UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Aplicación de Métodos Multi-criterio (MCDA) para planeamiento energético de largo plazo en la industria del cemento

Juan Felipe Raigoza Loaiza

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas,
Departamento Ciencias de la Computación y la Decisión
Medellín, Colombia
2016

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Aplicación de Métodos Multi-criterio (MCDA) para planeamiento energético de largo plazo en la industria del cemento

Juan Felipe Raigoza Loaiza

Este trabajo se presenta para optar al título de Magister en Sistemas Energéticos

Directora

Profesora Yris Olaya Morales PhD.

Maestría en Sistemas Energéticos

Perfil Profundización

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas,
Departamento Ciencias de la Computación y la Decisión
Medellín, Colombia
2016

Para Paulina, por su irracional e ilimitada paciencia y amor en todo momento.

Agradecimientos

Mis profundos agradecimientos en cada etapa del desarrollo de este ciclo educativo en el claustro de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Facultad de Minas

A mis Padres por la incansable motivación durante el tiempo que he estado ausente,
A Carlos Andrés, por su apoyo y ejemplo de perseverancia,
A Andrés, por su incondicional apoyo, comprensión y guía en la conjunción de mis objetivos,
A Yris, por su infinita paciencia e increíble don del servicio, mi más profunda admiración,
Al cuerpo de profesores y colegas de la universidad, por su calidez y compromiso,
Y por supuesto,
A Lupita por su compañía desinteresada.

Contenido

LISTADO DE GRÁFICAS **9**

LISTADO DE TABLAS **10**

LISTADO DE ACRÓNIMOS Y SÍMBOLOS **11**

RESUMEN GENERAL **12**

1. INTRODUCCIÓN Y CONTEXTO **13**

2. PROBLEMA: COMPLEJIDAD DE LA PLANEACIÓN TECNOLÓGICA PARA TRANSFORMACIÓN DE RECURSOS ENERGÉTICOS EN LA INDUSTRIA DEL CEMENTO **18**

2.1. Cuestionamientos Relevantes **18**

2.2. Delimitación y Alcance **19**

2.3. Objetivo General **19**

2.3.1. Objetivos Específicos 19

3. CONSUMO ENERGÉTICO EN LA INDUSTRIA CEMENTERA. **20**

3.1. Consumo energético del proceso y su impacto en emisiones de CO2 **20**

3.2. Cambios tecnológicos para reducción de consumo energético **22**

3.3. Necesidades de planeación en inversiones de mejoras en consumo energético en la industria cementera **23**

4. ANÁLISIS DE DECICIONES MULTICRITERIO - MCDA **25**

4.1. Aplicación de metodologías MCDA en planeación de recursos energéticos **29**

4.2. Método PROMETHEE **32**

4.2.1. Conceptos Fundamentales del Método PROMETHEE 32

Métodos de representación Promethee: Plano Gaia 38

4.2.2. 38

5. CASO DE ANÁLISIS: APLICACIÓN DE MÉTODO PROMETHEE A LA PLANEACIÓN DE INVERSIÓN EN TECNOLOGÍA PARA EL MEJORAMIENTO DEL CONSUMO ENERGÉTICO EN UNA PLANTA DE FABRICACIÓN DE CEMENTO 41

5.1. Alternativas de mejoramiento de una planta de producción de cemento 41

5.2. Objetivos ejercicio 43

5.3. Paquete computacional para aplicación Método Promethee 43

5.4. Proceso y modelación 43

5.5. Análisis de sensibilidad de Resultados Modelación 48

5.6. Análisis de resultados 53

5.7. Conclusiones frente aplicación del método 54

6. MÉTODOS DE PLANEACIÓN ESTRATÉGICA BASADA EN MÉTODO DE ROADMAPPING 55

6.1. Definición de Gestión tecnológica, 55

6.2. Técnica de Roadmapping 56

6.3. Tipos de Roadmap 57

6.4. Elementos gráficos para la planeación de Roadmapping 58

6.5. Proceso de Construcción de Roadmap 58

6.6. Representación planeación largo plazo en método de Roadmapping 60

7. CONCLUSIONES FINALES 61

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 63

Listado de Gráficas

Gráfica 1. Mejoras en las emisiones de CO2 asociadas a la producción de cemento a 2013 [kg CO2 / tonelada Cemento]..... 20
Grafica 2. Perspectivas en disminución de consumo de calor y de electricidad en la fabricación de cemento a 2050 21
Gráfica 3. Distribución de 312 aplicaciones de Métodos MCDA por áreas de interés 29
Gráfica 4. Procesos de Cálculo Método Promethee 33
Gráfica 5. Funciones objetivo para Calculo Método Promethee 35
Gráfica 6. Funciones objetivo Lineales para Calculo Método Promethee 36
Gráfica 7. Ejemplo de un plano de Gaia en una selección de automóviles 39
Gráfica 8. Caracterización de alternativas y criterios en Smart-Picker 45
Gráfica 9. Plano GAIA Promethee para alternativas y criterios de proyectos de mejora energética para una Planta de fabricación de cemento. 47
Gráfica 10. Plano GAIA Promethee sensibilidad A1(Reducción aire falso) a cambios a Criterio C1(Mejora consumo energético)..... 49
Gráfica 11. Plano GAIA Promethee sensibilidad A1(Reducción aire falso) a cambios a Criterio C2 (Inversión inicial) 50
Gráfica 12. Plano GAIA Promethee sensibilidad A1 (Reducción aire falso) a cambios a Criterio C3 (Ahorro anual) 51
Gráfica 13. Plano GAIA Promethee sensibilidad A1 (Reducción aire falso) a cambios a Criterio C4 (Impacto Ambiental) 52
Gráfica 14. Representación Roadmap mejora eficiencia consumo energético planta cemento 10 años 60

Listado de Tablas

Tabla 1. Características deseadas en herramientas para toma de decisiones en la Planeación en la Industria (Fuente: Construcción a partir de fuentes propias)..... 15
Tabla 2. Criterios típicos para evaluación de Sistemas de abastecimiento energético..... 16
Tabla 3. Proyectos para mejora de eficiencia en producción de cemento..... 22
Tabla 4. Algunos modelos de planeación empleados la industria cementera 24
Tabla 5. Métodos MCDA utilizados según el tipo de problema 27
Tabla 6. Información de entrada necesaria para métodos MCDA de Calificación (Outranking) y resultados de salida 28
Tabla 7. Comparación Métodos AHP, PROMETHEE, ELECTRE, para uso en energía..... 30
Tabla 8. 5 proyectos que impactan el consumo energético en Cemento..... 42
Tabla 9. Interfaz de ingreso de datos para modelación Smart-Picker 44
Tabla 10. Caracterización de los criterios en Smart-Picker 44
Tabla 11a. Resultados y flujos priorización de Alternativas según criterios decisor..... 46
Tabla 11b. Alternativas priorizadas bajo método Promethee (software Smart-Picker) 46
Tabla 12. Sensibilización Alternativa A1 en valores críticos de cada criterio (% peso)..... 48

Listado de Acrónimos y Símbolos

AHP	Analytic Hierarchy Process
ANP	Analytic Network Process
CEMBUREAU	Organization of the cement industry in Europe
CIS	Independent States Community
CO2	Carbon Dioxide
CSI	Cement Sustainability Initiative
DEA	Data Envelopment Analysis
ECRA	European Cement Research Academy
EIA	Energy Information Agency
ELECTREE	Elimination and Choice Expressing Reality
EPA	Environment Protection Agency
GAIA	Promethee graphical representation
GNR	Getting the numbers right, a WBSC program
GP	Goal Programing
HPRP	High-pressure roller press
IEA	International Energy Agency
KCAL	Kilocalories
KWH	Kilowatts hour
MACBETH	Measuring Attractiveness by Categorical Based Evaluation Technique
MAUT	Multi - Attribute Utility Theory
MCDA	Multicriteria decision Aid
MEGA	Mega planning method
MP	Materias Primas
PROMETHEE	Preference Ranking Organization Method for Enriched Evaluation
SWOT	Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats
TOPSIS	Technique of Order Preference Similarity to the ideal Solution.
US	United States
UTA	Utility theory additive
WBSC	Worldwide Business Sustainability Council

Resumen general

La industria cementera ha sido tradicionalmente uno de los principales protagonistas en la demanda de recursos energéticos, dando cuenta por el 2% del consumo global de energía según la WBSC en 2012, y en consecuencia es responsable del 5% de las emisiones de CO2 a nivel mundial, estos, entre otros factores hacen que la industria cementera sea particularmente visible en los temas de intensidad energética.

Factores como la demanda energética son críticos en los procesos de planeación de inversiones y deben ser entrelazados con otros diversos aspectos de primer orden, tales como aspectos técnicos, económicos, sociales, medio ambientales entre otros, esto exige que los procesos de planeación sean complejos, con altos niveles de incertidumbre y con niveles limitados de racionalidad e información a menudo subjetiva.

Este trabajo plantea dimensionalmente como esta planeación se ha propuesto desde el interior de la industria, los horizontes de mejora que ha planteado el sector frente a variables externas independientes como la volatilidad de los mercados energéticos, la creciente regulación gubernamental en términos ambientales y la gran dinámica de renovación tecnológica planteada para industria. Se propone entonces la revisión de tendencias en utilización de una de las metodologías de planeación en materia de asignación de recursos e inversiones en recursos energéticos, identificación y selección de una herramienta de planeación y toma de decisiones basada en análisis multicriterio bajo incertidumbre MCDA que pueda aplicarse de manera ágil teniendo en cuenta las limitaciones de información y racionalidad.

Finalmente se tratará un caso de planeación simple de la industria con el método seleccionado y por medio de un paquete computacional de uso académico se modelara la toma de decisión para priorizar alternativas de inversión, teniendo en cuenta parámetros cotidianos de la planeación en la industria cementera que permitan probar el desempeño del método en casos reales del sector de manufactura de cemento.

1. Introducción y contexto

Las nuevas realidades en materia de abastecimiento energético que encaran los sectores industriales, domésticos y otros de escala mundial, involucran variables como la sostenibilidad, innovación tecnológica, dinámica económica, aspectos medio ambientales y elementos financieros (Schneider, Romer, Tschudin, & Bolio, 2011). Para adaptarse a este ambiente los procesos de planeación y toma de decisiones han evolucionado, incluso en el sector de producción del cemento, el cual se ha caracterizado por una alta intensidad en el consumo de recursos energéticos, siendo el responsable del 12% a 15% de la energía utilizada industrialmente a nivel mundial (Madlool, Saidur, Hossain, & Rahim, 2011).

Usualmente la planeación de recursos energéticos en industrias de gran escala, como la industria del cemento, deben incluir análisis de tendencias de la demanda (Dikos & Spyropoulou, 2013) con ofertas frecuentemente basadas en modelos económicos y tecnológicos presentando una serie de alternativas y acciones que podrían cumplir los objetivos deseados (Beccali, Cellura, & Mistretta, 2003) y que a su vez deben incorporar diversos niveles de conocimiento por parte de los decisores en la priorización, y que obedecen o se rigen por concepciones, criterios, información, perspectivas e intereses particulares de cada compañía (Slotte & Hämäläinen, 2014).

Desde hace más de cuatro décadas se han venido desarrollando diferentes métodos de planeación y toma de decisiones que pueden considerar múltiples criterios (Kantorovich, 1960). Se han evidenciado elementos comunes en los modelos metodológicos tales como lógica, prospectiva, probabilidad y en algunos casos se han indicado algunas contradicciones entre estas disciplinas (Bradfield, Wright, Burt, Cairns, & Van Der Heijden, 2005). Dada la abundancia de métodos y acercamientos a problemas de planeación se analizaron tres grandes familias de métodos que pueden ser aplicados:

Optimización de Problemas Multiobjetivo: esta disciplina tiene como base la utilización de un conjunto de algoritmos que permiten abordar problemas con alternativas de solución discretizadas y condicionadas por un comportamiento asociado a funciones objetivo, las cuales podrían ser lineales o no lineales, y que a su vez contienen variables continuas que pueden maximizarse o minimizarse en algunas regiones de dichas funciones, incluso aportando soluciones en conflicto con otras funciones objetivo que no permitan solucionar todas las

necesidades del problema. Un ejemplo de esto es la función costo vs rendimiento (Diwekar, 2008) y (Arsham, Adlakha, & Lev, 2009).

MCDA, Multiple Criteria Decision Analysis: son métodos que ayudan a los decisores a tomar decisiones en función de sus preferencias, en los casos en que existe más de un criterio en conflicto. Al utilizar métodos MCDA puede hacerse frente a problemas complejos, dividiéndolos en problemas más simples o más pequeños. Después de sopesar algunos criterios y hacer juicios sobre los mismos, se vuelven a unir las piezas para presentar una visión conjunta que represente la mejor opción de solución (Pohekar & Ramachandran, 2004). La tabla 1 contiene una calificación y clasificación de los aspectos y características deseadas en procesos de planeación por entes decisores en la industria. Se construyó a partir de la revisión de literatura y de la experiencia en el sector con fuentes privadas.

Además de las técnicas de optimización, se encuentran casos de aplicación de la metodología de *Dinámica de Sistemas* en la planeación de recursos energéticos en la industria cementera. Por ejemplo, Ansari & Seifi (2013) tienen en cuenta variables asociadas a los mercados de recursos energéticos, emisiones de CO2, crecimiento de la demanda entre otros, y Anand, Vrat, & Dahiya, (2006) analizan el impacto en el abastecimiento de recursos energéticos para la manufactura de cemento. También se encuentran análisis enfocados en la evolución tecnológica asociada a la demanda energética, restricciones gubernamentales e impacto en precio y la competitividad del sector cementero (Honggang & Arquitts, 1999).

Enmarcando el problema de planeación de consumo energético de la industria cementera en problemas de planeación de uso de recursos energéticos y su exigencia para toma de decisiones con multiples objetivos en conflicto, se propone la compatibibilidad de los Métodos de Análisis de toma de Decisiones Multicriterio (MCDA) (Loken, 2007). A pesar del gran número de aplicaciones de esta metodología, no es posible afirmar que exista un método superior para algún campo de aplicación, quizás por la naturaleza de la toma de decisiones (Guitouni & Martel, 1998), por esto se sintetiza la percepción en caracteristicas que podrian ser deseadas en los ejercicios de planeación.

Tabla 1. Características deseadas en herramientas para toma de decisiones en la Planeación en la Industria

	Optimización de Objetivos	Dinámica de Sistemas	Análisis Multicriterio MCDA
Multiobjetivo / Multicriterio	■■■■	■■■	■■■■■
Multidecisores	■	■	■■■■■
Repetitividad	■■■■■	■■■■■	■■■
Tratamiento de información subjetiva	■	■■■■■	■■■■■
Resolución de información	■■■■■	■■■	■
Complejidad matemática	■■■■■	■■■	■■■
Decisiones para nivel estratégico	■■■■	■■■	■■■■■

Nivel de aplicación: ■ Bajo / ■■■■■ Alto

(Fuente: Construcción a partir de fuentes propias)

Para este estudio es fundamental utilizar un método que contenga un alto nivel de aplicación en problemas con múltiples decisores con efectos mínimos de compensación y la posibilidad de identificar las preferencias durante el proceso de decisión. También es importante considerar que la resolución de información puede ser limitada y con altos niveles de incertidumbre. Contemplando lo anterior y a partir de los aspectos presentados en la Tabla 4. Se determina que, para el desarrollo del análisis de toma de decisiones en planeación de inversiones en recursos energéticos para la industria cementera, se utilizará Metodología MCDA, dada su facilidad de entendimiento, tratamiento multidecisor, multicriterio y manejo de información disponible.

Este trabajo pretende conectar y aplicar las tendencias de toma de decisiones bajo métodos MCDA con las necesidades de planeación de la industria de fabricación de cemento, representado en un caso de priorización de inversiones en proyectos de mejora de consumo energético de una operación cementera.

En la industria del cemento es común incluir criterios técnicos, económicos, ambientales y sociales en la toma de decisiones. Wang, et al. (2009) realizaron una revisión de 199 publicaciones de aplicaciones de métodos MCDA en planeación energética, clasificando en cuatro grandes grupos de criterios de decisión y a su vez cada criterio en hasta nueve subcriterios, encontrando que los criterios económicos y ambientales son los más considerados, 35% y 34% respectivamente, seguidos de los técnicos y sociales 22% y 8% respectivamente (ver detalle a continuación en la Tabla 2), donde Wang, et al. (2009) presentan dichos criterios.

Tabla 2. Criterios típicos para evaluación de Sistemas de abastecimiento energético

Aspectos	Criterio	Publicaciones citadas
Técnico	Eficiencia	15
	Eficiencia energética	3
	Relación de Energía Primaria	4
	Seguridad	9
	Confiabilidad	9
	Madurez de la tecnología	3
Económico	Costos de Inversión	24
	Costos de Operación y Mmto	13
	Costo Combustible	9
	Costo Electricidad	7
	Valor presente neto	5
	Retorno de Inversión	4
	Ciclo de vida	4
	Costos anual equivalente	4
Medio Ambiente	Emisiones de NOx	12
	Emisiones de CO2	21
	Emisiones de CO	3
	Emisiones de SO_2	8
	Emisiones particuladas	5
	Compuestos Volátiles Orgánicos	3
	Uso de la tierra	10
	Ruido	6
Social	Aceptabilidad social	4
	Creación de empleo	9
	Beneficios sociales	5

Tomado de Wang, Jing, Zhang, & Zhao, (2009).

Como se muestra en la Tabla 2 para cada aspecto se tiene un número de criterios y, considerando que la decisión debe satisfacer un gran número de sub-criterios, es necesario

identificar métodos de planeación que consideren niveles de incertidumbre en la información disponible y en algunos casos que permitan intervenir información de naturaleza subjetiva o de difícil comparación para los decisores.

2. Problema: Complejidad de la planeación tecnológica para transformación de recursos energéticos en la industria del cemento

Ante la gran complejidad de los actuales mercados de fuentes y recursos energéticos, las industrias altamente intensivas energéticamente, como la industria cementera, deben enfrentar difíciles acertijos a la hora de invertir en tecnología de transformación de combustibles y electricidad ya que incluso desde su análisis de viabilidad la rentabilidad de los tipos de infraestructura seleccionada puede ser incierta.

Se han planteado esquemas de tomas de decisiones estratégicas que formulan escenarios posibles para establecer nuevos esquemas productivos alrededor de la asignación de recursos y tecnologías para fuentes energéticas; sin embargo, no se ha identificado cual o cuáles de los actuales modelos de toma de decisiones pueden aplicarse de una manera confiable y altamente ajustada al caso cementero.

Teniendo en cuenta lo anterior, nuestro propósito es identificar los principales aspectos que se deben tener en cuenta en las tareas de tomas de decisiones en la planeación de inversiones en abastecimiento energético en la industria cementera y la pertinencia de la utilización de Métodos de Análisis Multicriterio para apoyar estos procesos de planeación.

2.1. Cuestionamientos Relevantes

¿Cómo identificar los drivers en la dinámica de costos de los energéticos asociados a la operación de producción de cemento?

¿Cómo tomar decisiones respeto a la tenencia de fuentes y activos energéticos para aumentar la seguridad del suministro?

¿Cómo valorar las preferencias en la toma de decisiones en inversión en recursos energéticos y sus impactos en la rentabilidad del negocio cementero?

¿Existen ventajas y/o desventajas en la utilización de métodos de toma de decisiones para en tareas de planeación de recursos energéticos en la industria cementera?

2.2. Delimitación y Alcance

El propósito de este estudio se limita al radio de planeación en los procesos de manufactura de cemento, comprendido desde la transformación de materia prima, incluyendo los procesos |principales de producción de cemento hasta el empaque de producto. Procesos externos como exploración, explotación y transporte de materias primas, recursos y productos externos a la planta no se consideran en el análisis, dada su particularidad. También se excluyen análisis en logística y cadenas de distribución, procesos de producción de concreto.

El horizonte de planeación contemplado es de 10 años para largo plazo, y 5 años para el mediano. Los análisis financieros son basados en costos fijos de combustibles y electricidad, al igual que las inversiones no tienen variaciones de devaluación en el tiempo, las estimaciones son costos de 2015.

2.3. Objetivo General

Aplicar un método de análisis de decisiones Multicriterio a la planeación de tecnología energética para la industria del cemento.

2.3.1. Objetivos Específicos

- Comparar los métodos de análisis multicriterio más usados con base en su aplicabilidad a la selección de tecnología energética en cemento.
- Seleccionar y aplicar un método de toma de decisiones Multicriterio a un caso de renovación de tecnología en la industria del cemento.
- Representar de forma gráfica la dinámica de adopción de tecnología.

3. Consumo energético en la industria cementera.

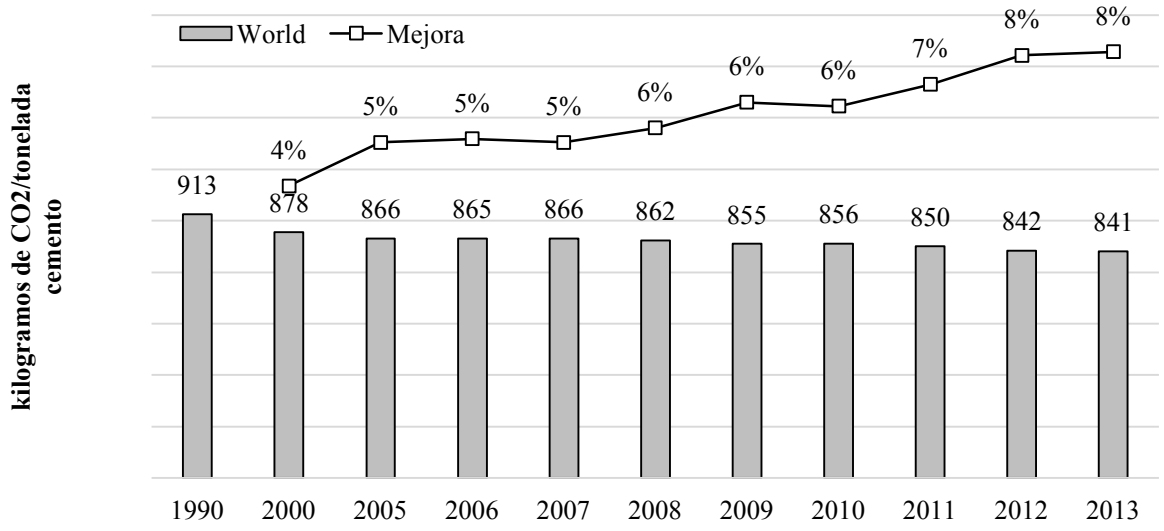
3.1. Consumo energético del proceso y su impacto en emisiones de CO2

Para la producción de cemento es necesario invertir una cantidad de energía en forma de calor y electricidad, comparable con la de otras industrias intensivas en energía como la de fabricación de acero y generación eléctrica (Oda et al., 2012). Teniendo en cuenta las estadísticas disponibles en Cement Sustainability Initiative (CSI), (2009) y de acuerdo con (Worrell, Kermeli, & Galitsky, 2012) la industria del cemento ha logrado disminuir un 6% en su consumo calórico promedio global entre 1990 y 2006, para el año 2013, se ha reportado un promedio global de 838 kCal/ton clinker (Cement Sustainability Initiative (CSI), 2009).

El uso de la energía eléctrica en la producción de cemento varía entre 90 y 150 kWh por tonelada de cemento producido.(Simbolott & Tosato, 2010). De acuerdo con la base de datos de GNR en el año 2006, el consumo de electricidad promedio global fue de 111 kWh por tonelada de cemento (Cement Sustainability Initiative (CSI), 2009).

Los valores típicos de emisión de CO2 pueden estar alrededor de 600 a 700 gramos de CO2 por cada kilo de cemento producido que, en proporción, se emiten en un 60% en la preparación de las materias primas (procesos de descarbonatación) y en un 40% en la combustión del proceso de Clinkerización. (Cembureau, 2009).

Gráfica 1. Mejoras en las emisiones de CO2 asociadas a la producción de cemento a 2013 [kg CO2 / tonelada Cemento]

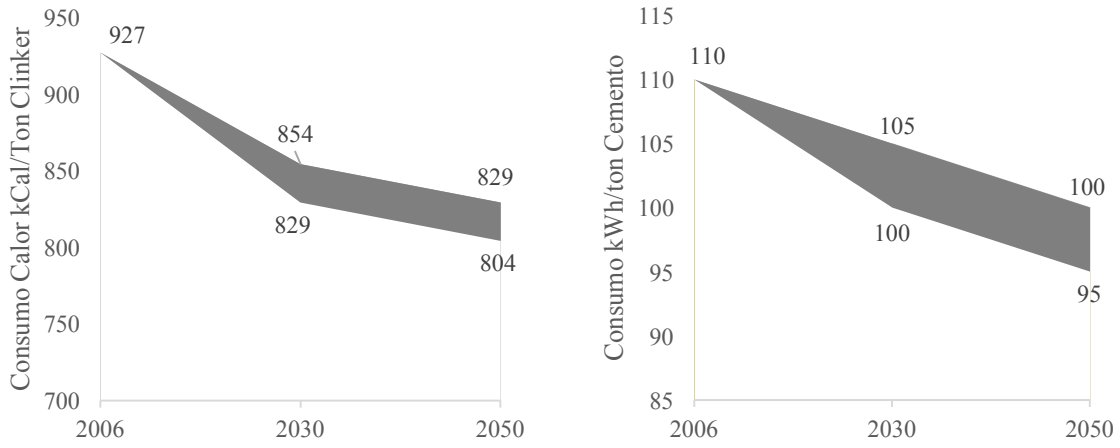


Tomado de Cement Sustainability Initiative CSI (2009).

Como se muestra en la Grafica 1 el consume de energía y las emisiones de CO2 en la industria del cemento han disminuido entre 1990 y 2013. Sin embargo, como respuesta a las necesidades en consumo de calor (combustible) y energía eléctrica del sector cementero, se han fijado metas de ahorro del 10% y 15% de calor para el procesos de fabricación de clinker y disminución de uso de electricidad entre 10% y 14%.

Para lograr estas metas, se requieren mejoras tecnológicas como las mostradas en la Grafica 1, la cual se construye a partir de datos de Schneider y Hoenig, (Cement Sustainability Initiative (CSI), 2009). Los escenarios de ahorro de la Gráfica 2 parten de la tecnología disponible actualmente en el negocio de fabricación de cemento y para el futuro asumen el desarrollo esperado de sistemas con captura de CO2, enriquecimiento de la combustión y sistemas de cogeneración entre otros, (Barker, Turner, Napier-Moore, Clark, & Davison, 2009).

Grafica 2. Perspectivas en disminución de consumo de calor y de electricidad en la fabricación de cemento a 2050



Tomado de CSI/ECRA Technology Papers, Cement Sustainability Initiative CSI (2009).

El significado de las mejoras tecnológicas en términos de CO2 es simple: las nuevas tecnologías están orientadas a la disminución de consumo de energía, ya sea combustible u electricidad, y esto permite que los procesos de combustión sean de menor escala y por tanto sean liberados menos gases de combustión a lo largo del proceso. Adicionalmente, los avances en reemplazo de materias primas y combustibles también son estructurados para disminuir la

intensidad de uso de materias que liberen dióxidos de carbono, dióxidos de nitrógeno y azufre entre otros. (Kline & Barcelo, 2012).

3.2. Cambios tecnológicos para reducción de consumo energético

Existen muchas mejoras tecnologías y medidas que pueden reducir la intensidad energética en las distintas etapas del proceso de producción de cemento (Worrell et al., 2012). En la tabla 3 se observan los rangos de mejoras que pueden alcanzarse con mejoras cada uno de principales procesos de la fabricación de cemento y en áreas del negocio; estas pueden ir desde la preparación de las materias primas hasta los proyectos de expansión que mejoran la tecnología de las plantas (Worrell et al., 2012).

Tabla 3. Proyectos para mejora de eficiencia en producción de cemento

Procesos principales producción cemento	Rango de ahorros en calor [Mbtu/ton cemento]	Rango de ahorros en electricidad [kWh/ton cemento]
Preparación Materias Primas	0.01 hasta 0.02	0.6 hasta 17.5
Fabricación Clinker	0.01 hasta 1.35	0.02 hasta 18.0
Molienda de Cemento	-	1.6 hasta 25.0
Mejoras a nivel planta	0.04	0.01 hasta 9.0
Mejora en productos	0.10 hasta 0.90	0.01 hasta 3.0
Cambio en materias primas	0.05 hasta 0.25	-
Proyectos expansion nuevas tecnologías	0.05 hasta 250	0.05 hasta 25

Tomado de Worrell et al., (2012).

A pesar de que se ha identificado un numero importante de alternativas para mejorar los consumos y el desempeño energético de los procesos de producción de cemento, este aspecto solo abarca la situación interna de las operaciones y excluye variables externas a las plantas de producción como la materia prima, la logística, los mercados de recursos energéticos, la demanda y la oferta de recursos financieros, la regulación, los competidores y los impactos ambientales. Por el gran número de factores interrelacionados que influyen en la eficiencia

energética de la industria del cemento, se requieren herramientas de planeación para las inversiones en eficiencia energética.

3.3. Necesidades de planeación en inversiones de mejoras en consumo energético en la industria cementera

Elegir la combinación de tecnologías que se deben adoptar y el momento adecuado para realizar las inversiones en eficiencia energética en la industria del cemento es un problema complejo porque:

- Existe una amplia y variada oferta de tecnologías disponibles para la mejora de consumo energético en la industria del cemento, como se puede comprobar en la tabla 2, donde se resumen alrededor de medio centenar de alternativas de mejora para los proceso.
- Existen algunas tecnologías aún en etapa de desarrollo, lo que no permite identificar y calcular beneficios que justifiquen inversiones en el mediano plazo (Koelbl, van den Broek, van Ruijven, Faaij, & van Vuuren, 2014).
- Las alternativas tienen costos de inversión altos (Worrell et al., 2012).
- Los precios de las fuentes energéticas dependen de mercados de materias primas y son volátiles, lo cual aumenta el riesgo de la selección de tecnologías e infraestructura.
- Las decisiones deben considerar el impacto en objetivos intangibles para las empresas, como imagen, estructuras sociales, aspectos legales.

Estos y otros aspectos justifican que se apliquen herramientas de apoyo a la toma de decisiones a los procesos de planeación que consideran insumos como energía. En la Tabla 4 se resumen algunos ejemplos de modelos de apoyo a la planeación en la industria del cemento reportados en la literatura.

Como se ve en la Tabla 4, se han desarrollado modelos de optimización para problemas de cadena de suministro (Dikos & Spyropoulou, 2013), planeación de operación de canteras (Asad, 2011; Rehman & Asad, 2010). También se encuentran modelos que buscan minimizar el costo de adquirir los energéticos para mantener un plan de producción e inventario de cemento dados (Yildirim & Kardas, 2014) y para ajustar la producción de manera óptima en función del costo de la electricidad (Mitra, Grossmann, Pinto, & Arora, 2012).

Tabla 4. Algunos modelos de planeación empleados la industria cementera

Autores	Aplicación	Tipo Modelo	Año
(Dikos & Spyropoulou, 2013)	Planeación y Optimización de la Cadena de Suministro	Optimización (SCOP)	2013
(Yildirim & Kardas, 2014)	Minimización de costos de energía en cemento	Sistema Multi-agente (MAS)	2014
(Asad, 2011)	Planeación largo plazo en la operación de minas cemento	Programación lineal (PL)	2011
(Mitra et al., 2012)	Planeación óptima de la producción considerando precios variables de electricidad	Modelo determinístico MILP	2012
(Huntzinger & Eatmon, 2009)	Análisis del ciclo de vida del proceso de fabricación de cemento	Modelación de ciclo de vida (LCA)	2009
(Rehman & Asad, 2010)	Optimización de corto plazo para operación cementera	Modelo Integrado de Programación Lineal (MILP)	2010
(Koroneos, Roumbas, & Moussiopoulos, 2005)	Modelos de eficiencia exergética en cemento	Análisis exergético del proceso	2005
(Gupta, 2012)	Selección de proveedor logístico cemento	MCDM Promethee	2012
(Das & Kandpal, 1999)	Modelación para estimar CO2 en cemento	Programación lineal dinámica	1999

Finalmente, también se tienen casos de aplicación de metodologías desarolladas para problemas ambientales como análisis de ciclo de vida LCA (Huntzinger & Eatmon, 2009) y análisis exergéticos (Koroneos et al., 2005).

Basados en la extensión de literatura localizada para tratamiento de Planeación en industrias similares a la industria de fabricación de cemento en términos de escala y de uso de recursos, se propone para este trabajo, la utilización un modelo Análisis Multicriterio para toma de Decisiones -MCDA- como herramienta metodológica, el cual permite el tratamiento de problemas con características compatibles a nuestro caso, tales como: Diversidad de soluciones, con múltiples criterios para decisión, en casos múltiples decisores, información subjetiva y con incertidumbre, y gran accesibilidad al modelo matemático para sustentar los resultados.

En adelante dedicamos una parte a un breve análisis de la estructura fundamental del método.

4. Análisis de Deciciones Multicriterio - MCDA

El método Análisis de Decisiones Multicriterio MCDM (Multi-Criteria Decision Making), también conocido como *Ayuda para toma de Decisiones Multicriterio* MCDA, es un conjunto de técnicas usadas en problemas complejos de priorización (Loken, 2007). Es una disciplina que permite combinar la matemática, gerenciamiento, informática, psicología, ciencias sociales, economía y ciencias ingenieriles, (A Ishizaka & Nemery, 2013). Entre las categorías de los problemas que pueden ser tratados con MCDA están:

a. Estratégicos: problemas de largo plazo con poca automatización y alta incertidumbre. Problemas de diseño.
b. Tácticos: problemas de mediano plazo, en fases de adaptación y estructuración media, con automatización media.
c. Operacionales: corto plazo, uso frecuente, bien definidos y altos niveles de automatización.

El método MCDA ordena alternativas calificadas por la intensidad de las preferencias de los decisores y permite encontrar soluciones de compromiso a partir de las preferencias que los propios decisores definen. El proceso se centra en el decisor y su capacidad lógica de análisis. La información subjetiva del decisor es capturada en las preferencias que le permiten orientar la decisión (A Ishizaka & Nemery, 2013).

Los métodos MCDA son una familia de métodos que difieren en el tipo de problema al cual se adecúan y en el tipo de solución propuesta. Roy (1981) define los siguientes tipos de problemas en *The Optimisation Problem Formulation: Criticism and Overstepping,* de la siguiente manera:

a. *Problemas de Selección de Opciones únicas.* Este tipo de problemas tiene como objetivo seleccionar la mejor opción resultante que permita reducir siempre la cantidad de alternativas comparables. (Por ejemplo, qué recurso es necesario para liderar un proyecto).
b. *Problemas de clasificación.* Este tipo de problemas necesitan establecer un orden de soluciones en diferentes categorías. Este tipo de proceso agrupa por características similares, son usados en ambientes organizacionales, por ejemplo, los niveles de desempeño de los recursos humanos de una compañía.

c. *Problemas de Calificación (Outranking).* Estos problemas buscan una solución de calificación de las alternativas, con escalas comúnmente comparativas, e.g., mejor a peor, caro a barato. Se usa comúnmente para evaluar alternativas técnicas o de desempeño en múltiples objetivos.
d. *Problemas de Descripción.* Permite identificar impactos y sus consecuencias, normalmente tiene un objetivo por cumplir en la parte inicial.
e. *Problemas de Eliminación.* Este tipo de incógnita busca eliminar opciones de una lista de categorías, o ranking de soluciones determinadas para un problema.

En términos generales, los métodos MCDA tienen tres enfoques para alcanzar una solución: el enfoque completo, el enfoque preferencia/indiferencia y el enfoque del nivel de referencia,

Enfoque completo. Supone que una puntuación mala en uno de los criterios se compensa por una puntuación buena en otro criterio. Por esta razón, calcula una puntuación global con base en la puntuación de cada criterio individual. Dentro de este enfoque se pueden clasificar técnicas como

- AHP, Analityc Hierarchy Process
- ANP, Analityc Network Process
- MAUT, Multi - Attribute Utility Theory
- MACBETH, Measuring Attractiveness by Categorical Based Evaluation Technique

Enfoque en Preferencia /Indiferencia (Outranking) (Escuela francesa). Evita el efecto de compensación en la puntuación de criterios, permite el concepto de no comparabilidad entre alternativas, es decir, dos opciones pueden tener el mismo puntaje, pero su comportamiento puede ser diferente y por lo tanto incomparable, y dado que las preferencias no pueden ser sumadas o compensadas matemáticamente, es posible seleccionar un mayor grado de preferencia a una opción cuando no son comparables en la realidad.

Entre este tipo de enfoque se pueden encontrar:

- PROMETHEE, Preference Ranking Organization Method for Enriched Evaluation
- ELECTRE, Elimination Et Choix Traduisant la Realité / Elimination and Choice Expressing Reality)

Programación de Objetivos o enfoque del nivel de referencia. Este enfoque define un objetivo en cada criterio, y luego se identifican las opciones más cercanas a la meta ideal o nivel de referencia.

- TOPSIS, Technique of Order Preference Similarity to the ideal Solution.
- Goal Programing
- DEA, Data Envolopment Analysis

En la Tabla 5 se muestran los tipos de MCDA adecuados al tipo de problema.

Tabla 5. Métodos MCDA utilizados según el tipo de problema

Problemas de Selección	Problemas de Calificación	Problemas de Clasificación	Problemas de Descripción
AHP	AHP	AHP Sort	
ANP	ANP		
MAUT/UTA	MAUT/UTA	UTADIS	
MACBETH	MACBETH		
PROMETHEE	PROMETHEE	FlowSort	GAIA, FS-Gaia
ELECTRE I	ELECTRE II	ELECTRE III	
TOPSIS	TOPSIS		
GOAL PROGRAM			
DEA	DEA		

Tomado de Wang et al. (2009).

En la Tabla 5 se presenta una clasificación de las familias metodológicas MCDA asociadas a cada clase problema (Wang et al., 2009), que coincide en parte con la clasificación de los tipos de problemas expuesta por Roy (1981).

Este trabajo se enmarca en un ejercicio de planeación de inversiones para la mejora de consumos energéticos como problemas tipo calificación -Outrankingbajo multiples objetivos.

De acuerdo con Roy (1981), el fundamento del tratamiento de problemas con métodos Outranking radica definición de una relación jerárquica entre los criterios en el planteamiento del problema, teniendo en cuenta lo que se sabe acerca de las preferencias del tomador de decisiones (que también podemos denominar como el conocimiento experto del decisor), la calidad de las evaluaciones de las alternativas y la naturaleza del problema en cuestión. En este método se deben identificar los argumentos suficientes para afirmar que existen alternativas comparables y que al mismo tiempo no existe ninguna razón fuerte para rechazar una alternativa.

Ishizaka & Nemery (2013), proponen un conjunto de criterios para seleccionar métodos MCDA de acuerdo con la información disponible y el resultado esperado (Ver tabla 6).

Tabla 6. Información de entrada necesaria para métodos MCDA de Calificación (Outranking) y resultados de salida

Información Entrada	Complejidad	Método MCDA	Salida (Resultados)
Función de Utilidad	Muy Alta	MAUT	Calificación completa con puntajes
Comparación de pares por interdependencias	↑	ANP	Calificación completa con puntajes
Comparación de pares en escalas de intervalos		MACBETH	Calificación completa con puntajes
Comparación de pares por indiferencia, preferencia y umbrales de veto		AHP ELECTREE	Calificación completa con puntajes Calificación parcial y completa con puntajes (calificación en pares por grados)
Comparación por indiferencia y umbrales de indiferencia		PROMETHEE	Calificación parcial y completa con puntajes (grados preferencia en pares y calificación)
Opciones ideales y restricciones	↓	Goal Programming	Solución factible con desviación
Opción ideal y anti-ideal		TOPSIS	Clasificación completa con calificación cercana
	Muy Baja		
Entradas subjetivas no necesarias		DEA	Calificación parcial con clasificación de efectividad

Tomado de Ishizaka & Nemery (2013).

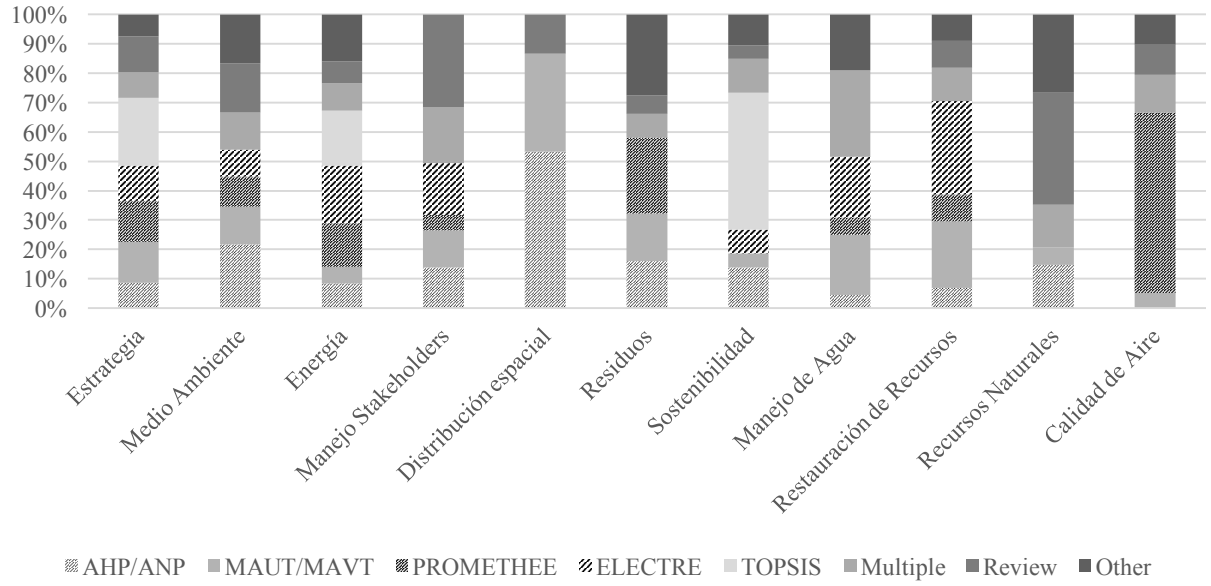
De acuerdo con la Tabla 6, el método PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enriched Evaluation) puede ser preferido al ELECTRE (Elimination Et Choix Traduisant la Realité / Elimination and Choice Expresiing Reality) porque solamente requiere de la identificación o medición del grad de indiferencia y/o de preferencia de los decisores, mientras que ELECTRE requiere análisis de indiferencia, además de conceptos de preferencia y de veto.

4.1. Aplicación de metodologías MCDA en planeación de recursos energéticos

En materia de literatura en el tema, citamos el trabajo de (Wang et al., 2009), quienes presentan una revisión de literatura de 108 aplicaciones de análisis de decisiones en multicriterio en problemas ambientales. En este estudio se muestra que AHP y ANP son las técnicas más aplicadas en energía (42%), seguidas de Promethee (12%).

Por otra parte (Huang, Keisler, & Linkov, 2011) hacen un sondeo de 312 aplicaciones de Métodos MCDA por áreas de interés como se ve en la Gráfica 3, los métodos de Agregación (AHP/ANP) y de Preferencia (PROMETHEE/ELECTRE-denotados por fondo con tramas a líneas) tienden a ser utilizados problemas de alta complejidad como por ejemplo restauración de recursos, manejo de agua, manejo de interesados y energía.

Gráfica 3. Distribución de 312 aplicaciones de Métodos MCDA por áreas de interés



Tomado de Huang et al, (2011).

Estos resultados presentados en la Gráfica 3 coinciden con Loken (2007), que encuentra que los modelos MCDA basados en preferencias son muy populares en los problemas de planificación de recursos energéticos. Los modelos MCDA se han utilizado en muchos estudios para la evaluación de estrategias de alternativas de suministro de electricidad (casos de gestión de la demanda también fueron incluidos en algunos de ellos). Los métodos de preferencias (Outranking), más populares son PROMETHEE II y ELECTRE III. PROMETHEE II y también se ha utilizado para la evaluación de alternativas para el uso de energía geotérmica (Haralambopoulos & Polatidis, 2003).

Por último, como se muestra en la Tabla 7 que resume la revisión de literatura, de la cual podemos concluir que es más correcto hablar de que método es más aplicable y no de cuál es mejor que otro, pues dada la naturaleza multicriterio de su creación, son métodos muy flexibles a la hora de hablar de aplicaciones.

Tabla 7. Comparación Métodos AHP, PROMETHEE, ELECTRE, para uso en energía

Método	Ventajas	Limitaciones	Aplicación
AHP ANP MAUT (Agregation)	- Se ha afirmado que el proceso de evaluación de las funciones de utilidad ayuda a los procesos de toma de decisiones para identificar los criterios más importantes, generar y evaluar alternativas de solución, resolver el juicio y la preferencia de los conflictos entre el proyecto de modalidades e identificar mejoras en el impacto (Loken, 2007)y (Hobbs, 1995) - AHP / MAUT es uno de los pocos métodos MCDA diseñados especialmente para el manejo de riesgos e incertidumbres. - Ramanathan y Ganesh (Ramanathan & Ganesh, 1995)Afirman que AHP es simple, flexible, atractivo,	- Siskos y Hubert, 1983 (Siskos & Spyridakos, 1999) afirmaron que análisis (AHP, ANP, MAUT) presentan muchas complicaciones en el proceso de decisión, especialmente en relación con la evaluación de las probabilidades y la fijación de las ventajas asociadas a los criterios específicos. Establecer las funciones de utilidad es una tarea difícil y engorrosa, porque la mayoría de modalidades no tienen una buena percepción de sus propias preferencias de riesgo. - Ramanathan y Ganesh, (Ramanathan & Ganesh, 1995) anotaron que AHP requiere mucho tiempo cuando el número de alternativas y / o criterios es	- Para elección o clasificación de las estrategias de tecnologías energéticas, (Loken, 2007) - Evaluación de estrategias alternativas de suministro de electricidad, utilizando AHP, MAUT también en optimización de la demanda. (Hobbs, 1995) - Evaluación de la gestión de la demanda energética y elección de canasta de recursos de energía (Hobbs & Meier, 1994) - Ramanathan y Ganesh, (Ramanathan & Ganesh, 1995) han utilizado técnicas de agregación de las desviaciones para resolver problemas de asignación de recursos energéticos.

	intuitivo y cuenta con capacidad para manejar criterios cuantitativos y cualitativos en el mismo marco	grande, como es a menudo el caso en problemas de recursos energéticos. - Las desventajas en la valoración numérica de la preferencia presentada por Saaty en 1983, donde se podrían sobre-estimar la preferencia por una alternativa, (Salo & Hämäläinen, 1997)	
PROMETHEE ELECTREE (Outranking)	- Proporcionan una clara visión en la estructura del problema, modelan las preferencias del decisor de una manera realista e identifican dudas en la intensidad de las preferencias de los decisores, estos métodos son capaces de tratar problemas bajo incertidumbre (Behzadian, Kazemzadeh, Albadvi, & Aghdasi, 2010) - Se afirma que la representación de los resultados de este tipo de métodos es más simple y fácil de entender que los resultados de enfoques de agregación, tales como AHP, MAUT. - No se utilizan para la selección real de alternativas, pero son muy adecuados para el proceso de selección inicial (Greening & Bernow, 2004)	- Según (Georgopoulou, Sarafidis, & Diakoulaki, 1998) una diferencia principal entre PROMETHEE y ELECTRE es el cálculo procedimiento que se utiliza. PROMETHEE II dispone de un procedimiento de cálculo transparente, fácil para entender por cada decisor, mientras que los decisores a menudo se encuentran los cálculos de ELECTRE III demasiado complejo. - ELECTRE termina catalogada como una "caja negra" que termina siendo insatisfactoria para los decisores, tal como expone (Haralambopoulos & Polatidis, 2003) y (Georgopoulou et al., 1998)	- La mayoría de la investigación en este tema se han centrado en la selección y evaluación de generación de energía o de explotación alternativas. - En el contexto de la gestión de la energía, (Gwo-Hshiung, Tzay-an, & Chien-Yuan, 1992) empleó PROMETHEE para evaluar exhaustivamente las alternativas para el desarrollo de nuevos sistemas de energía - Estrategia para los futuros sistemas energéticos en Taiwán. - Evaluación y clasificación de esquemas de explotación de energía alternativas geotérmico (Goumas & Lygerou, 2000) - (Diakoulaki & Karangelis, 2007) presentaron criterios económicos, técnicos y ambientales, para evaluar escenarios de generación de energía en Grecia - Evaluación y clasificación de proyectos de energías renovables de con criterios múltiples, (Haralambopoulos & Polatidis, 2003)
STEP TOPSIS (Goal Programing)	- Según (Loken, 2007), Programación de metas es menos subjetiva que la teoría de la agregación de valor, ofrece un procedimiento muy	- Existen muchas críticas en relación con la asignación de los pesos, la determinación de objetivos y la normalización de las variables.	- Tiene aplicaciones de optimización del suministro de energía en generación de electricidad (Mirasgedis & Diakoulaki, 1997) - Aplicaciones en materia medioambiental (y para la elección

	sencillo que resulta de fácil entendimiento por decisores - Muchos de los métodos de programación de metas son adecuados para ser aplicado directamente en programación lineal, permitiendo su integración en sistemas Optimización simple - (Pohekar & Ramachandran, 2004) GP ayudar a los decisores a estar al tanto de "el impacto de una preferencia por una función objetivo en la solución".	- Cada criterio tiene que estar asociado con un atributo definido en una escala medible, lo que significa que el método no es generalmente adecuado manejar criterios que no son cuantitativos. - Debe combinarse con otra técnica si los criterios cualitativos van a ser incluidos en un estudio. - El método requiere que los decisores son capaces de definir sus objetivos en cada iteración. - En algunos casos donde podría presentar soluciones dominantes como óptimas.	de una canasta de recursos de energía (Hobbs & Meier, 1994) También se comparó con un método de obtención de ingresos y a un número de métodos basados en (Hobbs & Meier, 1994) planificación de la energía son el método STEP, que fue utilizado para la asignación de recursos de energía (Pokharel & Chandrashekar, 1998), - TOPSIS, que fue utilizado para la evaluación de estrategias alternativas de suministro de electricidad (Hobbs, 1995).

Fuente: Elaboración propia.

4.2. Método PROMETHEE

El método PROMETHEE fue desarrollado por (J. P. Brans, Mareschal, & Vincke, 1984) y presentado por primera vez en 1982 en una conferencia organizada por Nadeau y Landry en la Universidad Laval, Quebec, Canadá.

PROMETHEE es un método de calificación bastante simple en su concepción y aplicación, en comparación con los otros métodos para el análisis de criterios múltiples, su éxito es básicamente debido a sus propiedades matemáticas ya su facilidad de uso particular (J.-P. Brans & Mareschal, 2005), (J. P. Brans, Vincke, & Mareschal, 1986).

4.2.1. Conceptos Fundamentales del Método PROMETHEE

Según Ishizaka & Nemery (2013), Promethee tiene por objeto entregar un listado priorizado de soluciones alternativas a un determinado problema según el grado de preferencia del decisor. Los pasos esenciales son:

1. Cálculo del grado de preferencia entre cada dos alternativas medidas en un mismo criterio.
2. Cálculo de la priorización de los flujos de decisiones en un mismo criterio.
3. Cálculo de la priorización global de la preferencia entre múltiples criterios.

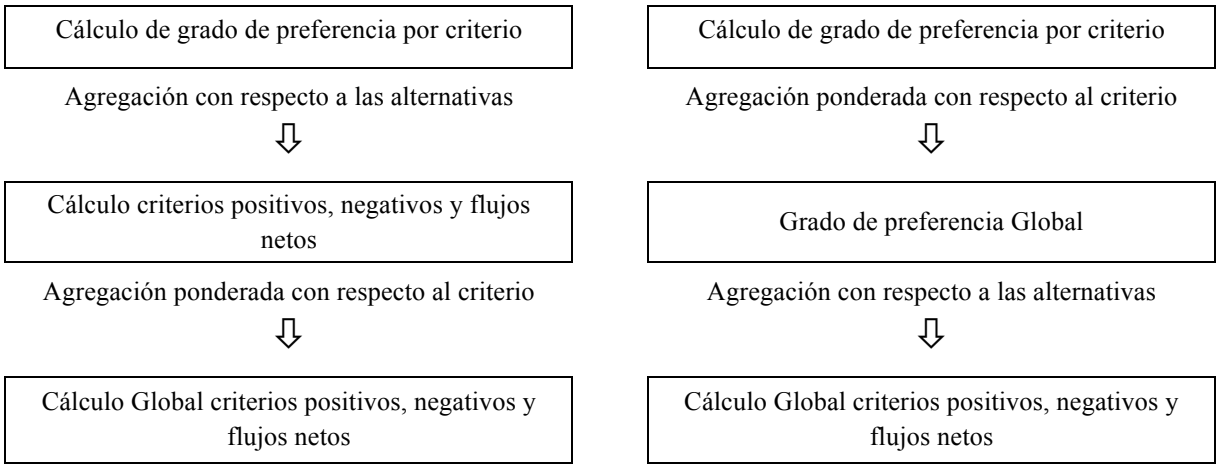
Este cálculo global puede ser representado gráficamente y presentar la mejor decisión al problema, junto al grado de asertividad de las demás alternativas permitiendo tener la sensibilidad de los impactos en cada criterio evaluado.

Matriz de preferencias

En Promethee las preferencias son plasmadas en una matriz de preferencias, que a su vez es deducida desde una matriz de pagos o consecuencias. Esta matriz de preferencias contiene los grados de preferencias para las alternativas consideradas y que posteriormente serán calculadas entre todos los pares ordenados. Los grados de preferencias globales se deducen a partir de los grados de preferencia de cada criterio por medio de su suma ponderada. Los flujos globales se pueden deducir de los grados de preferencias globales. La razón de la introducción de esta matriz preferencia es la comparación de la información en las comparaciones por pares.

La matriz de preferencia nos permite detectar alternativas incomparables de manera puntual (incomparables si sólo tienen en cuenta estas dos alternativas), o que son 'indiferentes' en la clasificación final. La matriz de preferencia contiene información que se pierde cuando la agregación de los grados de preferencia por parejas llega a los flujos globales. Este proceso de cálculo está representado en el lado derecho de la siguiente figura en la gráfica 4,

Gráfica 4. Procesos de Cálculo Método Promethee



Tomado de Ishizaka & Nemery (2013).

Los dos enfoques presentados en la Gráfica 4, son totalmente complementarios. Con el primer enfoque es posible identificar el comportamiento global de una alternativa en comparación con todas las otras alternativas en un determinado criterio. Con el segundo enfoque (grado de preferencia global) se puede evaluar cómo una alternativa se compara a nivel global con otra alternativa específica.

Grado de preferencia entre alternativas en criterio único (A Ishizaka & Nemery, 2013)

El método Promethee establece un cálculo entre los grados de preferencia de un agente decisor en la selección entre dos alternativas de solución frente un problema, esta intensidad de la preferencia es medida entre 0 y 1, y establece que tan satisfactoria es una solución respecto otra desde la perspectiva de cada criterio de evaluación del decisor.

Si el grado Preferencia igual a 1, es una fuerte preferencia por la alternativa evaluada en uno de los criterios, comparada con otra alternativa. Si la Preferencia igual a 0, es poca preferencia o incluso denota indiferencia hacia la alternativa para el criterio en particular. Además, es posible que la preferencia no contenga un valor extremo en ninguno de ambos sentidos, es decir, que exista en algún grado entre 0 y 1.

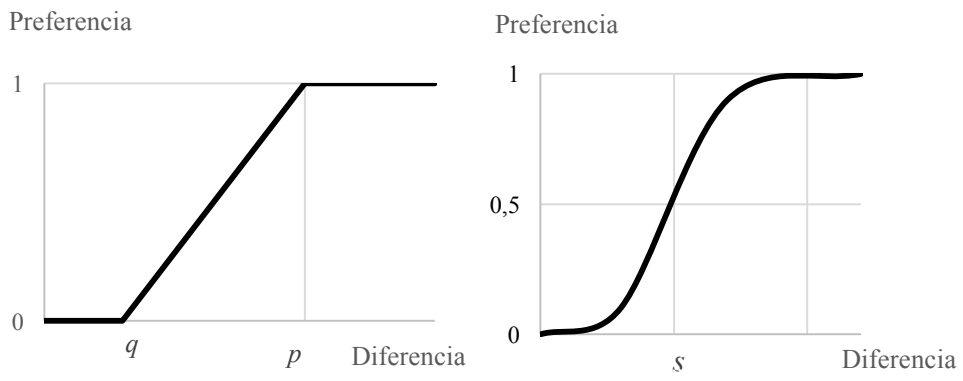
La comparación entre dos alternativas debe ser en el mismo criterio y el grado de preferencia es resultado de la comparación de los valores cuantitativos o cualitativos, por ejemplo, precio de un bien – cuantitativo, o diseño de un producto – cualitativo, y que solo puede ser calificado dependiendo del objetivo buscado por el decisor. Aunque en la realidad es muy difícil que un decisor racional pueda tener una preferencia únicamente en un criterio, incluso puede no ser realista pensar que solo se quiere cumplir un objetivo (por ejemplo, la compra de un auto nuevo, en la que siempre se es indiferente a cumplir el objetivo funcional: transportarse, porque todas las alternativas disponibles podrían cumplir ese objetivo).

Lo importante en PROMETHEE es la forma en la que el decisor percibe la diferencia entre las evaluaciones en cada criterio específico. Estas comparaciones por pares son basadas en la diferencia entre las evaluaciones de dos alternativas (por ejemplo, la diferencia de precio entre las alternativas).

Se puede elegir entre dos tipos de funciones de preferencia: lineal y la función de Gauss. Si el tomador de decisiones opta por una función lineal, entonces las preferencias aumentarán gradualmente como una función de la diferencia entre las evaluaciones en un criterio particular.

Cuando se utiliza una función de preferencia Gaussiana, el aumento sigue una función exponencial.

Gráfica 5. Funciones objetivo para Calculo Método Promethee



Tomado de Ishizaka & Nemery (2013)

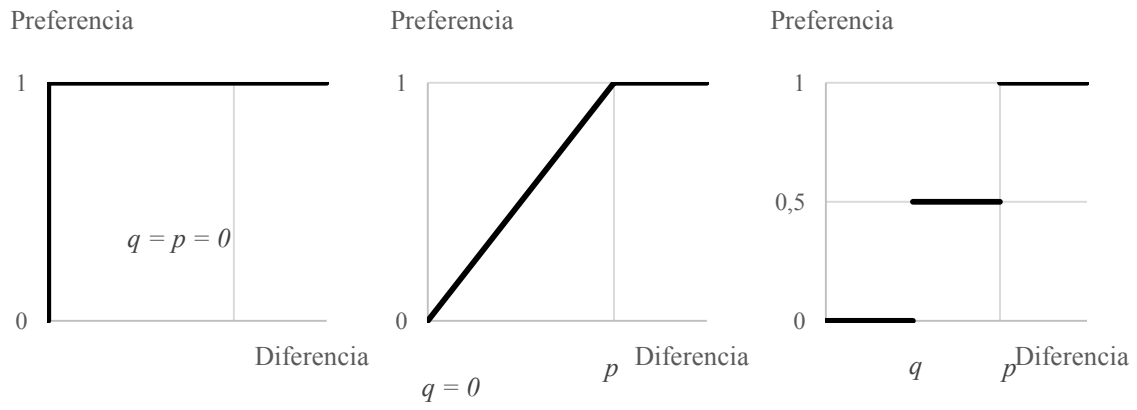
Con el fin de especificar cada función de preferencia, se requieren uno o dos parámetros. La función lineal de preferencia requiere dos parámetros: un umbral *q* de indiferencia y el umbral de preferencia *p* (Gráfica 5 - izquierda). Por otro lado, la función de Gauss requiere sólo un parámetro: el punto de inflexión *s*, (Gráfica 5 - derecha).

Estas funciones arrojan el valor de la preferencia, y es calculado por la diferencia entre el grado de indiferencia (p - q) y el de preferencia (q, que se refiere a la porción en la función donde deja de ser de interesante para el decisor dicha solución, es decir, cuando p sea igual a q, la preferencia es cero, o indiferente). Si la diferencia entre las evaluaciones de alternativas en un criterio es menor que el umbral de indiferencia (negativo), entonces el tomador de decisiones no percibe diferencias entre estas dos alternativas y el grado de preferencia es 0. Si la diferencia es mayor que el umbral de preferencia, existe una intensidad de preferencia; es decir, el grado de preferencia puede llegar a ser igual a 1.

La Gráfica 6 representa la función de preferencia lineal para los parámetros particulares *p* y *q*. Si q = p = 0 (Gráfica 6(izquierda), entonces hay una fuerte preferencia por una alternativa tan pronto como haya una diferencia diferente de 0 (por pequeña que la diferencia pueda ser). En la figura 6(centro) no existe una zona de indiferencia (q = 0) lo que significa que cada diferencia se

considera de manera proporcional. Por último, en la Gráfica 6(derecha) la función de preferencia es dada por una “función de paso“. Esto significa que la fuerza de preferencia sólo puede tomar tres valores: 0, 0,5 o 1.

Gráfica 6. Funciones objetivo Lineales para Calculo Método Promethee



Tomado de A Ishizaka & Nemery (2013)

Concepto de Flujos positivos, negativos y totales en criterio único (Alessio Ishizaka & Nemery, 2013)

El concepto de flujo criterio único positivo (o flujo de salida) de una alternativa es una puntuación con un valor entre 0 y 1.

- Se puede interpretar como: ¿Cuánto se prefiere una alternativa (de acuerdo con las preferencias del decisor) sobre todas las demás alternativas en dicho criterio particular? Cuanto mayor sea este flujo positivo, más preferida es la alternativa que se compara con las otras (es decir, dicha alternativa en la mejor). De hecho, es un "comportamiento promedio" obtenido con el promedio de todas las preferencias de una alternativa en comparación con las otras (excluyendo el grado de preferencia compararon con sí misma). Por lo tanto, es la suma normalizada de todos los elementos de fila y siempre se encuentra entre 0 y 1.

De igual forma, los flujos negativos representan un comportamiento medio. Miden cómo las otras alternativas se prefieren a esta alternativa. El flujo negativo este modo se obtiene tomando un promedio de todos los grados de preferencia de las alternativas en comparación con esa

alternativa en particular (excluyendo el grado de preferencia en comparación con la alternativa misma). Esta puntuación de este modo siempre se encuentra entre 0 y 1.

Por último, para tomar aspectos tanto positivos como negativos de la en cuenta, usamos los flujos netos de una alternativa que se obtiene restando los flujos negativos de los flujos positivos. Estos tienen que estar maximizados o minimizados según el criterio, ya que representan el equilibrio entre la fuerza de la tendencia global y su debilidad. El resultado neto de una alternativa de este modo siempre se encuentra entre -1 y 1.

Los flujos globales o totales

Hasta este momento solo hemos considerado analisis de intensidad de preferencias con un solo criterio. Con el fin de tener en cuenta más de un criterio, incluso considerar todos los criterios al mismo tiempo, el decisor tiene que proporcionar la importancia relativa de cada criterio. Por ejemplo, el precio de un bien puede ser dos veces tan importante como su función. Por otro lado, la seguridad podría ser más importante que el precio. En otras palabras, el decisor especifica un peso para cada criterio lo cual le permite agregar peso (por medio de una suma ponderada) a todos los flujos positivos, negativos y netos que entran en los flujos globales, de modo que se pueden tomar todos los criterios en cuenta.

La importancia relativa de un criterio puede representarse de varias maneras (verbales, por comparaciones en pares, etc.) pero, al final, es, en cualquier caso, se transforma en un valor numérico asociado a cada criterio (es decir, el peso del criterio).

La puntuación global positiva indica cuánto se prefiere una alternativa a nivel global a todas las otras alternativas al considerar varios criterios. Dado que los pesos están normalizados, la puntuación global positiva siempre se encuentra entre 0 y 1.

De forma análoga, la puntuación negativa global indica cuanto se prefiere una alternativa por parte de otras alternativas. La puntuación negativa siempre se encuentra entre 0 y -1 y tiene que ser minimizada. Los flujos netos de una alternativa, se obtienen restando los flujos negativos de los flujos positivos, así se toman en cuenta los puntos de vista (siendo solo una alternativa preferida sobre todas las otras opciones).

Existen variaciones al metodo, PROMETHEE I y PROMETHEE II con diferencias en el tratamiento de los flujos netos y globales, que no son objeto de análisis para el presente trabajo.

4.2.2. Métodos de representación Promethee: Plano Gaia

El plano Gaia es una representación bidimensional de un problema de decisión. Contiene todos los aspectos del problema de decisión: las alternativas, los criterios y la información de preferencias del decisor (umbrales y pesos). En este plano, las alternativas están representadas por los puntos y los criterios por flechas o vectores. La posición de las alternativas le permite al decisor tener idea en cuanto a sus similitudes:

a. Cuanto más cerca se ubiquen las alternativas, son más similares.
b. La similitud y no similitud se definen por el umbral de indiferencia y preferencia. Esto implica que el plano Gaia depende de la información de preferencia propuesta por el decisor.

Análogamente, la posición relativa de los criterios nos indica la correlación y anti-correlación (o conflicto) de criterios:

a. Cuanto más cercanas estén las flechas, más correlacionadas con los criterios en el problema de decisión.
b. Cuanto mayor es el ángulo entre los criterios, mayor es el conflicto entre ellos. El plano Gaia permite la visualización de los puntos de vista conflictivos.

Como se puede ver, las longitudes de los criterios son diferentes. La longitud de un criterio mide su potencia o es posible tener una 'diferenciación' como una función de los datos:

a. A medida que las alternativas sean más diferentes sobre un criterio, la longitud de la flecha es más larga y por lo tanto es mayor la discrepancia en el criterio.
b. El poder de discriminación de un criterio depende de los umbrales de preferencia elegidos (cuanto mayor es el umbral de indiferencia, menor diferenciación hay en el criterio) y de igual forma para el peso del criterio.

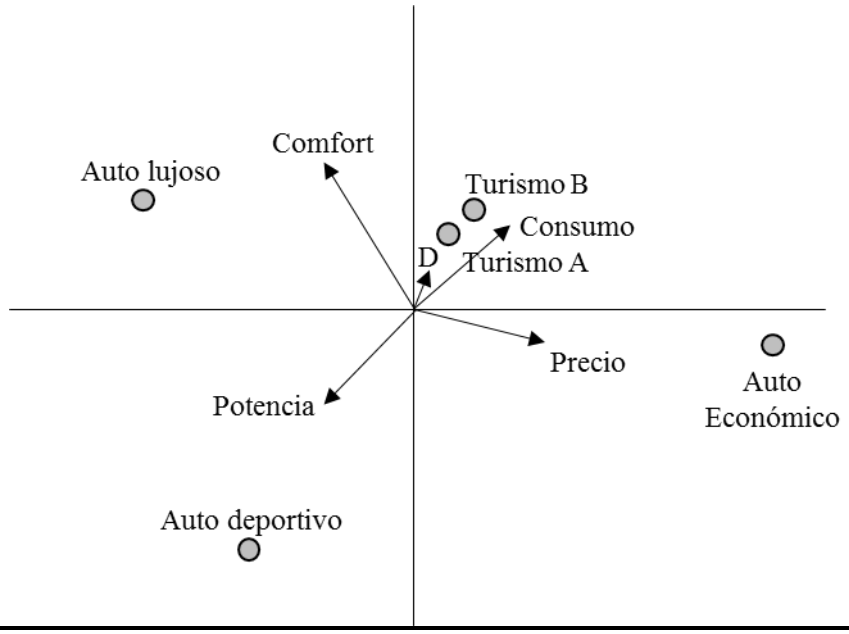
Por último, la flecha o vector más corto (llamado la alternativa de decisión) representa el criterio de solución más acertada con respecto al objetivo, y su orientación corresponde a su criterio más fuerte seleccionado. La proyección de las alternativas en esta línea representa sus prioridades:

a. Cuanto mayor es la línea de la alternativa, mayor será la preferencia.

Sin embargo, ya que esta es sólo una representación de dos dimensiones, los resultados de la proyección puede representar una pérdida de información que hace que el plano GAIA sea

menos preciso (o menos representativo para del problema de decisión). La cantidad de información consolidada depende de los datos y el número de criterios.

Gráfica 7. Ejemplo de un plano de Gaia en una selección de automóviles



Tomado de Ishizaka & Nemery (2013).

Según el plano GAIA del ejemplo de selección de un nuevo auto presentado en el texto de la gráfica anterior, tenemos los siguientes resultados:

a. Las alternativas son representadas por círculos y corresponden a Auto de lujo, Auto deportivo, Turismo A, Turismo B y Auto económico.
b. Los criterios son vectores y corresponden a Potencia, Comfort, Precio, Consumo.
c. Las alternativas Turismo A y Turismo B, son muy cercanas y similares siendo la opción Turismo B la más preferida y en consecuencia la seleccionada.
d. Las alternativas menos compatibles son Auto deportivo y Auto económico, que evidencian una distancia muy considerable en el plano.
e. En cuanto a criterios, los de mayor conflicto están dados por los criterios de consumo y potencia que se presentan con ángulos opuestos plenamente, en direcciones opuestas que podemos denominar criterios en conflicto.

f. La longitud de cada criterio está relacionado con el grado de discriminación sobre el criterios y está dado por los umbrales de indiferencia u preferencia de cada criterio y a su vez correspondiente al peso asignado, en el ejemplo comfort y potencia son criterios muy discriminados por el umbral que se seleccionó y en consecuencia se ubican lejanos del centro, significando que se alejan del objetivo deseado.
g. Por último, se muestra un pequeño vector D, que indica la inclinación de su preferencia mayor y sus prioridades, para este caso el decisor se inclina por alternativas de mejor consumo.

5. Caso de análisis: Aplicación de Método Promethee a la planeación de inversión en tecnología para el mejoramiento del consumo energético en una planta de fabricación de cemento

En este capítulo desarrollaremos un caso de selección de alternativas para un ejercicio de planeación, para el cual utilizaremos cinco alternativas de proyectos de mejora en consumo energético en la industria del cemento, cabe anotar que en aras de practicidad no se profundiza en la naturaleza de las alternativas de mejora, o en la materia de la toma de decisiones, se pretende unicamente probar la accesibilidad del método.

Nuestra tarea será aplicar el método PROMETHEE para priorizar estas cinco alternativas disponibles de mejora, según la preferencia y criterios del decisor y presentar un mapa gráfico bajo la técnica del Roadmapping que se explicará en el capitulo siguiente, el cual contienne una propuesta de secuencia de ejecución, teniendo en cuenta que todas son soluciones viables y realizables técnicamente.

5.1. Alternativas de mejoramiento de una planta de producción de cemento

Como un acercamiento al tema, se seleccionaron un grupo de cinco mejoras en consumo energéticos típicas aplicables en diferentes puntos del proceso cementero, tomados del trabajo de Worrell et al. (2012), cuya aplicación fue comprobada con una fuente de este sector industrial.

- **Reducción de aires falsos de proceso en la molienda de material crudo:** este proyecto identifica y disminuye excesos de entradas de aire frio en el proceso.
- **Especializar estaciones de Molienda de cemento**, esta iniciativa consta de una reorganización de la programación de producción de diferentes tipos de cemento en una misma estación de molienda, evitando tiempos muertos en el reinicio de la molienda por cambio de receta.
- **Mejorar factores de marcha de hornos de Clinkerización**, esta mejora permite aumentar la estabilidad de los hornos y su tiempo de operación evitando enfriamientos súbitos en el proceso.
- **Enriquecimiento de la combustión con oxígeno**, este proyecto es una de las nuevas líneas de desarrollo del negocio del cemento que consta principalmente de una tener una

turbo-alimentación del proceso de combustión con oxígeno y obtener un mayor desempeño y producción del horno.

- **Mineralización del Clinker**, este proyecto propone una reformulación de las recetas del clinker de manera que se logren propiedades físico-químicas más reactivas y no sea necesario la utilización de una reacción altamente demandante en

Los proyectos de mejoras se caracterizan en términos de consumo energético, inversión inicial, ahorro anual e impacto en el medio ambiente, tal como se muestra en la Tabla 8. Para dimensionar los ahorros, considere que para una planta de cemento de 2 millones de toneladas de producción al año, se debe tener en cuenta que los ahorros registrados no solo son asociados a beneficios de disminución de consumo energético, tambien pueden incluir ahorros por mayor productividad, u ahorros en materias primas.

Tabla 8. 5 proyectos que impactan el consumo energético en Cemento

Nombre	**Consumo Energético** [% disminución]	**Inversión Inicial** [usd Capex]	**Ahorro Anual** [usd]	**Medio Ambiente** [impacto]
Reducción Aire falso Molienda	2%	50,000	101,000	Poco
Especialización Molienda Cemento	3%	500,000	78,000	Bajo
Mejora Run Factor Hornos	1%	10,000	108,000	Bajo
Enriquecimiento Combustión Oxigeno	2%	10,000	10,000	Bajo
Mineralización del Clinker	1%	20,000	10,000	Medio

Anotaciones importantes:

- Los casos citados no reflejan la totalidad de posibilidades con las que se cuentan en una operación de cemento para disminuir el consumo de energéticos (combustibles y electricidad), se extraen de algo más de 200 alternativas (Worrell et al., 2012), se escogen 5 representativas con características de diferentes visiones de mejora.
- La variable independiente finita es el recurso económico, por tanto todas las alternativas compiten por la asignación de recursos para su implementación.
- No se realizanevaluaciones financieras tales como VPN, TIR o ROI.
- Los impactos ambientales son subjetivos según la experiencia del decisor.

5.2. Objetivos ejercicio

- Priorizar el orden de ejecución de las cinco alternativas de mejora para la planta de cemento, teniendo en cuenta que pueden ser ejecutadas y cuyo ranking está basado en la maximización de beneficios y minimización de costos, se tiene en cuenta que el impacto ambiental puede ser un costo administrativo alto, a pesar de ser subjetivo.
- Aplicar y analizar la facilidad de utilización del método Promethee para los casos propuestos.
- Analizar los resultados del método e identificar las preferencias y su similitud con las recomendaciones aportadas por el decisor.

5.3. Paquete computacional para aplicación Método Promethee

Para el ejercicio en mención se utilizara el software Smart-Picker, este paquete computacional ha sido recomendado en el texto guía para el presente trabajo, "Ishizaka A., Nemery P. Multi-criteria Decision Analysis: Methods and Software. Wiley. 2013", Fue puesto en el mercado en el 2011 por equipo del departamento de Ingeniería de la Universidad Libre de Bruselas

Este paquete proporciona una versión estudiantil gratuita para uso académico, por tiempo ilimitado, pero con limitaciones de aplicación, únicamente calcula con 4 criterios y 5 alternativas.

5.4. Proceso y modelación

Los pasos para realizar la modelación son los siguientes, y se realizaron con base en la información obtenida de las alternativas para mejora de consumo en planta de cemento, (no se trata el uso del software en detalle, dada la extensión del trabajo se omiten del tratamiento incluido en el trabajo):

a. **Ingreso de datos para modelación**.

   En este paso, se ingresan las cinco alternativas A1, A2,…A5, según la caracterización presentada en la Tabla 9. Cada alternativa se especifica en cada criterio seleccionado para el ejercicio (Técnico - Mejora en consumo energético, Económico - Inversión Capex, Financiero - Ahorro anual en gastos de energéticos, y Ambiental - beneficios en Impactos ambientales), la única escala subjetiva se asigna al criterio ambiental (siendo la

calificación de “Poco” la más cercana a la indiferencia, y “Medio” el impacto más preferido por el decisor.

Tabla 9. Interfaz de ingreso de datos para modelación Smart-Picker

Performances of the actions

	Name	C1	C2	C3	C4
		Mejora	Inversión	Ahorro	Ambiental
A1	Reducción aire falso Molienda	1.7	50000.0	101000.0	Poco
A2	Especialización Molienda Cemento	2.9	500000.0	78000.0	Bajo
A3	Mejora Factor de Marcha hornos	0.7	10000.0	108000.0	Bajo
A4	Enriquecimiento Combustion con Oxigeno	2.0	10000.0	10000.0	Bajo
A5	Mineralización del Clinker	1.0	20000.0	10000.0	Medio

b. Ingreso de parámetros de preferencia

En este paso es necesario asignar precisiones a cada criterio para el ejercicio de optimización del método matemático, los cuales deben definir:

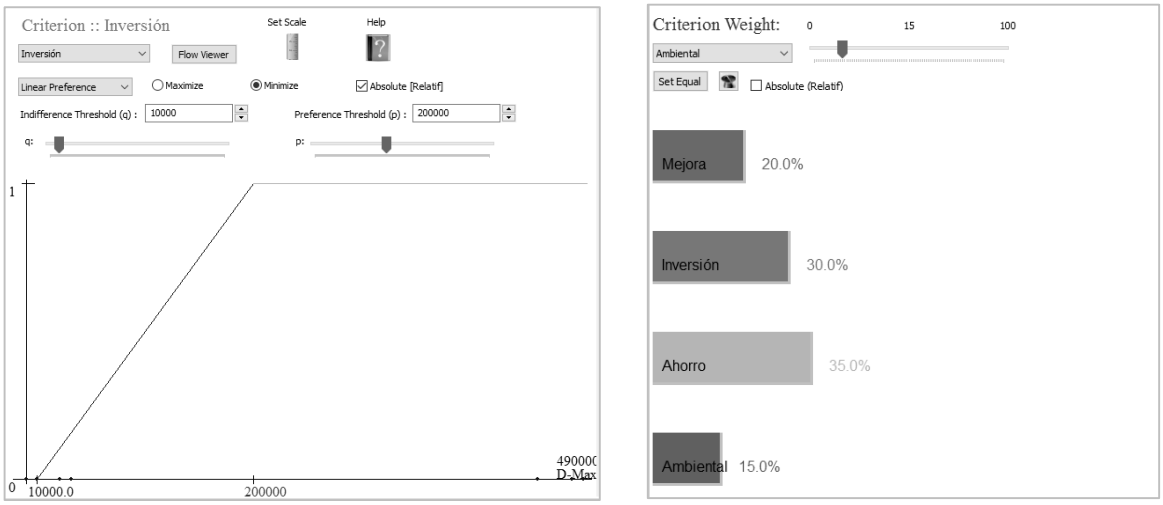
- Minimización o Maximización del Criterio
- Peso porcentual de cada Criterio, relativo a una suma de todos los criterios ponderados de 100%, de la siguiente manera: El Decisor (se reserva identidad, por razones de confidencialidad de los datos proporcionados), asignó al 20% de peso a Mejora (Criterio técnico), 30% a Inversión (Criterio Económico), 35% en Ahorro (Criterio Financiero) y 15% en Impacto Ambiental (Criterio Medio Ambiente).
- Tipo de función de preferencia, se escoge típicamente para todos los criterios una función lineal, definida por umbral de indiferencia *q*, y umbral de preferencia *p* tales parametros deben ser ingresados tal como se presenta en la tabla 10.

Tabla 10. Caracterización de los criterios en Smart-Picker

	Mejora	Inversión	Ahorro	Ambiental
new name	Mejora	Inversión	Ahorro	Ambiental
min max	max	min	max	min
weight	0.2	0.3	0.35	0.15
Type (L/S)	L	L	L	L
p	5	200000.0	100000	9
q	0.0	10000.0	1000.0	1.0
Abs/Rel	Abs	Abs	Abs	Abs

c. **Determinación de umbrales de preferencia alternativas y pesos de los criterios,** se ingresa de modo manual tal como se presenta en la Gráfica 8. También es posible utilizar interfaces especializadas para caracterizar cada alternativa (Umbrales, función de preferencia, escala) y asignación gráfica de pesos.

Gráfica 8. Caracterización de alternativas y criterios en Smart-Picker



d. **Resultados del cálculo de priorización de Smart-Pciker**

Luego de asegurar la caracterización de las alternativas (A_n) y los criterios (C_n), el software aplica el método suma de flujos positivos y negativos basados en las preferencias del decisor que presentó su deseo de minimización u maximización para cada alternativa, los cuales se pueden observar organizados según la calificación (ranking) del software en orden de posición 1 a 5, siendo el menor número el mas cercano a la preferencia del decisor contiguo a la calificación obtenida por cada criterio, presentado en las Tabla 10.a. En la Tabla 10.b. se presentan estos resultados organizados en orden de prioridad de mayor a menor asociados a sus caracteristicas de impacto en cada criterio.

Tabla 11a. Resultados y flujos priorización de Alternativas según criterios decisor

Results | Processed Data

Actions	Net Flows	Position
A1 - Reducción aire falso Molienda	0.3124	1.0
A2 - Especialización Molienda Cemento	-0.16933	4.0
A3 - Mejora Factor de Marcha hornos	0.23655	2.0
A4 - Enriquecimiento Combustion con Oxigeno	-0.12534	3.0
A5 - Mineralización del Clinker	-0.25429	5.0

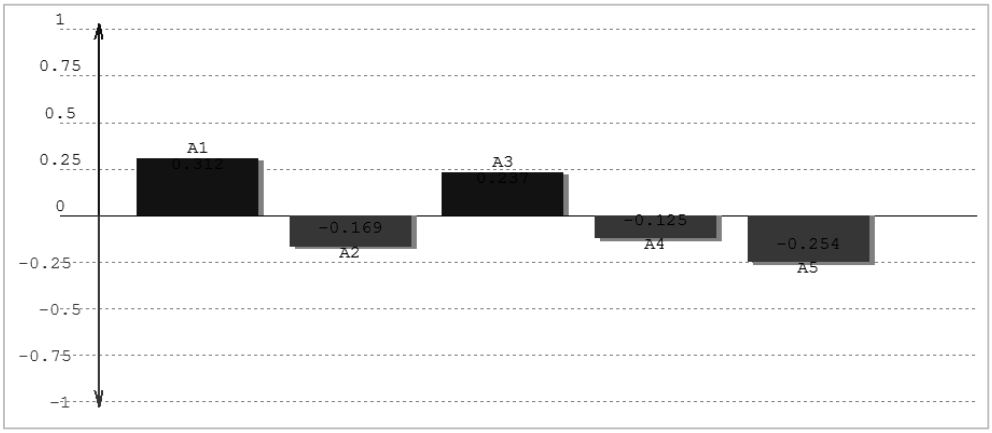
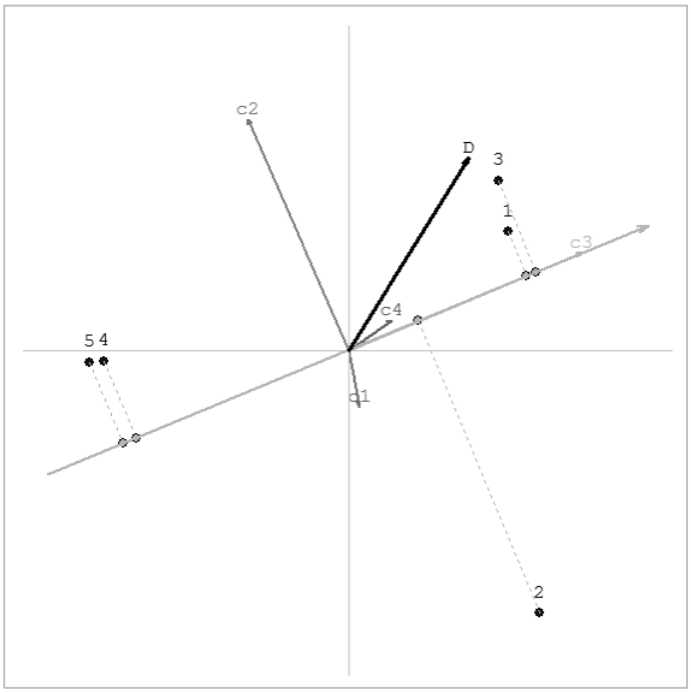


Tabla 11b. Alternativas priorizadas bajo método Promethee (software Smart-Picker)

Nombre	Consumo Energético [% disminución]	Inversión Inicial [usd Capex]	Ahorro Anual [usd]	Medio Ambiente [impacto]
1. Reducción Aire falso Molienda	1.7%	50,000	101,000	Poco
2. Mejora Run Factor Hornos	0.7%	10,000	108,000	Bajo
3. Enriquecimiento Combustión Oxigeno	2.0%	10,000	10,000	Bajo
4. Especialización Molienda Cemento	2.9%	500,000	78,000	Bajo
5. Mineralización del Clinker	1.0%	20,000	10,000	Medio

e. Plano GAIA de resultados en preferencias

Gráfica 9. Plano GAIA Promethee para alternativas y criterios de proyectos de mejora energética para una Planta de fabricación de cemento.



Observaciones a partir del plano de intensidad de preferencias presentadas en la Grafica 9:

a. El criterio con mayor preferencia por el decisor es C3(maximizar Ahorro anual), dada su preferencia del 35% en los pesos de los criterios. Seguido por C2 (deseo de minimizar Inversión) con una alta preferencia según el umbral de preferencia *p* de la tabla 10, aunque existían varias alternativas que cumplían este criterio y aparentemente no inclinó decisión de manera importante.
b. Según lo anterior, A1 (punto 1) es el punto más cercano al centro, es decir, es el más óptimo de las alternativas para cumplir el objetivo, y a su vez el más cercano en el criterio preferido C3 (maximizar Ahorro anual).
c. C1 y C4, son resultado de preferencias débiles o con alto grado de indiferencia, a pesar de no estar en conflicto directo con C3, están relegadas por el peso asignado por el decisor.
d. Las alternativas A4 (punto 4) y A5 (punto 5), están lejanas del vector de preferencia principal del decisor por tener un pobre desempeño en el criterio C3 (maximizar ahorro anual), y la alternativa A2 (punto 2) se ve muy distante por requerir la inversión más alta de todas las alternativas y se ubica de manera opuesta a C2 (minimizar inversión).

5.5. Análisis de sensibilidad de Resultados Modelación

Luego de obtener los resultados de la modelación, tomamos la Alternativa A1(Reducción de aire falso) de la tabla 11.b para realizar algunas pruebas de sensibilidad ante el cambio en los valores de cada criterio, manteniendo constante los pesos seleccionados por el decisor.

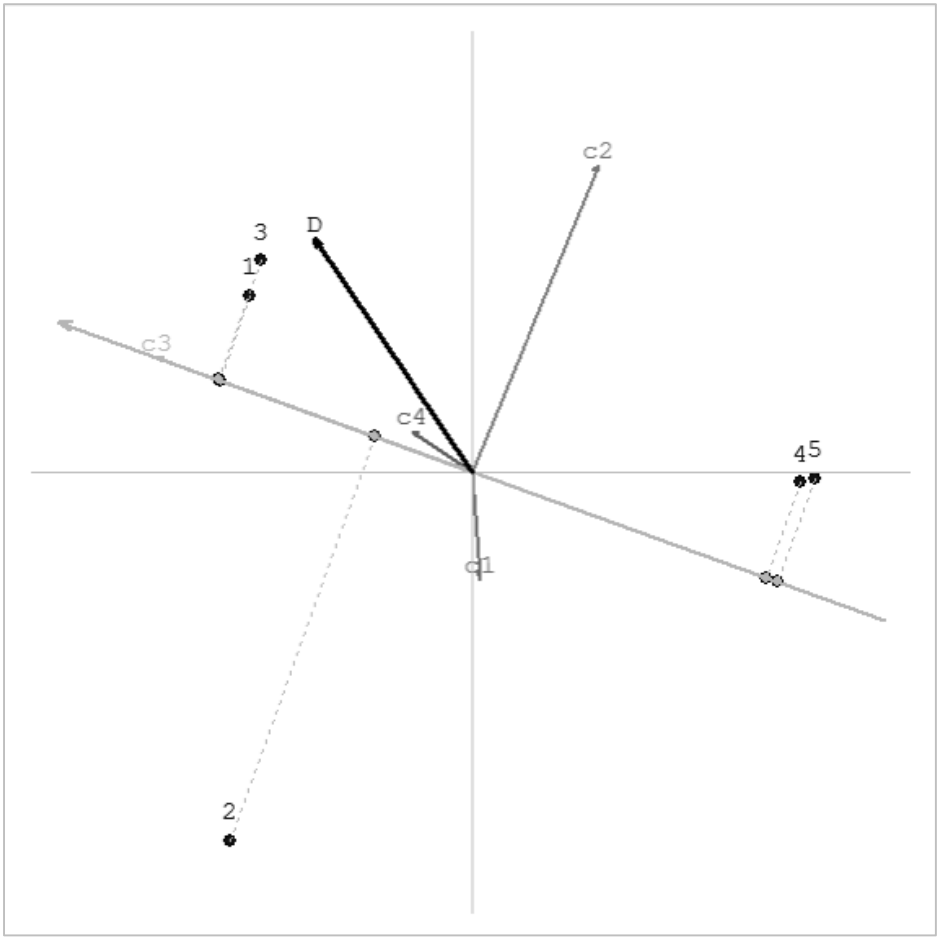
En la siguiente Tabla 12 se presentan variaciones en los valores extremos propuestos para cada uno de los criterios en los que fue evaluada la alternativa A1 (Reducción de aire falso en la molienda) en los cuales son propuestos valores extremos para cada uno de estos criterios, y en adelantes son comentados en relación cada uno de sus resultados reflejados en planos GAIA independientes, ver Graficas 10 a 13. Debe notarse que para la siguiente sensibilidad solo se alteran los valores de la alternativa A1, correspondiente al punto 1 en los planos GAIA presentados

Tabla 12. Sensibilización Alternativa A1 en valores críticos de cada criterio (% peso)

Nombre	**Consumo Energético (20%)** [% disminución] -Sensibilidad A- Gráfica 10	**Inversión Inicial (30%)** [usd Capex] -Sensibilidad B- Gráfica 11	**Ahorro Anual (35%)** [usd] -Sensibilidad C- Gráfica 12	**Medio Ambiente (15%)** [impacto] -Sensibilidad D- Gráfica 13
Alternativa A1 Reducción Aire falso Molienda	1.7%	50,000	101,000	Poco
Mínimo valor posible estimado	0.2%	10,000	1,000	Poco
Mínimo valor posible estimado	5%	200,000	100,000	Poco

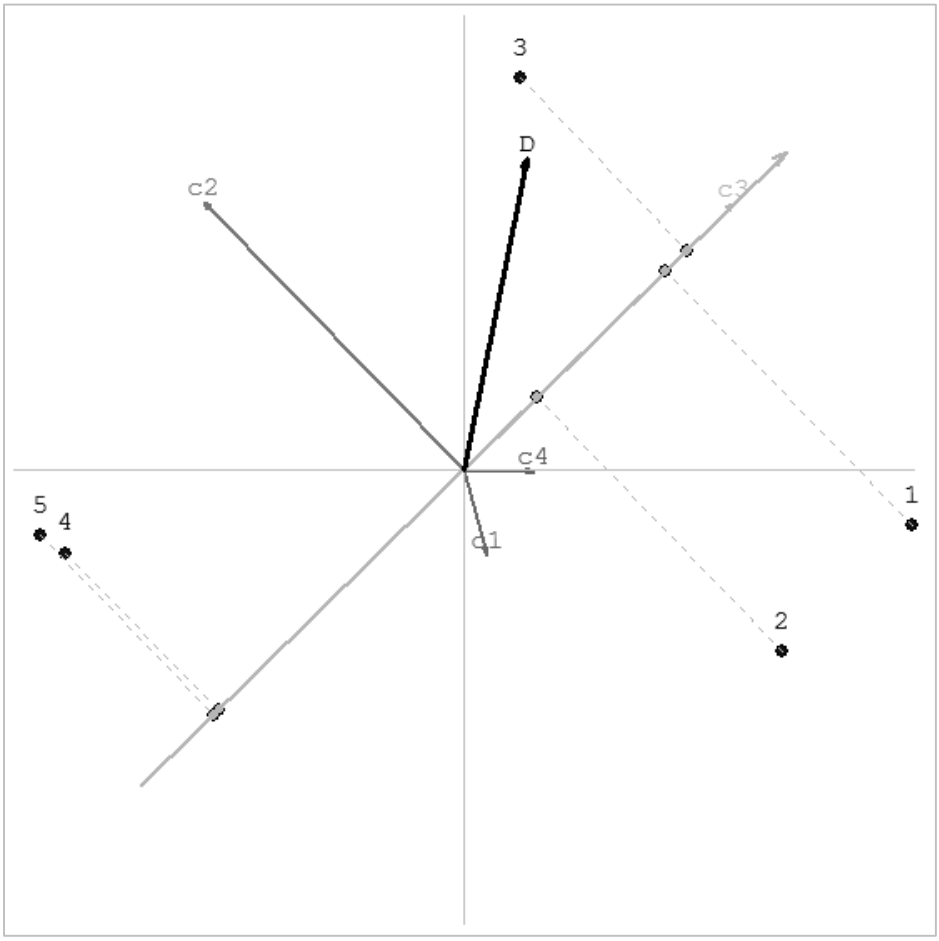
a. *Sensibilidad A. Valor mínimo de ahorro energético de Alternativa A1(Reducción de aire falso) respecto criterio C1(Mejora de consumo energético).* A1 puede mejorar el consumo energético en 1.7% según su planteamiento. Si asumimos que esta mejora en consumo es solo 0.2%, como lo indica la tabla 12, encontramos que el decisor aún prefiere esa alternativa A1, dado que áun puede cumplir su segundo criterio mas deseado C2(Inversión inicial, 30%) es posible notar en la Grafica 10 que el vector de decisión D continua orientado a al criterio C3(Máximo ahorro) aunque con menor intensidad, y el punto 1 (A1) es aún el mas cercano al criterio C3(Ahorro anual) como puede apreciarse en la Grafica 10 a continuación.

Gráfica 10. Plano GAIA Promethee sensibilidad A1(Reducción aire falso) a cambios a Criterio C1(Mejora consumo energético)



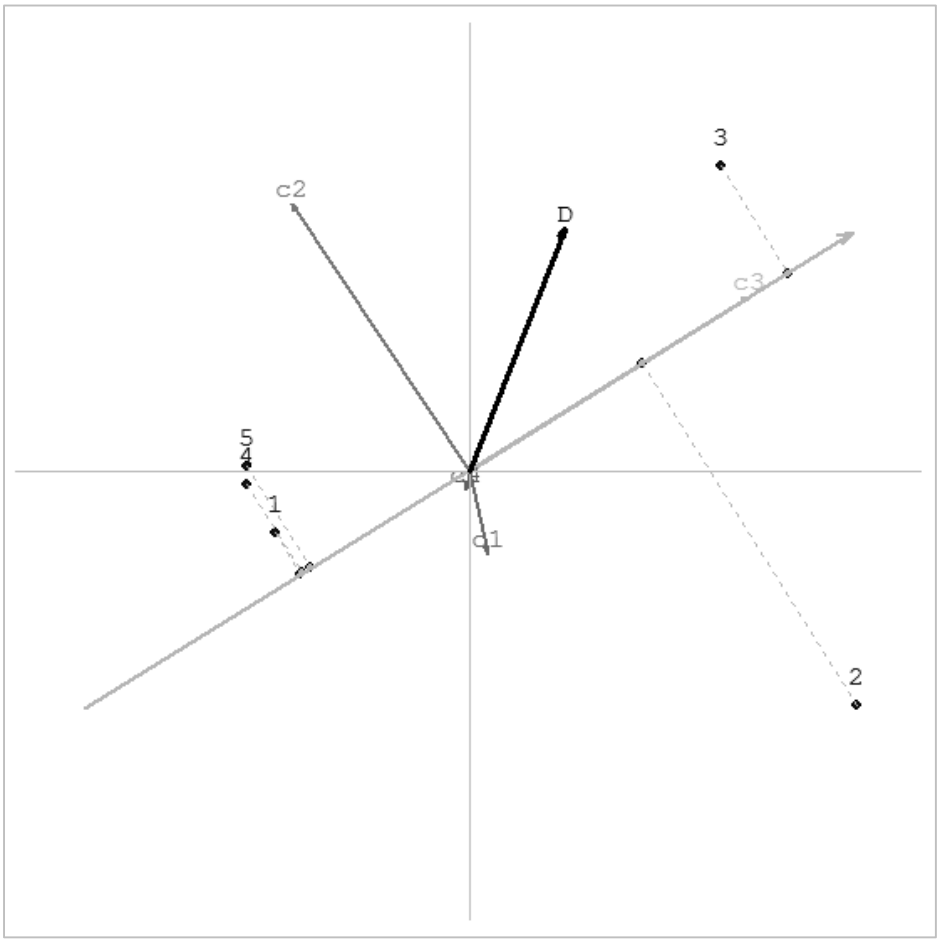
b. *Sensibilidad B. Valor máximo de inversión inicial de A1(Reducción de aire falso) respecto criterio C2(Menor inversión).* La propuesta de A1(Reducción de aire falso en la molienda) es una inversión originalmente de USD50,000, si la inversión se aumentara a USD200,000, la alternativa no sería preferida con la misma intensidad, de hecho debe ceder el paso a la alternativa A3(Enriquecimiento con oxigeno), que era la siguiente en el ranking, de hecho A1 tendría flujo negativo en la suma global y se alejaría de manera importante del objetivo de cumplir el criterio mas deseado C3(Ahorros anuales), como resultado, A1 solo sera objetivo de una timida preferencia por C1(consumo energético) y por C4 (Impacto Ambiental), ver vectores c1 y c4 en la Grafica 11 a continuación.

Gráfica 11. Plano GAIA Promethee sensibilidad A1(Reducción aire falso) a cambios a Criterio C2 (Inversión inicial)



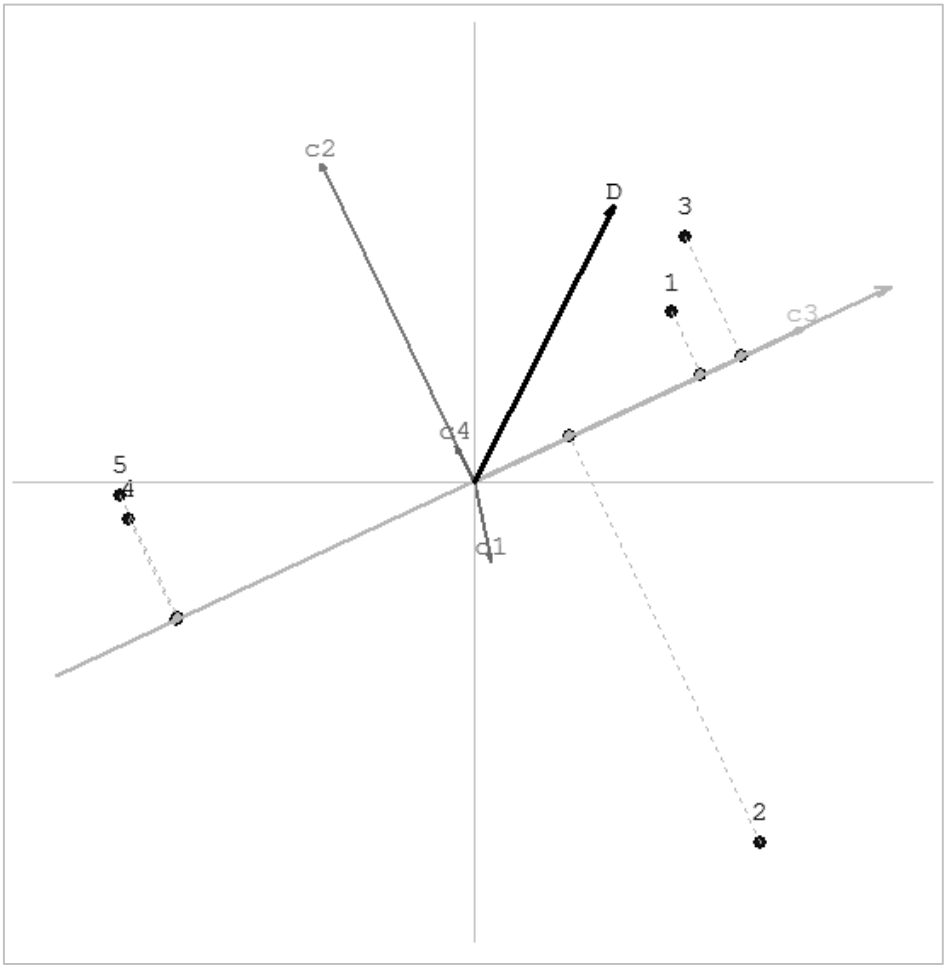
c. *Sensibilidad C. Valor mínimo de ahorro anual de Alternativa A1(Reducción de aire falso) respecto criterio C3(Ahorro anual),* este es el criterio de preferencia del decisor según su peso asignado es de 35%, la alternativa A1 que tenía un ahorro de USD101,400 es llevado a solo USD1,000, en consecuencia pasaría a ser una alternativa no preferida y prácticamente entra en conflicto con el criterio preferido por el decisor, veamos en la Gráfica 12 como se represnta este escenario, donde se aprecia el punto 1 (A1) esta en sentido opuesto al vector del criterio C3, y que predeciblemente la alternativa A3(enriquecimiento con oxigeno) sería el punto mas cercano al criterio mas deseado.

Gráfica 12. Plano GAIA Promethee sensibilidad A1 (Reducción aire falso) a cambios a Criterio C3 (Ahorro anual)



d. *Sensibilidad D. Valor medio impacto ambiental de Alternativa A1(Reducción de aire falso) respecto criterio C4(Impacto ambiental)*, en este caso A1 pasa de impacto bajo a impacto Medio, en valores subjetivos, sin embargo no se evidenciaron cambios en las preferencias y A1 aún es la alternativa más preferida, debido a que el peso asignado a este criterio (15%) no es muy fuerte para inclinar la preferencia del decisor. Ver la siguiente Gráfica 13.

Gráfica 13. Plano GAIA Promethee sensibilidad A1 (Reducción aire falso) a cambios a Criterio C4 (Impacto Ambiental)



5.6. Análisis de resultados

Según el ejercicio de priorización de alternativas para mejora de consumo de energía, basado en metodología MCDA Promethee, la alternativa "Reducir el aire falso en la molienda (A1)", es la más cercana al objetivo central del análisis, bajo los pesos asignados a criterios de evaluación: Mejora de consumo (C1), Inversiones inicial (C2), Ahorro anual en costos de combustibles (C3) e impacto ambiental (C4), lo cual es correcto desde las siguientes afirmaciones:

- Siendo el criterio de ahorro anual (C3) el de mayor peso según el decisor con un 35%, esta alternativa presenta la segunda mejor propuesta de ahorro de USD 101,000, no lejos de la mejor que propone USD 108,000 en ahorros anuales.
- La inversión no es la menor pero se encuentra en el rango bajo de las alternativas, la menor la propone A3 en USD 10,000 con un buen desempeño en mejora de consumo, pero la mayor se situó en USD 500,000 propuesta por A2.
- En sumatoria, y tal como lo busca el método, entendiendo que el acercamiento a la decisión es multicriterio, A1 es la alternativa que en promedio se acerca mejor a todos los criterios sin ser máximo o mínimo en ninguno, es la alternativa que en conjunto mejor satisface los pesos seleccionados por el decisor.
- Dado que todas las funciones de preferencias se simularon bajo un comportamiento lineal, no es posible identificar ventajas o limitaciones del uso de funciones de Gauss para todas las alternativas o la combinación de ambas funciones en el mismo ejercicio.
- No fue posible comprobar las rutinas de normalización de las comparaciones de pares, pero en la percepción de los pesos no se hallaron inconsistencias en la preferencia asignada de los pesos en contraste con los resultados arrojados.
- Como se mencionó en el inicio, todo el ejercicio se realiza bajo el supuesto que el decisor no varia sus % de pesos en el tiempo para criterios durante la implementación de las alternativas, por ejemplo, si emergén impuestos significativos a las emisiones seria posible que el interes del decisor por el criterio ambiental cambie rapidamente en un mediano plazo, inlcuso antes de implementar la alternativa seleccionada.

5.7. Conclusiones frente aplicación del método

- Según lo analizado en la literatura, el método Promethee cuanta con un soporte matemático robusto y permite un entendimiento en su naturaleza de cálculo, cualidad que es atribuible igualmente al método AHP, pero sin características agregativas.
- El ejercicio se reconstruyó en repetidas ocasiones, y mantuvo consistencia en los resultados de calificación y priorización para los parámetros tratados.
- El análisis vía plano GAIA es más exigente en suposiciones dada su naturaleza grafica, pero sigue siendo una herramienta interesante para construir una perspectiva de las inclinaciones del decisior representada en vectores.
- Como conclusión final, es posible que este método contenga las características solicitadas en la parte introductoria del trabajo por parte de los procesos de planeación de la industria de fabricación del cemento,
    - Herramienta multicriterio (cuatro criterios), Multiobjetivo (cinco alternativas)
    - Multidecisor, la versión académica no permitió el uso de varios decisores pero la versión completa tiene la alternativa.
    - Repetitividad, se chequeo en cinco corridas que los resultados fueron consistentes en todas las sesiones.
    - Tratamiento de información subjetiva, se cuenta con escala de preferencias para información no cuantitativa, caso de impacto de medio ambiente.
    - Requisito de información, bajo, no es exige tratamiento de la información
    - Complejidad matemática, baja no exige alta experticia en análisis matemática
    - Decisiones de nivel estratégico, permite análisis de sensibilidad aunque no se hace ningún tratamiento de variables de tiempo, pero es posible incluir proyección mediante funciones matemáticas.

6. Métodos de Planeación Estratégica basada en método de Roadmapping

El problema de la planeación estratégica ha ido evolucionando a la par que los nuevos requisitos en las industrias de hoy en día. Herramientas como el Macro Planning, Mega Planning (Kaufman, 2005) han capturado cada vez más la atención, por ser técnicas de planeación de estrategias aceptadas muy a pesar de la alta incertidumbre que los caracteriza, y han evolucionado de ser videntes del futuro a creadores de escenarios posibles (Caetano & Amaral, 2011).

Entre los elementos importantes en el análisis de largo plazo podemos enunciar, algunos comunes como, los costos, el ritmo del cambio tecnológico, la competencia y las nuevas necesidades de los interesados (Phaal, Farrukh, & Probert, 2004), esto significa que cada aspecto debe ser evaluado como una oportunidad, una amenaza o riesgo, bajo una cuantificación de impacto o perturbación de los mercados (Christensen, 2006), llevando esto a que las industrias deban idear respuestas que contengan o promuevan esas oportunidades u amenazas identificadas.

Existe entonces una herramienta denominada Roadmapping (hojas de Ruta) que pueden proporcionar versiones de horizontes para los planes de negocio y su comportamiento esperado en los mercados, redes, o frente al uso de recursos (Phaal et al., 2004), obligando al desarrollo de tecnologías, inversiones, proyectos, expansiones u contracciones de infraestructura o del negocio mismo.

6.1. Definición de Gestión tecnológica,

Gestión de la tecnología se refiere a la efectiva identificación, selección, adquisición, desarrollo, explotación y protección de tecnología (producto, proceso e infra - estructural) necesarios para alcanzar, mantener (y crecer) una posición de mercado y el rendimiento del negocio, de acuerdo con los objetivos de la empresa tal como lo proponen Stoneburner, Goguen, & Feringa (2002).

La anterior definición destaca dos importantes temas de gestión de la tecnología, (Phaal et al., 2004).

a. Establecer y mantener los vínculos entre los recursos tecnológicos y los objetivos de la empresa es de vital importancia y representa un reto continuo. Esto requiere una comunicación efectiva y una efectiva gestión del conocimiento, con el apoyo de herramientas y procesos apropiados. De particular importancia es el diálogo y la comprensión que necesita ser establecido entre las funciones comerciales, operativas y tecnológicas de la industria (Stoneburner, Goguen, & Feringa, 2002).
b. La gestión eficaz de la tecnología requiere de una serie de procesos de gestión y la definición EITIM incluye los cinco procesos propuestos por Gregory, (1995): identificación, selección, adquisición, explotación y protección de la tecnología. Estos procesos no siempre son muy visibles en las empresas, y se distribuyen normalmente dentro de otros procesos de negocio, tales como la estrategia, la innovación y las operaciones.

6.2. Técnica de Roadmapping

El método de Roadmapping es una poderosa técnica para apoyar la gestión y planificación de la tecnología, sobre todo para explorar y comunicar los vínculos dinámicos entre recursos tecnológicos, los objetivos de la organización y los cambios del entorno, (Phaal & Palmer, 2010) Roadmap (hoja de ruta) es un diagrama basado en el tiempo, que comprende un número de capas que típicamente incluyen dos perspectivas: impacto o comportamiento de una variable independiente, comúnmente expresados en costos/consumos y otra de alternativas tecnológicas o de respuesta al comportamiento de una variable independiente. La hoja de ruta permite plantear escenarios de evolución de los mercados, los productos y tecnologías, junto con los vínculos y las discontinuidades entre los diferentes puntos de vista, (Phaal et al., 2004).

La técnica Roadmapping se puede utilizar para presentar temas claves de estrategia (por ejemplo tecnología y las transiciones), con el uso de su estructura de capas en combinación con la dimensión del tiempo.

Probert & Radnor (2003), identifican las primeras raíces del enfoque en la industria automotriz EE.UU., con Motorola y Corning donde logran desarrollar enfoques sistemáticos en la década de 1970 y principios de 1980. El enfoque de Motorola ha sido más visible, lo que lleva a tomar del

concepto en el sector de la electrónica de consumo (Groenveld, 1997), (Kostoff & Schaller, 2001).

Muchos otros enfoques han estado estrechamente relacionados con la tecnología de hojas de ruta, tales como, (Phaal et al., 2004)

- Técnicas de predicción,
- Previsión de futuros,
- Métodos Delphi,
- Planificación de escenarios,
- Técnicas de retroproyección y otros enfoques generales para el desarrollo de la estrategia de tecnología.

La característica particular (y beneficio) de estos los mapas conceptuales de desarrollo de tecnología en Gráficas secuenciales - es el uso de un marco estructurado (y con una gran potencia Gráfica) basado en el tiempo para desarrollar, representar y comunicar los planes estratégicos, en términos de la co-evolución y desarrollo de tecnología, productos y mercados, (Phaal et al., 2004) En este sentido, la tecnología de Roadmapping (hojas de ruta) también está estrechamente relacionado con otros enfoques de planificación gráfica como PERT (Técnica de revisión y evaluación de programas) y las herramientas de planificación de Gantt, (Martinich, 2014).

6.3. Tipos de Roadmap

Algunas aplicaciones presentadas por Des Marais et al. (2008), son

a. *Planeación de Producto.*
b. *Planeación de Capacidad de Servicio.*
c. *Planeación Estratégica.*
d. *Planeación de largo plazo.*
e. *Planeación de Conocimiento.*
f. *Planeación de Programas.*
g. *Planeación de Procesos.*

6.4. Elementos gráficos para la planeación de Roadmapping

Para la representación de esta técnica, no existe un formato especifico o normativo para su construcción, dado que es necesario identificar su objetivo, también es necesario identificar cuál será su uso en la organización y como se adapta a cada situación, si el fin es comercial, como fuente de información, de recursos disponibles, en fin, cual es el objeto de comunicación que debe transmitirse con su construcción, a continuación elementos esenciales en su construcción presentados por Probert, Farrukh, & Phaal (2003).

a. *Representación de Objetivos y aspectos*, en visión multicapa
b. *Barras de avance*, para seguimiento y control de cumplimiento y secuencia
c. *Tablas,* en algunos casos es útil expresar el Roadmap en forma de tabla, esto permite tener una manera de verificación ágil o para comparar desempeños en escala.
d. *Gráficas de datos,* esto permite incluir comportamientos de variables en el tiempo o identificar deltas importantes en capas adyacentes.
e. *Representaciones pictóricas,* para objetivos que permiten el diseño del proceso y el continuo desarrollo de las trayectorias, es posible utilizar representaciones ajustadas a cada compañía, según el tipo de producto deseado.
f. *Diagramas de Flujo,* este puede ser el elemento más esencial en la planeación de objetivos, planes de alternativa, secuencias, milestones, y permiten identificar las metas parciales de un plan para completar una misión, objetivos estratégicos, o contribución a otras metas de diferentes niveles.
g. *Planeación de capas simples,* cuando el programa es muy complejo es recomendado utilizar tableros independientes para cada plan, pero siempre relacionado al mismo objetivo final o macro.
h. *Texto,* algunos Roadmap contienen una alta carga de texto, dada la complejidad de las instrucciones e información que de deban contener, sin embargo, no es muy recomendable basar el desarrollo funcional de la herramienta en significados, mas es orientado a los ideogramas cuanto más sea posible.

6.5. Proceso de Construcción de Roadmap

A partir del siguiente diagrama es posible identificar un proceso estándar de construcción de un Roadmap, sin ánimo de generalizar, es un ejemplo muy descriptivo para el método, (Rip &

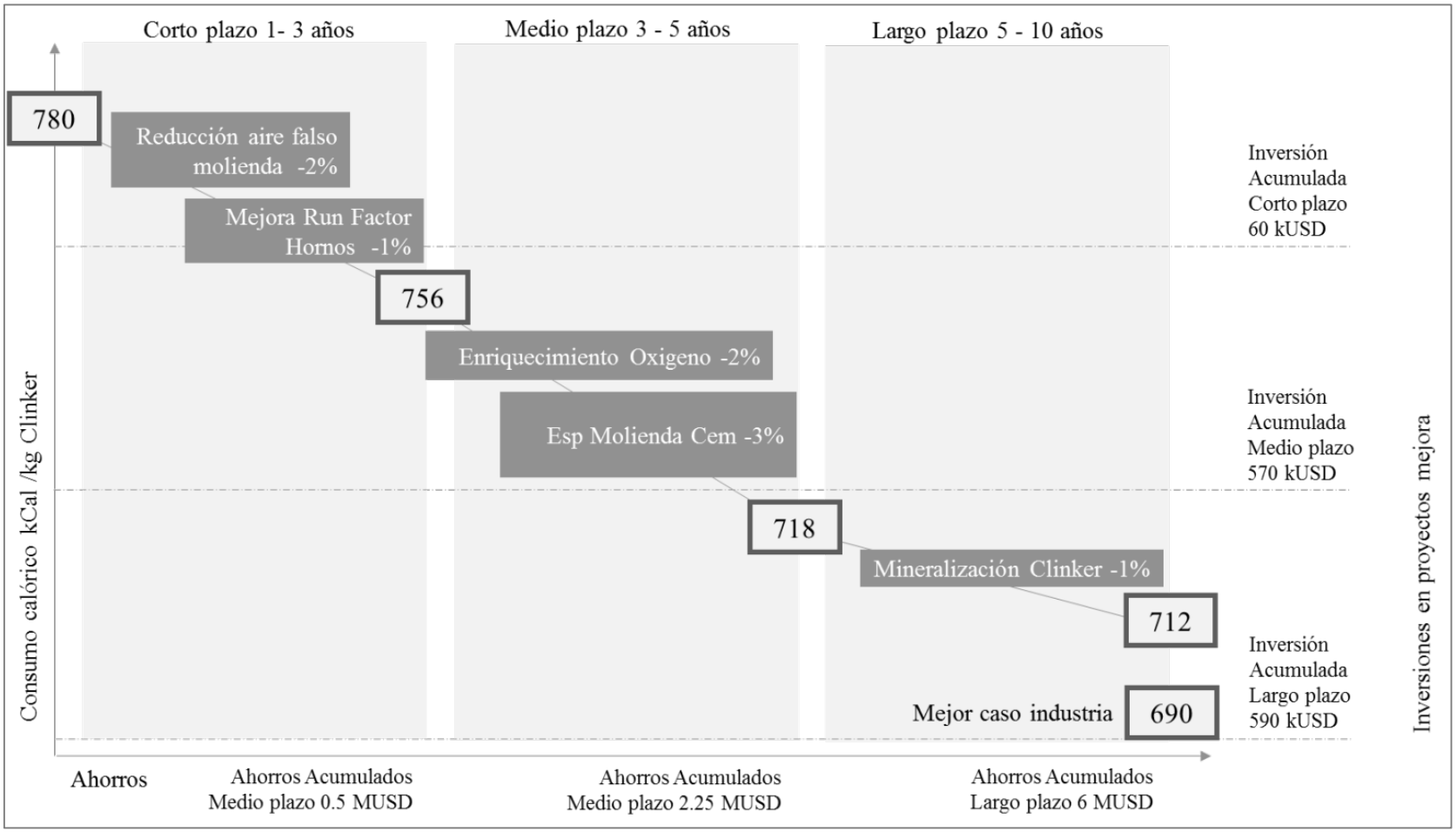
Kemp, 1998). Existen además otras dimensiones que deben ser identificadas y desarrolladas en un nivel necesario para brindar un soporte estructural al método consciente y robusto:

a. Tiempo
b. Capas: Objetivos, necesidades, planes, líneas de desarrollo
c. Instrucciones: Conectores, Información suplementaria, herramientas para dar claridad
d. Orden lógico de proceso, con elementos, como inputs o información necesaria, procesos de desarrollo de aprobación, y escenarios o resultados probables en el tiempo.

6.6. Representación planeación largo plazo en método de Roadmapping

Para representar gráficamente los resultados a los interesados, se utiliza la metodología de Roadmapping, para ello se propone a continuación la siguiente secuencia según los resultados del ejercicio del capitulo 5 de Planeación la siguiente Grafica 14.

Gráfica 14. Representación Roadmap mejora eficiencia consumo energético planta cemento 10 años



7. Conclusiones Finales

- Apoyados en el gran número y nivel de la literatura revisada y recopilada acerca de las aplicaciones de metodología MCDA es posible anotar que hay una porción de estas publicaciones importante dedicada al análisis de los sistemas de abastecimiento de recursos energéticos y, que abordados desde diferentes perspectivas y temáticas permiten develar la potencia de esta metodología, prácticamente con un recorrido de 30 años aproximadamente, en diversas aplicaciones a nivel mundial.
- En relación a nuestro análisis de las realidades en la planeación de largo plazo de las inversiones en recursos energéticos, debemos anotar que fue posible dimensionar la complejidad expresada en la literatura en cuanto a la intensidad de los recursos necesarios para presentar y sostener alternativas técnico-económicas y su desempeño en contexto socio-ambiental actual.
- Para nuestro caso particular, fue posible comprobar la flexibilidad del método, mediante la aplicación de métodos Promethee (MCDA Outranking), para lo cual es necesario resaltar:
    - Se evidenció una gran agilidad para el tratamiento de datos de entrada, gracias a la normalización e ingreso de información subjetiva.
    - Gracias a las alternativas de paquetes informáticos como Smart-Picker, fue posible la utilización del método sin complicaciones en los planteamientos matemáticos, asignación de premisas para la modelación, análisis de sensibilidad, lectura de resultados, todo esto con un grado de consistencia aceptable, lo que comprueba que el método se ha diseñado para usuarios finales no expertos en el tratamiento de métodos matemáticos robustos.
    - Desafortunadamente la utilización de criterios y alternativas fue limitada por la versión utilizada para recrear el caso práctico, sin embargo, creemos que fue suficiente para probar la interacción del método ante la aplicación en un ejercicio de planeación de la industria del cemento.
- A pesar de la amabilidad del método y su herramienta informática, fue evidente la necesidad de contar con un equipo con sentido de análisis de resultados y experticia para asignar las preferencias y comprobar la consistencia de criterios y alternativas.

- En cuanto a la utilización de métodos gráficos para la comunicación de planes estratégicos, se utilizó la técnica de Roadmapping, donde se puede ver valor agragado en aspectos como el seguimiento de los planes de largo plazo, identificación de objetivos mediante metas e inversiones en una escala temporal y su facilidad de comunicación a otros niveles de las organizaciones por su facil lectura.
- El presente trabajo se plantea como el inicio de una discusión acerca de la incorporación de métodos de análisis y toma de decisiones bajo niveles de incertidumbre y racionalidad limitada, con certeza en el futuro es necesario realizar trabajos centrados en análisis de decisiones con criterios variando en el tiempo, tales como cambio de precios de recursos energéticos con alta incertidumbre, aplicación de nuevos impuestos u incentivos en el uso de alternativas con tecnologías verdes o alternativas.

8. Referencias Bibliográficas

Asad, M. W. A. (2011). A heuristic approach to long-range production planning of cement quarry operations. *Production Planning and Control*, *22*(4), 353–364. http://doi.org/10.1080/09537287.2010.484819

Barker, D. J., Turner, S. A., Napier-Moore, P. A., Clark, M., & Davison, J. E. (2009). CO2 Capture in the Cement Industry. In *Energy Procedia* (Vol. 1, pp. 87–94). http://doi.org/10.1016/j.egypro.2009.01.014

Beccali, M., Cellura, M., & Mistretta, M. (2003). Decision-making in energy planning. Application of the Electre method at regional level for the diffusion of renewable energy technology. *Renewable Energy*, *28*(13), 2063–2087. http://doi.org/10.1016/S0960-1481(03)00102-2

Behzadian, M., Kazemzadeh, R. B., Albadvi, a., & Aghdasi, M. (2010). PROMETHEE: A comprehensive literature review on methodologies and applications. *European Journal of Operational Research*, *200*(1), 198–215. http://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.01.021

Bradfield, R., Wright, G., Burt, G., Cairns, G., & Van Der Heijden, K. (2005). The origins and evolution of scenario techniques in long range business planning. *Futures*, *37*(8), 795–812. http://doi.org/10.1016/j.futures.2005.01.003

Brans, J.-P., & Mareschal, B. (2005). Promethee Methods. *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*, 163–196. http://doi.org/Doi 10.1007/0-387-23081-5_5

Brans, J. P., Mareschal, B., & Vincke, P. (1984). PROMETHEE: A New Family of Outranking Methods in Multicriteria Analysis. In *Operational Research* (pp. 477–490).

Brans, J. P., Vincke, P., & Mareschal, B. (1986). How to select and how to rank projects: The Promethee method. *European Journal of Operational Research*, *24*(2), 228–238. http://doi.org/10.1016/0377-2217(86)90044-5

Caetano, M., & Amaral, D. C. (2011). Roadmapping for technology push and partnership: A contribution for open innovation environments. *Technovation*, *31*(7), 320–335. http://doi.org/10.1016/j.technovation.2011.01.005

Cement Sustainability Initiative (CSI). (2009). Development of state of the art-techniques in cement manufacturing : trying to look a head, (March), 29.

Christensen, C. M. (2006). The Ongoing Process of Building a Theory of Disruption -

Christensen - 2005 - Journal of Product Innovation Management - Wiley Online Library. *Journal of Product Innovation Management*, (2004), 39–55. http://doi.org/10.1111/j.1540-5885.2005.00180.x

Das, A., & Kandpal, T. C. (1999). A model to estimate energy demand and CO2 emissions for the Indian cement industry. *International Journal of Energy Research*. http://doi.org/10.1002/(SICI)1099-114X(19990610)23:7<563::AID-ER431>3.0.CO;2-D

Des Marais, D. J., Nuth, J. a, Allamandola, L. J., Boss, A. P., Farmer, J. D., Hoehler, T. M., … Spormann, A. M. (2008). The NASA Astrobiology Roadmap. *Astrobiology*, *8*(4), 715–730. http://doi.org/10.1089/ast.2008.0819

Diakoulaki, D., & Karangelis, F. (2007). Multi-criteria decision analysis and cost-benefit analysis of alternative scenarios for the power generation sector in Greece. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. http://doi.org/10.1016/j.rser.2005.06.007

Dikos, G., & Spyropoulou, S. (2013). Supply chain optimization and planning in Heracles General Cement Company. *Interfaces*, *43*(4), 297–312. http://doi.org/10.1287/inte.2013.0689

Georgopoulou, E., Sarafidis, Y., & Diakoulaki, D. (1998). Design and implementation of a group DSS for sustaining renewable energies exploitation. *European Journal of Operational Research*, *109*(2), 483–500. http://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00072-1

Goumas, M., & Lygerou, V. (2000). Extension of the PROMETHEE method for decision making in fuzzy environment: Ranking of alternative energy exploitation projects. *European Journal of Operational Research*, *123*(3), 606–613. http://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00093-4

Greening, L. A., & Bernow, S. (2004). Design of coordinated energy and environmental policies: Use of multi-criteria decision-making. *Energy Policy*, *32*(6), 721–735. http://doi.org/10.1016/j.enpol.2003.08.017

Gregory, M. (1995). Technology management: a process approach. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manafacture*, *209*(B5), 347–356. http://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1995_209_094_02

Groenveld, P. (1997). Roadmapping integrates business and technology. *Research Technology Management*, *50*(6), 49–58. http://doi.org/10.1080/08956308.2007.11657472

Guitouni, A., & Martel, J.-M. (1998). Tentative guidelines to help choosing an appropriate

MCDA method. *European Journal of Operational Research*, *109*, 501–521. http://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00073-3

Gupta, R. (2012). Selection of logistic service provider using fuzzy PROMETHEE for a cement industry. *Journal of Manufacturing Technology Management*, *23*(7), 899–921. http://doi.org/10.1108/17410381211267727

Gwo-Hshiung, T., Tzay-an, S., & Chien-Yuan, L. (1992). Application of multicriteria decision making to the evaluation of new energy system development in Taiwan. *Energy*, *17*(10), 983–992. http://doi.org/10.1016/0360-5442(92)90047-4

Haralambopoulos, D. A., & Polatidis, H. (2003). Renewable energy projects: Structuring a multi-criteria group decision-making framework. *Renewable Energy*, *28*(6), 961–973. http://doi.org/10.1016/S0960-1481(02)00072-1

Hobbs, B. F. (1995). Optimization methods for electric utility resource planning. *European Journal of Operational Research*. http://doi.org/10.1016/0377-2217(94)00190-N

Hobbs, B. F., & Meier, P. M. (1994). Multicriteria methods for resource planning: an experimental comparison. *IEEE Transactions on Power Systems*, *9*(4), 1811–1817. http://doi.org/10.1109/59.331435

Huang, I. B., Keisler, J., & Linkov, I. (2011). Multi-criteria decision analysis in environmental sciences: Ten years of applications and trends. *Science of the Total Environment*, *409*(19), 3578–3594. http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.06.022

Huntzinger, D. N., & Eatmon, T. D. (2009). A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies. *Journal of Cleaner Production*, *17*(7), 668–675. http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.04.007

Ishizaka, A., & Nemery, P. (2013). *Multi-criteria Decision Analysis: Methods and Software*. Wiley. http://doi.org/10.1002/9781118644898

Ishizaka, A., & Nemery, P. (2013). PROMETHEE. In *Multi-Criteria Decision Analysis: Methods and Software* (pp. 135–179). http://doi.org/10.1002/9781118644898.ch6

Kantorovich, L. V. (1960). Mathematical Methods of Organizing and Planning Production. *Management Science*, *6*(March), 366–422. http://doi.org/10.1287/mnsc.6.4.366

Kaufman, R. (2005). Defining and Delivering Measurable Value: A Mega Thinking and Planning Primer. *Performance Improvement Quarterly*, *18*, 6–16. http://doi.org/10.1111/j.1937-8327.2005.tb00337.x

Kline, J., & Barcelo, L. (2012). Cement and CO2 - A victim of success. *Cement International*, *10*(5), 62–71. http://doi.org/10.1109/CITCON.2012.6215687

Koelbl, B. S., van den Broek, M. A., van Ruijven, B. J., Faaij, A. P. C., & van Vuuren, D. P. (2014). Uncertainty in the deployment of Carbon Capture and Storage (CCS): A sensitivity analysis to techno-economic parameter uncertainty. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, *27*, 81–102. http://doi.org/10.1016/j.ijggc.2014.04.024

Koroneos, C., Roumbas, G., & Moussiopoulos, N. (2005). Exergy analysis of cement production. *International Journal of Exergy*, *2*(1), 55. http://doi.org/10.1504/IJEX.2005.006433

Kostoff, R. N., & Schaller, R. R. (2001). Science and technology roadmaps. *IEEE Transactions on Engineering Management*, *48*(2), 132–143. http://doi.org/10.1109/17.922473

Loken, E. (2007). Use of multicriteria decision analysis methods for energy planning problems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *11*(7), 1584–1595. http://doi.org/10.1016/j.rser.2005.11.005

Madlool, N. A., Saidur, R., Hossain, M. S., & Rahim, N. A. (2011). A critical review on energy use and savings in the cement industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. http://doi.org/10.1016/j.rser.2011.01.005

Martinich, L. P. (2014). Excellent execution: Production and operations management. *IEEE Engineering Management Review*, *42*(4), 13–15. http://doi.org/10.1109/EMR.2014.2364657

Mirasgedis, S., & Diakoulaki, D. (1997). Multicriteria analysis vs. externalities assessment for the comparative evaluation of electricity generation systems. *European Journal of Operational Research*, *102*(2), 364–379. http://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00115-X

Mitra, S., Grossmann, I. E., Pinto, J. M., & Arora, N. (2012). Optimal production planning under time-sensitive electricity prices for continuous power-intensive processes. *Computers and Chemical Engineering*, *38*, 171–184. http://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2011.09.019

Oda, J., Akimoto, K., Tomoda, T., Nagashima, M., Wada, K., & Sano, F. (2012). International comparisons of energy efficiency in power, steel, and cement industries. *Energy Policy*, *44*, 118–129. http://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.01.024

Phaal, R., Farrukh, C. J. P., & Probert, D. R. (2004). Technology roadmapping—A planning framework for evolution and revolution. *Technological Forecasting and Social Change*, *71*(1–2), 5–26. http://doi.org/10.1016/S0040-1625(03)00072-6

Phaal, R., & Palmer, P. J. (2010). Technology Management: Structuring the Strategic Dialogue.

Engineering Management Journal, *22*(1), 64–74.

Pohekar, S. D., & Ramachandran, M. (2004). Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *8*(4), 365–381. http://doi.org/10.1016/j.rser.2003.12.007

Pokharel, S., & Chandrashekar, M. (1998). A multiobjective approach to rural energy policy analysis. *Energy*, *23*(4), 325–336. http://doi.org/10.1016/S0360-5442(97)00103-5

Probert, D. R., Farrukh, C. J. P., & Phaal, R. (2003). Technology roadmapping—developing a practical approach for linking resources to strategic goals. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, *217*(9), 1183–1195. http://doi.org/10.1243/095440503322420115

Probert, D., & Radnor, M. (2003). Frontier experiences in industry-academia consortia. *Research Technology Management*, *46*(2), 27–30. http://doi.org/10.1109/EMR.2003.24902

Ramanathan, R., & Ganesh, L. S. (1995). Energy resource allocation incorporating qualitative and quantitative criteria: An integrated model using goal programming and AHP. *Socio-Economic Planning Sciences*, *29*(3), 197–218. http://doi.org/10.1016/0038-0121(95)00013-C

Rehman, S. U., & Asad, M. W. A. (2010). a Mixed-Integer Linear Programming (Milp) Model for Short-Range Production Scheduling of Cement Quarry Operations. *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, *27*(3), 315–333. http://doi.org/10.1142/S0217595910002727

Rip, A., & Kemp, R. (1998). Technological change. *Human Choice and Climate Change*, *2*(Vol. 2: Resources and Technology), 327–399. http://doi.org/10.1007/BF02887432

Roy, B. (1981). The Optimisation Problem Formulation: Criticism and Overstepping. *The Journal of the Operational Research Society*, *32*(6), 427–436. http://doi.org/10.2307/2581530

Salo, A. A., & Hämäläinen, R. P. (1997). On the measurement of preferences in the analytic hierarchy process. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, *6*(November 1994), 309–319. http://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1360(199711)6:6<309::AID-MCDA163>3.0.CO;2-2

Schneider, M., Romer, M., Tschudin, M., & Bolio, H. (2011). Sustainable cement production-present and future. *Cement and Concrete Research*, *41*(7), 642–650. http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.019

Simbolott, G., & Tosato, G. (2010). Cement Production. *Energy Technology Systems Analysis Programme*, (June), 1–8. Retrieved from http://www.etsap.org/E-techDS/PDF/I03_cement_June 2010_GS-gct.pdf

Siskos, Y., & Spyridakos, a. (1999). Intelligent multicriteria decision support: Overview and perspectives. *European Journal of Operational Research*, *113*(2), 236–246. http://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00213-6

Slotte, S., & Hämäläinen, R. P. (2014). Decision Structuring Dialogue. *EURO Journal on Decision Processes*. http://doi.org/10.1007/s40070-014-0028-7

Stoneburner, G., Goguen, A., & Feringa, A. (2002). Risk Management Guide for Information Technology Systems Recommendations of the National Institute of Standards and Technology. *Nist Special Publication*, *800–30*, 55. Retrieved from http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.74.6062&rep=rep1&type=pdf

Wang, J.-J., Jing, Y.-Y., Zhang, C.-F., & Zhao, J.-H. (2009). Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *13*(9), 2263–2278. http://doi.org/10.1016/j.rser.2009.06.021

Worrell, E., Kermeli, K., & Galitsky, C. (2012). [Worrell et al., 2013] ENERGY STAR Guide for the Cement Industry. *An ENERGY STAR® Guide for Plant and Energy Managers*, (December).

Yildirim, O., & Kardas, G. (2014). A multi-agent system for minimizing energy costs in cement production. *Computers in Industry*, *65*(7), 1076–1084. http://doi.org/10.1016/j.compind.2014.05.002