneficio social importante.
- Las características que definen cada técnica DEA, son parte fundamental para definir la idoneidad de un modelo, de esta manera en este proyecto se observa que el modelo con más características favorables es el de Eficiencia-Cruzada y en la segunda posición de siete se encuentra el modelo de Súper-Eficiencia, el cual se escogió en este proyecto por tres puntos importantes: por la practicidad de su formulación, la cantidad de características favorables y la clasificación de la unidades extremadamente eficientes, este último punto es importante ya que los resultados obtenidos por medio de esta técnica identifican la mejor unidad eficiente, donde las posibilidades para que dos o más unidades eficientes tengan la misma puntuación son casi nulas. Lo que reduce en gran medida

los criterios de selección de un proyecto.

- A partir de los resultados obtenidos de la implementación del modelo DEA Super-Eficiencia y DEA-CBA de los costos medioambientales, se obtuvo que los proyectos apropiados según los procedimientos realizados en este trabajo para la provincia de Vélez Santander son la conexión a una red existente y una planta hidráulica. Este proyecto se enfoca en fuentes renovables, bajo este precepto la mejor opción para ser implementada es el proyecto de un sistema hidráulico.

RECOMENDACIONES

- Es importante utilizar fuentes de información especializada del sitio de interés y verificar la veracidad de la información ya que las tecnologías cambian constantemente.
- Para obtener resultados fiables a partir del comportamiento de los factores ambientales presentes en el sitio de interés se debe considerar un periodo de tiempo extenso de más de un año, se recomienda tomar datos en un periodo de tres años de estudio de estos factores.
- Este proyecto es desarrolla como una propuesta para determinar la viabilidad de proyectos de fuentes de energía dentro de un conjunto de proyectos candidatos a ejecutarse en una región. Los resultados obtenidos por medio de los procedimientos acá planteados no están comparados contra ningún procedimiento de las mismas características. Se recomienda contrastar los resultados obtenidos por medio de este procedimiento con un software especializado o procedimiento reconocidos y de iguales características.

BIBLIOGRAFÍA

- ADLER, N., FRIEDMAN, L., AND SINUANY-STERN, Z. 2002a. Review of ranking methods in the data envelopment analysis context. *European Journal of Operational Research* 140:249–265.
- ADLER, N., FRIEDMAN, L., AND SINUANY-STERN, Z. 2002b. Review of ranking methods in the data envelopment analysis context. *European Journal of Operational Research* 140:249 – 265.
- ADLER, N. AND GOLANY, B. 2001. Evaluation of deregulated airline networks using data envelopment analysis combined with principal component analysis with an application to western europe. pp. 18 – 31.
- ANDERSEN AND N.C, P. P. 1986. A procedure for ranking efficient units in data envelopment analysis management science. pp. 1261–1294.
- ANDERSEN, P. AND PETERSEN, N. 1993a. A procedure for ranking efficient units in data envelopment analysis management science. pp. 1261–1294.
- ANDERSEN, P. AND PETERSEN, N. C. 1993b. A procedure for ranking efficient units in data envelopment analysis. pp. 1261–1294.
- ANDERSEN, P. AND PETERSEN, N. C. 1993c. A procedure for ranking efficient units in data envelopment analysis, management science. pp. 1261–1294.

- ASHRAFI, A., JAAFAR, A. B., LEE, L. S., AND BAKAR, M. R. A. 2011a. An enhanced russell measure of super-efficiency for ranking efficient units in data envelopment analysis. pp. 92–96.
- ASHRAFI, A., JAAFAR, A. B., LEE, L. S., AND BAKAR, M. R. A. 2011b. An enhanced russell measure of super-efficiency for ranking efficient units in data envelopment analysis. pp. 92–96.
- AYALA RODRÍGUEZ, Á., CARRILLO CAICEDO, G., AND GALINDO CÁRDENAS, J. 2004 - 2005. Norma técnica de la essa.
- AZADEH, A., GHADERI, S., AND MAGHSOUDI, A. 2008. Location optimization of solar plants by an integrated hierarchical {DEA} {PCA} approach. *Energy Policy* 36:3993 – 4004.
- BARDHAN, I., BOWLIN, W., COOPER, W., AND SUEYOSHI, T. 1996. Models for efficiency dominance in data envelopment analysis. part i: Additive models and med measures. pp. 322–332.
- BESSENT, A. AND BESSENT, E. 1980. Determining the comparative efficiency of schools through data envelopment analysis. *Educational Administration Quarterly* 16:57–75.
- CARLOS, D. M. 2001. Energía eléctrica y medio ambiente. Dilbert Books.
- CHEN, J., DENG, M., AND GINGRAS, S. 2011a. A modified superefficiency measure based on simultaneous input-output projection in data envelopment analysis. pp. 496–504.
- CHEN, J.-X., DENG, M., AND GINGRAS, S. 2011b. A modified measure based on simultaneous input-output in data envelopment analysis, computers, research. pp. 496–504.
- CLAUDIO, A. F. 2009a. energías renovables para el desarrollo sustentable en méxico. pp. 12–capitulo 1.
- CLAUDIO, A. F. 2009b. energías renovables para el desarrollo sustentable en méxico. pp. 18–40 – capitulo 2.
- COELLI, T., RAO, D., AND BATTESE, G. 1998. An Introduction to Efficiency and Productivity Analysis. Kluwer Academic Publishers.
- COLL SERRANO, V., BLASCO, B., AND M., O. 2000. Evaluación De La Eficiencia Mediante El Análisis Envolverte De Datos.
- COOPER, W., SEIFOERD, L., AND ZHU, J. 2003. Data envelopment analysis: History, models and interpretations. red mcombs school of business, university of texas at austin. p. 13.

CREG 2015. quienes somos.

DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA UPME, U. AND JAVERIANA, P. U. 2015. Atlas potencial hidroenergético de Colombia 2015. Unidad de Planeación Minero Energética UPME, Bogotá ,Colombia, 1a ed. edition.

EMA, C. 2012. Determinacion de inversiones y gastos de administración, operación y mantenimiento para la actividad de generación en zonas no interconectadas utilizando recursos renovables.

ENRRIQUEZ, G. 2010. Tecnologías de generación de energía eléctrica.

ESCALANTE HERNANDEZ, H., ORDUZ PRADA, J., ZAPATA, L., HENRY, J., RUIZ, C., ORTEGA, M. C., AND MARTHA, D. 2011. Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia 2010. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. Nivel bibliográfico: MG.

ESCALANTE HERNÁNDEZ, H., ORDUZ PRADA, J., ZAPATA LESMES, H. J., CARDONA RUIZ, M. C., AND DUARTE ORTEGA, M. 2008. Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia. IDEAM.

ESSA 2015. quienes somos essa.

FRIEDMAN AND L., S.-S. 1998. Combining ranking scales and selecting variables in the data envelopment analysis context: The case of industrial branches. pp. 781–791.

FRIEDMAN, L. AND SINUANY-STERN, Z. 1997a. Scaling units via the canonical correlation analysis and the data envelopment analysis. pp. 629–637.

FRIEDMAN, L. AND SINUANY-STERN, Z. 1997b. Scaling units via the canonical correlation analysis and the data envelopment analysis. european journal of operational research. pp. 629–636.

FRIEDMAN, L. AND SINUANY-STERN, Z. 1998. Combining ranking scales and selecting variables in the data envelopment analysis context: The case of industrial branches. computers and operations research. pp. 781–791.

GONZÁLEZ-LONGATT AND M., F. 04 de Octubre de 2004. Tecnologías de generación distribuida: Costos y eficiencia.

HASHIMOTO, A. 1986. A ranked voting system using a dea/ar exclusion model. pp. 600–604.

- HOSSEINZADEH, F., LOTFI, JAHANSHALOO, G. R., KHODABAKHSHI, M., ROSTAMY-MALKHLIFEH, M., MOGHADDAS, Z., AND VAEZ-GHASEMI, M. 2013. A review of ranking models in data envelopment analysis.
- HOUGAARD, J. 1999a. Fuzzy scores of technical efficiency. pp. 529–541.
- HOUGAARD, J. 1999b. Fuzzy scores of technical efficiency. european journal of operational research. pp. 529–541.
- I., B., W.F., B., W.W., C., AND SUBYOSHI, T. 1996. Models for efficiency dominance in data envelopment analysis. part i: Additive models and med measures. journal of the operations research society of japan. pp. 322–332.
- JANNA, C., MARIO, C. C., BOTERO, S. B., AND QUIJANO, R. 2007. Tecnologías de conversión y recuperación de energía:convencionales y nuevas tendencias. primera edición.
- J.M., B., D., B., AND D.K., W. 1996. Measuring the efficiency of prescribing by general practitioners. *The Journal of the Operational Research Society* 47:1443–1451.
- KARSAK, E. 1998. A two-phase robot selection procedure. production planning and control. pp. 675–684.
- KARSAK, E. 1999. A two-phase robot selection procedure. pp. 675–684.
- KUOSMANEN, T. AND KORTELAINEN, M. 2007. Valuing environmental factors in cost-benefit analysis using data envelopment analysis. *Ecological Economics* 62:56 – 65.
- LEDESMA, C. 2009. como funciona una central hidroeléctrica@BOOKLET.
- LHUSURBIL 2015. energía solar fotovoltaica.
- LI, S., JAHANSHALOO, G. R., AND KHODABAKHSHI, M. 2007a. A superefficiency model for ranking efficient units in data envelopment analysis. pp. 638–648.
- LI, S., JAHANSHALOO, G. R., AND KHODABAKHSHI, M. 2007b. A superefficiency model for ranking efficient units in data envelopment analysis, appliedmathematics and computation. pp. 638–648.
- LI, X. AND REEVES, G. 1999. A multiple criteria approach to data envelopment analysis. pp. 507–517.
- MARTÍN, C. D. 2001. energía eléctrica y medio ambiente. Dilbert Books.

- MARTINEZ, A. 2013. Accedido 04-20-2016.
- MEHRABIAN, M. R., ALIREZAEI, G. R., AND JAHANSHAHLOO 1999a. A complete efficiency ranking of decision making units in data envelopment analysis, *Computational Optimization and Applications*.
- MEHRABIAN, S., ALIREZAEI, M., AND JAHANSHAHLOO, G. 1999b. A complete efficiency ranking of decision making units in data envelopment analysis. pp. 261–266.
- MEHRABIAN, S., ALIREZAEI, M. R., AND JAHANSHAHLOO, G. R. 1999c. A complete efficiency ranking of decision making units in data envelopment analysis. pp. 261–266.
- MOSTAJO VEIGA, M., FARINA ÁLVAREZ, P., FERNÁNDEZ-MONTES, M., AND MORALEDA, A. K. 2013. Study on cost and business comparison of renewable vs. non-renewable technologies (re-cost).
- NIELS, A. AND PETERSEN, C. 1993. A procedure for ranking efficient units in data envelopment analysis.
- NOZICK, L., BORDERAS, H., AND MEYBURG, A. 1998. Evaluation of travel demand measures and programs: a data envelopment analysis approach. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 32:331–343.
- NREL 2013a. Accedido 04-20-2016.
- NREL 2013b. A distributed generation renewable energy estimate of costs. Accedido 04-20-2016.
- OLESEN, O. B. AND PETERSEN, N. C. 1995. Incorporating quality into data envelopment analysis: a stochastic dominance approach. *International Journal of Production Economics* 39:117–135.
- PICAZO-TADEO, A. J., GÓMEZ-LIMÓN, J. A., AND REIG-MARTÍNEZ, E. 2011. Assessing farming eco-efficiency: A data envelopment analysis approach. *Journal of Environmental Management* 92:1154 – 1164.
- PIEDRÁHITA, C. A. F. 2007. Upme.
- RAMANATHAN, R. 2001. Comparative risk assessment of energy supply technologies: a data envelopment analysis approach. *Energy* 26:197–203.
- RAO, S. AND RAO, S. 2009. *Engineering Optimization: Theory and Practice*. Wiley.

- S., M., M.R., A., AND G.R, J. 1999. complete efficiency ranking of decision making units in data envelopment analysis. computational optimization and applications. pp. 261–264.
- SCHUSCHNY, A. 2007. El método dea y su aplicación al estudio del sector energético y la emisiones de co2 en américa latina y caribe. *CEPAL-SERIE Estudios estadísticos y prospectivos* 46:51.
- SEXTON, T., SILKMAN, R., AND HOGAN, A. 1986a. Measuring efficiency: An assessment of data envelopment analysis. pp. 73–105.
- SEXTON, T., SILKMAN, R., AND HOGAN, A. 1986b. Measuring efficiency: An assessment of data envelopment analysis. pp. 73–105.
- SEXTON, T., SILKMAN, R., AND HOGAN, A. J. 2002. Data envelopment analysis: critique and extensions, in measuring efficiency: An assessment of data envelopment analysis, r. h. silkman. pp. 73–105.
- SIGNIFICADOS 2015a. erosion.
- SIGNIFICADOS 2015b. ruido.
- SINUANY-STERN, Z., MEHREZ, A., AND BARBOY, A. 1994a. Academic departments efficiency via data envelopment analysis. pp. 543–556.
- SINUANY-STERN AND Z., F. L. 1998. Data envelopment analysis and the discriminant analysis of ratios for ranking units. pp. 470–478.
- SINUANY-STERN, Z. AND FRIEDMAN, L. 1998. Data envelopment analysis and the discriminant analysis of ratios for ranking units. european journal of operational research. pp. 470–478.
- SINUANY-STERN, Z., MEHREZ, A., AND BARBOY, A. 1994b. Academic departments efficiency via data envelopment analysis. computers and operations research. pp. 543–556.
- SINUANY-STERN, Z., MEHREZ, A., AND HADAD, Y. 2000. An ahp/dea methodology for ranking decision making units. pp. 109–124.
- SUEYOSHI, T. 1999a. Data envelopment analysis non-parametric ranking test and index measurement: Slack-adjusted dea and an application to japanese agriculture cooperatives. pp. 315–326.

- SUEYOSHI, T. 1999b. Data envelopment analysis non-parametric ranking test and index measurement: Slack-adjusted dea and an application to japanese agriculture cooperatives. *omega international journal of management science*. pp. 315–326.
- SUPERSERVICIOS 2015. Sspd.
- TONE, K. 2002a. A slacks-based measure of super-efficiency in data envelopment analysis. pp. 32–41.
- TONE, K. 2002b. A slacks-based measure of super-efficiency in data envelopment analysis, *European Journal of Operational Research*.
- TORGERSEN, A., FORSUND, F., AND KITTELSEN, S. 1996a. Slack-adjusted efficiency measures and ranking of efficient units. pp. 379–398.
- TORGERSEN, A., FORSUND, F., AND KITTELSEN, S. 1996b. Slack-adjusted efficiency measures and ranking of efficient units. *the journal of productivity analysis*. pp. 379–398.
- T.R., S., R.H., S., AND A.J., H. 1986. *analysis: The evolution of the state of the art (1978-1995)*.
- TROUTT, M. 1995a. A maximum decisional efficiency estimation principle. pp. 76–82.
- TROUTT, M. 1995b. A maximum decisional efficiency estimation principle. *management science*. pp. 76–82.
- UPME AND IDEAM 2005. *Atlas de radiación solar de Colombia*. UPME and IDEAM, Bogotá DC, Colombia.
- VICENTE COLL SERRANO AND BLASCO, O. M. B. 2006. *evaluación de la Eficiencia Mediante el análisis envolvente de datos*. pagina 30.
- YEH, Q.-J. 1996. The application of data envelopment analysis in conjunction with financial ratios for bank performance evaluation. *Journal of the Operational Research Society* 47:980–988.

ANEXOS

A

INFORMACIÓN UTILIZADA

En este anexo se presentan los datos utilizados en el caso de estudio, estos datos son indicadores de recurso energético, demanda, costos de equipos, impactos ambientales entre otros. Estos datos fueron recopilados de diferentes fuentes especializadas en cada tema y de origen nacional e internacional. Toda la información utilizada tiene su respectiva cita de referencia en cada tabla. La región objeto de estudio en este trabajo es la provincia de Vélez en Santander y las zonas que conforman esta región están limitadas por los municipios que conforman la provincia.

A.1 DATOS DE RECURSO ENERGÉTICO DE LA PROVINCIA DE VÉLEZ

TABLA A.1.: Tabla 24: Distancia Barrancabermeja a municipio

Municipio	Viviendas totales	Viviendas electrifica- das	Viviendas sin elec- trificar	% Cobertura	Distancia en ruta desde Barrancabermeja [km]
Aguada	654	564	90	86,24	230
Albania	1734	1507	227	86,91	317.7
Barbosa	2573	2421	152	94,09	215.7
bolívar	3457	2636	821	76,25	201.8
Chipatá	1528	1110	418	72,64	209
El Peñón	1523	1114	409	73,15	239.5
Florián	1812	1691	121	93,32	251
Guavatá	1461	1392	69	95,28	203.5
Guepsa	1005	905	100	90,05	227
Jesús María	1156	1056	100	91,35	219
La Belleza	2015	1611	404	79,95	243
La Paz	2548	2475	73	97,14	233
Puente Nacional	3324	3217	107	96,78	224
San Benito	1082	924	158	85,40	243
Sucre	2569	2247	322	87,47	212
Vélez	3917	3617	300	92,34	200
Cimitarra	6401	6181	220	96,56	115
Landázuri	2749	2475	274	90,03	145
Puerto Parra	1215	925	290	76,13	78
Santa Helena de Opón	1044	861	183	82,47	321

Fuente: Buscador de Google maps y ESSA

TABLA A.2.: Tabla 25: Recurso energético disponible por cada municipio para Biomasa

Municipio	Cultivos agrícolas [TJ/año]	Cultivos transitorios [TJ/año]	Cultivos permanentes [TJ/año]
Aguada	300	30	300
Albania	300	30	300
Barbosa	300	30	300
bolívar	300	30	300
Chipatá	300	50	300
El Peñón	50	30	10
Florián	300	30	300
Guavatá	300	30	300
Guepsa	300	30	300
Jesús María	150	30	20
La Belleza	300	30	300
La Paz	300	10	300
Puente Nacional	300	30	300
San Benito	300	30	300
Sucre	300	30	300
Vélez	300	30	300
Cimitarra	50	30	20
Landázuri	150	10	50
Puerto Parra	50	30	20
Santa Helena de Opón	300	30	300

Fuente: Atlas del potencial energético de la biomasa residual Colombia

TABLA A.3.: Tabla 26: Densidad de energía eólica a 20 (m) (kWh/m^2)

Municipio	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Aguada	8	8	8	8	5	8	8	5	8	8	8	8
Albania	5	5	8	5	8	5	5	5	8	8	8	8
Barbosa	8	8	8	8	8	8	8	5	3	8	8	8
bolívar	8	8	3	8	5	3	3	3	8	3	8	8
Chipatá	8	8	8	8	5	5	8	5	3	8	8	8
El Peñón	8	5	8	5	5	5	5	5	8	8	8	8
Florián	3	3	3	3	5	3	3	5	8	8	8	8
Guavatá	8	8	8	8	8	8	5	5	3	8	8	8
Guepsa	8	8	8	8	5	5	5	5	8	8	8	8
Jesús María	3	8	8	8	8	5	5	5	8	8	8	8
La Belleza	2	3	5	5	5	5	3	3	8	8	3	8
La Paz	8	8	8	8	5	8	5	5	8	8	8	8
Puente Nacional	8	8	8	8	12	8	8	5	3	3	8	6
San Benito	8	8	8	8	5	8	8	5	3	8	8	8
Sucre	8	5	8	5	8	5	5	5	8	8	3	8
Vélez	8	8	8	8	5	8	5	5	8	8	8	8
Cimitarra	3	3	8	5	5	5	3	3	8	8	3	8
Landázuri	8	8	8	8	5	5	5	5	8	8	8	8
Puerto Parra	2	3	3	5	5	5	5	3	8	8	8	8
Santa Helena de Opón	8	8	8	8	5	5	5	5	8	8	8	8

Fuente: Atlas de viento y energía eólica de Colombia

Tabla A.4.: Tabla 27: Información sobre datos disponibles en [demanda/oferta] de recurso hídrico

Municipio/Recurso	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	
Aguada	2,67	2,23	2,33	1,62	0,74	1,14	2,77	1,74	1,80	1,26	1,01	1,25
Albania	2,17	1,09	2,05	1,75	0,90	1,49	3,94	3,41	1,57	1,27	0,92	0,89
Barbosa	1,11	1,33	1,65	1,34	0,33	0,55	1,37	0,56	0,55	0,36	0,25	0,30
Bolívar	1,93	2,33	2,88	2,33	0,57	0,96	2,39	0,97	0,95	0,63	0,43	0,52
Chipatá	3,45	2,89	3,01	2,10	0,96	1,47	3,58	2,25	2,32	1,63	1,30	1,19
El Peñón	1,13	0,56	1,06	0,91	0,47	0,77	2,04	1,77	0,81	0,66	0,48	0,46
Florián	2,53	1,27	2,39	2,04	1,05	1,73	4,59	3,97	1,82	1,47	1,07	1,04
Guavatá	6,02	7,25	8,97	7,28	1,78	3,00	7,45	3,03	2,97	1,97	1,35	1,62
Guepsa	11,46	9,60	10,01	6,97	3,18	4,90	11,92	7,48	7,71	5,42	4,32	3,95
Jesús María	5,03	6,07	7,50	6,08	1,49	2,51	6,23	2,54	2,48	1,65	1,13	1,35
La Belleza	1,08	0,54	1,02	0,87	0,45	0,74	1,95	1,69	0,78	0,63	0,45	0,44
La Paz	2,25	1,89	1,97	1,37	0,63	0,96	2,34	1,47	1,52	1,07	0,85	0,78
Puente Nacional	6,69	8,06	9,97	8,09	1,97	3,34	8,29	3,37	3,30	2,19	1,50	1,80
San Benito	4,94	4,14	4,32	3,01	1,37	2,11	5,14	3,22	3,33	2,34	1,86	1,79
Sucre	2,19	2,65	3,27	2,65	0,65	1,10	2,72	1,11	1,08	0,72	0,49	0,59
Vélez	2,92	2,44	2,55	1,77	0,81	1,25	3,03	1,90	1,96	1,38	1,10	1,00
Cimitarra	1,12	0,56	1,06	0,90	0,47	0,77	2,03	1,76	0,81	0,65	0,47	0,46
Landázuri	2,79	1,40	2,63	2,25	1,16	1,91	5,06	4,38	2,01	1,63	1,18	1,15
Puerto Parra	1,04	0,53	0,91	0,77	0,42	0,61	1,55	1,42	0,68	0,57	0,50	0,47
Santa Helena de Opón	1,13	1,00	1,09	0,99	0,30	0,57	0,89	0,60	0,57	0,41	0,39	0,40

Fuente: Estudio nacional del agua IDEAM

TABLA A.5.: Tabla 28: Demanda hídrica en cada municipio

Municipio	Dem[m ³ /s]
Aguada	0,02
Albania	0,04
Barbosa	1,17
bolívar	0,11
Chipatá	0,05
El Peñón	0,05
Florián	0,07
Guavatá	0,05
Guepsa	0,01
Jesús María	0,05
La Belleza	0,09
La Paz	0,06
Puente Nacional	0,03
San Benito	0,02
Sucre	0,05
Vélez	0,63
Cimitarra	0,06
Landázuri	0,18
Puerto Parra	0,09
Santa Helena de Opón	0,04

Fuente: Estudio nacional del agua IDEAM

TABLA A.6.: Tabla 29: Datos de recurso solar en (kWh/m^2)(parte 1)

Municipio	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Aguada	4,2	4	4	4	3,5	4
Albania	3,8	3,5	3,5	3,5	3	3,5
Barbosa	4,5	4	4	4	3,5	4
Bolívar	4,5	4	4,5	4	3,8	4
Chipatá	4,5	4	3,5	4	3,5	3,5
El Peñón	4,5	4	4	4	4	4
Florián	4,5	4	4	4	4	4
Guavatá	4,5	4	4	4	3,5	4
Guepsa	4,5	4	4	3,5	3,5	4
Jesús María	4,5	4	4	4	3,5	4
La Belleza	4,5	4	4	4	4	4
La Paz	4,2	4	4	4	3,5	4
Puente Nacional	4,7	4,3	4,5	4,5	4	4
San Benito	4,2	4	4	4	3,5	4
Sucre	4,5	4	4	4	4	4
Vélez	4,5	4	4	4	3,5	4
Cimitarra	4,5	4	4,5	4	4	4,6
Landázuri	4,7	3,5	3,5	4	4	4
Puerto Parra	3,8	4	4	4	4	4,6
Santa Helena de Opón	3,8	4	4	4	4	4

Fuente: Atlas de radiación solar de Colombia

TABLA A.7.: Tabla 30: Datos de recurso solar en (kWh/m^2) (parte 2)

Municipio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Aguada	4,5	4	4	3,5	3,5	4
Albania	4	3,5	3,5	3	3,5	3,5
Barbosa	4,5	4	4	3,5	3,5	4
Bolívar	4,5	4	4	3,8	3,5	4
Chipatá	4	3,5	3,5	3,5	3,5	4
El Peñón	4,5	4	4,5	4	4	4
Florián	4,5	4	4	4	3,5	4
Guavatá	4,5	4	4	3,5	3,5	4
Guepsa	4,5	4	4	3,5	3,5	4
Jesús María	4,5	4	4	3,5	3,5	4
La Belleza	4,5	4	4,5	4	4	4
La Paz	4,5	4	4	3,5	4	4
Puente Nacional	4,5	4	4	4	4	4
San Benito	4,5	4	4	3,5	3,5	4
Sucre	4,5	4	4,5	4	4	4
Vélez	4,5	4	4	3,5	3,5	4
Cimitarra	5,5	4,5	5	4,5	4	3,5
Landázuri	4,5	4	4	4	4	3,5
Puerto Parra	5,5	4,5	5,3	4,5	4	4
Santa Helena de Opón	4,5	4	4	4	4	4

Fuente: Atlas de radiación solar de Colombia

A.2 TOTAL DE VIVIENDAS CON Y SIN SERVICIO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA PROVINCIA DE VÉLEZ

TABLA A.8.: Tabla 31: Información disponible de las viviendas sin electrificar

Municipio	Viviendas totales	Viviendas electrificadas
Aguada	654	564
Albania	1734	1507
Barbosa	2573	2421
Bolívar	3457	2636
Chipatá	1528	1110
El Peñón	1523	1114
Florián	1812	1691
Guavatá	1461	1392
Guepsa	1005	905
Jesús María	1156	1056
La Belleza	2015	1611
La Paz	2548	2475
Puente Nacional	3324	3217
San Benito	1082	924
Sucre	2569	2247
Vélez	3917	3617
Cimitarra	6401	6181
Landázuri	2749	2475
Puerto Parra	1215	925
Santa Helena de Opón	1044	861

Fuente : ESSA

A.3 COSTOS PARA CADA TIPO DE TECNOLOGÍA UTILIZADA CON DISTINTAS CAPACIDADES

TABLA A.9.: Tabla 32: Datos necesarios para determinar el costo nivelado de la energía (parte 1)

Tecnología o tipo de proyecto	Capacidad desde kW	Capacidad hasta kW	Factor de planta	Costos de inversión total instalado <i>USD/kWh</i>	Costos fijos de operación y mantenimiento <i>USD/kWh</i>	Costos variables de operación y mantenimiento <i>USD/kWh</i>	Combustible (en caso de ser usado) <i>USD/kWh</i>	Costo de red BT <i>USD/km</i>	Vida útil [años]
biomasa	0	100	0,65	5,792	0,098	0,00004	0,650	6867,3	30
diésel	0	20	0,65	1,815	0,027	0,003	1,939	6867,3	30
diésel	20	30	0,65	1,815	0,027	0,003	2,331	6867,3	30
diésel	30	40	0,65	1,515	0,027	0,003	2,384	6867,3	30
diésel	40	60	0,65	1,515	0,027	0,003	1,907	6867,3	30
diésel	60	75	0,65	1,2	0,027	0,003	1,950	6867,3	30
diésel	75	125	0,65	1	0,027	0,003	1,750	6867,3	30
diésel	125	150	0,65	1	0,027	0,003	1,751	6867,3	30
diésel	150	200	0,65	1	0,027	0,003	1,733	6867,3	30
diésel	200	250	0,65	1	0,027	0,003	1,729	6867,3	30
diésel	250	300	0,65	1	0,027	0,003	1,725	6867,3	30
diésel	300	500	0,65	1	0,027	0,003	1,718	6867,3	30
diésel	500	1000	0,65	0,92	0,027	0,003	1,710	6867,3	30
diésel	1000	1500	0,65	0,92	0,027	0,003	1,708	6867,3	30

Fuente: -Distributed generation renoWable energy estimate of costs -levelized cost of electricity renoWable energy technologies study -plan indicativo de expansión de cobertura de energía eléctrica UPME -tecnologías de generación distribuida costos y eficiencia

TABLA A.10.: Tabla 33: Datos necesarios para determinar el costo nivelado de la energía (parte 2)

Tecnología o tipo de proyecto	Capacidad desde [kW]	Capacidad hasta [kW]	Factor de planta	Costos de inversión total instalado [USD/kW]	Costos fijos de operación y mantenimiento [USD/kWh]	Costos variables de operación y mantenimiento [USD/kWh]	Combustible (en caso de ser usado) [USD/kWh]	Costo de red BT [USD/km]	Vida útil [años]
eolica	0	10	0,35	7,645	0,04	0	0	6867,3	30
eolica	10	100	0,35	6,118	0,035	0	0	6867,3	30
eolica	100	1000	0,35	3,751	0,031	0	0	6867,3	30
picocentrales (a filo de agua)	0,5	5	0,3	3	0,03146	0	0	6867,3	30
microcentrales (a filo de agua)	5	50	0,3	3	0,03147	0	0	6867,3	30
minicentrales (a filo de agua)	50	500	0,3	3	0,03148	0	0	6867,3	30
pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) (a filo de agua)	500	10000	0,3	3	0,03149	0	0	6867,3	30
centrales hidroeléctricas (CH) (presa)	10000	20000	0,3	2,5	0,0205	0	0	6867,3	30
red existente	0	1000	1	3	0,021	0	0	6867,3	30
solar FV	0	10	0,25	9,46	0,021	0	0	6867,3	30
solar FV	10	100	0,25	7,24	0,019	0	0	6867,3	30
solar FV	100	1000	0,25	4,9	0,0167	0	0	6867,3	30

A.4 VALORACIÓN DE IMPACTOS MEDIOAMBIENTALES PARA CADA TECNOLOGÍA

TABLA A.11.: Tabla 34: Matriz de impactos medio ambientales

Tipo de impacto\Tecnología	Biomasa	Diésel	Eólica	Hidráulica	Red	FV	Térmica solar	Carbón
Acidificación	3	2	2	3	1	3	4	5
CO2	1	2	1	2	1	1	1	5
CH4	5	2	2	2	1	3	3	3
Partículas materiales pesados	2	3	1	3	2	2	3	3
Metales pesados	2	3	1	3	3	1	2	3
Almacenamiento de residuos	2	2	4	3	3	1	2	3
Catástrofes	1	3	5	3	2	1	3	2
Contaminación visual	2	2	3	3	1	3	4	3
Ruido	1	2	1	2	1	1	1	2
Terreno ocupado	2	2	2	5	2	1	2	4
Seguridad y salud humana	1	2	3	3	4	2	3	3
Modificación del hábitat	2	2	4	5	2	2	3	4
Erosión	1	1	4	3	1	1	2	5
Perforaciones	2	1	2	3	2	1	1	5
Desplazamiento de familias	2	2	3	4	1	1	2	3
Alteración de la calidad de H2O	3	2	3	3	1	3	4	3

Fuente: Energías renovables, <http://WWW.energiasrenovablesinfo.com/solar/impacto-medioambiental-energia-solar>

B

ASPECTOS FÍSICOS PARA LA
IMPLEMENTACIÓN DE TECNOLOGÍAS
RENOVABLES

A continuación se muestran los códigos de programación utilizados para determinar los resultados de la mejor opción de proyecto dentro de la región considerada.

B.1 ADAPTACIÓN DE LOS DATOS INICIALES DE DEMANDA ENERGÉTICA Y RECURSO ENERGÉTICO

```
1 import openpyxl
2 import pandas as pd
3 from pandas import excelwriter
4 from pandas import excelfile
5 import math
6 from itertools import izip
7
8 # {1} #### documento de entrada y de salida #####
9
10 name_doc_in='recurso_demanda.xlsx'
11 #name_sheet_in='re_solar'
12 name_doc_out='inputs.xlsx'
13 name_sheet_out='inputs'
14
15 ###parametros generales para operaciones en la conversion de los datos###
16 num_inputs=2
17 tecnologias=['r_biomasa','r_diesel','r_eolico','r_hidraulico','r_red',
18 'r_solar','demanda']
19 num_tecnologias=len(tecnologias)
20
21 e_base=3154.0# [kwh/año]
22 meses=12
23 t=8760.0#[h/año]
24 pueblos=range(1,21)#['la_aguada','albania','barbosa','bolivar',
25 'chipata','el_penon','florian','guavata','guespa','jesus_maria',
26 'la_belleza','la_paz','puente_nacional','san_benito','_sucre',
27 'velez','cimitarra','landazuri','puerto_parra','santa_helena_de_pon']
28 num_pueblos=len(pueblos)
29
```

```

30 #####parametros especificos conversion de los datos#####
31
32 #_____biomasa
33
34 rb_base=float(e_base*3.6*(10**6)/(10**12))#[ t j /año]
35 efi_biom=0.5
36 #_____diesel
37
38 efi_die=0.4
39 #_____eolico
40
41 altura=20#[m]
42 area_de_barrido=10 #[m2]
43 efi_eol=0.65
44 re_base=float(e_base*1000/(area_de_barrido*t))#[w/m2]
45
46 #_____hidraulico
47
48 ro=1000#[kg/m3]
49 g=9.8#[m/s2]
50 altura_salto=5.0#[m]
51 efi_h=0.75#eficiencia
52 log_cause=500.0#[m]-----logitud de cause utilizado
53 pendiente=[0.01, 0.01, 0.01, 0.01, 0.01, 0.01, 0.01, 0.01, 0.01, 0.01,
54           0.02, 0.01, 0.01, 0.01, 0.01, 0.01, 0.01, 0.01, 0.02, 0.01]#[m/m]
55 list_alturas=[5.00, 5.00, 6.00, 5.00, 5.00, 5.00, 5.00, 5.00, 6.00,
56             5.00, 8.00, 5.00, 5.00, 5.00, 5.00, 5.00, 5.00, 5.00, 7.50, 5.00]
57 pot_h_base=e_base*1000/t#[w] -----potencia hidraulica base
58
59 #_____solar
60
61 area_pv=50 #[m2]
62 rs_base=float(e_base/(t*area_pv))#[w/m2]
63 rs_base
64 efi_sol=0.15

```

```
65
66 #_____demanda
67
68 aparato_de_mayor_potencia=1200 #[va]
69 area_de_vivienda=50#[m2]
70 factor_de_potencia=0.9
71
72 ##### guardaar datos base #####
73 dats_rec=[]
74 for t in range(num_tecnologias):
75     df = pd.read_excel(name_doc_in, sheetname=tecnologias[t])
76     filas =int(len(df.index)+1)
77     columnas= int(len(df.columns))
78
79     doc = openpyxl.load_workbook(name_doc_in)
80     doc.get_sheet_names()
81     [tecnologias[t]]
82     hoja = doc.get_sheet_by_name(tecnologias[t])
83     matrix=[]
84     for i in range(filas):
85         matrix.append([0]*columnas)
86         for f in range(filas):
87             for c in range(columnas):
88                 matrix[f][c]=hoja.cell(row=f, column=c).value
89
90     dats_rec.append(matrix)
91
92 #print dats_rec[0][5][1:]
93 ##### input uno #####
94 #operaciones para datos de biomasa
95 list_ekb_max=[]
96 for q in range(1,num_pueblos+1):
97     rb_sum=sum(dats_rec[0][q][1:])
98     ekb=e_base*efi_biom*rb_sum/rb_base
99     list_ekb_max.append(ekb)
```

```
100
101 ekb_max=max( list_ekb_max)
102 #---> normalizado
103 b_nor=[]
104 for w in range(num_pueblos):
105     b_nor.append(list_ekb_max[w]/ekb_max)
106 #print b_nor
107
108 #operaciones para datos de diesel
109 list_ekd_max=[]
110 for e in range(1,num_pueblos+1):
111     ekd=dats_rec[1][e][3]*e_base*efi_die*(1.0/dats_rec[1][e][5])
112     list_ekd_max.append(ekd)
113
114 ekd_max=max( list_ekd_max)
115 #---> normalizado
116 d_nor=[]
117 for r in range(num_pueblos):
118     d_nor.append(round(list_ekd_max[r]/ekd_max,2))
119 print d_nor
120
121 #operaciones para datos de eolico
122 mat_eke=[]
123 for t in range(num_pueblos):
124     mat_eke.append([0]*meses)
125 for f in range(num_pueblos):
126     for c in range(meses):
127         mat_eke[f][c]=round(dats_rec[2][f+1][c+1]*efi_eol*e_base/re_base,2)
128
129 ##---> normalizado
130 list_eke=[]
131 for y in range(num_pueblos):
132     list_eke.append(sum(mat_eke[y]))
133 e_nor=[]
134 for u in range(num_pueblos):
```

```
135     e_nor.append(list_eke[u]/max(list_eke))
136     #print e_nor
137
138 #operaciones para datos de hidraulico
139
140 mat_reh=[]
141 for i in range(num_pueblos):
142     mat_reh.append([0]*meses)
143 for f in range(num_pueblos):
144     for c in range(meses):
145         mat_reh[f][c]=round(dats_rec[3][f+1][14]*
146 100/dats_rec[3][f+1][c+2],2) print mat_reh[19]
147
148 list_q_base=[]
149 for p in range(num_pueblos):
150     list_q_base.append(pot_h_base/float(ro*g*list_alturas[p]*efi_h))
151 #print list_q_base
152
153 mat_ekh=[]
154 for o in range(num_pueblos):
155     mat_ekh.append([0]*meses)
156 for f in range(num_pueblos):
157     for c in range(meses):
158         mat_ekh[f][c]=round(mat_reh[f][c]*
159 e_base/list_q_base[f],2)
160 list_acumulado_anual=[]
161 for a in range(num_pueblos):
162     list_acumulado_anual.append(sum(mat_ekh[a]))
163 #print list_acumulado_anual
164 h_nor=[]
165 for u in range(num_pueblos):
166     h_nor.append(list_acumulado_anual[u]/max(list_acumulado_anual))
167     #print h_nor
168
169 #operaciones para datos de red existente
```

```

170
171 list_ekr=[]
172 for i in range(num_pueblos):
173     list_ekr.append(float(round(dats_rec[4][i+1][3]*e_base,2)))
174 r_nor=[]
175 for u in range(num_pueblos):
176     r_nor.append(list_ekr[u]/max(list_ekr))
177     #print r_nor
178
179 #operaciones para datos de recurso solar
180
181 mat_eks=[]
182 for x in range(num_pueblos):
183     mat_eks.append([0]*meses)
184
185 for f in range(num_pueblos):
186     for c in range(meses):
187         mat_eks[f][c]=round(dats_rec[5][f+1][c+1]*e_base/rs_base,2)
188 #print mat_eks[0]
189 list_eks=[]
190 for u in range(num_pueblos):
191     list_eks.append(sum(mat_eks[u])*efi_sol)
192 #print list_eks
193 s_nor=[]
194 for u in range(num_pueblos):
195     s_nor.append(list_eks[u]/max(list_eks))
196 ##### input dos #####
197
198 #operaciones para datos de demanda energetica
199 columnas=num_tecnologias
200 #projects=['nombre.pueblo', 'p.biomasa', 'p.diesel', 'p.eolico',
201 'p.hidraulico', 'p.red_exist', 'p.solar']
202 #projects=['s_pueblo', 'proy0', 'proy1', 'proy2', 'proy3', 'proy4', 'proy5']
203 titulos=['inputs_pueblo', 'proy0', 'proy1', 'proy2', 'proy3', 'proy4', 'proy5']
204 dos=[2]*num_pueblos

```

```
205 unos=[1]*num_pueblos
206 list_dem=[]
207 for q in range(num_pueblos):
208     numero_de_viviendas=dats_rec[6][q+1][1]-dats_rec[6][q+1][2]
209     fac_diversidad=1/(0.2+0.8*math.exp((1-numero_de_viviendas)/6))
210     dmax_rural=((aparato_de_mayor_potencia+(32*area_de_vivienda*0.5))*
211     numero_de_viviendas*factor_de_potencia)/fac_diversidad
212     list_dem.append(dmax_rural*t/1000)
213     print "lista_de_demanda", list_dem, len(list_dem)
214
215 mat_dem=[]
216 for b in range(num_pueblos):mat_dem.append(list_dem)
217 #mat_dem.insert(0,dos)
218 mat_dem.insert(0,pueblos)
219
220 #print mat_dem[4]#####
221 mat_recurso=[pueblos, b_nor, d_nor, e_nor, h_nor, r_nor, s_nor ]
222 filas =len(mat_recurso)
223 columnas= len(mat_recurso[0])
224 matrix=[]
225 for i in range(filas):
226     matrix.append([0]*columnas*2)
227 #print matrix[1:5]
228 for f in range(filas):
229     for c in range(columnas*2):
230         if c%2==0:
231             matrix[f][c]=mat_recurso[f][c//2]
232         elif c%2!=0:
233             matrix[f][c]=mat_dem[f][c//2]
234
235 #print len(matrix[0])
236 #print len(matrix)
237 dicxout={}
238 for x,y in izip(titulos, range(columnas+1)):
239     dicxout[x]=matrix[y]
```

240

241 *#print dicxout[projects[7]]*

242 *##### exporta datos a hoja de excel #####*

243 `datxout = pd.dataframe(dicxout)`

244 `writer = pd.excelwriter(name_doc_out, engine='xlsxwriter')`

245 `datxout.to_excel(writer, sheet_name=name_sheet_out)`

246 `writer.save()`

247 **print** "listos_los_inputs"

B.2 ADAPTACIÓN DE LOS DATOS INICIALES DE IMPACTOS AMBIENTALES Y BENEFICIO ECONÓMICO

```
1 import openpyxl
2 import pandas as pd
3 from pandas import excelwriter
4 from pandas import excelfile
5 import math
6 from itertools import izip
7
8
9 name_doc_in='impactos_beneficios.xlsx'
10 name_sheet_in=['impactos','costos','demanda']
11 num_sheet=len(name_sheet_in)
12
13 # {1} ### valores para configurar las tablas de outputs ###
14 ----- zonas o poblaciones-----
15 pueblos=range(1,21)#['la aguada','albania','barbosa','bolivar',
16 'chipata','el_penon','florian','guavata','guepsa','jesus_maria',
17 la belleza','la paz','puente nacional','san benito',
18 sucre','velez','cimitarra','landazuri','puerto_parra',
19 'santa_helena_de_apon']
20 num_pueblos=len(pueblos)
21 dos=[2]*num_pueblos
22 unos=[1]*num_pueblos
23 num_proyectos=6
24 e_base=3154.0# [kwh/año]
25 meses=12
26
27 #-----demanda-----
28 aparato_de_mayor_potencia=1200 #[va]
29 area_de_vivienda=50#[m2]
30 factor_de_potencia=0.9
31
32 #----distancias redes de distribucion-----
```

```

33
34 red1=1#      kilometro de red
35 red2=5#      extension total de la distribucion
36 red3=10#     en un proyecto
37 num_red=len ([red1 ,red2 ,red3 ])
38 #-----configuracion para costos -----
39
40 porcentaje_oymf=0.01
41 porcentaje_oymv=0.001
42 total_costo_red=1+porcentaje_oymf+porcentaje_oymv
43 costo_red_bt=6867.3*total_costo_red#[usd/km]
44 costo_red_mt=6000*total_costo_red#[usd/km]
45 tiempo_duracion=30#[years]
46 t=8760.0#[h/año]
47 costo_kwh=2 #usd
48
49 #-----costos redes de distribucion-----
50
51 costo_de_red1=costo_red_bt*red1#[usd]
52 costo_de_red2=costo_red_bt*red2#[usd]
53 costo_de_red3=costo_red_bt*red3#[usd]
54
55 #-----tasa de interes-----
56 dtf=0.0739
57 ##### ingreso y organizacion de datos #####
58 ##### en listas en tres dimenciones: dats_outputs[][][] #####
59 #--- impactos, costos de las tecnologias y demanda-----
60 dats_outputs=[]
61 for et in range(num_sheet):
62     dfout = pd.read_excel(name_doc_in, sheetname=name_sheet_in[et])
63     filas =int(len(dfout.index)+1)
64     columnas= int(len(dfout.columns))
65     docout = openpyxl.load_workbook(name_doc_in)
66     docout.get_sheet_names()
67     [name_sheet_in[et]]

```

```
68     hojaout = docout.get_sheet_by_name(name_sheet_in[et])
69
70     mat=[]
71     for i in range(filas):
72         mat.append([0]*columnas)
73     for f in range(filas):
74         for c in range(columnas):
75             mat[f][c]=hojaout.cell(row=f , column=c).value
76     dats_outputs.append(mat)
77 #print dats_outputs[0][17][:]
78
79 #-----cambio de filas por columnas para -----
80 #-----especificar cada tipo de tecnologia-----
81 qw=dats_outputs[1]
82 fxc=[]
83 qwe=[]
84 k=0
85 while k<len(qw[0]):
86     for j in range(len(qw)):
87         for i in range(len(qw[0])):
88             if len(qwe)!=len(qw):
89                 xtempx=qw[j][k]
90             else:
91                 qwe=[]
92             qwe.append(xtempx)
93         fxc.append(qwe)
94         k=k+1
95
96 #---se agrupan las tecnologias de los datos de costos-----
97 #---donde: b: biomasa, d: diesel, e: eolica, h: hidraulica---
98 #---r: red existente, s: solar fotovoltaica-----
99
100 b1=fxc[10].index('b')-1
101 b2=fxc[10].count('b')+b1
102 d1=fxc[10].index('d')-1
```

```

103 d2=fxc[10].count('d')+d1
104 e1=fxc[10].index('e')-1
105 e2=fxc[10].count('e')+e1
106 h1=fxc[10].index('h')-1
107 h2=fxc[10].count('h')+h1
108 r1=fxc[10].index('r')-1
109 r2=fxc[10].count('r')+r1
110 s1=fxc[10].index('s')-1
111 s2=fxc[10].count('s')+s1
112
113 #print fxc[10][b1:b2]
114 #print fxc[10][d1:d2]
115 #print fxc[10][e1:e2]
116 #print fxc[10][h1:h2]
117 #print fxc[10][r1:r2]
118 #print fxc[10][s1:s2]
119
120 #--numero de filas y columnas de la matriz de datos-----
121 #--donde: "filas2" corresponde a la cantidad de filas de ---
122 los datos ingresados de impactos, y "columnas2" a el numero
123 de columnas de los mismos datos; "filas3" y "columnas3"
124 corresponden respectivamente a los datos ingresados de costos---
125 filas2=len(dats_outputs[0])
126 columnas2=len(dats_outputs[0][0])
127 filas3=len(dats_outputs[1])
128 columnas3=len(dats_outputs[1][0])
129
130 #print "impactos", filas2, columnas2
131 #print "costos", filas3, columnas3
132
133 # {3} ### calculo de la demanda electrica para cada poblacion
134 con datos suministrados por la essa, y segun metodologia
135 establecida ,tambien por la essa #####
136
137 list_dem=[]

```

```
138 for q in range(num_pueblos):
139 numero_de_viviendas=dats_outputs[2][q+1][1]-dats_outputs[2][q+1][2]
140 fac_diversidad=1/(0.2+0.8*math.exp((1-numero_de_viviendas)/6))
141 dmax_rural=((aparato_de_mayor_potencia+(32*area_de_vivienda*0.5))*
142 numero_de_viviendas*factor_de_potencia)/fac_diversidad
143
144     list_dem.append(dmax_rural/1000)
145
146 #print list_dem
147
148 {4} sumatoria de impactos medioambientales por cada tecnologia ##
149 ###y asignacion del respectivo valor para cada poblacion ##
150
151 mat1=[0]*(columnas2-1)
152 mat2=[]
153 for f in range(filas2-1):
154     for i, j in izip(dats_outputs[0][f+1][1:], mat1):
155         mat2.append(i+j)
156         mat1=mat2
157 #---ac se realiza un ajuste de los impactos, de manera---
158 #---que el mayor impacto tenga la minima valoracion---
159     mat2=[]
160 list_impactos=[]
161 for p in range(len(mat1)):
162     list_impactos.append(round(1.0/mat1[p],4))
163
164 #print list_impactos, len(list_impactos)
165
166 mat_impacts=[]
167 for v in range(num_proyectos):
168     itemp=[list_impactos[v]]*num_pueblos
169     mat_impacts.append(itemp)
170 #mat_impacts.insert(0,unos)
171 mat_impacts.insert(0,pueblos)
172
```

```

173 #print mat_impacts
174 ##### beneficio economico #####
175 #--costos de inversion
176
177 costos_anuales1=[]
178 costos_anuales2=[]
179 costos_anuales3=[]
180 mat_costos_anuales=[costos_anuales1 ,costos_anuales2 ,costos_anuales3]
181 energia_gen_anual=[]
182
183 # suma de : la inversion inicial , mas el costo total
184 de la inversion de la red mas costos de o&m fijos y
185 les y costo de combustible de ser necesario
186
187 for p in range(1,filas3): #listas con las sumatiras de todos los
188 valores por cada tecnologia
189
190 costos_anuales1.append(dats_outputs [1][p][4]* dats_outputs [1][p][2]+
191 costo_de_red1+ dats_outputs [1][p][2]* dats_outputs [1][p][3]* t*
192 (dats_outputs [1][p][5]+ dats_outputs [1][p][6]+ dats_outputs [1][p][7]))
193
194 costos_anuales2.append(dats_outputs [1][p][4]* dats_outputs [1][p][2]+
195 costo_de_red2+ dats_outputs [1][p][2]* dats_outputs [1][p][3]* t*
196 dats_outputs [1][p][5]+ dats_outputs [1][p][6]+ dats_outputs [1][p][7]))
197
198 costos_anuales3.append(dats_outputs [1][p][4]* dats_outputs [1][p][2]+
199 costo_de_red3+ dats_outputs [1][p][2]* dats_outputs [1][p][3]* t*
200 (dats_outputs [1][p][5]+ dats_outputs [1][p][6]+ dats_outputs [1][p][7]))
201 energia_gen_anual.append(dats_outputs [1][p][2]* dats_outputs [1][p][3]* t)
202 #kwh
203 #print costos_anuales1 , "cantidad" , len( costos_anuales1)
204 #print "energia gen" , energia_gen_anual , len(energia_gen_anual) , filas3
205
206 list_sum_a1=[]
207 list_sum_a2=[]

```

```
208 list_sum_a3=[]
209 list_sum_e=[]
210
211 #print "lista a1 ", costos_anuales1, len(costos_anuales1)
212 #-----sumatorias lcoe vpn costos-----
213 for i in range(1,filas3):
214     time=tiempo_duracion
215     x=0
216     sum_a1=0
217     sum_a2=0
218     sum_a3=0
219     sum_e=0
220     for x in range(time):
221         sum_a1=(costos_anuales1[i-1]/(1+dtf)**x)+sum_a1
222         sum_a2=(costos_anuales2[i-1]/(1+dtf)**x)+sum_a2
223         sum_a3=(costos_anuales3[i-1]/(1+dtf)**x)+sum_a3
224         sum_e=(energia_gen_anual[i-1]/(1+dtf)**x)+sum_e
225     list_sum_a1.append(sum_a1)
226     list_sum_a2.append(sum_a2)
227     list_sum_a3.append(sum_a3)
228     list_sum_e.append(sum_e)
229
230     x=0
231     sum_a1=0
232     sum_a2=0
233     sum_a3=0
234     sum_e=0
235 print "energy", list_sum_e, len(list_sum_e)
236 mat_sum_a=[list_sum_a1,list_sum_a2,list_sum_a3]
237 mat_lcoe=[]
238 mat_ben=[]
239 mat_ben1=[]
240 mat_ben2=[]
241
242 #print "vpn costos", list_sum_a1, "len", len(list_sum_a1)
```

```
243 #print "energia", list_sum_e, len(list_sum_e)
244
245 for a in range(num_red):
246     mat_lcoe.append([0]*(filas3-1))
247     mat_ben.append([0]*(filas3-1))
248     mat_ben1.append([0]*(filas3-1))
249     mat_ben2.append([0]*(filas3-1))
250
251 #-----formulacion para calcular lcoe-----
252 for i in range(num_red):
253     for g in range(filas3-1):
254         mat_lcoe[i][g]=(mat_sum_a[i][g])/list_sum_e[g]
255 #print len(mat_lcoe[0])
256 print "lcoe", mat_lcoe[2], len(mat_lcoe)
257 for i in range(num_red):
258     for g in range(filas3-1):
259         mat_ben[i][g]=costo_kwh-mat_lcoe[i][g]
260 #print "matben", mat_ben
261 for i in range(num_red):
262     for g in range(filas3-1):
263         mat_ben1[i][g]=abs(min(mat_ben[i]))+mat_ben[i][g]
264
265 for i in range(num_red):
266     for g in range(filas3-1):
267         mat_ben2[i][g]=mat_ben1[i][g]/max(mat_ben1[i])
268 #print mat_ben[0]
269
270 list_biomasa=[]
271 list_hidraulica=[]
272 list_solar=[]
273 list_red=[]
274 list_eolica=[]
275 list_diesel=[]
276
277 for i in range(num_red):
```

```
278 list_biomasa.append(max(mat_ben2[i][b1:b2]))
279 list_hidraulica.append(max(mat_ben2[i][h1:h2]))
280 list_solar.append(max(mat_ben2[i][s1:s2]))
281 list_red.append(max(mat_ben2[i][r1:r2]))
282 list_diesel.append(max(mat_ben2[i][d1:d2]))
283 list_eolica.append(max(mat_ben2[i][e1:e2]))
284 #print list_diesel
285
286 mat_tecnologias=[list_biomasa , list_diesel , list_hidraulica ,
287 list_eolica , list_red , list_solar ]
288 #print mat_tecnologias
289
290 mat_beneficios1 =[]
291 mat_beneficios2 =[]
292 mat_beneficios3 =[]
293 for j in range(num_proyectos):
294     for i in range(num_red):
295         if i==0:
296             ixtemp=[mat_tecnologias[j][i]*num_pueblos
297             mat_beneficios1.append(ixtemp)
298         elif i==1:
299             iytemp=[mat_tecnologias[j][i]*num_pueblos
300             mat_beneficios2.append(iytemp)         elif i==2:
301             iztemp=[mat_tecnologias[j][i]*num_pueblos
302             mat_beneficios3.append(iztemp)
303
304
305 #mat_beneficios1.insert(0,dos)
306 #mat_beneficios2.insert(0,dos)
307 #mat_beneficios3.insert(0,dos)
308 mat_beneficios1.insert(0,pueblos)
309 mat_beneficios2.insert(0,pueblos)
310 mat_beneficios3.insert(0,pueblos)
311 ##### vpn de impactos #####
312 mat_vpn_impactos=[]
```

```

313 for i in range(filas2 - 1):
314     mat_vpn_impactos.append([0]*(columnas2 - 1))
315
316 for f in range(1,filas2):
317     for c in range(1,columnas2):
318         x=0
319         su_tecnologias=0
320         for x in range(tiempo_duracion)
321 sum_tecnologias=dats_outputs[0][f][c]/(1 + dtf)**x+sum_tecnologias
322     mat_vpn_impactos[f - 1][c - 1]=sum_tecnologias
323     x=0
324     sum_tecnologias=0
325
326 #print mat_vpn_impacto
327
328 -----demanda como referencia de carga-----
329 list_dem=[]
330 for q in range(num_pueblos):
331     numero_de_viviendas=dats_outputs[2][q+1][1] - dats_outputs[2][q+1][2]
332     fac_diversidad=1/(0.2+0.8*math.exp( (1 - numero_de_viviendas)/6))
333     dmax_rural=((aparato_de_mayor_potencia+(32*area_de_vivienda*0.5))*
334     numero_de_viviendas*factor_de_potencia)/ fac_diversidad
335     list_dem.append(dmax_rural/1000)
336
337 #print "lista de demanda", list_dem
338
339 -----creacion de listas de potencia de los equipos-----
340 list_b=[]
341 list_d=[]
342 list_e=[]
343 list_h=[]
344 list_r=[]
345 list_s=[]
346 #----- factor de planta-----
347 fp_b=[]

```

```
348 fp_d=[]
349 fp_e=[]
350 fp_h=[]
351 fp_r=[]
352 fp_s=[]
353 #-- costos vpn de operacion del equipo mas el tipo de red 1--
354 costos_b1=[]
355 costos_d1=[]
356 costos_e1=[]
357 costos_h1=[]
358 costos_r1=[]
359 costos_s1=[]
360 #-- costos vpn de operacion del equipo mas el tipo de red 2---
361 costos_b2=[]
362 costos_d2=[]
363 costos_e2=[]
364 costos_h2=[]
365 costos_r2=[]
366 costos_s2=[]
367 #--- costos vpn de operacion del equipo mas el tipo de red 3--
368 costos_b3=[]
369 costos_d3=[]
370 costos_e3=[]
371 costos_h3=[]
372 costos_r3=[]
373 costos_s3=[]
374
375 for i in range(b1,b2):
376     list_b.append(dats_outputs[1][i+1][2])
377     fp_b.append(dats_outputs[1][i+1][3])
378     costos_b1.append(list_sum_a1[i])
379     costos_b2.append(list_sum_a2[i])
380     costos_b3.append(list_sum_a3[i])
381 for i in range(d1,d2):
382     list_d.append(dats_outputs[1][i+1][2])
```

```

383     fp_d.append(dats_outputs[1][i+1][3])
384     costos_d1.append(list_sum_a1[i])
385     costos_d2.append(list_sum_a2[i])
386     costos_d3.append(list_sum_a3[i])
387     for i in range(e1,e2):
388         list_e.append(dats_outputs[1][i+1][2])
389         fp_e.append(dats_outputs[1][i+1][3])
390         costos_e1.append(list_sum_a1[i])
391         costos_e2.append(list_sum_a2[i])
392         costos_e3.append(list_sum_a3[i])
393     for i in range(h1,h2):
394         list_h.append(dats_outputs[1][i+1][2])
395         fp_h.append(dats_outputs[1][i+1][3])
396         costos_h1.append(list_sum_a1[i])
397         costos_h2.append(list_sum_a2[i])
398         costos_h3.append(list_sum_a3[i])
399     for i in range(r1,r2):
400         list_r.append(dats_outputs[1][i+1][2])
401         fp_r.append(dats_outputs[1][i+1][3])
402         costos_r1.append(list_sum_a1[i])
403         costos_r2.append(list_sum_a2[i])
404         costos_r3.append(list_sum_a3[i])
405     for i in range(s1,s2):
406         list_s.append(dats_outputs[1][i+1][2])
407         fp_s.append(dats_outputs[1][i+1][3])
408         costos_s1.append(list_sum_a1[i])
409         costos_s2.append(list_sum_a2[i])
410         costos_s3.append(list_sum_a3[i])
411     # organizacion de los items anteriores en listas de listas
412     mat_pot_equipos=[list_b ,list_d , list_e , list_h , list_r , list_s]
413     mat_factor_de_planta=[fp_b ,fp_d,fp_e , fp_h , fp_r , fp_s]
414     mat_costos1=[costos_b1 ,costos_d1 ,costos_e1 ,costos_h1 ,costos_r1 ,costos_s1]
415     mat_costos2=[costos_b2 ,costos_d2 ,costos_e2 ,costos_h2 ,costos_r2 ,costos_s2]
416     mat_costos3=[costos_b3 ,costos_d3 ,costos_e3 ,costos_h3 ,costos_r3 ,costos_s3]
417

```

```
418 #print "equipos", mat_pot_equipos
419
420 #---- si la potencia de los equipos es mayor o igual a la demanda----
421 #---- entonces se le asigna la planta inmediatamente superior a ----
422 #---- dicha carga dando como resultado una matriz de plantas
423 #---- asignadas para las diferentes cargas en todos los municipios
424 #---- las asignaciones se dan debido a las propuestas de plantas
425 #---- o equipos disponibles-----
426
427 list_dem.append(list_dem[len(list_dem)-1])
428 #-- lista de listas de la potencia asignada a cada pueblo por
429 cada tecnologia segun equipos disponiibles
430 mat_pot_asociada=[]
431 #-- energia asogiada a esa potencia
432 energia_anual=[]
433 #---- costos asociados a los equipos seleccionados
434 mat_costos1_asociados=[]
435 mat_costos2_asociados=[]
436 mat_costos3_asociados=[]
437 for i in range(len(list_dem)):
438     mat_pot_asociada.append([0]*(len(mat_pot_equipos)))
439 for e in range(len(list_dem)):
440     energia_anual.append([0]*(len(mat_pot_equipos)))
441 for c1 in range(len(list_dem)):
442     mat_costos1_asociados.append([0]*(len(mat_pot_equipos)))
443 for c2 in range(len(list_dem)):
444     mat_costos2_asociados.append([0]*(len(mat_pot_equipos)))
445 for c3 in range(len(list_dem)):
446     mat_costos3_asociados.append([0]*(len(mat_pot_equipos)))
447 for f in range(len(list_dem)-1):
448     for c in range(len(mat_pot_equipos)):
449         x=0
450         while x<len(mat_pot_equipos[c]):
451             if list_dem[f]<mat_pot_equipos[c][x]<list_dem[f+1]:
452                 mat_pot_asociada[f][c]=mat_pot_equipos[c][x]
```

```
453 energia_anual[f][c]=mat_factor_de_planta[c][x]*
454 mat_pot_equipos[c][x]*t
455     mat_costos1_asociados[f][c]=mat_costos1[c][x]
456     mat_costos2_asociados[f][c]=mat_costos2[c][x]
457     mat_costos3_asociados[f][c]=mat_costos3[c][x]
458     x=len(mat_pot_equipos[c])
459     elif mat_pot_equipos[c][x]==list_dem[f+1]:
460     mat_pot_asociada[f][c]=mat_pot_equipos[c][x]
461     energia_anual[f][c]=mat_factor_de_planta[c][x]*
462     mat_pot_equipos[c][x]*t
463     mat_costos1_asociados[f][c]=mat_costos1[c][x]
464     mat_costos2_asociados[f][c]=mat_costos2[c][x]
465     mat_costos3_asociados[f][c]=mat_costos3[c][x]
466     x=len(mat_pot_equipos[c])
467     elif mat_pot_equipos[c][x]>list_dem[f]:
468     mat_pot_asociada[f][c]=mat_pot_equipos[c][x]
469     energia_anual[f][c]=mat_factor_de_planta[c][x]*
470     mat_pot_equipos[c][x]*t
471     mat_costos1_asociados[f][c]=mat_costos1[c][x]
472     mat_costos2_asociados[f][c]=mat_costos2[c][x]
473     mat_costos3_asociados[f][c]=mat_costos3[c][x]
474     x=len(mat_pot_equipos[c])
475     else :
476         x=x+1
477
478 del mat_pot_asociada[len(mat_pot_asociada)-1]
479 del energia_anual[len(energia_anual)-1]
480 del mat_costos1_asociados[len(mat_costos1_asociados)-1]
481 del mat_costos2_asociados[len(mat_costos2_asociados)-1]
482 del mat_costos3_asociados[len(mat_costos3_asociados)-1]
483
484 #print "vpn de los costos", len(mat_costos1_asociados),
485 len(mat_costos1_asociados[0])
486 #multiplicacion de cada valor dentro de la lista de listas por
487 #una constante; en este caso los kwh por el precio del kwh
```

```
488
489 valor_de_la_energia=[]
490 y=0
491 while y<len(energia_anual):
492     tempergia=[costo_kwh*term for term in energia_anual[y]]
493     y=y+1
494     valor_de_la_energia.append(tempergia)
495 #print valor_de_la_energia[0]
496 #print "pot demanda", round(list_dem[0],0)
497 #print "energia año", mat_pot_asociada[0], energia_anual[0]
498 #print "valor energia año", valor_de_la_energia[0]
499
500 #-----vpn valor de la energia-----
501 mat_vpn_valor_energia=[]
502 for i in range(len(valor_de_la_energia)):
503     mat_vpn_valor_energia.append([0]*(len(valor_de_la_energia[0])))
504
505 for f in range(len(valor_de_la_energia)):
506     for c in range(len(valor_de_la_energia[0])):
507         x=0
508         sum_vpn_beneficios=0
509         for x in range(tiempo_duracion):
510             sum_vpn_beneficios=valor_de_la_energia[f][c]/(1+dtf)*
511 x+sum_vpn_beneficios
512             mat_vpn_valor_energia[f][c]=sum_vpn_beneficios
513             x=0
514             sum_vpn_beneficios=0
515
516 #print "vpn de la energia", len(mat_vpn_valor_energia),
517 len(mat_vpn_valor_energia[0])
518 #print mat_vpn_valor_energia
519
520 beneficio_economico_netto1=[]
521 beneficio_economico_netto2=[]
522 beneficio_economico_netto3=[]
```

```

523
524 for i in range(len(mat_vpn_valor_energia)):
525     beneficio_economico_neto1.append([0]*
526 (len(mat_vpn_valor_energia[0])))
527     beneficio_economico_neto2.append([0]*
528 (len(mat_vpn_valor_energia[0])))
529     beneficio_economico_neto3.append([0]*
530 (len(mat_vpn_valor_energia[0])))
531
532 for f in range(len(mat_vpn_valor_energia)):
533     for c in range(len(mat_vpn_valor_energia[0])):
534         beneficio_economico_neto1[f][c]=mat_vpn_valor_energia[f][c]-
535 mat_costos1_asociados[f][c]
536         beneficio_economico_neto2[f][c]=mat_vpn_valor_energia[f][c]-
537 mat_costos2_asociados[f][c]
538         beneficio_economico_neto3[f][c]=mat_vpn_valor_energia[f][c]-
539 mat_costos3_asociados[f][c]
540
541 beneficio_economico_neto=[beneficio_economico_neto1 ,
542 beneficio_economico_neto2
543 ,beneficio_economico_neto3 ,dats_outputs[0]]
544
545 # {0} ##### formato tablas de salida #####
546 #---datos de entrada y salida en tablas formato ".xlsx"-----
547
548 name_doc_out=['outputs1.xlsx','outputs2.xlsx','outputs3.xlsx']
549 name_sheet_out=['outputs1','outputs2','outputs3']
550
551
552 name_doc_out1=['cba_medioambiental1.xlsx','cba_medioambiental2.xlsx',
553 'cba_medioambiental3.xlsx']
554 name_sheet_out1=['beneficio_economico_neto1',
555 'beneficio_economico_neto2','beneficio_economico_neto3']
556
557 ben_f_x_c=[]

```

```
558 for mat in range(len(beneficio_economico_neto)):
559     mat_ben=beneficio_economico_neto[mat]
560     fxc=[]
561     qwe=[]
562     k=0
563     while k<len(mat_ben[0]):
564         for j in range(len(mat_ben)):
565             for i in range(len(mat_ben[0])):
566                 if len(qwe)!=len(mat_ben):
567                     xtemp=mat_ben[j][k]
568                     else:
569                         qwe=[]
570                         qwe.append(xtemp)
571                 fxc.append(qwe)
572                 k=k+1
573             ben_f_x_c.append(fxc)
574 ben_f_x_c[0].insert(0,pueblos)
575 ben_f_x_c[1].insert(0,pueblos)
576 ben_f_x_c[2].insert(0,pueblos)
577
578 print "beneficio_economico_neto1",len(beneficio_economico_neto3),
579 len(beneficio_economico_neto3[0])
580 print "f_x_c",len(ben_f_x_c[3]),len(ben_f_x_c[3][0])
581
582 #-----,-----
583 flas =len(ben_f_x_c[0])
584 clas= len(ben_f_x_c[0][0])
585
586 tit1=['pueblo','proy1','proy2','proy3','proy4','proy5','proy6']
587 tit2=['pueblo','proy1','proy2','proy3','proy4','proy5','proy6']
588 tit3=['pueblo','proy1','proy2','proy3','proy4','proy5','proy6']
589
590
591 dicxcba1={}
592 for x,y in izip(tit1, range(clas+1)):
```

```
593     dicxcba1[x]=ben_f_x_c[0][y]
594 dicxcba2={}
595 for x,y in izip(tit2 , range(clas+1)):
596     dicxcba2[x]=ben_f_x_c[1][y]
597 dicxcba3={}
598 for x,y in izip(tit3 , range(clas+1)):
599     dicxcba3[x]=ben_f_x_c[2][y]
600 dicxcba4={}
601
602
603 dicxcba=[dicxcba1 , dicxcba2 , dicxcba3 ]
604
605 for i , j , k in izip(dicxcba , name_doc_out1 , name_sheet_out1):
606     datxout = pd.dataframe(i)
607     writer = pd.excelwriter(j , engine='xlsxwriter')
608     datxout.to_excel(writer , sheet_name=k)
609     writer.save()
610
611
612 titulos=['nombre.pueblo' , 'p.biomasa' , 'p.diesel' ,
613 'p.eolico' , 'p.hidraulico' , 'p.red_exist' , 'p.solar']
614 ##pestanas en el documento de salida
615 titulos1=['outputs1_pueblo' , 'proy0' , 'proy1' , 'proy2' , 'proy3' , 'proy4' , 'proy5']
616 titulos2=['outputs2_pueblo' , 'proy0' , 'proy1' , 'proy2' , 'proy3' , 'proy4' , 'proy5']
617 titulos3=['outputs3_pueblo' , 'proy0' , 'proy1' , 'proy2' , 'proy3' , 'proy4' , 'proy5']
618
619 fil =len(mat_impacts)
620 col= len(mat_impacts[0])
621 #print fil , col
622 matrix1=[]
623 matrix2=[]
624 matrix3=[]
625 for i in range(fil):
626     matrix1.append([0]*col*2)
627     matrix2.append([0]*col*2)
```

```
628     matrix3.append([0]*col*2)
629 #print matrix[1:5]
630 for f in range(fil):
631     for c in range(col*2):
632         if c%2==0:
633             matrix1[f][c]=mat_impacts[f][c//2]
634             matrix2[f][c]=mat_impacts[f][c//2]
635             matrix3[f][c]=mat_impacts[f][c//2]
636         elif c%2!=0:
637             matrix1[f][c]=mat_beneficios1[f][c//2]
638             matrix2[f][c]=mat_beneficios2[f][c//2]
639             matrix3[f][c]=mat_beneficios3[f][c//2]
640 #
641 #print len(matrix1[0])
642 #print len(matrix2)
643 dicxout1={}
644 for x,y in izip(titulos1 , range(col+1)):
645     dicxout1[x]=matrix1[y]
646 dicxout2={}
647 for x,y in izip(titulos2 , range(col+1)):
648     dicxout2[x]=matrix2[y]
649 dicxout3={}
650 for x,y in izip(titulos3 , range(col+1)):
651     dicxout3[x]=matrix3[y]
652
653 dicxout=[dicxout1 , dicxout2 , dicxout3]
654
655 for i,j,k in izip(dicxout , name_doc_out , name_sheet_out):
656     datxout = pd.DataFrame(i)
657     writer = pd.ExcelWriter(j , engine='xlsxwriter')
658     datxout.to_excel(writer , sheet_name=k)
659     writer.save()
660
661 print "listos_los_outputs"
```

B.3 INGRESO DE LA FORMULACIÓN DEA-SUPEREFICIENCIA COMO MÓDULO A PYTHON

```
1 from itertools import izip
2 from scipy.optimize import minimize
3 import argparse
4 import csv
5 #import numpy
6 import pandas
7
8 def miu(l, sign=1.0):
9
10     return sign*l[0]
11
12 def flip_bw(x):
13     for x_i in x:
14         x_i.insert(0,x_i.pop())
15 #     x_i.insert(0,x_i.pop())
16
17     return x
18
19 def flip(x):
20     for x_i in x:
21         temp=x_i[0]
22         del x_i[0]
23         x_i.append(temp)
24
25     return x
26
27 def save_csv(data, file):
28
29     with open(file, "wb") as csvfile:
30         f_writer = csv.writer(csvfile)
31         for data_i in data:
32             f_writer.writerow(data_i)
```

```
33
34 def load_csv(file):
35
36     with open(file , "rb") as csvfile:
37         f_reader = csv.reader(csvfile)
38         data = []
39         for row in f_reader:
40             data.append([float(val) for val in row])
41
42     return data
43
44 def save_xls(data , file , r_headers=None, c_headers=None):
45
46     f_writer = pandas.ExcelWriter(file)
47     df = pandas.DataFrame(data , r_headers , c_headers)
48     df.to_excel(f_writer)
49     f_writer.save()
50
51 def load_xls(file , hasHeaders=True):
52
53     if hasHeaders:
54         fd_data = pandas.read_excel(file)
55     else:
56         fd_data = pandas.read_excel(file , header=None)
57
58     return fd_data.values.tolist()
59
60 def DEA(x, y, verbose=False):
61     """Compute modified DEA algorithm """
62
63     num_proj = len(x[0])
64     c0 = [(lambda l, x_i=x_i: l[0]*x_i[0] - sum([x_j * l_j for x_j, l_j
65 in izip(x_i[1:], l[2:])])) for x_i in x[0:]]
66     c1 = [(lambda l, y_r=y_r: sum([y_j * l_j for y_j, l_j in izip(y_r[1:],
67 l[2:])) - y_r[0]) for y_r in y[0:]]
```

```
68 c2 = [(lambda l, j=j: l[j + 1]) for j in xrange(num_proj)]
69
70 cons = [{'type': 'ineq', 'fun' : c_i} for c_i in c0 + c1 + c2]
71 l0 = [0] * (num_proj + 1)
72
73     res = minimize(miu, l0, args=(1.0, ), method='SLSQP', constraints=cons,
74 options={'disp': verbose})
75     return map(lambda n: round(n, 2), res.x.tolist())
76     if __name__ == "__main__":
77
78     parser = argparse.ArgumentParser(description=
79 'Computes_DEA_from_data_stored_in_files')
80     parser.add_argument('in_mode', metavar='im', type=str,
81 nargs='?', default="csv", help='input_format')
82     parser.add_argument('x_file', metavar='x', type=str, nargs='?',
83 default="x.csv", help='name_of_the_input_file_for_x_values')
84     parser.add_argument('y_file', metavar='y', type=str, nargs='?',
85 default="y.csv", help='name_of_the_input_file_for_y_values')
86     parser.add_argument('out_mode', metavar='om', type=str, nargs='?',
87 default="csv", help='output_format')
88     parser.add_argument('out_file', metavar='out', type=str, nargs='?',
89 default="out.csv", help='name_of_the_output_file')
90
91     args = parser.parse_args()
92     if args.in_mode == "xls":
93         x = load_xls(args.x_file)
94         y = load_xls(args.y_file)
95     else:
96         x = load_csv(args.x_file)
97         y = load_csv(args.y_file)
98
99     outputs = [DEA(x, y)]
100     outputs.extend([DEA(flip(x), flip(y)) for i in xrange(len(x[0]) - 1)])
101
102     if args.out_mode == "xls":
```

```
103         save_xls(outputs , args.out_file)
104     else :
105         save_csv(outputs , args.out_file)
```

B.4 INGRESO DE LA FORMULACIÓN DEA-CBA COMO MODULO A PYTHON

```

1 import numpy
2 from scipy.optimize import minimize
3
4 def miu(p, sign=1.0):
5
6     return sign*p[0]
7 def CBA(B, Z):
8     """a"""
9
10    n, m = Z.shape
11    CA = numpy.zeros((m, 1))
12    SB = numpy.zeros((m, 1))
13    P = numpy.zeros((m, n))
14
15    c2 = [(lambda p, j=j: p[j + 1]) for j in xrange(n)]
16    for i in range(m):
17
18        z = numpy.hstack([Z[:, :i], Z[:, i+1:]])
19        b = numpy.hstack([B[:, i], B[:, i+1:]])
20
21    c0 = [lambda p, j=j, i=i, z=z, b=b: B[i] - p[0] -
22 numpy.sum(Z[:, i] * p[1:]) - (b[j] - numpy.sum(z[:, j] *
23 p[1:])) for j in xrange(m - 1)]
24 c1 = [lambda p, i=i: B[i] - numpy.sum(Z[:, i] * p[1:])]
25 cons = [{'type': 'ineq', 'fun' : c_i} for c_i in c0 + c1 + c2]
26 p0 = [0] * (n + 1)
27 res = minimize(miu, p0, args=(-1.0,), method='SLSQP',
28 constraints=cons, options={'disp':False})
29     CA[i] = res.x[0]
30     P[i] = res.x[1:]
31     SB[i] = B[i] - numpy.sum(Z[:, i] * P[i])
32     return CA, P, SB

```

B.5 CÓDIGO DE APLICACIÓN DE DEA-CBA PARA DETERMINAR EL BENEFICIO DE LOS PROYECTOS DE LOS PROYECTOS

```
1 import numpy
2 import pandas
3 import CBA
4
5 def save_xls(data, f_writer, file, sheet, r_headers=None,
6 c_headers=None):
7
8     df = pandas.DataFrame(data, r_headers, c_headers)
9     df.to_excel(f_writer, sheet)
10 fileB = "cba_medioambiental1.xlsx"
11 fileZ = "impactos.xlsx"
12 file = "salida_costo_impactos.xlsx"
13 Z = pandas.read_excel(fileZ).values
14 Bs = pandas.read_excel(fileB).values
15 m, n = Bs.shape
16 data = numpy.zeros((2 * m, n - 1))
17 # data = []
18 f_writer = pandas.ExcelWriter(file)
19 for i, B in enumerate(Bs):
20     a, b, c = CBA.CBA(B[:-1], Z)
21     data[i*2] = a[:, 0]
22     local_data = numpy.hstack([a, b, c])
23     save_xls(local_data, f_writer, file, str(i))
24     data[i*2 + 1] = c[:, 0]
25     print(i)
26     print("\n")
27 print(data)
28 save_xls(data, f_writer, file, "Resumen")
29 f_writer.save()
```

B.6 CÓDIGO DE APLICACIÓN DE DEA-SÚPEREFICIENCIA PARA DETERMINAR LA EFICIENCIA DE LOS PROYECTOS

```

1 import DEA
2 import heapq
3 num_max = 1 # de uno en adelante entero
4 criterio = 1
5 #de cero a uno los proyectos con un factor limite sobre el maximo
6 output_file = "salida.xls"
7 # Carga datos, elimina las dos primeras columnas que no
8 contienen nada relevante (al calculo).
9 x = [t[1:] for t in DEA.load_xls("inputs.xlsx")]
10 y_a = [a[1:] for a in DEA.load_xls("outputs1.xlsx")]
11 y_b = [b[1:] for b in DEA.load_xls("outputs2.xlsx")]
12 y_c = [c[1:] for c in DEA.load_xls("outputs3.xlsx")]
13
14 # Define parametros utilizados en los calculos
15 num_towns = len(x)/2 #numero_de_entradas
16 num_proj = len(x[0])
17 ys = (y_a, y_b, y_c)
18 top_1 = [[]] * num_towns # aca se guardara el/los proyectos
19 con mayor n0 de cada pueblo.
20 p_fin = [] # Aca se almacenara informacion de pueblo, num.
21 proyecto y archivo del proyecto (y_a = 0, etc.)
22 # Aca se almacenan los datos para el calculo final del DEA.
23 x_fin = []
24 y_fin = []
25
26 all_outputs = []
27 for i in xrange(num_towns):
28     outputs = [] # Almacenara los n0 para el pueblo i.
29     for y in ys:
30         # print(x[i*2:2*(i+1)])
31         outputs.extend([DEA.DEA(x[i*2:2*(i+1)], y[i*2:2*(i+1)])[0]])
32     outputs.extend([DEA.DEA(DEA.flip(x[i*2:2*(i+1)]),

```

```
33 DEA.flip(y[i*2:2*(i+1)]))[0]
34 for j in xrange(len(x[0]) - 1))
35     DEA.flip(x[i*2:2*(i+1)])
36     DEA.flip(y[i*2:2*(i+1)])
37 # En este paso tengo los resultados del DEA (n0) para el pueblo i.
38 # La siguiente linea ubica la posicion de los num_max mayores n0.
39 top_1[i] = [index for k in heapq.nlargest(num_max, outputs) for index,
40 el in enumerate(outputs) if el == k]
41     for z in top_1[i]:
42 # Almacena informacion util para despues(Nombre del pueblo,# proyecto ,archivo usa
43     p_fin.append(("Pueblo"+str(i), z %num_proj, z // num_proj))
44 # Almacena datos asociados a la posicion
45     x_fin.append([w[z %num_proj] for w in x[i*2:2*(i+1)])]
46     y_fin.append([w[z %num_proj] for w in ys[z // num_proj][i*2:2*(i+1)])]
47     all_outputs.append(outputs)
48
49 # Transponer la lista (porque el DEA asi lo necesita).
50 x_fin = map(list, map(None, *x_fin))
51 y_fin = map(list, map(None, *y_fin))
52
53 # Calculo final del DEA. Almaceno solo n0.
54 outputs = [DEA.DEA(x_fin, y_fin)[0]]
55 outputs.extend([DEA.DEA(DEA.flip(x_fin), DEA.flip(y_fin))[0]]
56 for i in xrange(len(x_fin[0]) - 1))
57
58 # Filtra segun algun criterio.
59 results = [(score, proj) for score, proj in zip(outputs, p_fin)
60 if score >= max(outputs)*criterio]
61
62 # Imprime los resultados.
63 print(results)
64 #print top_1
65 #
66 #print(outputs)
67
```

```
68 DEA.save_xls(all_outputs , output_file)
69
70
71 print "listo_la_salida_de_resultados_de_los_mejores_proyectos"
```

C

CARACTERÍSTICAS Y COSTOS DE LAS
TECNOLOGÍAS UTILIZADAS EN LOS
PROYECTOS

Antes de realizar cualquier análisis para este caso se realiza una observación simple de los recursos presentes en la región de interés, y a partir de estos se decide qué tipo de tecnología se evaluarán. Dadas las características de la provincia de Vélez se determinaron las siguientes tecnologías, las cuales se tienen en cuentas según la gran variedad que existe en la actualidad como se observa el la gráfica C.1

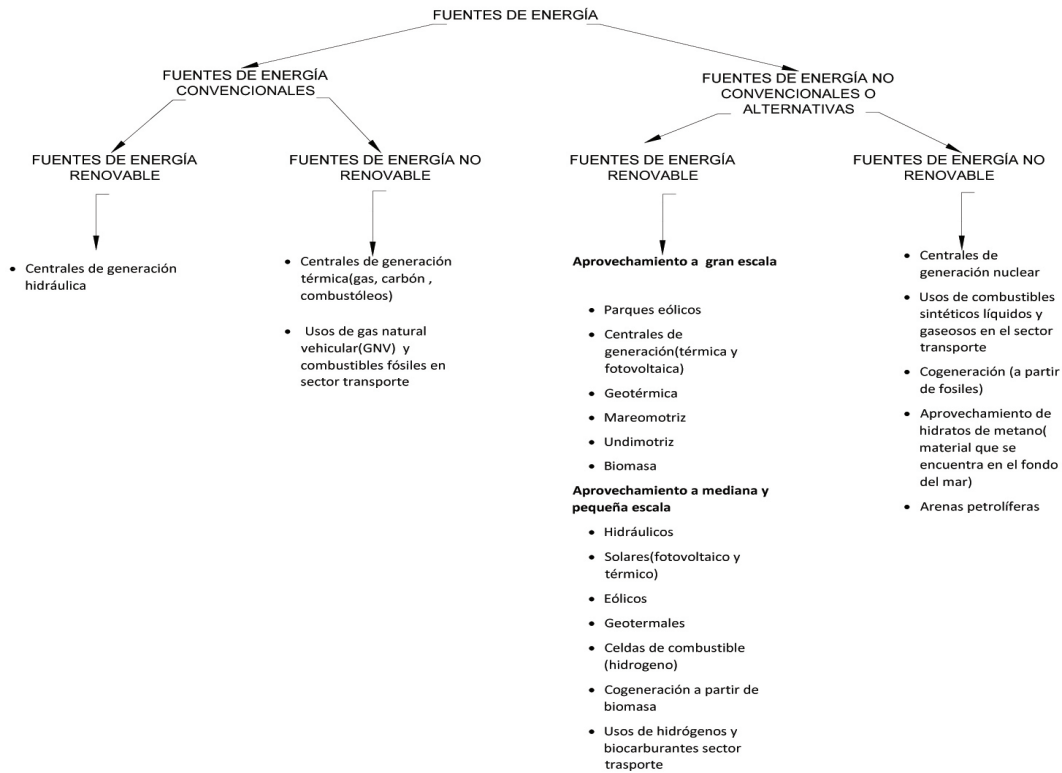


Figura C.1.: Figura 15: Tipos de fuentes energías
Fuente: Elaborado por los autores

:

C.1 FUENTE DE ENERGÍA EÓLICA:

Por ser una región que no cuenta con costas directamente la implementación de esta fuente es poco viable, pero cabe resaltar que como Colombia cuenta con una buena ubicación espacial, hay partes donde las corrientes de aire favorecen la implementación a una altura adecuada del aerogenerador es recomendable utilizar torres de más de 20m de altura. Es un sistema de producción de energía eléctrica a partir de la energía del viento, siendo este el

resultado del desplazamiento de masa de aire causado por gradientes térmicos y de presión. A través de aerogeneradores este sistema de conversión transforma la energía del viento en energía mecánica y posteriormente en energía eléctrica. Los componentes principales de un aerogenerador son: el rotor, que puede ser horizontal o vertical; el sistema de orientación, constituido por aletas estabilizadoras; el sistema de regulación, el sistema de transmisión de energía y el sistema de generación que puede ser un dinamo o un alternador asíncrono o síncrono .

La operación exitosa de un sistema eólico y la cantidad de energía eléctrica que éste puede producir depende de gran medida del terreno, de las condiciones locales de viento, fundamentalmente de la densidad de potencia del viento que varía de 10 a 41.000 W/m^2 y de la velocidad del viento que oscila entre 2,5 y 25 m/s , por último depende de la eficiencia global de conversión relacionada con el diseño apropiado de los aerogeneradores.

Los aerogeneradores más frecuentes usados son los de eje horizontal, los menos frecuentes de eje vertical. Los aerogeneradores se clasifican según su potencial en pequeños ($< 100kW$) y grandes ($> 100kW$). Los pequeños se emplean en sistemas aislados o miniredes, mientras que los de mayor potencia se emplean en sistemas interconectados a la red.

El costo de las turbinas eólicas es de aproximadamente USD 1,700 por kW . El costo de la electricidad generada depende de la velocidad del viento y de su distribución a lo largo del año. En condiciones óptimas, con costos de alrededor de 5 centavos de dólar por kWh, esta tecnología resulta competitiva con muchas de las tecnologías convencionales de generación de electricidad Claudio (2009a).

Los generadores eólicos son de baja potencia por unidad de área, se requiere cerca de 16,7 Ha por cada Mega Watt instalado, un cálculo simple permite estimar que para instalar igual capacidad de energía eólica que la que ingresaría un proyecto de gran tamaño como HidroAysén (2700 MW), requeriría de un área ocupada por molinos 5 veces mayor, vale decir cerca de 45000Ha, esto sin considerar que el factor de planta de una eólica es cerca de 3 o 4 veces menor al de una Hidroeléctrica de estas características.

ANEXO C. CARACTERÍSTICAS Y COSTOS DE LAS TECNOLOGÍAS UTILIZADAS EN LOS PROYECTOS

TABLA C.1.: Tabla 35: Costos de capital de una planta eólica

costo de capital 2010 (USD/kW)				
<i>Componentes</i>	<i>300W</i>	<i>100W</i>	<i>10kW</i>	<i>100MW</i>
<i>Equipos</i>	3,787	2,290	1,218	1,050
<i>Obras civiles</i>	860	290	78	67
<i>Ingeniería</i>	56	56	45	45
<i>Instalación</i>	737	179	112	89
<i>Imprevistos</i>	559	290	156	134
<i>Total</i>	5,998	3,105	1,608	1,385

TABLA C.2.: Tabla 36: Ventajas e Inconvenientes de las plantas eólicas

ventajas	inconvenientes
Buen grado de desarrollo tecnológico	Solo se produce energía en presencia de recursos suficientes de viento
Comercialmente competitivo en todos los países con un suficiente nivel de recursos	Incertidumbre asociada a la intermitencia y aleatoriedad de tales recursos
No produce emisiones a la atmósfera	Ruidos y ocupación de territorio
Rapido tiempo de construcción	Impacto sobre la avifauna

C.2 FUENTE DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA:

en la actualidad las tecnologías desarrolladas de celdas fotovoltaicas favorecen la implementación de la energía solar, haciendola una de las más implementadas en la región como en cualquier parte del mundo

La producción de energía eléctrica a través del efecto fotovoltaico se basa en la utilización de materiales semiconductores que generan corriente eléctrica al ser iluminados, este método es mas utilizado dado que sale mas barato por su tecnología utilizada, que la solar térmica.

Las celdas fotovoltaicas transforman directamente la radiación solar en electricidad por medio de un fenómeno físico denominado efecto fotovoltaica. Las celdas se pueden utilizar en conexión con la red eléctrica o bien en sitios aislados, por medio de sistemas que incluyen baterías .

TABLA C.3.: Tabla 37: Ventajas e Inconvenientes de la tecnología solar fotovoltaica

<i>Ventajas</i>	<i>Inconvenientes</i>
<i>Permite llevar la electricidad a núcleos aislados</i>	<i>Requiere gran inversión inicial</i>
<i>Los sistemas de captación son de fácil mantenimiento, tecnología probada</i>	<i>Solo se genera energía en presencia de radiación solar (salvo incorporando de sistemas de acumuladores)</i>
<i>Es energía no contaminante</i>	<i>Producción eléctrica 6 veces mas cara que con centrales de carbón</i>
<i>Proviene de una fuente de energía inagotable</i>	

Costos Los costos de los sistemas fotovoltaicos dependen de la configuración escogida o sistemas aislados o conectados a la red. Se considera a los consumos una parte substancial del sistema fotovoltaico ya que estos son los que determinan el tamaño del mismo. Para el análisis de costos se han escogido los sistemas que por su capacidad y tipo de conexión son o puede llegar a ser los más usados en Colombia. La tabla siguiente muestra los costos de capital discriminados entre equipos, ingeniería, obras civiles e instalación de las configuraciones mas comunes.

TABLA C.4.: Tabla 38: Costos de capital de una planta Solar

Costos del capital(USD/kW)				
<i>Capacidad del sistema</i>	<i>0,05kW</i>	<i>0,3kW</i>	<i>25kW</i>	<i>5MW</i>
<i>Equipos</i>	6,668	6,668	4,785	4,504
<i>Obras civiles</i>	0	0	980	980
<i>Ingeniería</i>	0	0	200	200
<i>Instalación</i>	0	0	700	560
<i>Margendecontingencia</i>	700	700	700	680
<i>Total</i>	7,368	7,368	7,365	6,924

Fuente: World Bank Y Cálculos Del Consumidor

C.3 FUENTES CON PLANTAS A BASE DE BIOMASA:

Criterio de selección: El recurso de biomasa se evalúa ya que una de la principales actividades económicas de esta región es la agricultura, con productos como el cacao, el café, la caña de azúcar entre otros también la existencia de grandes extensiones de terreno

y temperatura media hacen de esta región sea propicia para la ganadería, el cultivo de bosques facilitando el aprovechamiento de la biomasa.

La Biomasa es energía solar almacenada en forma de compuestos químicos en cualquier material proveniente de organismos vivos (plantas y animales) tales como vegetación bosque, selvas, cultivos acuáticos, residuos agrícolas, desechos de animales y desechos urbanos e industriales de tipo orgánico que pueden utilizarse para producir energía Janna et al. (2007). Para evaluar el potencial energético (PE) de la biomasa residual agrícola, pecuaria y de los residuos sólidos urbanos y de poda en Colombia, se desarrolló un modelo matemático para cada sector, los cuales están planteados en función de “la masa del residuo” y de “su contenido energético”; los modelos aplicados para cada sector son:

Modelo de PE de la Biomasa residual Vegetal BRV:

$$PE_{Biomasa-vegetal} = M_{residuo-seco} * PCI_{Residuo} \quad (C.1)$$

En la ecuación la masa de residuo seco es función del área cosechada (A), el rendimiento del cultivo (Re), la cantidad de residuos generados f_{p-e} y del contenido de humedad f_h y se expresa como

$$Masa_{residuo-seco} = A * Re * f_{p-e} * f_h \quad (C.2)$$

Teniendo en cuenta los “ m ” clase de residuos, los “ n ” números de especies cultivadas y los tipos de BR (RAC o RAI), la expresión general para el cálculo del PE es :

$$PEBV_{real} = K * \sum R_{ei} * A_i * \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m f_{p-e} * f_h \quad (C.3)$$

Modelo de PE de la Biomasa Residual Animal BRA:

El modelo se plateó con base en la tecnología de digestión anaerobia, que es la principal aplicación para este tipo de residuo.

La masa del residuo es función de los factores: el Número de Animales (NA), la cantidad de materia seca (MS), la fracción recuperable (fr), la fracción de sólidos volátiles (fsv), la producción de Biogás (YB) y el poder calórico inferior del residuo (PCI)

$$PB_{animal} = \sum NA * MS * MS_i * fr_i * fsv_i * YB_i * PCI \quad (C.4)$$

Modelo de PE de la Biomasa Residual Sólidos Orgánicos Urbanos BRSOU:

Tomando como referencia los estudios presentados por BHATTCHARYA et al 2005 (1), se desarrolló un modelo basado en un balance de masa que estima la cantidad de metano generado, a partir de la cantidad de carbono orgánico presente en los RSOU, que es accesible a la descomposición anaeróbica. La reacción global de descomposición del carbono orgánico, puede ser presentada por la siguiente ecuación Escalante Hernández et al. (2008).

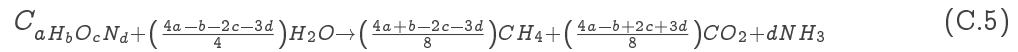


TABLA C.5.: Tabla 39: Ventajas e Inconvenientes de las plantas de biomasa

<i>ventajas</i>	<i>inconvenientes</i>
<i>Ayuda a la economía de los sectores rurales</i>	<i>Los rendimientos de las calderas son algo inferiores a los que se usan en combustibles fósiles</i>
<i>Es abundante</i>	<i>Posee menor densidad energética</i>
<i>Beneficios ambientales</i>	<i>Los canales de distribución no están desarrollados como los de los combustibles fósiles</i>
<i>Elimina focos infecciosos y libera olores desagradables que provocan los excrementos de los animales</i>	<i>Los sistemas de alimentación de combustible y eliminación de cenizas son más complejos y requieren mayor costo de operación y mantenimiento</i>

TABLA C.6.: Tabla 40: Costos de capital (*USD/kW*) para la planta de generación eléctrica con Biomasa

<i>Articulos</i>	<i>Costo (USD/kW)</i>
<i>Equipo</i>	1,441
<i>Civil</i>	190
<i>Ingeniería</i>	100
<i>Construcción</i>	78
<i>Costos de contingencia</i>	89
<i>Total</i>	1,898

TABLA C.7.: Tabla 41: Con base en el factor de capacidad, la vida de la planta los costos de O&M se estima el costo de generación de la siguiente forma

<i>Capital</i>	2,89
<i>OM</i>	0,5
<i>Variable</i>	0,45
<i>Combustible</i>	

C.4 FUENTES DE ENERGÍA HIDRÁULICA A PEQUEÑA ESCALA:

Santander cuenta con grandes afluentes hidricas como son el rio Opon, Magdalena, Suárez, entre otros favoreciendo la implementación de centrales de energía hidráulica ya sea a pequeña, mediana o gran escala.

Aprovecha la fuerza del agua igual que las grandes centrales hidráulicas. Las minicentrales no suelen superar los cinco megavatios de potencia y se instalan en pequeños saltos de agua, cursos de ríos e incluso en canales de riego. Claudio (2009a).

TABLA C.8.: Tabla 42: Ventajas e Inconvenientes

Ventajas	Inconvenientes
Es inagotable mientras no varíe el ciclo de agua	Requiere de un importante desarrollo de la infraestructura que producirá la electricidad
Tiene un costo bajo de mantenimiento	Ocasiona daños en la fauna y flora
Tiene larga vida	Largos periodos de construcción
Se puede usar para pequeños consumos como para nivel industrial	Costos de expropiacion e las zonas inundables

Costos Las centrales hidroeléctricas tienen costos relativamente bajos y compiten favorablemente con las tecnologías de energías no renovables. Aunque los costos de inversión varían mucho de un sitio a otro, un valor promedio es USD 2,100 *kW* mientras que el costo de la electricidad generada es típicamente entre 3 y 4 *USD/kWh*, Claudio (2009a). costo de capital de una minihidroeléctrica (*USD/kW*)

TABLA C.9.: Tabla 43: Costos de capital para plantas Hidráulicas a pequeña escala, proyecto de costos de capital micro/pico hidroeléctrica (*USD/kW*)

<i>Componentes</i>	<i>5MW</i>
<i>Equipos</i>	1,106
<i>Obrasciviles</i>	1,128
<i>Ingeniería</i>	223
<i>Instalación</i>	190
<i>Total</i>	2,647

En la medida en que se reconozcan los distintos beneficios de las pequeñas centrales hidroeléctricas, incluyendo su impacto en la mitigación del cambio climático, este potencial será económico y financieramente factible.

TABLA C.10.: Tabla 44: Costos por capacidad

Capacidad	2010	2015	2020
300 <i>kW</i>	1676	1659	1642
1 <i>kW</i>	2994	2876	2848
100 <i>kW</i>	2904	2759	2737
5 <i>MW</i>	77	75	74

Fuente : 2010 Corpoema

C.5 PLANTAS CON MOTORES DE TECNOLOGÍA DIÉSEL

Esta tecnología se puede desarrollar en la región gracias a que se cuenta con pozos petroleros y una refinería facilitando el combustible para poner en funcionamiento las plantas.

la energía eléctrica producida por esta tecnología proviene del funcionamiento de grupo de generadores o centrales eléctricas, constituidas por motores diesel que transforman la energía química, contenida en el combustible, en energía mecánica mediante su combustión, seguidamente esta energía se transforma en energía eléctrica aprovechable carlos (2001).

El combustible requerido para la operación de las plantas diesel deben poseer las características de auto- ignición al estar sometido a altas presiones y temperaturas de la cámara de combustión. Esta característica la cumplen dos grupos de combustibles, el de los aceites pesados y el biodiesel.

ANEXO C. CARACTERÍSTICAS Y COSTOS DE LAS TECNOLOGÍAS UTILIZADAS EN LOS PROYECTOS

TABLA C.11.: Tabla 45: Ventajas e Inconvenientes

Ventajas	Inconvenientes
Puede funcionar con motores de 2 o 4 tiempos	Mantenimiento
Facil de dar encendido mediante una chispa	El agua que desecha causa daños en las tuberías
Menor costo de generación que con la gasolina	Alto grado de corrosión

TABLA C.12.: Tabla 46: Costos de plantas diésel para diferentes capacidades

	MAN 150 kW a 100 kW	Cummins GSK19G 300 kW	Caterpillar rG3516 LE 800 kW	caterpillar rG3616 LE 3 MW	Wartsila5238 LN 5 MW
paquete de generador	260	230	269	400	450
recuperador de calor	205	179	89	65	40
interconexión eléctrica	260	90	40	22	12
trabajo y materiales	359	400	379	216	200
proyecto y construcción	235	158	121	95	95
ingeniería	129	81	45	41	41
contingencias	43	34	28	25	25
financiamiento del proyecto (intereses)	24	25	31	55	55
costo total de la planta (USD/KW)	1515	1197	1002	919	919

Fuente: Tecnologías de generación distribuida costos y eficiencia

C.6 CONEXIÓN A UNA RED EXISTENTE:

En la actualidad la red existente cubre gran parte de la región, en un porcentaje del 88 % brindando suministro a las poblaciones que se encuentran aquí, garantizando un servicio continuo, facilitando su conexión ya que cuenta con una gran cobertura.

Se llama Red Existente al conjunto de redes eléctricas presentes en el territorio nacional Colombiano pertenecientes al SIN, y se toma como referencia en este trabajo como una opción mas para suplir las necesidades energéticas en una región determinada.

Esta será tomada en cuenta para el desarrollo de este trabajo, ya que es uno de los recursos

necesarios para el desarrollo de dicho trabajo, la red existente se comparara con las otras fuentes de energía mencionadas anteriormente, en este servicio se presenta diferentes niveles de tensión donde se puede clasificar en alta, media y baja tensión.

TABLA C.13.: Tabla 47: Ventajas e Inconvenientes

Ventajas	Inconvenientes
Garantiza un flujo continuo	Contaminación alta
Hay varios proveedores del servicio	Pérdidas y fugas en la transmisión

Costos se describe a continuación los elementos y actividades necesarias para la implementación de una red de media tensión teniendo en cuenta sus costos.

ANEXO C. CARACTERÍSTICAS Y COSTOS DE LAS TECNOLOGÍAS UTILIZADAS EN LOS PROYECTOS

TABLA C.14.: Tabla 48: Media tensión (parte 1)

ACTIVIDAD	UNID	CTDAD	COSTO UNITA- RIO MATE- RIAL	MANO DE OBRA	TRANSPORTE	H&E	Vr.PARCIAL	TOTAL ITEM
Replanteo de Línea M.T. Hasta 34,5 KV	ML	0,00	36	215	0	43	258	0.00
Suministro, transporte e instalación de poste de concreto 12 m. TR 510 Kg.	UND	10,00	585,452	202,130	60,000	41,064	303,204	3,032,040.00
Suministro, transporte e instalación de herrajes en poste o torrecilla para dos hilos estructura de paso sencilla tipo - 510 hasta 13,2 KV.	UND	23,00	196,666	33,286	6,000	551	39,860	916,780.00
Suministro, transporte e instalación de herrajes en poste o torrecilla estructura de paso disposición triangular simétrica tres hilos tipo P-101 hasta 13,2 kV.	UND	0,00	239,082	33,286	6,000	551	39,837	0,00
Suministro, transporte e instalación de herrajes en poste o torrecilla estructura disposición triangular simétrica ángulo tres hilos tipo P-110 hasta 13,2 kV	UND	0,00	460,480	33,286	6,000	551	39,837	0,00

Fuente: ESSA

TABLA C.15.: Tabla 49: Media tensión (parte 2)

ACTIVIDAD	UNID	CTDAD	COSTO UNITA- RIO MATE- RIAL	MANO DE OBRA	TRANSPORTE	H&E	Vr.PARCIAL	TOTAL ITEM
Suministro, transporte e instalación de herrajes en poste o torrecilla estructura disposición triangular simétrica terminal tres hilos tipo R-114 hasta 13,2kV.	UND	0,00	509,821	33,286	6,000	551	39,837	0,00
Suministro y transporte e instalación de herrajes en poste o torrecilla estructura de retención disposición triangular simétrica tres hilos tipo R-130 hasta 34,5 kV	UND	0,00	700,631	33,286	9,600	551	43,437	0,00
Suministro, transporte e instalación de herrajes en poste o torrecilla para dos hilos estructura de paso con angulo tipo - 512 hasta 13,2 KV.	UND	0,00	383,056	33,286	6,000	551	39,837	0,00
Suministro, transporte e instalación de herrajes en poste o torrecilla para dos hilos estructura de retención terminal tipo - 514 hasta 13,2 KV.	UND	0,00	426,185	33,286	6,000	551	39,837	0,00

Fuente: ESSA

ANEXO C. CARACTERÍSTICAS Y COSTOS DE LAS TECNOLOGÍAS UTILIZADAS EN LOS PROYECTOS

TABLA C.16.: Tabla 50: Media tensión (parte 3)

ACTIVIDAD	UNID	CTDAD	COSTO UNITA- RIO MATE- RIAL	MANO DE OBRA	TRANSPORTE	H&E	Vr.PARCIAL	TOTAL ITEM
Suministro, transporte e instalación de herrajes en poste o torrecilla estructura de paso en angulo disposición horizontal dos hilos tipo PH - 211 hasta 13,2 KV.	UND	0,00	445,184	33,286	9,000	551	42,837	0,00
Suministro, transporte e instalación de herrajes en poste o torrecilla estructura de paso en angulo disposición horizontal dos hilos tipo PH - 201 hasta 13,2 KV.	UND	0,00	220,800	33,286	6,000	551	39,837	0,00
Suministro, transporte e instalación de herrajes en poste o torrecilla estructura retención disposición horizontal dos hilos tipo RH - 230M hasta 13,2 KV. Aislador porcelana 10"	UND	0,00	634,678	33,286	9,600	551	43,437	0,00

Fuente: ESSA

TABLA C.17.: Tabla 51: Media tensión (parte 4)

ACTIVIDAD	UNID	CTDAD	COSTO UNITA- RIO MATE- RIAL	MANO DE OBRA	TRANSPORTE	E&E	Vr. PARCIAL	TOTAL ITEM
Suministro, transporte e instalación de un conductor ACSR No 2 AWG. Para M.T.	ML	3,000.00	1,195	300	90	94	3,484	10,452,000.05
Preparación concreto 2,500 psi.	m ³	1,00	203,088	33,286	43,200	9,280	85,767	85,767.00
Suministro, transporte e instalación de herrajes en poste o torrecilla para un hilo estructura de paso tipo - 507 hasta 13,2 KV.	UND	30,00	58,068	33,286	1,200	551	35,067	1,052,010.00
Suministro, transporte e instalación de herrajes en poste o torrecilla para un hilo estructura de retención terminal tipo - 505 hasta 13,2 KV.	UND	30,00	97,973	33,286	2,400	551	36,267	1,088,010.00
Suministro, transporte e instalación de herrajes en poste o torrecilla para un hilo estructura de retención doble tipo - 506 hasta 13,2 KV.	UND	30,00	215,661	33,286	3,600	551	37,467	1,124,010.00

Fuente: ESSA

ANEXO C. CARACTERÍSTICAS Y COSTOS DE LAS TECNOLOGÍAS UTILIZADAS EN LOS PROYECTOS

TABLA C.18.: Tabla 52: Media tensión (parte 5)

ACTIVIDAD	UNID	CTDAD	\$ COSTO UNITA- RIO MATE- RIAL	MANO DE OBRA	TRANSPORTE	E&E	Vr.PARCIAL	TOTAL ITEM
Suministro, transporte e instalación de una caja corta circuito de 15 KV 100 A. 100 KV – BIL	UND	3,00	119,480	25,330	600	551	26,484	79,452.00
Suministro, transporte e instalación de un pararrayo de 10 o 12 KV 10 KA.	UND	6,00	119,480	25,330	600	551	26,487	158,922.00
Suministro, transporte e instalación de amortiguador tipo stockbridge para cable No 2 AWG.	UND	6,00	41,818	12,665	240	551	13,462	80,772.00
Suministro, transporte e instalación de torre metálica 12 m. Totalmente Galvanizada en caliente.	UND	0,00	1,194,800	202,130	21,000	16,530	239,660	,00

Fuente: ESSA

TABLA C.19.: Tabla 53: Media tensión (parte 6)

ACTIVIDAD	UNID	CTDAD	COSTO UNITA- RIO MATE- RIAL	MANO DE OBRA	TRANSPORTE	E&E	Vr.PARCIAL	TOTAL ITEM
Valla publicitaria para electrificación rural	UND	0,00	623,332	86,409	12,000	9,160	730,901	0,00
Suministro, transporte e instalación de herrajes en poste o torrecilla estructura de retención doble tipo 515 hasta 13.2 KV.	UND	4,00	629,662	33,286	6,000	551	39,841	159,364
Suministro, transporte e instalación de herrajes y elementos para templete directo a tierra. Alta Tensión hasta 13.2 KV. (Ref estructura 1)	UND	8,00	88,061	33,286	6,000	551	39,845	318,760
Suministro, transporte e instalación de herrajes en poste o torrecilla estructura terminal disposición horizontal dos hilos tipo RH - 214 hasta 13.2 KV.	UND	0,00	467,406	33,286	9,000	551	42,837	0,00
subtotal en pesos								18.666,359

Fuente: ESSA

La Tabla C.20 describe factores y actividades necesarias para llevar a cabo el montaje de una red de baja tensión teniendo en cuenta sus costas

TABLA C.20.: Tabla: 54 Baja tensión

actividad	unidad	cantidad	material	mano de obra	transporte	H&E	valor parcial	total
Replanteo red de Baja Tensión	ml	52664	36	200	0	50	286	15061904
Suministro, transporte e instalación de herrajes en poste estructura para percha un (1) hilo estructura - 625	Und	570	26166	15130	960	551	42807	24399990
Suministro, transporte e instalación de herrajes y elementos para templete directo a tierra. Baja tensión	Und	524	82325	27863	6000	551	116739	61171236
Suministro, transporte e instalación de herrajes y elementos para bajante a tierra. Baja tensión.	Und	219	167273	27863	1200	551	196887	43118253
Preparación de concreto 2.500 psi.	m ³	310	203088	33286	43200	9280	288854	89544740
Suministro, transporte e instalación de cable triplex autosoportado 600 V de 2x4+4 AWG	ml	43475	5974	929	120	80	7103	308802925

Fuente: ESSA