

Valoración Económica de un Sistema de Generación Distribuido mediante un método híbrido. Caso de estudio



Luis Miguel Castillo Perafán

Sergio Andrés Muñoz Hoyos

Tesis de grado en Automática Industrial.

Director:

Álvaro René Restrepo Garcés

Doctor

Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Electrónica Instrumentación y Control
Popayán, Enero de 2018

Luis Miguel Castillo Perafán
Sergio Andrés Muñoz Hoyos

Valoración Económica de un Sistema de Generación
Distribuido mediante un método híbrido. Caso de estudio

Tesis presentada a la Facultad de Ingeniería
Electrónica y Telecomunicaciones de la
Universidad del Cauca para la obtención del
Título de:

Ingeniero en Automática.

Director:
Álvaro René Restrepo Garcés, Doctor

Popayán
2018

Dedicatoria Luis Miguel Castillo Perafán.

A mi querida madre que con su esfuerzo, dedicación y enseñanzas velo siempre por el cumplimiento de los sueños de sus hijos. A ella que, aunque no logro ver la finalización de mi carrera sé que desde el cielo está orgullosa y sonriente y aunque no pueda sentir su abrazo acogedor siempre estuvo conmigo en este largo camino. A mi abuela, papa y hermano por su constante preocupación y felicidad por cada escalón alcanzado, sin olvidar el amor incondicional, los regaños, motivación y el constante apoyo de mi querida Erika.

Dedicatoria Sergio Andrés Muñoz Hoyos.

A mi madre y abuela por su constante e incondicional apoyo, consejos, comprensión, amor y ayuda en los momentos más difíciles. Me han brindado lo que soy como persona, mis valores, mis principios, mi carácter y sobre todo mi perseverancia y coraje para conseguir mis objetivos.

A mis hermanos no solo por estar presentes aportando buenas cosas en mi vida, sino por los grandes lotes de felicidad y de diversas emociones que siempre me han causado.

“Ustedes son mi fuente de inspiración y motivación, los quiero mucho...”

Agradecimientos

En general a toda la comunidad universitaria y en particular a los ingenieros de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones que colaboraron para la realización de este trabajo, a nuestros compañeros por su apoyo y motivación y, a nuestro director por su tiempo, paciencia y colaboración.

Resumen

En este documento se valora económicamente un sistema de generación distribuido (SGD) basado en el uso de fuentes de energía renovables (FER), mediante dos métodos de valoración: a) el método flujo de caja descontado (FCD), el cual no tiene en cuenta el comportamiento estocástico de las FER y por lo tanto las modela de forma determinista y, b) el método híbrido (MH) propuesto por el autor y conformado por las técnicas meta-heurística *Particle swarm optimization* (PSO) y FCD, el cual considera y modela el comportamiento estocástico de las FER. Además, para validar la aplicabilidad de los métodos se propone implementarlos en un caso de estudio de la ciudad de Popayán; finalmente, se propone: 1) evaluar el desempeño individual de los métodos de forma cualitativa y cuantitativa mediante un método de análisis multicriterio, específicamente el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) y, 2) evaluar el MH propuesto frente a otros métodos híbridos presentados en la literatura científica.

Abstract

This document evaluates economically a distributed generation system (GDs) based on the use of renewable energy sources (RES), by means of two valuation methods: a) the discounted cash flow (CDF), which does not take into account the stochastic behavior of the FERs and therefore model them deterministically; and b) the hybrid method (MH) proposed by the author and conformed by the meta-heuristic techniques optimization of particle swarm (PSO) and CDF, which considers and models the stochastic behavior of RES. In addition, to validate the application of the methods offered in the case study of the city of Popayán; Finally, it is proposed: 1) to evaluate the individual performance of the methods qualitatively and quantitatively using a multicriteria analysis method, specifically the Hierarchical Analytical Process (AHP) and, 2) to evaluate the proposed MH compared to other hybrid methods presented in the scientific literature.

Contenido

	pág.
Agradecimientos	IV
Resumen.....	V
Abstract.....	VI
Contenido.....	VII
Lista de Figuras	IX
Lista de Tablas.....	X
Lista de Anexos	XI
Glosario	XII
Introducción	13
Capítulo 1.....	15
Marco de referencia.....	15
1.1. Estado del Arte	15
1.2. Marco conceptual	22
1.3. Conclusiones del capítulo	37
Capítulo 2.....	38
Metodología para la valoración económica del SGD.....	38
2.1. Análisis y modelación de variables estocásticas	39
2.2. Métodos para Valoración.....	41
2.3. Método FCD y método híbrido PSO+FCD	42
2.4 Evaluación de los métodos	60
2.5 Conclusiones de capítulo.....	64
Capítulo 3.....	65
Aplicación y análisis de resultados	65
	VII

3.1. Caso de estudio.....	66
3.2. Modelación de las FER.....	72
3.3. Aplicación del método FCD	74
3.4. Aplicación del método híbrido (FCD + PSO).....	79
3.5. Comparación de los indicadores económicos	84
3.6. Comparación del desempeño de los métodos.....	86
3.7. Comparación con otros métodos híbridos	89
3.8 Conclusiones de capítulo	92
Conclusiones generales y trabajos Futuros.....	94
Conclusiones generales.....	94
Trabajos futuros	95
Bibliografía.....	96

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Dominio de las variables y las funciones objetivo	28
Figura 2. Inicialización del cumulo en el espacio de búsqueda.....	30
Figura 3. Movimiento de partícula en el espacio de soluciones	31
Figura 4. Diagrama de flujo PSO	32
Figura 5. Esquema del SGD hibrido conectado a la red	36
Figura 6. Estructura metodológica para valoración económica de un SGD.	39
Figura 7. Entradas y salidas del FCD para un SGD.....	48
Figura 8. Diagrama de flujo PSO multiobjetivo.....	51
Figura 9. Esquema de hibridación PSO+FCD.....	52
Figura 10. Vectores asociados a una partícula	55
Figura 11. Valores asociados a una partícula	55
Figura 12. Pseudocódigo del algoritmo hibrido.	59
Figura 13. Diagrama de flujo PSO+FC.....	60
Figura 14. Estructura jerárquica para la planeación de proyectos FER.	62
Figura 15. Metodología AHP.....	63
Figura 16. Consumo total mensual de la empresa en el año 2015.	67
Figura 17. Distribución del modelado de los datos de radiación solar	68
Figura 18. Distribución de Weibull del modelado de los datos de velocidad. ...	69
Figura 19. Consumo diario total, promedio y pico máximo de la empresa en el año 2015.	71
Figura 20. HSP modelada en el periodo de evaluación del proyecto.....	72
Figura 21. Velocidad del río Cauca modelada.	73
Figura 22. Indicadores económicos de salida con el FCD	78
Figura 23. Indicadores del proyecto con el MH.....	82
Figura 24. Evolución del desplazamiento del enjambre en el espacio de búsqueda.	84
Figura 25. Evaluación de los escenarios.....	85

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Aplicación de la técnica PSO.	17
Tabla 2. Análisis económico de SGD.....	19
Tabla 3. Aplicación de algoritmos híbridos con PSO.	21
Tabla 4. Variables de incertidumbre en los proyectos del sector eléctrico.	26
Tabla 5. Estructura de un FCD.....	34
Tabla 6. Indicadores económicos utilizados en un PGD.	35
Tabla 7. Calculo del flujo de caja libre.....	48
Tabla 8. Condiciones ambientales de emplazamiento.	66
Tabla 9. Promedio mensual de HSP	67
Tabla 10. Promedios mensuales velocidad del agua	69
Tabla 11. Tabla resumen diferencias de los escenarios.	71
Tabla 12. Radiación solar promedio modelada con la distribución normal.	72
Tabla 13. Velocidad del agua modelada con la distribución de Weibull.....	73
Tabla 14. Resultados técnicos del FCD.	75
Tabla 15. Resultados económicos del FCD.	76
Tabla 16. Resultados más favorables con el FCD para cada escenario.....	77
Tabla 17. Resultados técnicos con el MH.	80
Tabla 18. Resultados económicos con el MH	81
Tabla 19. Resultados más favorables con el MH en cada escenario.....	82
Tabla 20. Mejores resultados obtenidos en cada método.....	85
Tabla 21. Criterios de comparación de los métodos	87
Tabla 22. Matriz de comparación por pares.....	87
Tabla 23. Análisis subjetivo de los criterios para los métodos	88
Tabla 24. Matriz de valores de ponderación para cada método	88
Tabla 25. Resultados del método AHP	89
Tabla 26. Comparación con otros métodos híbridos de PSO.	91

Lista de Anexos

	Pág.
Anexo A	103
Anexo B	104
Anexo C	106
Anexo D	112
Anexo E	113
Anexo F	114

Glosario

CNE	Costo nivelado de la electricidad
Dp	Demanda en horas de alto consumo
Dv	Demanda en horas de bajo consumo
FCD	Flujo de caja descontado
FER	Fuente de energía renovable
FV	Fotovoltaico
GD	Generación distribuida
HSP	Hora solar pico
INUP	Inversión necesaria por unidad de potencia
IPC	Índice de precios al consumidor
IR	Índice de rentabilidad
IVA	Impuesto al valor agregado
L1715	Ley 1715 de 2014 de congreso de la república de Colombia
MH	Método híbrido PSO+FCD
PGD	Proyecto de generación distribuida
PSO	Optimización por enjambre de partículas
PRI	Periodo de retorno de la inversión
Retefuente	Impuesto a la renta
SFV	Sistema de generación fotovoltaico
SGD	Sistema de generación distribuida
SHC	Sistema de generación hidrocínético
SCR	Sistema conectado a red
SFVCR	Sistema fotovoltaico conectado a red
SHCR	Sistema hidrocínético conectado a red
TIR	Tasa interna de retorno
VA	Valor actual
VPN	Valor presente neto
WACC	Costo medio ponderado de capital

En inglés u otro

	Significado en inglés	Significado en español
AHP	Analytical Hierarchical Process	Proceso analítico jerárquico
PSO	Particle swarm optimization	Optimización por enjambre de partículas

Introducción

Las fuentes de energía renovables (FER) parecen ser un enfoque prometedor para producir energía de forma local, limpia e inagotable como respuesta ante: las mejoras tecnológicas, los incentivos gubernamentales para el uso de energías renovables, las crecientes preocupaciones por la generación de energía a partir de combustibles fósiles y, la emisión de gases contaminantes. Esto motiva la implementación de sistemas de generación eléctrica ubicados cerca a los consumidores finales con diferentes tipos de FER, para suplir la necesidad energética de variados conjuntos de cargas eléctricas y/o térmicas, denominados sistemas de generación distribuida (SGD) (Nikman, Golestaneh, & Malekpour, 2012).

Las diferentes tecnologías que se emplean en las instalaciones de los SGD se pueden dividir en dos grupos: Tecnologías no renovables y tecnologías renovables. Pero, esta última utiliza recursos de las FER, los cuales tienen un comportamiento estocástico, lo que genera incertidumbre en aspectos técnicos como: la ubicación, dimensionamiento, generación, etc. y en aspectos económicos como: costos de implementación y operación, pérdidas energéticas, precios de la electricidad, etc. (Montoya-Bueno, Muñoz-Hernández, & Contreras, 2016). Por lo tanto, si se ignoran las incertidumbres de los parámetros no es posible obtener los beneficios de ahorro energético y económico que ofrecen los SGD (Yun, Shijie, & Yunhan, 2017).

Según (Joreidi, 2016), uno de los principales objetivos de la ingeniería en los SGD es la optimización, del tamaño, ubicación, capacidad de generación, configuración y condiciones de funcionamiento. Para la optimización de los SGD se emplean distintas técnicas y métodos con el fin de lograr los máximos beneficios del sistema, considerando el tipo y funcionamiento y, las restricciones técnicas y operativas de la red.

La viabilidad económica de los SGD conlleva al inversionista a tomar la decisión final de invertir en un proyecto de generación de eléctrica. Existen diferentes métodos de valoración económica mediante los cuales se obtiene una visión clara de la viabilidad de un proyecto, además de diferentes indicadores económicos que de acuerdo con (Sapag Chain & Sapag Chain, 2008) miden la capacidad de obtener ganancias del proyecto tales como: el valor presente neto (VPN), el número de periodos de retorno de la inversión (PRI), la tasa interna de recuperación de la inversión (TIR), el índice de rentabilidad (IR) y el costo nivelado de la electricidad (CNE) en proyectos de generación eléctrica.

En este proyecto se adopta la perspectiva de valoración económica desde el punto de vista del inversionista privado, quien tiene el propósito de suplir sus necesidades energéticas a través de los SGD con FER y la red tradicional (comercializador), para ello se tiene en cuenta: 1) la incertidumbre de las renovables que es común en los proyectos de generación distribuida (PGD), 2) las ventajas que ofrece el mercado interactivo, ya que el autogenerador además

de suplir la de demanda propia del consumidor, puede vender los excedentes de generación al comercializador, 3) la topología y dimensionamiento del sistema y, 4) la normatividad colombiana, específicamente la Ley 1715 de 2014 (L1715).

Este trabajo realiza la valoración económica de un PGD conformado por una o más tecnologías renovables, mediante la aplicación y comparación entre dos métodos y, tiene como finalidad obtener resultados que permitan determinar la decisión correcta en un proceso de inversión. Para lograr el objetivo se hizo uso de diferentes técnicas, herramientas y una metodología estructurada.

En 2014 en Colombia se promulgó la Ley 1715 (Congreso de la República de Colombia 2014), que tiene por objeto: "...promover el desarrollo y la utilización de las fuentes no convencionales de energía, principalmente aquellas de carácter renovable, en el sistema energético nacional, mediante su integración al mercado eléctrico..." Este marco normativo establece incentivos tributarios para promover la autogeneración en los sectores comercial, residencial e industrial; además de la posibilidad de exportación de excedentes a la red. Teniendo en cuenta la L1715, se planteó la necesidad de involucrar los beneficios e incentivos presentados en los modelos y procesos diseñados para determinar las tecnologías más viables desde el punto de vista económico.

Los principales aportes de este trabajo son:

- 1) La metodología implementada para la valoración económica de un PGD, en el que se consideran dos métodos (MH y FCD) de evaluación.
- 2) La articulación de un método híbrido conformado por la técnica de inteligencia artificial PSO y la técnica de valoración económica FCD.
- 3) La codificación de la técnica PSO multiobjetivo para la optimización de los costos iniciales.
- 4) La incorporación de la normatividad colombiana (L1715) en el proceso de evaluación económica de un PGD con el método híbrido conformado por las técnicas PSO y FCD.
- 5) Evaluación de la viabilidad económica y técnica de las tecnologías FER (fotovoltaica e hidrocínética) para la implementación en un caso del sector industrial.
- 6) La identificación de los criterios y de sus valores; para la comparación entre los métodos FCD y MH.
- 7) La comparación del MH propuesto frente a otros métodos híbridos presentados en la literatura.

Capítulo 1

Marco de referencia

En este capítulo se abordan las técnicas: meta-heurística Optimización por enjambre de partículas (PSO por sus siglas en inglés), el flujo de caja descontado (FCD), indicadores económicos y, las variables estocásticas en los SGD. Para cada una se realiza la revisión y análisis de la literatura, definición de conceptos generales y metodología de desarrollo e implementación. Lo anterior enfocado en los PGD, que operan y tienen en cuenta el comportamiento estocástico de las FER.

El capítulo está estructurado de la siguiente manera: 1) se presenta la revisión literaria de las técnicas PSO, FCD tradicional y de los métodos híbridos que involucran PSO; 2) se consolidan los conceptos sobre los SGD, las FER, las técnicas abordadas, la topología y dimensionamiento del SGD, los equipos del sistema y los indicadores económicos y, 3) se presentan las conclusiones del capítulo.

1.1. Estado del Arte

La valoración económica de un PGD puede ser tratada por distintas técnicas y/o métodos, lo que hace ineludible una revisión de la literatura científica que permita identificar las tecnologías de generación, las metodologías, las restricciones propias de cada proyecto, las mejoras obtenidas y, otras características que pudiesen contribuir en la realización de este tipo de proyectos. En este trabajo la valoración económica se realiza mediante el método FCD y el método híbrido (MH) conformado por PSO y FCD.

1.1.1 Revisión Literaria de PSO

El método PSO fue descrito alrededor del año 1995 por (Kennedy & Eberhart, 1995), y se inspira en el comportamiento de los enjambres de insectos en la naturaleza. En concreto, se puede pensar en un enjambre de abejas, ya que éstas en el momento de recolectar el polen, buscan la región del espacio en la que existe más densidad de flores, debido a que la probabilidad que haya polen es mayor. La misma idea fue trasladada al campo de la computación en forma de algoritmo y se emplea en la actualidad en la optimización de distintos tipos de sistemas.

En la revisión de la literatura se encontraron diversos trabajos que utilizan la técnica meta-heurística PSO. Entre los trabajos que utilizan la técnica sin modificaciones se tienen a (Mousavi & Shourian, 2010) quienes tratan el almacenamiento de energía hidroeléctrica utilizando PSO para el diseño óptimo en dos casos puntuales; en el primer caso fue para optimizar los niveles normales y mínimos de funcionamiento del embalse, así como la capacidad de producción del grupo motor propulsor y, el segundo caso para el desagüe del embalse. (Behrang, Assareh, Noghrehabadi, & Ghanbarzadeh, 2011) estimaron el promedio diario de radiación solar global en diecisiete ciudades para diferentes regiones de Irán, consideraron once modelos diferentes basados en la luz solar. (Wang, Xu, Chau, & Chen, 2013) modelaron la precipitación anual de lluvias en el río amarillo de China, aplicaron cuatro modelos basados en análisis adaptativo de datos para determinar los parámetros libres de una máquina vectorial de apoyo, los resultados indicaron que el modelo PSO-SVM mejoró significativamente la predicción de la precipitación de aguas lluvias en la estación estudiada. (Seyedmahmoudian, y otros, 2014) detectaron el punto de potencia máximo global en un sistema fotovoltaico, para verificar la fiabilidad y la precisión del sistema definieron tres condiciones de sombreado parcial; las ventajas de la técnica propuesta fueron: la técnica es independiente de la naturaleza del sistema, este cae en el máximo local en condiciones de sombreado parcial, el sistema es adaptativo y por último el sistema es preciso para rastrear el punto de potencia máximo global en condiciones de sombreado parcial. (Ramírez Ramírez, Garcés Ruiz, & Arrieta Giraldo, 2016) plantearon una propuesta novedosa para ubicar de manera óptima las turbinas de un parque eólico, teniendo en cuenta: el área del parque, la disposición de los vientos y el efecto sombra; además aplicaron a un caso de estudio, y concluyeron obtener respuestas de buena calidad para dar solución al problema. (Cavazzini, Santolin, Pavesi, & Ardizzon, 2016) presentaron un nuevo enfoque para la estimación del costo de los equipos electromecánicos, según el cual el costo final se descompone en dos principales contribuciones: el costo del equipo mecánico, incluyendo turbina, válvula automática y, elementos de regulación y el costo del equipo eléctrico; es decir, costo del alternador.

Algunos trabajos modifican el PSO convencional como: (Fu, Li, Wang, & Ji, 2011) propusieron maximizar la producción total de energía hidroeléctrica de un sistema de embalse en el río QingJiang, para lo cual se empleó una técnica que acopla el mecanismo de procesamiento de información inmune con PSO para lograr una mejor solución global con menos esfuerzo computacional; los

resultados mostraron que el algoritmo es capaz de encontrar la política operativa más satisfactoria para el sistema de embalse de dos cascadas. (Su, Lu, Chang, & Gutierrez-Alcaraz, 2011) abordaron la cuestión de optimizar el funcionamiento y el uso de la red para adaptar las integraciones de SGD, se empleó una técnica PSO binaria para resolver el problema de optimización no lineal discreta, y las posibles incertidumbres asociadas con recursos y cargas renovables volátiles de SGD, las cuales se incorporaron a través de un enfoque de simulación estocástico. (Ishaque & Salam, 2013) propusieron PSO discreto para mejorar la capacidad de seguimiento del punto de potencia máximo para un sistema fotovoltaico en condiciones de sombreado parcial. El algoritmo simplifico en gran medida la estructura de control al eliminar los factores de número aleatorio y coeficientes de aceleración de PSO, se concluyó que, a pesar de la estructura simple, el método propuesto ofrece notable precisión y velocidad en comparación con PSO convencional. propusieron la aplicación de una especie de algoritmos evolutivos multiobjetivos, denominados adaptación de PSO, para resolver el problema de ajuste de ganancias PID del sistema hidráulico de control de regulación de una turbina. Además, se empleó un método de asignación de valor de pertenencia basado en lógica fuzzy para detener el algoritmo cuando se tuviese una salida deseable.

Con el propósito de denotar los trabajos que aplican y modifican el algoritmo PSO en proyectos de generación eléctrica, en la Tabla 1 se presenta el resumen de la revisión bibliográfica.

Algoritmo	Tipo	Trabajos que lo Aplican
PSO	PSO Convencional	(Ramírez Ramírez, Garcés Ruiz, & Arrieta Giraldo, 2016), (Behrang, Assareh, Noghrehabadi, & Ghanbarzadeh, 2011), (Wang, Xu, Chau, & Chen, 2013), (Mousavi & Shourian, 2010), (Cavazzini, Santolin, Pavesi, & Ardizzon, 2016), (Seyedmahmoudian, y otros, 2014)
DPSO	PSO Determinista	(Ishaque & Salam, 2013)
IA-PSO	PSO con Algoritmos inmunes	(Fu, Li, Wang, & Ji, 2011)
BPSO	PSO binario (Discreto)	(Su, Lu, Chang, & Gutierrez-Alcaraz, 2011)

Tabla 1. Aplicación de la técnica PSO.

Con base en los estudios que han aplicado PSO se concluye:

- El PSO convencional presenta una mayor frecuencia de aplicación que el resto, además, es una técnica vigente en la que se está trabajando continuamente el problema de mínimos locales y en los últimos años se ha profundizado sobre sus variantes y mejoras.
- PSO es una técnica meta-heurística con amplia aplicación en el sector energético, especialmente en: la parte técnica de los sistemas fotovoltaicos e hidráulicos, la maximización de la capacidad de generación, la ubicación óptima del SGD, la predicción de puntos de radiación solar, precipitación de lluvias, costos de equipos electromecánicos, entre otras.

- PSO puede ser una solución alternativa ante complejos problemas que no han sido resueltos con técnicas clásicas u métodos analíticos, puesto que es una técnica de búsqueda basada en la estocástica que tiene sus raíces en la vida artificial y el comportamiento social, así como en la ingeniería y la informática.
- Se evidencia el problema de la convergencia prematura y la ausencia de una metodología única, que permita determinar eficientemente, la manera de salir de dicho problema. En la mayoría de los estudios se establecen soluciones que carecen de un patrón de pasos a seguir.

1.1.2 Revisión literaria del método Flujo de caja aplicado en un SGD

(Fisher, 1907) desarrolló el FCD, usado intensivamente en la evaluación de las inversiones en activos reales. EL FCD incluye indicadores económicos como valor actual (VA), valor presente neto (VPN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR); éste se caracteriza por su simplicidad en el cálculo y la fácil visualización de su lógica.

El método FCD es comúnmente utilizado en los proyectos eléctricos para determinar la viabilidad económica de los mismos durante el periodo de vida útil del proyecto. A continuación, se presentan algunos trabajos donde se emplea el método de flujo de caja: (Kang, Kang, Kim, & Hur, 2014) evaluaron la viabilidad económica de pequeños sistemas de cogeneración (turbina de biogás y la red de distribución). Empleando los costos de inversión y funcionamiento de todas las instalaciones y los precios de la electricidad y el gas, estimaron índices económicos tales como el margen bruto anual, el VPN y el PRI. (Parrales Vásquez, Vallejo Lozano, & Montealegre, 2011) realizaron el análisis de flujo de caja durante un periodo de quince años de vida útil del proyecto, de éste se evaluaron dos indicadores como el VPN y la TIR para el correcto análisis económico. (Ramos Mora, 2016) presentó una investigación que muestra un análisis de costo beneficio de la implementación de las fuentes de energía no convencionales, para la empresa del sector químico industrial Detergentes Ltda. La estimación de los beneficios financieros está basada en las variables de rentabilidad, inversión requerida y costos de mantenimiento preventivo del sistema fotovoltaico e ingresos proyectados por la disminución de la cantidad de kWh consumidos por la empresa a la red pública. (Holdermann, Kissel, & Beigel, 2014) presentaron un estudio donde usan el método FCD para calcular los costos de inversión específicos necesarios, para que los sistemas fotovoltaicos sean económicamente viables para las sesenta y tres redes de distribución en Brasil. (Zhang, Deng, Margolis, & Su, 2015) utilizaron un modelo de flujo de efectivo para determinar el atractivo económico relativo de la generación distribuida fotovoltaica en varias provincias orientales de China, para el análisis del efecto de las recientes políticas fotovoltaicas y el impacto potencial de las políticas en el futuro, realizaron entrevistas con las partes interesadas de generación fotovoltaica y crearon un modelo de flujo de efectivo para calcular la tasa interna de rendimiento de los proyectos de generación bajo diversos marcos políticos. (Pless, Arent, Logan, Cochran, & Zinaman, 2016) utilizaron el análisis de FCD y el análisis de opciones reales para valorar los sistemas híbridos (gas natural-recurso renovable)

en aplicaciones distribuidas, centrándose en los proyectos residenciales y comerciales que se ubican en los estados de Nueva York y Texas. (Bakos, 2011) presentó una descripción de la política relacionada con la promoción de las FER en Grecia, se realiza el análisis económico del flujo de caja a una central eléctrica de pequeña potencia de 60 kWp. Se calcularon varios índices de viabilidad económica y financiera, tales como el flujo de caja anual a positivo, TIR, el retorno de la inversión y el VPN. (Spertino, Di Leo, & Cocina, 2013) presentaron un análisis técnico-económico de las inversiones en sistemas fotovoltaicos instalados en la azotea de edificios, se emplearon los índices de rentabilidad en términos de VPN y TIR, evaluados a lo largo de la duración de los incentivos (20 años), con el fin de determinar la conveniencia de la inversión. (Rodrigues, Chenb, & Morgado-Diasa, 2017) analizaron la rentabilidad económica de diferentes regiones de China considerando los niveles de radiación solar, los ahorros en el autoconsumo, los flujos de caja procedentes de la inyección de energía en la red y los precios locales de las instalaciones para mostrar que el mejor rendimiento se obtiene en los lugares con mejor radiación solar o cuando el precio de la electricidad es mayor. El flujo de caja del estudio se basa en el costo de instalación, el valor del subsidio nacional y los precios de la electricidad.

Con el propósito de denotar los trabajos que emplean el método FCD para el análisis económico de SGD y, determinar su viabilidad económica mediante el uso de indicadores, la Tabla 2 presenta el resumen de la revisión bibliográfica.

Método de evaluación	Sistema de generación	Indicadores económicos	Trabajos que lo aplican
Flujo de caja	Sistema fotovoltaico conectado a red	VPN y TIR	(Parrales Vásquez, Vallejo Lozano, & Montealegre, 2011)
Análisis costo beneficio y FC	Sistema fotovoltaico	VPN	(Ramos Mora, 2016)
Flujo de caja	Cogeneración turbina de biogás y electricidad de la red	Margen bruto anual, VPN, PRI	(Kang, Kang, Kim, & Hur, 2014)
FCD	Sistema fotovoltaico	VPN,IR	(Holdermann, Kissel, & Beigel, 2014)
Flujo de efectivo	Sistema fotovoltaico	TIR	(Zhang, Deng, Margolis, & Su, 2015)
FCD y el análisis de opciones reales	Gas natural y recursos renovables	VPN y CAMP	(Pless, Arent, Logan, Cochran, & Zinaman, 2016)
Flujo de caja	Sistema fotovoltaico	TIR, VPN, ROI	(Bakos, 2011)
Flujo de caja	Sistema fotovoltaico instalado en azotea	VPN, TIR	(Spertino, Di Leo, & Cocina, 2013)
Flujo de caja	Sistemas fotovoltaico	VPN, IR	(Rodrigues, Chenb, & Morgado-Diasa, 2017)

Tabla 2. Análisis económico de SGD

De acuerdo con la revisión de la literatura se concluye:

- El análisis económico de los SGD empleando el método FCD, permite al inversionista tener una visión más clara de la rentabilidad del proyecto durante la vida útil del mismo, afectando la decisión de invertir o no en el proyecto.
- El VPN es el indicador más utilizado para determinar la viabilidad económica de los proyectos de generación.
- El análisis económico mediante el FCD permite determinar qué tipo de tecnología renovable es la más viable para implementar un SGD, esto basado en las condiciones tecno-económicas de las tecnologías.
- EL FCD es una técnica vigente y aún es ampliamente utilizada en gran parte de los trabajos, aunque presenta ciertas limitaciones al no considerar las incertidumbres en los proyectos, lo que disminuye la confiabilidad de los resultados obtenidos en las proyecciones de los flujos de efectivo.
- Los SGD evaluados en la mayoría de los casos son sistemas fotovoltaicos siendo estos los de mayor preferencia en los proyectos de generación eléctrica.

1.1.3 Revisión de PSO híbridos aplicados en SGD

La utilización de algoritmos híbridos de PSO es cada vez más común para resolver problemas de optimización en el sector eléctrico, especialmente en los SGD. A continuación se presentan algunos trabajos donde se emplean métodos híbridos: (Mohandes, 2012) utilizó PSO para entrenar una red neuronal artificial, empleando datos de estaciones de medición disponibles para estimar la radiación solar global mensual promedio en lugares donde no hay estaciones de medición disponibles. (Moradi & Abedini, 2012) propusieron un método combinado para resolver los problemas de localización y capacidad de generación. En este método, algoritmos genéticos y PSO se utilizaron para determinar la ubicación y para calcular la capacidad de generación de un SGD, respectivamente. (Jiekang, Jianquan, Guotong, & Hongliang, 2012) presentaron una optimización de enjambre de partículas híbridas incorporada con algoritmos evolutivos, donde se determina la capacidad de generación de cada planta hidroeléctrica en cascada que maximiza el beneficio operativo esperado en el período de planificación, teniendo en cuenta los comportamientos estocásticos. (H. Moradi, Hajinazari, Jamasb, & Paripour, 2013) aplicaron un método de optimización híbrida empleando el algoritmo PSO para maximizar la función objetivo principal formulada con base en el VPN y el algoritmo de programación lineal difusa para optimizar el costo de la estrategia operativa. (Gómez-González, López, & Jurado, 2013) abordaron un método híbrido que utiliza PSO para buscar una amplia gama de combinaciones de ubicaciones, empleando flujo óptimo de potencia para definir la capacidad disponible de cada combinación. (Jiang, Ji, & Shen, 2014) propusieron un nuevo

método híbrido entre PSO y el algoritmo de búsqueda gravitacional, para la solución de la generación óptima de energía en problemas de despacho económico. (H. Moradi, Eskandari, & Showkati, 2014) y (Moradi & Eskandari, 2014) utilizaron un método híbrido en el que el algoritmo de programación cuadrática se aplica para minimizar los gastos económico-ambientales de generación energía, mientras que el algoritmo PSO se emplea para determinar las capacidades óptimas de unidades generación y almacenamiento. La diferencia en los trabajos radica en que el método propuesto por (Moradi & Eskandari, 2014), utiliza el esquema de programación matemática para explicar las incertidumbres asociadas con el precio de la electricidad. (Cheng, Chen, & Fleming, 2015) y (Kansal, Kumar, & Tyagi, 2016) aplicaron la optimización multiproyección de partículas con estrategia de preferencia con el fin de determinar las capacidades y ubicaciones óptimas de los SGD para minimizar la pérdida de potencia total del sistema y disminuir el costo causado por la generación de energía y las emisiones contaminantes. (Jamian, Mustafa, & Mokhlis, 2015) utilizaron el concepto de programación evolutiva en el algoritmo PSO para optimizar la producción de SGD. Este método de optimización permite que las partículas se muevan hacia el valor óptimo en un periodo más corto de tiempo y de manera más sencilla.

Con el propósito de denotar los trabajos que hibridan el algoritmo PSO con otra técnica, para proyectos de generación eléctrica, en la Tabla 3 se presenta el resumen de la revisión bibliográfica.

Algoritmo	Hibridación	Objetivo	Trabajos que lo Aplican
IMPSO-PS	Optimización de multiproyección de Partículas con Estrategia de Preferencia	Determinar la capacidad, ubicación óptima y minimizar la pérdida de potencia del sistema.	(Cheng, Chen, & Fleming, 2015), (Kansal, Kumar, & Tyagi, 2016)
PSO-EP	PSO con programación evolutiva	Optimizar la capacidad de generación.	(Jamian, Mustafa, & Mokhlis, 2015)
AG-PSO	Algoritmos genéticos con PSO	Determinar la capacidad de generación y ubicación del SGD	(Moradi & Abedini, 2012)
PSO-FLP	PSO con programación lineal difusa	Maximizar el VPN y optimizar el coste de la estrategia operativa.	(H. Moradi, Hajinazari, Jamasb, & Paripour, 2013)
HPSO-AE	PSO híbrido con Algoritmos Evolutivos	Determinar la generación y la mejor estrategia operativa.	(Jiekang, Jianquan, Guotong, & Hongliang, 2012)
PSO-OPF	PSO con flujo de potencia óptimo	Determinar la mejor ubicación y la capacidad de generación.	(Gómez-González, López, & Jurado, 2013)
HPSO-GSA	PSO con Algoritmo de Búsqueda Gravitacional	Determinar la capacidad de generación óptima	(Jiang, Ji, & Shen, 2014)
PSO-QP	PSO con Programación Cuadrática	Minimizar los gastos económico-ambientales y optimizar la capacidad de generación.	(Moradi & Eskandari, 2014), (H. Moradi, Eskandari, & Showkati, 2014).
PSO-ANN	PSO utilizado para entrenar una Red Neuronal Artificial	Estimar la radiación solar en lugares donde no hay estaciones de medición.	(Mohandes, 2012)

Tabla 3. Aplicación de algoritmos híbridos con PSO.

De acuerdo con los trabajos consultados se concluye:

- En gran parte de los trabajos, los métodos híbridos aplicados a SGD se utilizan para determinar la capacidad de los sistemas, junto con una estrategia operativa de gestión de la energía. El algoritmo PSO es el encargado de determinar la capacidad de generación, mientras que el otro método incluido en la hibridación se emplea en la búsqueda óptima de la estrategia operativa.
- De las diversas aplicaciones en que se utilizan los métodos híbridos, una muy común es para dar solución al problema de los mínimos globales, puesto que los algoritmos híbridos reducen el espacio de búsqueda de la solución y permiten al algoritmo converger hacia una solución global.
- Los métodos híbridos pueden presentar incrementos en los tiempos de carga computacional, dependiendo de los parámetros de control de los algoritmos. Esto se evidencia en (Jiang, Ji, & Shen, 2014) quienes hibridaron PSO con algoritmo de búsqueda gravitacional, donde se incluye éste último para realizar la valoración económica del SGD, haciendo que la carga computacional se incremente considerablemente.
- Los hallazgos de la revisión literaria explicitan que el tipo, el tamaño y la capacidad de generación de los SGD, afectan significativamente los objetivos técnicos, económicos y ambientales de los sistemas. Por lo tanto, se plantean los métodos híbridos como los indicados para resolver estas problemáticas permitiendo alcanzar los mayores beneficios del sistema.

1.2. Marco conceptual

A continuación, se presenta una visión general de los conceptos expuestos en este trabajo, que permiten comprender los apartados de la investigación y cómo se relacionan entre sí. Se presenta la fundamentación teórica necesaria de un SGD y de las FER para su abastecimiento, haciendo énfasis en la energía hidrocinética y la energía solar, también se abordan los conceptos y teoría para la comprensión de los métodos y técnicas que se emplean en la investigación, así como de las variables estocásticas que influyen en el sistema; por último, se expone la información concerniente a los indicadores económicos y el dimensionamiento del sistema.

1.2.1 Generación distribuida y fuentes de energía renovable

El concepto de generación distribuida (GD) ha surgido en los últimos años debido a la evolución que ha tenido el sistema eléctrico. En este nuevo escenario, es más común la presencia de pequeños generadores ubicados cerca de los consumidores o en la red de distribución. Puesto que, hoy en día, los sistemas centralizados de energía eléctrica se enfrentan a diferentes problemas técnicos, económicos y ambientales, una forma viable de aliviar estos problemas es utilizar los SGD, de los cuales existen distintos tipos que de acuerdo con su sistema y tecnología se pueden dividir en dos grupos: Tecnologías no renovables (Turbina de gas, Micro-turbina y Motores alternativos) y tecnologías renovables (Eólica, Mini-hidráulica, Solar térmica y Fotovoltaica, Geotérmica y Mareomotriz) (Buitrago Arroyave & López Lezama, 2013).

Las FER se definen como inagotables, tales como el calor y la luz del sol, la fuerza del viento, la materia orgánica, las corrientes de agua, la energía de los mares y océanos y, el calor geotérmico. Debido a que la energía que se consume principalmente en nuestro planeta es de carácter fósil, el uso de FER en sistemas de generación eléctrica es muy importante, ya que, provocan una reducción significativa de emisión de gases contaminantes (Brezze, 2014). Las FER tienen la desventaja de tener incertidumbre en la generación, debido a que recursos como el sol, el agua, etc., son estocásticos (Monjas-Barroso & Balibrea-Iniesta, 2013).

Energía hidrocínética

La energía hidrocínética no es más que la energía de una masa de agua debido a su movimiento, entre más velocidad lleve el agua, mayor será la energía que contenga, existen dos formas de producir energía a partir de movimientos de agua: La primera se le conoce como energía hidrocínética basada en corrientes y la podemos encontrar en los cursos artificiales de agua y las corrientes de los ríos; La segunda forma se conoce como energía hidrocínética basada en olas y se encuentra en las mareas y corrientes oceánicas (khan & Bhuyan, 2009).

Un sistema de generación hidrocínético (SHC) trabaja con la energía del flujo libre por lo que requieren mucho más volumen de agua para alcanzar una producción eléctrica razonable, por lo que, en ambientes complejos como un río, se pueden lograr generaciones interesantes. La generación de una turbina hidrocínética se puede estimar de la siguiente manera:

$$\frac{P}{A} = k \frac{1}{2} \rho v^3 \quad (1)$$

La ecuación (1), determina la potencia hidrocínética para una turbina, donde el fluido que atraviesa el área A, varía notablemente con cambios de velocidad. En esta ecuación el coeficiente de potencia k es una medida de la eficiencia dinámica del fluido de la turbina y difiere según el fabricante, se aplica para generadores

eólicos de la misma manera que para generadores hidrocinéticos, pero aún con velocidades similares la diferencia de densidades hace que trabajar con fluidos como el agua sea más atractivo del punto de vista de la generación eléctrica, además, pensando en obtener una mayor producción eléctrica y al igual que como ocurre con las turbinas eólicas se puede ir a una escala mayor mediante la implementación de granjas hidrocinéticas.

Según (Guney & Kaygusuz, 2010) existe un límite teórico para el porcentaje de energía cinética que se puede extraer del máximo disponible en el fluido, este límite se conoce como 'límite de Betz' y es del 59,3% para un disco actuador único y abierto, ósea que el coeficiente de potencia k difiere según el fabricante y como máximo será el límite de Betz.

Energía solar

La energía solar directa es la energía del sol sin transformar, que calienta e ilumina; esta se trasmite a través de las ondas electromagnéticas presentes en los rayos del sol, las cuales son generadas de forma continua y emitidas permanentemente al espacio, cerca del 70% de la energía solar recibida por el planeta es absorbida por la atmosfera, los suelos y los océanos. El porcentaje restante es reflejado por la atmosfera de nuevo al espacio (Twidell & Weir, 2015).

Radiación solar

La radiación solar que llega a la Tierra es la fuente de energía renovable más fundamental en la naturaleza. Esta podría desempeñar un papel clave en la descarbonización de la economía mundial junto con mejoras en la eficiencia energética e imponer costos a los emisores de gases de efecto invernadero. En los estudios de energía solar, los datos sobre la radiación y sus componentes en un lugar dado, son un insumo fundamental para aplicaciones de energía como sistemas fotovoltaicos, sistemas solares térmicos, hornos solares y diseño solar pasivo. Los datos deben ser confiables y fácilmente disponibles para el diseño, optimización y evaluación del rendimiento de los sistemas solares para cualquier ubicación en particular (Besharat & Dehghan, 2013).

Hora solar pico

La insolación es la energía radiante que incide en una superficie de área conocida en un tiempo dado, se analizan los datos de radiación solar global que incide sobre un metro cuadrado de superficie horizontal en un día medio. La unidad de medida es Wh/m^2 . Esto equivale a una hora solar pico (HSP). (Twidell & Weir, 2015).

La energía producida diariamente por un sistema de generación fotovoltaico (SFV) conectado directamente a la carga, se puede expresar como el producto de tres factores independientes (Morán, Facchini, Pontoriero, & Doña, 2009), como lo muestra la siguiente ecuación:

$$Eg = P * HSP * \eta \quad (2)$$

Donde P es la potencia nominal, o potencia máxima que entrega el generador en las denominadas condiciones estándar de medida [1.000 W/m^2 de radiación, una temperatura de $25C^\circ$ y una masa de aire espectral de 1,5 (AM)], HSP es el número de horas solares pico diarias y, η representa el rendimiento de la instalación fotovoltaica completa.

1.2.2 Variables estocásticas en los SGD

Las variables estocásticas son series de datos variantes a través del tiempo, en el sector eléctrico este tipo de variables están ligadas a los proyectos de generación de electricidad a través de las FER debido a la aleatoriedad de los datos, por lo que se necesitan de modelos estocásticos que permitan ajustar este tipo de variables a un modelo que pronostique el comportamiento de los datos en un tiempo futuro (Baziar & Kavousi-Fard, 2013), (Monjas-Barroso & Balibrea-Iniesta, 2013) y (Gonzales Chávez, 2014).

Tipos de incertidumbres consideradas en los SGD

Con base en la revisión bibliográfica de la Tabla 4, acerca de los proyectos que consideran la modelación de variables estocásticas en la valoración económica de PGD, se identifican los siguientes tipos de incertidumbres: económica y financiera, del mercado, tecnológica y ambiental; en esta última se hace énfasis debido a que en este trabajo se considera el comportamiento estocástico de las FER.

Incertidumbre ambiental: Los proyectos de generación de energía, cuya entrada para la producción de energía son recursos renovables (viento, radiación solar, mareas, caudal de agua, etc.) se enfrentan a un gran reto, ya que, por sus características naturales, el comportamiento de las entradas es estocástico, factor que al ser incluido en los procesos de valoración genera mayor flexibilidad al proyecto. Los métodos de generación de energía que utilizan fuentes no renovables producen un alto impacto ambiental, lo que ha llevado a la inclusión de externalidades en los proyectos (ej.: normas de emisión más estrictas), aumentando la incertidumbre en los precios de la energía. De otro lado, los métodos de producción respetuosos con el medio ambiente no sufren tal incertidumbre. Las incertidumbres ambientales tradicionalmente consideradas son: velocidad del viento, velocidad del agua, radiación solar y emisiones.

Tipo	VARIABLES	Trabajos que lo aplican
Económico-financiero	Costo Inversión	(Su, Lu, Chang, & Gutierrez-Alcaraz, 2011), (Monjas-Barroso & Balibrea-Iniesta, 2013), (Jordehi, 2016), (Cavazzini, Santolin, Pavesi, & Ardizzon, 2016), (H. Moradi, Hajinazari, Jamasb, & Paripour, 2013)
	Costos de Mantenimiento y Operación	(H. Moradi, Eskandari, & Showkati, 2014), (H. Moradi, Hajinazari, Jamasb, & Paripour, 2013), (Cheng, Chen, & Fleming, 2015), (Gómez-González, López, & Jurado, 2013), (Kansal, Kumar, & Tyagi, 2016), (Jiang, Ji, & Shen, 2014)
	Índice de precios al consumidor (IPC)	(Monjas-Barroso & Balibrea-Iniesta, 2013)
Ambiental	Emisiones	(H. Moradi, Eskandari, & Showkati, 2014), (Mandal & Chakraborty, 2012), (Cheng, Chen, & Fleming, 2015), (H. Moradi, Hajinazari, Jamasb, & Paripour, 2013).
	Velocidad del viento	(Yi Su, Lu, Shang, & Gutierrez-Alcaraz, 2011), (Xia, Zou, Liu, Wang, & Zhu, 2018), (Ramírez Ramírez, Garcés Ruiz, & Arrieta Giraldo, 2016)
	Radiación solar	(A. & Al, 2016), (Behrang, Assareh, Noghrehabadi, & Ghanbarzadeh, 2011), (Mohandes, 2012), (Ishaque & Salam, 2013), (Seyedmahmoudian, y otros, 2014)
	Caudal de agua	(Mahor & Rangnekar, 2012), (Fu, Li, Wang, & Ji, 2011), (Wang, Xu, Chau, & Chen, 2013), (Jamshid Mousavi & Shourian, 2010), (Hossain, El-Shafie, & Mohtar, 2015), (Jiekang, Jianquan, Guotong, & Hongliang, 2012)
Mercado	Precios de la electricidad	(Monjas-Barroso & Balibrea-Iniesta, 2013), (Jiekang, Jianquan, Guotong, & Hongliang, 2012), (Kansal, Kumar, & Tyagi, 2016)
	Precios de los Combustibles	(Rezam Khorram, Aliasghar, & Abdollah Kavousi, 2013), (Mandal & Chakraborty, 2012), (Jordehi, 2016), (Gómez-González, López, & Jurado, 2013), (Moradi & Eskandari, 2014)
	Demanda de la energía, perfil de carga	(Kansal, Kumar, & Tyagi, 2016), (Jiang, Ji, & Shen, 2014)
Tecnológico	Curva de aprendizaje	(Mohandes, 2012)
	Tiempo de vida: Eficiencia, confiabilidad	(Rezam Khorram, Aliasghar, & Abdollah Kavousi, 2013), (A. & Al, 2016), (Mohan, Ananthapadmanabha, & Kulkarni, 2015)
	Generación	(Fu, Li, Wang, & Ji, 2011), (Su, Lu, Chang, & Gutierrez-Alcaraz, 2011), (Cheng, Chen, & Fleming, 2015), (Jamian, Mustafa, & Mokhlis, 2015)

Tabla 4. Variables de incertidumbre en los proyectos del sector eléctrico.

De la revisión de la literatura en la Tabla 4 se concluye:

- Dentro de las variables de tipo económico, los costos de operación y mantenimiento son los más estudiados. Otras variables han sido muy poco modeladas, tales como el índice de precios al consumidor.
- Se presentan variables modeladas que se pueden considerar muy poco comunes en los procesos de evaluación, como son: perfil de carga y curva de aprendizaje.
- En las variables ambientales la modelación de la radiación es la de mayor uso; se puede asociar con el crecimiento de la tecnología a nivel mundial; del otro lado está la modelación de las emisiones, que debido a la preocupación por el medio ambiente se ha incrementado el número de trabajos que la modelan.
- Dentro de las variables ambientales tenemos la velocidad del flujo de agua que cuenta con muy poca información debido a que las tecnologías que la

aplican son relativamente nuevas por lo que la información sobre esta incertidumbre es escasa.

1.2.3 Optimización multiobjetivo

Según (Coello Coello, Van Veldhuizen, & Lamont, 2007), el Problema de Optimización Multiobjetivo (POM) se puede definir como:

‘Encontrar un vector de variables de decisión que satisfaga unas restricciones y optimice una función vector cuyos elementos representan las funciones objetivo.’

Desde un punto de vista formal esto se puede expresar como: determinar un vector de variables $\vec{x} = [x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*]^T$ que satisfaga:

- las m restricciones de desigualdad

$$g_i(\vec{x}) \leq 0 \text{ para } i = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

- las p restricciones de igualdad

$$h_i(\vec{x}) = 0 \text{ para } i = 1, 2, \dots, p \quad (4)$$

- y que optimice la función vectorial $\vec{y} \in R^3$

$$\vec{f}(\vec{x}) = [f_1(\vec{x}), f_2(\vec{x}), \dots, f_k(\vec{x})]^T \quad (5)$$

Para efectos prácticos todas las funciones objetivo se minimiza o maximizan lo cual se puede lograr mediante la siguiente identidad:

$$\min f_1(\vec{x}) = \max (-f_1(\vec{x})) \quad (6)$$

El conjunto de restricciones dadas por las ecuaciones anteriores, determina la región factible Ω y cualquier vector $\vec{x}^* \in \Omega$ define una solución factible. El vector de funciones $\vec{f}(\vec{x})$ es una función que mapea el conjunto Ω al conjunto Λ y que contiene todos los valores posibles de las funciones objetivo (Coello Coello, Van Veldhuizen, & Lamont, 2007). Lo anterior se puede apreciar en la Figura 1.

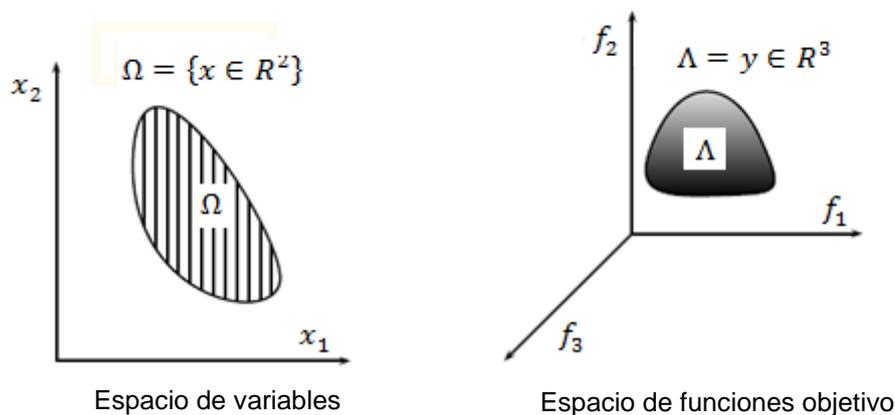


Figura 1. Dominio de las variables y las funciones objetivo. (Coello Coello, Van Veldhuizen, & Lamont, 2007).

Clasificación de técnicas para resolver problemas multiobjetivo

En el campo de la optimización se han realizado diferentes propuestas para clasificar las técnicas que existen para resolver problemas multiobjetivo. Como un primer aspecto a considerar, resulta importante distinguir las dos etapas en las cuales se puede dividir la solución de un problema multiobjetivo. La primera consiste en la optimización de las diversas funciones objetivo involucradas y el segundo corresponde a la selección de los compromisos más convenientes. Según (Coello Coello, Van Veldhuizen, & Lamont, 2007), una clasificación general de las técnicas evolutivas aplicadas en optimización multiobjetivo es la siguiente:

- **No basadas en Pareto:**
 - Ordenamiento lexicográfico.
 - Suma lineal de pesos.
 - VEGA.
 - Método ϵ -constraint.
 - Satisfacción de metas.

- **Basadas en Pareto:**
 - Jerarquización de Pareto pura.
 - MOGA.
 - NSGA y NSGA II.
 - NPGA y NPGA 2.
 - Enfoques no generacionales.

En este trabajo se opta trabajar con las técnicas no basadas en Pareto específicamente la suma lineal de pesos debido a que suelen ser muy eficientes, pero sólo con pocas funciones objetivo (menor a tres).

Combinación lineal de pesos

Esta técnica consiste en convertir el problema multiobjetivo en uno mono-objetivo mediante una suma ponderada de los objetivos:

$$\min \sum_{i=1}^k w_i f_i(\vec{x}) \quad (7)$$

con $w_i \geq 0$ que son los pesos que ponderan la importancia de cada una de las k funciones objetivo del problema, donde suele suponerse que:

$$\sum_{i=1}^k w_i = 1 \quad (8)$$

La principal ventaja de esta técnica es su simplicidad y su eficiencia. Por otro lado, sus principales desventajas son en primer lugar la dificultad de definir un conjunto de pesos que permita generar una porción significativa del frente de Pareto y adicionalmente se tiene que en esta técnica no permite obtener porciones no convexas del frente de Pareto sin importar la combinación de pesos empleada (Coello Coello, Van Veldhuizen, & Lamont, 2007).

1.2.4 Algoritmo de Optimización por enjambre de partículas (PSO)

Según (Moradi & Eskandari, 2014), el algoritmo de optimización por enjambre de partículas optimiza una función objetivo llevando a cabo una búsqueda estocástica basada en la población. Esta comprende soluciones potenciales, llamadas partículas, que son una metáfora para las aves en las inundaciones. Estas partículas se inicializan al azar y vuelan libremente a través del espacio de búsqueda multidimensional. Durante el vuelo, cada partícula actualiza su velocidad y posición basándose en la mejor experiencia propia y la encontrada por toda la población hasta ese punto. La regla de actualización dirigirá el enjambre de hacia la región más prometedora con un valor objetivo más alto, y eventualmente todas las partículas se acumularán alrededor del punto óptimo.

Composición de una partícula

La posición de cada partícula representa una solución potencial al problema que se está resolviendo. Para (Marini & Walczack, 2015), una partícula p_i está compuesta de tres vectores y tres valores de fitness:

- El vector $p_i x[*] = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{in})$ almacena la posición actual (localización) de la partícula en el espacio de búsqueda.

- El vector $pBest_i x[*] = (pBest_{i1}, pBest_{i2}, \dots, pBest_{in})$ almacena la posición de la mejor solución encontrada por la partícula hasta el momento.
- El vector de velocidad $v_i x[*] = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in})$ almacena el gradiente (dirección) según el cual se moverá la partícula.
- El valor de fitness $fitness_p_i$ almacena el valor de adecuación de la solución actual (vector p_i).
- El valor fitness $fitness_pBest_i$ almacena el valor de adecuación de la mejor solución encontrada por la partícula hasta el momento (vector $pBest_i$).
- El valor fitness $fitness_gBest_i$ almacena el valor de adecuación de la mejor solución encontrada por el enjambre hasta el momento (vector $pBest_i$).

Etapas del algoritmo PSO

El cúmulo se inicializa generando las posiciones y las velocidades iniciales de las partículas. Se pueden generar aleatoriamente en el espacio de búsqueda o con un heurístico de construcción. Una vez generadas las posiciones, se calcula el fitness de cada una y se actualizan los valores de $fitness_p_i$ y $fitness_pBest_i$.

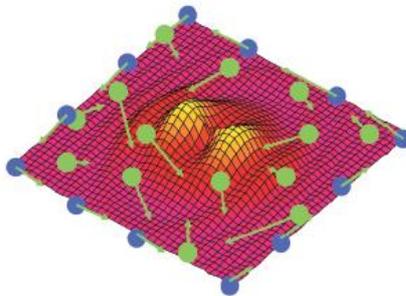


Figura 2. Inicialización del cúmulo en el espacio de búsqueda (García Nieto, 2006).

Inicializado el cúmulo (ver Figura 2), las partículas se deben mover dentro del proceso iterativo, desde una posición del espacio hasta otra, añadiendo al vector posición $p_i x[*]$ el vector velocidad $v_i x[*]$ para obtener un nuevo vector posición:

$$p_{i+1} x[*] = p_i x[*] + v_i x[*] \quad (9)$$

Una vez calculada la nueva posición de la partícula, se evalúa actualizando $fitness_p_i$; además, si el nuevo fitness es el mejor encontrado hasta el momento, se actualizan los valores de mejor posición $pBest_i x[*]$ y fitness $pgBest_i$. El vector velocidad de cada partícula es modificado en cada iteración utilizando la velocidad anterior, un componente cognitivo y un componente social. El modelo matemático

resultante y que representa el corazón del algoritmo PSO viene representado por la siguiente ecuación:

$$v_i X[*] = W * v_i x[*] + rand1() * c_1 * (pBest_i x[*] - p_i x[*]) + rand2() * c_2 * (pgBest_i x[*] - p_i x[*]) \quad (10)$$

Donde $p_i x[*]$ y $v_i x[*]$ son la posición y la velocidad de la partícula respectivamente, y el $pBest_i x[*]$ y $pgBest_i x[*]$ son las posiciones con el mejor valor objetivo encontrado hasta ese punto por la partícula i y la población total, respectivamente, W es el coeficiente de ponderación de inercia, $rand1()$ y $rand2()$ son variables aleatorias entre $[0,1]$, y $c_1=c_2$ son factores de ponderación.

Con base en las ecuaciones (9) y (10) se obtiene el desplazamiento de una partícula i en cada iteración k , en la Figura 3 se representa gráficamente este movimiento:

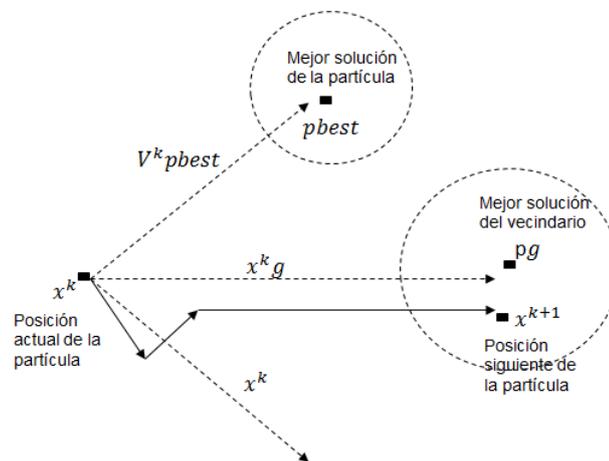


Figura 3. Movimiento de partícula en el espacio de soluciones (Garcia Nieto, 2006)

En la anterior gráfica, la línea discontinua representa la dirección de los vectores de velocidad actual: $v^k pBest$ es la velocidad de la mejor posición tomada por la partícula, $v^k g$ es la velocidad de la mejor partícula encontrada en el vecindario y v^k es la velocidad actual de la partícula. La línea continua representa la dirección que toma la partícula para moverse desde la posición x^k hasta la posición x^{k+1} . El cambio de dirección de esta línea depende de la influencia de las demás direcciones (gradiente) que intervienen en el movimiento.

Con base en las anteriores etapas, en la Figura 4 se esboza el diagrama de flujo del algoritmo PSO que se aplicara en este proyecto (ver unidad 2.3.3).



Figura 4. Diagrama de flujo PSO

Tipos de algoritmo PSO

Se pueden obtener diferentes tipos de PSO atendiendo a diversos factores de configuración, por ejemplo, según la importancia de los pesos cognitivo y social y según el tipo de vecindario utilizado. Por una parte, dependiendo de la influencia de los factores cognitivo y social (valores $\delta 1$ y $\delta 2$ respectivamente), (Kennedy & Eberhart, 1995) identifica cuatro tipos de algoritmos:

1. Modelo Completo: $\delta 1; \delta 2 > 0$. Tanto el componente cognitivo como el social intervienen en el movimiento.
2. Modelo sólo Cognitivo: $\delta 1 > 0$ y $\delta 2 = 0$. Únicamente el componente cognitivo interviene en el movimiento.
3. Modelo sólo Social: $\delta 1 = 0$ y $\delta 2 > 0$. Únicamente el componente social interviene en el movimiento.
4. Modelo Social exclusivo: $\delta 1 = 0$, $\delta 2 > 0$ y $g_i \neq x_i$. La posición de la partícula en sí no puede ser la mejor de su entorno.

Por otra parte, desde el punto de vista del vecindario, es decir, la cantidad y posición de las partículas que intervienen en el cálculo de la distancia en la componente social, se clasifican dos tipos de algoritmos: PSO Local y Global.

En el PSO Local, se calcula la distancia entre la posición actual de la partícula y la posición de la mejor partícula encontrada en el entorno local de la primera. Para el PSO Global, la distancia en el componente social viene dada por la diferencia entre la posición de la partícula actual y la posición de la mejor partícula $gBest_i$ encontrada en el cúmulo completo.

Aspectos avanzados de PSO

Un problema habitual de los algoritmos PSO es que la magnitud de la velocidad suele llegar a ser muy grande durante la ejecución, con lo que las partículas se mueven demasiado rápido por el espacio. El rendimiento puede disminuir si no se fija adecuadamente el valor de velocidad máxima, esta puede ser controlada y adaptada de acuerdo con la inercia:

$$w = w_{max} - \frac{w_{max} - w_{min}}{iter_{max}} * iter \quad (11)$$

Donde w_{max} es el peso inicial y w_{min} el peso final, $iter_{max}$ es el número máximo de iteraciones y, $iter$ es la iteración actual. w debe mantenerse aproximadamente entre 0.8 y 1.2, pues valores altos provocan una búsqueda exhaustiva (más diversificación) y valores bajos una búsqueda más localizada (más intensificación).

1.2.5 Valoración económica de un SGD

La evaluación de un PGD requiere el uso de técnicas adecuadas para su valoración, dentro del contexto en que van a ejercer sus operaciones, teniendo en cuenta los cambios que se pueden presentar en el tiempo de evaluación del proyecto y las estrategias a adoptar.

Método flujo de caja descontado (FCD)

La proyección del FCD constituye uno de los elementos más importantes del estudio de un proyecto, ya que la evaluación del mismo se efectuará sobre los resultados que se determinen en ella. La información básica para realizar esta proyección está contenida tanto en los estudios de mercado, técnico y organizacional, como en el cálculo de los beneficios que se obtendrán durante la vida útil del proyecto. Al proyectar el flujo de caja será necesario incorporar información adicional relacionada, principalmente, con los efectos tributarios de la depreciación, de la amortización del activo nominal, del valor residual, de las utilidades y pérdidas (Sapag Chain & Sapag Chain, 2008).

Estructura del flujo de caja

La construcción de los FCD puede basarse en una estructura general que se aplica a cualquier finalidad del estudio de proyectos. Para un proyecto que busca medir la rentabilidad de la inversión, el ordenamiento propuesto es el que se muestra en la siguiente tabla (Sapag Chain & Sapag Chain, 2008):

+ Ingresos afectos a impuestos	
- Egresos afectos a impuestos	Ingresos y egresos afectos a impuesto son todos aquellos que aumentan o disminuyen la utilidad contable de la empresa.
- Gastos antes de impuestos	Gastos no desembolsables son los gastos que para fines de tributación son deducibles, pero que no ocasionan salidas de caja, como la depreciación, la amortización de activos intangibles o el valor libro de un activo que se venda. Por no ser salidas de caja, se restan primero para aprovechar su descuento tributario, y se suman a los Ajustes por gastos no desembolsables, con lo cual se incluye sólo su efecto tributario.
= Utilidad antes de impuesto	
- Impuesto	Impuesto a la renta
= Utilidad después de impuesto	
+ Ajustes por gastos no desembolsables	Están compuestos por la depreciación y la amortización.
- Egresos no afectos a impuestos	Egresos no afectos a impuestos son las inversiones, ya que no aumentan ni reducen la riqueza contable de la empresa, por el solo hecho de adquirirlos. Generalmente es un cambio de activos (máquina por caja) o un aumento simultáneo de un activo y un pasivo (máquina y endeudamiento).
+ Beneficios no afectos a impuestos	Beneficios no afectos a impuesto son el valor de desecho del proyecto y la recuperación del capital de trabajo si el valor de desecho se calculó por el mecanismo de valoración de activos, ya sea contable o comercial.
= Flujo de caja	Suma total de flujos efectivos del proyecto

Tabla 5. Estructura de un FCD.

Indicadores de evaluación de proyectos

En un PGD las mediciones de la rentabilidad mediante el uso de indicadores económicos, son las que proporcionan la información suficiente para determinar la viabilidad del proyecto (Sapag Chain & Sapag Chain, 2008) y (Córdoba Padilla, 2013).

Con base en la revisión bibliográfica de la Tabla 2, acerca de los proyectos que aplican valoración económica en SGD, se identifican los siguientes indicadores económicos: Valor Presente neto (VPN), Tasa interna de retorno (TIR), periodo de retorno de la inversión (PRI), costos nivelados de energía (CNE), costo capital promedio ponderado (WACC), el modelo de valoración de activos de capital (CAPM), y el índice de rentabilidad (IR); a continuación se presenta la Tabla 6 que resume la información recopilada de los indicadores económicos.

Indicador	Objetivo	Criterio	Forma de calcularlo
VPN	Encontrar el costo de un proyecto en el momento actual t , con base en la previsión de los flujos futuros, para poder comparar los flujos de caja con respecto al desembolso inicial.	Se considera viable el proyecto cuando el VPN es positivo.	$VPN = \frac{\sum_{t=1}^n FC_t}{(1+r)^n} - I_0$, Donde I_0 es el valor inicial de la inversión, FC_t flujo de caja en el periodo t ; n horizonte temporal del proyecto; r tasa de descuento para el riesgo del proyecto.
TIR	Determinar la rentabilidad de un proyecto. Tasa de descuento con la que el VPN es igual a cero.	A mayor Tasa Interna de Retorno, mayor rentabilidad.	$VPN = \frac{\sum_{t=1}^n FC_t}{(1+r)^n} = 0$
PRI	Determinar el tiempo en que se recupera la inversión inicial a través de los FC, ingresos menos costos, todos actualizados al momento actual, obtenidos con el proyecto.	Tiempo mínimo necesario para recuperar la inversión.	$PRI = \frac{\sum_{t=1}^n (I_t - E_t)}{I_0}$, Donde PRI es el periodo de recuperación; I_t ingresos; E_t egresos; t periodo de tiempo (años, meses, etc); I_0 inversión inicial.
CNE	Definir el Precio de la Electricidad para un proyecto de generación.	A menor precio mayor rentabilidad de la inversión.	$CNE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t + C_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{G_t}{(1+r)^t}}$, Donde I_t es la inversión en el periodo t ; M_t son los gastos de operación y mantenimiento; C_t costos de combustibles y G_t la energía producida.
WACC	Medir el costo capital, entendido éste como una media ponderada entre la proporción de recursos propios y la proporción de recursos ajenos.	A mayor WACC mayor retribución del proyecto.	$WACC = K_e \frac{CAA}{CAA+D} + K_d (1 - T) \frac{D}{CAA+D}$, Donde K_e es la tasa del costo de oportunidad del inversionista; CAA el capital aportado del inversionista; D la deuda financiera contraída; K_d el costo de la deuda financiera; T la tasa de impuestos.
CAPM	Determinar la tasa de retorno teóricamente requerida para un cierto activo, si este es agregado a una cartera de inversiones adecuadamente diversificada.	A mayor riesgo del activo, mayor es la rentabilidad esperada por el mercado	$E(r_i) = r_f + \beta (E(r_m) - r_f)$, Donde $E(r_i)$, es la tasa de rendimiento esperada sobre el activo i ; β el beta (cantidad de riesgo con respecto al portafolio del mercado); r_m el rendimiento del mercado; r_f el rendimiento de un activo libre de riesgo.
IR	También conocido como razón beneficio/costo, mide el valor presente de los beneficios por unidad de inversión	IR > 1, Aceptable IR = 1, No hay perdidas, ni ganancias IR = 1, No Aceptable	$IR = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+r)^t}}{I_0}$, Donde FC_t es el flujo de caja en el tiempo t , r es la tasa de descuento, t es el número de periodos y, I_0 es la inversión inicial.

Tabla 6. Indicadores económicos utilizados en un PGD.

1.2.6 Dimensionamiento y topología de un SGD

El dimensionamiento de un SGD se realiza basado en un sistema conectado a la red (SCR), el cual puede estar conformado por dos (o más) tipos de tecnologías, convirtiéndole en un sistema híbrido. A continuación, se presenta el esquema del SCR y en el Anexo C se presentan los cálculos del dimensionamiento basado en las características de los equipos que lo conforman (ver Anexo D).

Sistema conectado a la red

Según (Perpiñan Lamigueiro, 2015) un sistema fotovoltaico conectado a la red (SFVCR) es un sistema cuya función es producir energía eléctrica en condiciones adecuadas para poder ser inyectada en la red convencional. Por otro lado, para (SMART HYDRO POWER, 2010) un sistema hidrocínético conectado a la red (SHCR), es particularmente útil en aplicaciones de respaldo donde la red eléctrica está disponible pero es muy cara o inestable.

La energía producida por estos sistemas será consumida parcial o totalmente en las cercanías, y la energía sobrante será inyectada en la red para su distribución a otros puntos de consumo. Es común que existan mecanismos de retribución económica que compensen al propietario del sistema por la energía que intercambia con la red (Perpiñan Lamigueiro, 2015).

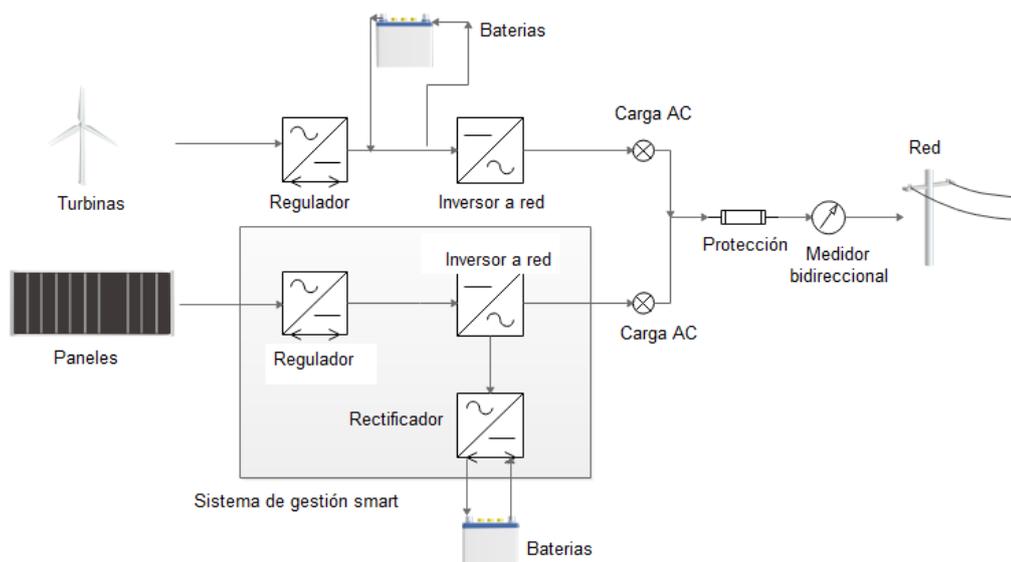


Figura 5. Esquema del SGD híbrido conectado a la red

Como se muestra en la Figura 5, un SGD híbrido está compuesto por: 1) un SFVCR que se compone del generador fotovoltaico, el regulador, el inversor DC/AC, baterías (si aplica), la carga y un conjunto de protecciones eléctricas y, 2)

un SHCR que se compone del generador hidrocínético, sistema de gestión Smart (Rectificador, inversor a red, regulador), baterías (si aplica), la carga y un conjunto de protecciones eléctricas. En el Anexo D se presenta la explicación detallada de las características de cada uno de estos equipos y su modo de funcionamiento.

1.3. Conclusiones del capítulo

- La valoración económica de un PGD es de crucial importancia, ya que, de esta depende la implementación y operación del mismo. Aunque existen muchas técnicas y/o métodos para abordar esta problemática, el método FCD es ampliamente utilizado en este tipo de proyectos, debido a su fácil implementación e interpretación de resultados y, con base en el criterio de los indicadores económicos, permite determinar la rentabilidad y viabilidad del proyecto.
- La versión Global de PSO converge más rápido, pues la visibilidad de las partículas incrementa y se acercan más rápido a la mejor posicionada del cúmulo favoreciendo la intensificación, aunque debido a esto también cae más fácilmente en óptimos locales. Mientras que, el comportamiento de la versión Local funciona de manera contraria, es decir, le cuesta más converger favoreciendo en este caso la diversificación, pero no cae fácilmente en óptimos locales.
- La aplicación del algoritmo PSO en los SGD se presenta principalmente en la modelación y simulación de las incertidumbres de tipo técnico vinculadas con el tipo, tamaño, ubicación y capacidad de generación del sistema. Aunque se encuentran algunos trabajos donde se aplica PSO para optimizar los costos totales, esto no infiere que realicen una valoración económica completa del sistema, por esta razón y acorde a la revisión de la literatura, es apropiado emplear un método híbrido que permita realizar el estudio técnico-económico de un SGD.
- En los últimos años se ha producido un crecimiento exponencial en el uso de la tecnología fotovoltaica. Los grandes avances de esta, la enorme fuente de potencial y el gran interés por parte de las potencias mundiales, logran que sea la tecnología de mayor uso para la producción de energía renovable. Por otro lado, la energía hidrocínética es una tecnología que relativamente está en las fases iniciales de desarrollo, sin embargo, la tendencia del uso de la corriente de los ríos y las investigaciones de la misma crecen día a día para obtener sistemas de mayor capacidad de producción energética.
- Los métodos PSO y FCD, aunque presentan diferentes estructuras y procesos para su implementación, se pueden utilizar de forma conjunta para la valoración económica de proyectos.

Capítulo 2

Metodología para la valoración económica del SGD

A continuación, se presenta la metodología para la valoración económica de un SGD, la cual contempla tres tipos de sistemas: fotovoltaico, hidrocínético y un híbrido, basado en las tecnologías de paneles solares y turbinas hidrocínéticas. La valoración considera aspectos técnicos, económicos e incertidumbres de las FER y se aborda a través de dos métodos: el FCD y el MH; el desempeño de estos se evalúa mediante la técnica de proceso analítico jerárquico (AHP por su sigla en inglés) del análisis multicriterio.

El capítulo se estructura de la siguiente manera: 1) se expone el procedimiento metodológico para identificar y modelar las funciones de distribución que mejor se ajustan y describen al comportamiento estocástico de las FER, 2) se presenta el método FCD y el MH orientados a un PGD, 3) se definen los indicadores económicos de mayor uso en los proyectos de generación eléctrica y los criterios de comparación de los métodos y, 4) se presentan las conclusiones del capítulo. La estructura de la metodología se ilustra a continuación en la Figura 6.

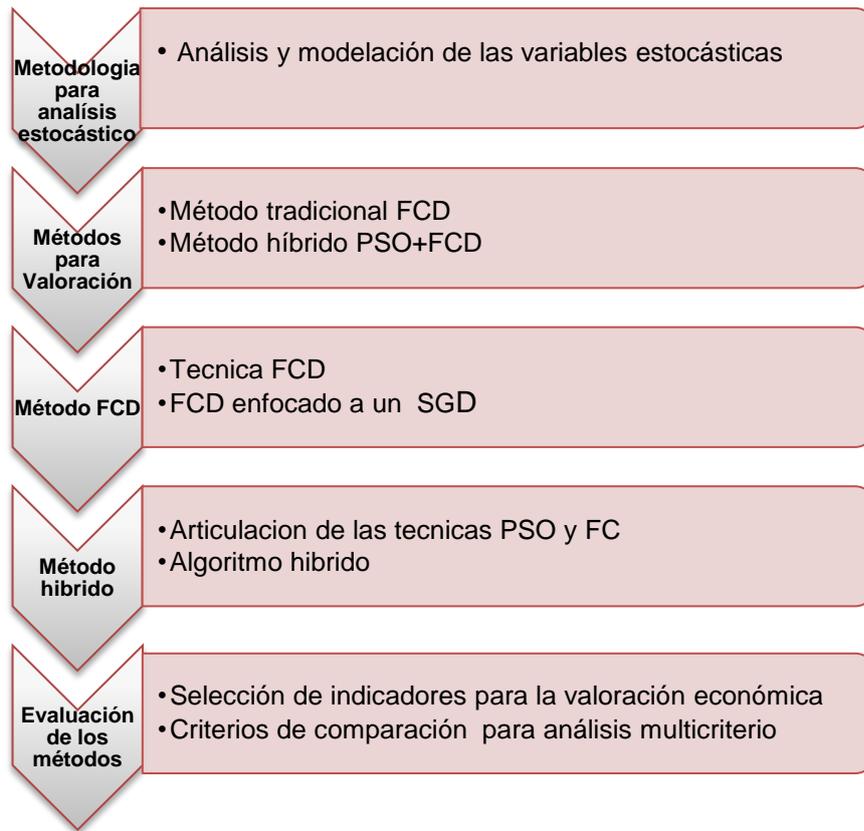


Figura 6. Estructura metodológica para valoración económica de un SGD.

2.1. Análisis y modelación de variables estocásticas

La planificación y evaluación de proyectos en el sector real, se realiza con base en variables estocásticas, sobre las cuales el decisor no tiene plena certeza (en el corto, mediano o largo plazo), lo cual dificulta la toma de decisiones; situación que se complica con el tamaño, los recursos, el tiempo y, el ámbito del proyecto (Restrepo Garcés, 2014). Además, según Hoff et al., (2003) es difícil identificar todas las incertidumbres y solicitar al decisor que crea en ellas. A su vez, las incertidumbres se convierten en oportunidades y amenazas que representan la flexibilidad del proyecto.

Por su parte (Nikman et al., 2012), afirman que las entradas de las tecnologías que permiten convertir una fuente natural como la radiación solar y la velocidad del agua en electricidad, son series de tiempo que tienen un comportamiento estocástico.

Por lo anterior, y debido a que en este trabajo se asume que la generación de las renovables depende, únicamente, de las entradas de los recursos naturales de cada una de las tecnologías, se hace necesario el uso de métodos y/o

herramientas estadísticamente confiables que permitan realizar el análisis y modelación de las anteriores.

El método Montecarlo parece ser una buena opción para tratar este tipo de inconvenientes, que según (Illana, 2013) es aplicable a cualquier tipo de problema resolviéndole mediante la invención de juegos de azar cuyo comportamiento simula algún fenómeno real gobernado por una distribución de probabilidad (ej. un proceso físico) o sirve para realizar un cálculo (ej. evaluar una integral); más técnicamente, este método es un proceso estocástico numérico, es decir, una secuencia de estados cuya evolución viene determinada por sucesos aleatorios.

A continuación, se presenta el proceso que se aplicará en el presente proyecto, éste está basado en la herramienta software '@Risk con simulación de Montecarlo', la cual permite analizar y determinar la función de distribución que mejor se adapte al comportamiento estocástico de una serie de tiempo no determinista:

1. Obtener un histórico del comportamiento real de la variable.
2. Definir el número de periodos históricos para analizar y número de periodos a modelar.
3. Analizar los datos históricos, seleccionar la función de distribución y sus parámetros, que mejor se ajustan al comportamiento de la variable real.
4. Simular los periodos de tiempo con la función de distribución determinada.

Como ya fue mencionado, las series de tiempo se ajustan a distribuciones estadísticas, en (Vélez-Pereira, Vergara, Barraza, & Agudelo, 2013) la radiación solar es modelada como una distribución normal y, en (Serrano, 2013), se utiliza la distribución de Weibull para modelar la velocidad de flujo de agua. Tanto en la radiación como en el flujo se requiere encontrar los parámetros de ajuste que permiten obtener el mejor comportamiento de la variable modelada respecto a la real.

Teniendo en cuenta que las distribuciones Normal y Weibull, han sido las utilizadas en los casos que nos atañen, a continuación, se presentan las funciones de distribución y sus correspondientes parámetros, con el objetivo de fundamentarlas teóricamente:

Distribución Normal

La distribución de una variable normal está completamente determinada por dos parámetros, su media y su desviación estándar, denotadas generalmente por μ y σ . Con esta notación, la función de densidad de la Normal viene dada por la ecuación:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma * \sqrt{2\pi}} \exp\left\{\frac{-1}{2} \left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right)^2\right\} \quad (12)$$

Donde μ es la HSP promedio de la serie de tiempo radiación solar y, σ es la desviación de los datos tomados como muestra.

Distribución de Weibull

Según (Serrano, 2013) algunas de las ventajas de la función Weibull sobre otras funciones de densidad de probabilidad son: permitir estimaciones satisfactorias de la asimetría de la distribución de densidad de probabilidad; si la función de Weibull para la distribución de x (flujo de agua) tiene un factor de forma, entonces la distribución de x al cubo también sigue la función de Weibull. Esta función se caracteriza por dos parámetros; uno de escala (c) y, otro de forma (k); el primero define cuán dispersa se encuentra la distribución, mientras que el segundo define la forma de la distribución. La función de distribución de Weibull está dada por:

$$f(r) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{x}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{c}\right)^k\right] \quad (13)$$

Y la función de distribución acumulada es:

$$f(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{c}\right)^k\right] \quad (14)$$

Donde, x es la velocidad del caudal en lt/s , c es el parámetro de escala con unidades lt/s y k es el parámetro de forma sin dimensiones.

2.2. Métodos para Valoración

Según (Yang & Blyth, 2007) el estudio económico que debe de realizar el inversionista para un SGD depende en primera instancia del tipo de sistema de generación elegido; los factores que intervienen, tales como la inversión inicial, los costes de operación y mantenimiento, las fuentes suministro de energía, condiciones de funcionamiento, etc., difieren de un sistema a otro, lo que provoca cierto grado de incertidumbre en los retornos futuros que se producen por las inversiones.

En este trabajo se plantea comparar la valoración económica de un SGD evaluado por dos métodos: 1) el método FCD y, 2) el MH propuesto en esta investigación, los cuales se describen a continuación:

- 1- Flujo de caja descontado (FCD): cumple con el dimensionamiento técnico-económico, en función de la demanda de potencia. Es un modelo simplificado ya que considera determinista el comportamiento de las FER, el área de instalación (techos, terrenos, ríos, etc.) infinitos, y además actúa sobre recursos ilimitados, es decir, no opta por minimizar costos. Este método no resuelve la minimización de costos, sino que parte con el objetivo de cumplir una demanda requerida al costo que sea necesario.
- 2- Método híbrido PSO+FCD (MH): cumple con el dimensionamiento técnico-económico y la demanda en función de la minimización de costos de inversión inicial. En este caso, se puede o no tener en cuenta el área de instalación total, dado que cada tecnología requiere de un área específica con características propias. Por otro lado, mediante el valor de inversión necesaria por unidad de potencia (INUP) se minimizan costos y por lo tanto, también su respuesta. La articulación de este método se plantea mediante la hibridación de la meta-heurística PSO y la técnica económica FCD.

2.3. Método FCD y método híbrido PSO+FCD

Aquí se presentan las técnicas y procesos para la implementación de los métodos de valoración económica de un SGD, cada método tiene una estructura básica inicial y un procedimiento, los cuales se adaptan para la aplicación de un PGD.

2.3.1 Método FCD para un SGD

Este método realiza la valoración económica de un SGD con base en la topología, el dimensionamiento del SCR (ver Anexo C), el tipo de tecnología y equipos (ver Anexo D) y los beneficios establecidos en la L1715 (ver Anexo A), junto con los decretos reglamentarios: 2143 de 2015 donde se definen los lineamientos para la aplicación de los incentivos de la L1715 y, 348 de 2017 donde se establecen los lineamientos de política pública en materia de gestión eficiente de la energía y entrega de excedentes de autogeneración a pequeña escala.

La aplicación del FCD permite obtener los flujos netos de efectivo, por los ingresos y egresos de un proyecto para un periodo de tiempo determinado, con los cuales se puede realizar la valoración económica del mismo mediante indicadores económicos que proporcionan una visión clara de la viabilidad de un PGD a partir de FER durante el tiempo de evaluación.

Para la correcta elaboración del FCD orientado a PGD se consideran los siguientes supuestos iniciales:

- La demanda energética a suplir ya está especificada y se determina constante para el tiempo de evaluación del proyecto.
- El incremento de los precios de la electricidad de venta y compra están sujetos al valor del índice de precios al consumidor (IPC) del año 2016.
- Los precios de la compra y venta de electricidad en horas pico y horas valle se consideran iguales.
- El precio de compra de referencia, es el valor del precio de la electricidad para zonas industriales.
- El precio de venta por kWh al comercializador se establece de acuerdo con el precio promedio de los contratos en el mercado (XM, 2017).
- La valoración económica se aborda desde el punto de vista del inversionista privado, y no se tienen en cuenta aspectos de financiación de terceros para el FCD.
- El dimensionamiento del SGD, no tiene en cuenta el tamaño del área de instalación de equipos y/o daños ambientales que este pueda ocasionar.
- Los costos de equipos se consideran fijos, y las FER deterministas.

A continuación, se presentan los modelos a utilizar para la aplicación del FCD:

Modelo para la evaluación de un PGD en el marco de la normativa colombiana.

La L1715 se convierte en el marco de referencia para la evaluación de los PGD. En el presente proyecto se tienen en cuenta los siguientes beneficios que ofrece la Ley: a) deducción anual y durante cinco años, del 50% del total de la inversión en el impuesto a la renta (34%); b) exclusión del pago del Impuesto al Valor Agregado (IVA) (19%) de elementos, equipos y servicios nacionales e importados; c) exención del pago de Derechos Arancelarios (A_0) de importaciones para labores de pre-inversión e inversión; y, d) depreciación acelerada: la tasa no será mayor del veinte por ciento (20%) como tasa global anual.

Los beneficios tributarios establecidos en la ley 1715 se calculan, de acuerdo con (Restrepo-Garcés, Manotas-Duque, & Lozano, 2016):

- Deducción del IVA (DI) a las inversiones (I_0) en renovables.

$$DI = I_0 * IVA \quad (15)$$

- Exención de aranceles de capital fijo o servicios importados (EA_0):

$$EA_0 = C_{KI} * A_0 \quad (16)$$

Donde, C_{KI} es el costo de equipos y servicios importados, y A_0 es la tasa arancelaria.

- Beneficio en t_0 por descuento de la renta (B_R) durante cinco años:

$$B_R = \frac{I_0 + 50\%}{n} \quad (17)$$

Donde I_0 es la inversión inicial del PGD y n es el número de años que el inversionista puede aplicar para este beneficio.

Modelo de generación anual del SGD

Generación fotovoltaica: en la ecuación (2) se presenta la energía producida diariamente por un SFV, el FCD está proyectado en años por lo que la generación debe ser representada en la misma escala de tiempo. La generación fotovoltaica está sujeta al siguiente modelo:

$$GF = (P * HSP * \eta) * 365 \quad (18)$$

Donde P es la potencia nominal, o potencia máxima que entrega el generador en las denominadas condiciones estándar de medida [1.000 W/m² de radiación, una temperatura de 25°C y una masa de aire espectral de 1,5 (AM)], HSP es el número de horas solares pico diarias y, η representa el rendimiento de la instalación fotovoltaica completa.

$$\eta = FPOL * FT * FS * FCCC * FINV * FCCA \quad (19)$$

Donde $FPOL$ es el factor de rendimiento por contaminación ambiental; FT es el factor de rendimiento por incremento de la temperatura; FS es el factor de rendimiento por sombra; $FCCC$ es el factor de rendimiento por pérdidas en conductores de corriente continua; $FINV$ es el factor de rendimiento del inversor y; $FCCA$ es el factor de rendimiento por pérdidas en conductores de corriente alterna.

Generación hidrocínica: el método utilizado para calcular la generación de una turbina hidrocínica que no sobrepasa los 10 kW, es el denominado "método de área de barrido", con el cual se puede calcular la energía anual producida por un generador hidrocínico comercial. Se calcula de acuerdo con:

$$GH = \left(\frac{P}{A}\right) * A * N * \left(\frac{8760 \text{ h/año}}{1000 \text{ w/kW}}\right) \quad (20)$$

Donde P/A es la densidad de potencia en $watt/m^2$ del área de barrido del rotor [ver ecuación (1)], en el sitio y a la altura del eje del generador hidrocínético que se prevé instalar; A es el área de barrido del rotor de la turbina en m^2 ; N es el número de turbinas del sistema.

Por lo tanto, para la generación total del SGD se tiene:

$$GT = GF + GH \quad (21)$$

Modelo de los costos totales de un PGD

Los costos están conformados por el Capital Fijo o inmovilizado (recursos financieros para instalación y montaje de las tecnologías renovables, que pueden ser de origen nacional o importados; conforman la I_0) y, Capital de Trabajo (recursos financieros para funcionamiento y operación durante la vida del proyecto). Hacen parte de la I_0 los gastos previos a la generación, los cuales se pueden estimar con una buena aproximación, después de elaborado el diseño del sistema y el plan de ejecución del proyecto. Un PGD puede incluir los siguientes costos: costos de la organización encargada de la ejecución del proyecto, costos de selección de la tecnología, costos de estudios técnicos (equipos y obras civiles), costos de evaluación de propuestas y adjudicación de contratos, costos de interventoría, costos de suministros e instalación de equipos y construcción de obras de ingeniería (civil, eléctrica, etc.), costos de gestión de aprobación del proyecto, etc. (Restrepo Garcés, 2014).

En el presente proyecto la I_0 incluye todos los costos en que incurre el inversionista para el inicio e implementación del proyecto, éste incluye toda la infraestructura para el montaje tales como: inversores, cableado, estructuras de soporte, reguladores, medidores inteligentes, sistemas de control, tecnologías FER, sistemas de almacenamiento, etc., requeridos para el funcionamiento óptimo del SGD (ver Capítulo 1, Figura 5). Además de la I_0 los costos del sistema incluyen el capital de trabajo, que está representado por: costos de Operación y Mantenimiento (OyM) y, los costos por reemplazo de partes y equipos en el periodo t (Cr).

$$Ct = I_0 + OyM + Cr \quad (22)$$

FCD orientado a un PGD

Las consideraciones que se tienen para cada sección de la estructura se plantean de la siguiente manera:

- Ingresos afectos a impuestos

Los ingresos afectos a impuestos en un PGD están dados por los beneficios de sustitución y beneficios de exportación que se producen por la generación de

electricidad. En este proyecto los beneficios económicos del sistema para un inversionista, están representados en la disminución de la facturación en el periodo t (diario, mensual y anual), resultado de la producción de electricidad del sistema que entra a suplir parte (o el total) de la carga que se demanda del distribuidor del servicio eléctrico y de la posible venta de los excedentes de producción.

Los beneficios de sustitución se asumen como en (Restrepo-Garcés, Manotas-Duque, & Lozano, 2016) donde están representados mediante la siguiente expresión:

$$BS = \text{Min}(GT; Dt) * PC \quad (23)$$

Donde PC , es el precio que paga el autogenerador por kWh al comercializador (CEO, 2017), GT es la generación de electricidad del SGD, y Dt es la demanda total del consumidor.

Los beneficios de exportación se calculan mediante la siguiente expresión empleada en (Restrepo-Garcés, et al, 2016):

$$BE = \text{Max}((GT - Dt) * PE; 0) \quad (24)$$

Donde PE es el precio de venta del kWh al comercializador (XM, 2017), GT , es la generación total del SGD, y Dt es la demanda total del consumidor.

- Egresos afectos a impuestos

Los egresos afectos a impuestos de un PGD están dados por los gastos de operación y mantenimiento de la instalación y los costos por compra de electricidad al comercializador.

Los costos de operación y mantenimiento para la instalación se calculan a través de la siguiente formula, según (Bensebaa, 2010):

$$OyM = (I_0 - Aranceles - GI - MyD) * 0.004 \quad (25)$$

$$I_0 = Cte + MyD + GI + aranceles \quad (26)$$

Donde I_0 , es el costo total de la inversión inicial para el proyecto, Cte es el costo total de los equipos, $Aranceles$ es el impuesto a los equipos y maquinaria de importación, GI gastos y fletes de importación, MyD montaje y dirección de la instalación.

Los costos por compra de electricidad a la red están dados por siguiente expresión:

$$CE = |\text{Min}(((GT + EB - Dt) * PC); 0)| \quad (27)$$

Donde GT , es la generación total del SGD, PC es el precio que paga el autogenerador por kWh al comercializador y EB es la energía almacenada en las baterías.

- Utilidad antes de impuestos

La utilidad antes de impuestos hace referencia a las ganancias del proyecto antes de intereses, impuestos, depreciaciones y amortizaciones. Es decir, se entiende como el beneficio bruto de explotación calculado antes de la deducibilidad de los gastos financieros.

En la utilidad antes de impuesto tenemos dos tipos de beneficios, el primero denominado EBITDA, es un indicador que mide el rendimiento financiero de un proyecto, el cual se determina por la diferencia entre los ingresos y gastos sin incluir los intereses por deuda, los impuestos a las utilidades generadas, las depreciaciones de los activos y las amortizaciones de los intangibles (Sapag Chain & Sapag Chain, 2008); y el segundo es el EBIT que es el beneficio de la empresa antes de tener en cuenta los intereses e impuestos.

En el caso de un PGD el EBITDA se calcula a partir de la fórmula:

$$EBITDA = BS + BE - OyM - CE \quad (28)$$

Donde *BS* y *BE* son los beneficios de sustitución y exportación respectivamente producidos por la generación de electricidad del SGD, *OyM* son los egresos producidos por los costos de operación y mantenimiento de la instalación y *CE* es la compra de electricidad al comercializador.

La fórmula para el EBIT de un PGD es la siguiente:

$$EBIT = EBITDA - Depreciación - Amortización \quad (29)$$

Para los proyectos de generación de electricidad con FER en Colombia la L1715 determina los costos de depreciación.

- Impuesto

El valor del impuesto a la renta de acuerdo con la legislación colombiana se plantea según los datos expuestos por la DIAN, en donde el valor del impuesto para el año 2017 está especificado en 34%.

- Utilidad después de impuestos

La utilidad después de impuesto hace referencia al beneficio del proyecto después de impuestos. Es decir que se entiende como las ganancias netas del proyecto y se calcula a partir de la ecuación:

$$UdT = UaI - Impuesto \quad (30)$$

Donde *UaI* es el *EBIT* calculado anteriormente y el *Impuesto* es el impuesto a la renta definido como el 34% de la *UaI*.

- Flujo de caja libre

Fondos que genera la empresa con su propia explotación económica sin considerar su financiación. El FCD se calcula de la siguiente manera:

+ Utilidad después de impuesto
+ Ajustes por gastos no desembolsables
- Egresos no afectos a impuestos
+ Beneficios no afectos a impuestos
= Flujo de caja

Tabla 7. Calculo del flujo de caja libre

En los ajustes por gastos no desembolsables ingresamos nuevamente la depreciación, en los egresos no afectos a impuestos participan directamente el costo de los activos fijos del proyecto y en los beneficios no afectos a impuestos incluimos el beneficio por descuento a la renta que dicta la L1715.

Con base en el esquema del FCD orientado a un SGD (ver Tabla 7), la topología del sistema conectado a red (ver ítem 1.2.6) y la normatividad colombiana para proyectos de generación eléctrica con fuentes no convencionales de energía (ver ítem 2.3.1), en la Figura 7 se muestra las entradas y salidas al FCD y el proceso de interacción entre las mismas.

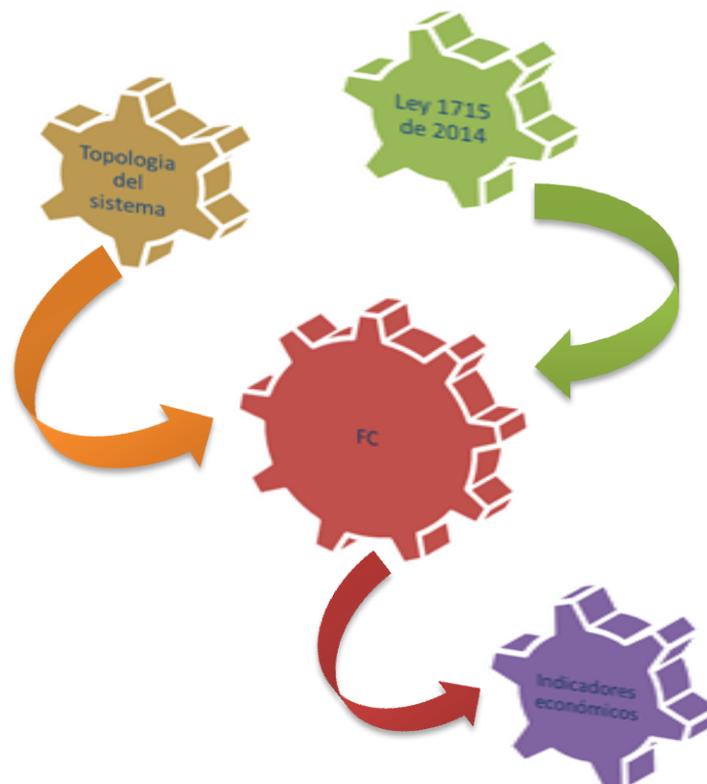


Figura 7. Entradas y salidas del FCD para un SGD.

2.3.2 Método híbrido PSO+FCD

De acuerdo con (Fisher, 1907), el método FCD no permite realizar la valoración económica de un proyecto, el cual considere la incertidumbre asociada a las variables estocásticas y realice la optimización de las mismas, por lo que se hace necesario un método que hibride al FCD con otras técnicas que permitan contrarrestar estas deficiencias.

En este método se realiza la valoración económica de un SGD, optimizando los costos de inversión inicial, mientras se cumple con una demanda de generación específica, por ende, la función objetivo que se elige es económica, además, el propósito principal de este tipo de proyectos desde el punto de vista del inversionista privado, es conseguir la máxima rentabilidad al menor costo posible, es decir, en términos económico-energéticos, generar cierta cantidad de energía eléctrica al mínimo costo posible.

Para la elaboración del MH, además de los supuestos iniciales del FCD, se consideran los siguientes:

- El método puede contemplar N opciones de tecnologías de generación, para este caso se opta por la tecnología fotovoltaica e hidrocinética.
- El funcionamiento del SGD se asume inmerso en el ambiente Smart grid ¹
- El SGD se dimensiona, optimiza y diseña para el funcionamiento en condiciones normales de operación, cualquier anomalía que se pudiese presentar a futuro, está fuera del alcance de este proyecto.
- La variable principal que se genera y tiene en cuenta es la potencia activa.
- Las FER se consideran las únicas variables estocásticas que afectan la generación de energía.

PSO multiobjetivo

En problemas multiobjetivo, se pueden distinguir dos enfoques fundamentales para el diseño de algoritmos PSO. El primer enfoque consiste en algoritmos que consideran cada función objetivo por separado, en estos, cada partícula se evalúa solamente para una función objetivo a la vez. El segundo enfoque consiste en algoritmos que evalúan todas las funciones objetivo para cada partícula basándose en el concepto de optimalidad de Pareto, produciendo las mejores posiciones no dominadas, llamadas líderes, que se utilizan para guiar las partículas (Parsopoulos & Vrahatis, 2008).

¹ Smart Grid se puede definir como un sistema eléctrico que utiliza información, comunicaciones bidireccionales, tecnologías de comunicación ciberseguras e inteligencia computacional de manera integrada en todo el espectro del sistema de energía desde la generación hasta los puntos finales de consumo de electricidad. (Gharavi & Reza, 2011).

En los enfoques mencionados, se debe tratar el problema de mantener las soluciones de Pareto óptimas detectadas. Este problema se puede abordar utilizando un conjunto adicional, denominado registro externo, para el almacenamiento de las soluciones no dominadas descubiertas durante la búsqueda. Un registro externo tiene también tamaño limitado, haciendo inevitable la imposición de reglas relativas a la sustitución de las soluciones existentes por soluciones nuevas.

El esquema general PSO multiobjetivo se puede describir con el siguiente pseudocódigo:

Algoritmo 2. PSO Multiobjetivo
<pre> S ← Inicializar cúmulo, velocidades y mejores posiciones() R ← Inicializar Registro externo() While no se alcance condición de parada do . for ii = 1 to size(S) do . evaluar cada partícula p_i del cúmulo S . if $fitness(p_i)$ es mejor que $fitness(pBest_i)$ then . $pBest_i \leftarrow p_i$; $fitness(pBest_i) \leftarrow fitness(p_i)$. end if . if $fitness(pBest_i)$ es mejor que $fitness(gBest)$ then . $gBest \leftarrow pBest_i$; $fitness(gBest) \leftarrow fitness(pBest_i)$. end if . end for . . for ii = 1 to size(S) do . $v_i \leftarrow W * v_i + c_1 * rand1 * (pBest_i - p_i) + c_2 * rand2 * (gBest_i - p_i)$. $p_{i+1} \leftarrow p_i + v_i$. end for end while Salida: la mejor encontrada </pre>

El diagrama de flujo del algoritmo PSO multiobjetivo se aprecia en la Figura 8:



Figura 8. Diagrama de flujo PSO multiobjetivo.

Sobre los diferentes enfoques para la propuesta de un algoritmo de optimización multiobjetivo basado en enjambres de partículas según (Reyes Sierra & Coello Coello, 2006) se tiene:

- Enfoque de agregación (Considerado en este proyecto)
- Ordenamiento lexicográfico
- Enfoque de sub-población
- Enfoque basado en Pareto

En el presente trabajo se utiliza el enfoque de agregación, debido a que permite la unificación de los objetivos en uno solo de manera simple.

Enfoque de agregación

En esta categoría se considera la combinación de todos los objetivos en uno solo, es decir un problema multiobjetivo pasa a ser un problema con un solo objetivo. Según (Parsopoulos & Vrahatis, 2008), el algoritmo tiene tres funciones de agregación que son: una agregación convencional lineal, una agregación dinámica y por último una agregación por pesos, en todos los casos los autores manejan una topología 'fully connected' donde todos los miembros están conectados entre sí.

Articulación del método PSO con el método FCD

La articulación de la meta-heurística PSO con la técnica económica FCD, realiza la valoración económica para los posibles escenarios que se puedan presentar en la implementación de un SGD bajo ciertas restricciones, además incluye el método Montecarlo para tratar y modelar las variables estocásticas consideradas en este trabajo; el buen manejo y articulación de estas técnicas brindan al método mayor optimalidad, flexibilidad y confiabilidad.

La hibridación consiste en utilizar PSO para buscar las posibles soluciones en el espacio de búsqueda, mientras que FCD se utiliza como la función objetivo, de donde se obtienen los indicadores económicos de todas las posibles soluciones que entrega PSO en cada iteración. Además, los cálculos de generación del sistema son realizados con los datos modelados de las FER, la Figura 9 muestra el esquema de hibridación planteado:



Figura 9. Esquema de hibridación PSO+FCD.

Como se observa en la Figura 9, el proceso consiste en una retroalimentación entre PSO y FCD, el uno depende del otro, pero se puede decir que el FCD es la herramienta con la que PSO se basa para dirigir la trayectoria del enjambre de partículas, mediante el valor de adecuación de las mismas, hasta completar la condición de parada (número iteraciones).

Modelo de optimización para la evaluación de un PGD con el MH

En el supuesto de que el inversionista busca obtener la máxima rentabilidad al menor costo posible, se plantea un modelo que busca maximizar la inversión necesaria por unidad de potencia del PGD [ver ecuación (24)], e incluye las

opciones de: exportar e importar (OEI) energía de la red y, solo de exportar energía a la red (OE). Se consideran como restricciones el número de equipos y la demanda de energía (ésta debe ser, satisfecha parcial o totalmente, depende del escenario propuesto).

$$INUP = \frac{G_T}{C_T} \quad (31)$$

Donde $INUP$ es la inversión necesaria por unidad de potencia, G_T es la generación total del sistema [ver ecuación (21)] y, C_T son los costos totales del PGD [ver ecuación (22)].

El modelo se contempla para un escenario inmerso en un SCR, del mismo dependerá el mínimo de la demanda a suplir, y la maximización del $INUP$. En el caso de (OEI), el modelo de optimización requiere que la sumatoria de la generación total del SGD, sea mayor a la demanda en el periodo valle (Dv); de esta manera, se asegura el cubrimiento de las necesidades energéticas y si se presentan excedentes, estos se venden a la red. En este caso el sistema no cuenta con sistemas de almacenamiento de potencia.

El modelo de optimización (OE), además de lo expuesto, necesita que la generación total [ver ecuación (21)] del PGD sea mayor que la demanda pico (Dp); en este caso se cuenta con un sistema de almacenamiento y los excedentes de energía son vendidos a la red.

Optimización del $INUP$ en (OEI) (32)

$$\begin{aligned} Max &= INUP \\ \text{Sujeto a:} \\ E_1 &\geq 0 \\ E_2 &\geq 0 \\ &\vdots \\ E_n &\geq 0 \\ \sum_{i=1}^n Gt &\geq Dv \end{aligned}$$

Optimización del $INUP$ en (OE) (33)

$$\begin{aligned} Max &= INUP \\ \text{Sujeto a:} \\ E_1 &\geq 0 \\ E_2 &\geq 0 \\ &\vdots \\ E_n &\geq 0 \\ \sum_{i=1}^n Gt &\geq Dp \end{aligned}$$

Donde $INUP$ es la Inversión Necesaria por Unidad de Potencia [ver ecuación (31)], a partir del cual se optimiza la inversión inicial; $E_1 \dots E_n$, representan el número de equipos mínimos que se pueden instalar realmente por cada tecnología que conforma el SGD; Gt es la generación total del sistema, que se obtiene del proceso de simulación-optimización del mismo; y , Dv y Dp son respectivamente la demanda valle y pico total de la empresa.

2.3.3 Algoritmo PSO+FCD

La propuesta de este trabajo se basa en el algoritmo PSO global para codificación continua, esta última es determinada por las características y complejidades del problema a resolver, no obstante, la codificación continua es la más usual en la literatura especializada, pudiendo existir casos en los que se requiere de codificación binaria o permutación de enteros.

El algoritmo PSO+FCD se basa en el dimensionamiento, el valor de inversión inicial y, la aplicación de la L1715, para formar la función objetivo.

Descripción del algoritmo

La partícula está asociada al número de vectores y valores que la componen, por el producto del número de dimensiones, en este caso son consideradas dos tecnologías de generación (fotovoltaica e hidrocínética), es decir, dos dimensiones; acorde a lo expuesto en 2.3.2 y una modificación objetiva del mismo, la partícula del MH se asocia con cuatro valores de aptitud y cuatro vectores bidimensionales, como se enlista a continuación:

- El vector que almacena la posición actual (localización X y Y) de la partícula en el espacio de búsqueda es:

$$p_{i,xy}[*] = ((p_{i1x}, p_{i1y}), (p_{i2x}, p_{i2y}), \dots, (p_{inx}, p_{iny})) \quad (34)$$

- El vector que almacena la posición de la mejor solución encontrada por la partícula hasta el momento es:

$$pBest_{i,xy}[*] = ((pBest_{i1x}, pBest_{i1y}), (pBest_{i2x}, pBest_{i2y}) \dots (pBest_{inx}, pBest_{iny})) \quad (35)$$

- El vector de velocidad que almacena el gradiente (dirección) según el cual se moverá la partícula es:

$$v_{i,xy}[*] = ((v_{i1x}, v_{i1y}), (v_{i2x}, v_{i2y}), \dots, (v_{inx}, v_{iny})) \quad (36)$$

- El vector $fitness_Best_{i,xy}$ almacena los valores de adecuación (INUP, generación) de la mejor solución encontrada por cada partícula hasta el momento es:

$$fitness_{Best_i,xy[*]} = ((INUP_{i1x}, generaci3n_{i1y}), (INUP_{i2x}, generaci3n_{i2y}), \dots, (INUP_{inx}, generaci3n_{iny})) \quad (37)$$

- El valor de fitness $fitness_{p_i,xy}$ almacena los valores de adecuaci3n (INUP, generaci3n) de la soluci3n actual (vector p_i,xy).
- El valor de fitness $fitness_{pgbest1_i,xy}$ almacena la posici3n de la part3cula con mejor adecuaci3n (minimizaci3n de costos) del enjambre actual (vector p_i,xy).
- El valor de fitness $fitness_{pgbest2_i,xy}$ almacena la posici3n de la part3cula con mejor adecuaci3n (generaci3n) del enjambre actual (vector p_i,xy).
- El valor de fitness $imaginary_{pgbest_i,xy}$ almacena una posici3n imaginaria conformada por el mejor valor de ($fitness_{pgbest1_i,xy}$, $fitness_{pgbest2_i,xy}$). Que representan las mejores posiciones encontradas hasta el momento (vector $fitness_{Best_i,xy}$).

Para obtener una mejor idea acerca de la composici3n de una part3cula, a continuaci3n, se ilustra sus vectores y valores por separado.



Figura 10. Vectores asociados a una part3cula



Figura 11. Valores asociados a una part3cula

Si se elige la capacidad de generaci3n e $INUP$, como la salida de la funci3n objetivo econ3mica, el valor de $fitness_{p_i,x}$ ser3 el valor de $INUP$, mientras que el

valor de $fitness_{p_i}$ y será la capacidad de generación de dicha partícula y, el número de paneles y turbinas quedan definidos por los componentes X y Y del vector posición actual $p_{i,xy}$ respectivamente.

En cada iteración para cada partícula que forma parte de la nube, hay que realizar todo el análisis técnico-económico descrito en el ítem 2.3.1 para obtener el $INUP$ y la capacidad de generación por cada partícula, luego el vector $fitness_{pBest_{i,xy}}[*]$ almacena el valor de dichos valores si la adecuación es mejor que las anteriores y el valor $imaginary_gbest_{i,xy}$ ($INUP$ y la capacidad de generación) se compone las mejores dos partículas globales (partículas con mejor adecuación económica y mejor adecuación en la capacidad de generación).

Ahora, si la nube está formada por N partículas, para cada iteración del algoritmo se deben de realizar N análisis o cálculos completos del $INUP$ y capacidad de generación, esto implica el cálculo de la generación, los ingresos recibidos por la venta de energía, el total de facturas ahorradas, la compra de electricidad al comercializador, el cálculo de los diferentes costos de operación y mantenimiento, la inversión necesaria en función del tamaño de la planta y todas estas cantidades referidas a valores actuales. Luego se obtienen los indicadores económicos (adecuación) y se comparan entre sí, para dirigir el enjambre.

Considerando lo anterior, el número de veces que se calcula el modelo para obtener un valor de $INUP$ y generación es el que se obtiene de multiplicar el número de iteraciones por el número de partículas, ($I * N$). Por ejemplo, para la resolución de un problema se tienen 20 partículas y el número de iteraciones es de 50, el número de procesos de cálculo asciende a 1000, bastante inferior a los que se necesitan realizar con un método exacto.

Modificaciones al algoritmo PSO

Básicamente el algoritmo propuesto conserva la misma estructura y lógica de PSO global convencional para modelo completo, exceptuando por la forma como se dirige al enjambre en cuanto a su componente social.

Recordando lo expuesto en el ítem 1.2.4, PSO convencional puede tener un componente cognitivo o social, o ambos siendo este el caso del método híbrido, esto significa que la modificación de la velocidad de las partículas y por ende su desplazamiento dependen de estos componentes; la modificación al algoritmo se realiza en el componente social, puesto que en PSO convencional la partícula con mejor adecuación al objetivo, es la encargada de dirigir al enjambre.

Por otro lado, para el método híbrido se tienen dos objetivos primordiales la capacidad de generación y la minimización de costos, esto infiere la presencia de dos partículas con la mejor adecuación para cada objetivo respectivamente, es decir, la partícula $X1$ es la que mejor se adecua a la capacidad de generación, y análogamente la partícula $X2$ es la que mejor se adecua a la minimización de costos, por lo tanto, se hace necesario un criterio que permita seleccionar una partícula única para dirigir al enjambre.

Por lo anterior, con base en literatura científica (ver ítem 2.3.2, sección ‘Enfoque de agregación’) se agrega temporalmente una nueva partícula invisible que extrae las características de las dos mejores partículas (X_1 y X_2) y las pondera, con igual porcentaje de peso (ver Ecuación (8)), formando así una partícula única que dirija al enjambre, el procedimiento se esboza a continuación:

$$pgbest1_{i,xy} = \max(fitness_{Best_i,xy}(INUP_{ix})) \quad (38)$$

$$pgbest2_{i,xy} = \max(fitness_{Best_i,xy}(Generacion_{iy})) \quad (39)$$

$$imaginay_pgbest_{i,xy} = (0.5 * pgbest1_{i,xy} + 0.5 * pgbest2_{i,xy}) \quad (40)$$

En la ecuación (40), las características de $pgbest1$ y $pgbest2$ son las que la componen, sin embargo, cabe resaltar que el tamaño del enjambre no se modifica en ningún sentido, porque, como se mencionó anteriormente, esta es una partícula imaginaria temporal, la cual evoluciona iterativamente a medida que mejora el valor de adecuación de $pgbest1$ y $pgbest2$, pero esta partícula jamás se evalúa en la función objetivo, por lo tanto, no se contempla como una potencial solución, es decir, esta partícula no afecta el tamaño del enjambre real. Las ecuaciones (38) y (39) van coincidiendo hasta un valor muy cercano, pero no igual, por lo que, la mejor solución real para el algoritmo PSO puede ser cualquiera de las dos.

Funcionamiento del algoritmo híbrido

La descripción detallada del proceso algorítmico en general es la siguiente:

- 1) En un rango establecido, se inicializan aleatoriamente las componentes X y Y , es decir el número de paneles y turbinas para cada partícula; y se asigna cero al vector de velocidad y al vector de adecuación.
- 2) Se toman los valores de radiación solar y velocidad del flujo de agua modelados mediante la simulación de Montecarlo del software @RISK.
- 3) Con los anteriores valores se inicia el proceso iterativo y se establece como condición de parada el número de iteraciones.
- 4) Se establece la restricción para que la posición de los componentes (X y Y) no sean negativos, puesto que, no es lógico que un SGD tenga un número negativo de paneles o turbinas.
- 5) Para cada iteración se evalúa la aptitud de las N partículas, es decir, se calcula el $INUP$ y la capacidad de generación. Para ello, se utiliza la función objetivo ‘FCD’ y los valores asociados para realizar los cálculos.
- 6) Para cada partícula, se actualizan el valor temporal de $fitness_{p_i,xy}$ ($INUP$, capacidad generación) obtenido en el punto anterior y se compara con el

valor del vector de adecuación $fitness_pBest_{i,xy}$, si es mejor, se actualiza el valor de $p_{i,xy}[*]$ en el vector $pBest_{i,xy}[*]$, y el valor de $fitness_{p_{i,xy}}$ en el vector $fitness_pBest_{i,xy}$. Este es el mejor resultado obtenido hasta el momento para la partícula xi .

- 7) Del vector de adecuación $fitness_pBest_{i,xy}[*]$ se busca la partícula que mejor *INUP* presente y la partícula que mejor generación tenga, y se actualizan en los valores de $gBest_1$ y $gBest_2$ respectivamente. Estos son los mejores resultados de adecuación alcanzados por todas las partículas del enjambre hasta el momento.
- 8) A los valores de $pgBest1_{i,xy}$ y $pgBest2_{i,xy}$ se les extrae el 50% de su potencial solución (X y Y) y se conforma el $imaginary_gbest_{i,xy}$ de acuerdo con la ecuación (40). Esta es la partícula imaginaria que dirige al enjambre en lo que respecta al componente social.
- 9) Se hace el ajuste inercial de acuerdo con la ecuación (11) y se generan las nuevas velocidades de las partículas de acuerdo con la ecuación (10).
- 10) Se actualizan las nuevas posiciones de las partículas de acuerdo con la ecuación (9).
- 11) Se grafica el número de paneles y turbinas correspondientes a la posición de cada partícula del enjambre por iteración.
- 12) Con las nuevas posiciones (potenciales soluciones), se reinicia el proceso iterativo desde el punto cuatro hasta completar la condición de parada (número iteraciones).

Definición de las entradas y salidas del algoritmo

El punto de partida de cualquier simulación es establecer los datos de entrada del algoritmo. La correcta definición y tratamiento de estos, conlleva a obtener respuestas deseadas dentro de lo estipulado cuando se generó el algoritmo, dichos datos son:

➤ **Datos de entrada:**

- Datos para el análisis económico
 - Precios de equipos, mano de obra y mantenimiento
 - Precios de comercialización de la energía
 - Horizonte de evaluación e impuestos
- Datos para generación, dimensionamiento, y topología del sistema
 - Demanda de potencia
 - Datos de predicción de las FER

- Características de equipos para generación solar e hidrocinética
- Datos para inicializar el algoritmo PSO
 - Tamaño del enjambre
 - Número de iteraciones
 - Factor de ponderación
 - Factor máximo y mínimo de inercia

➤ **Datos de salida del algoritmo:**

- Topología y dimensionamiento del sistema
- Generación total del sistema
- Costos totales del sistema e Indicadores económicos

Con base en la teoría de PSO multiobjetivo (ver ítem 1.2.3) y el anterior pseudocódigo general de PSO multiobjetivo (ver ítem 2.3.3), en la Figura 12 se propone el pseudocódigo a emplear en el presente trabajo.

Pseudocódigo del algoritmo híbrido

<pre> Algoritmo 1. PSO+FCD Global completo Swarm ← Inicializar enjambre() R ← Inicializar Registro externo() while no se alcance la condición de parada do for ii = 1 to size(Swarm) do if $p_{i,xy}[*] \leq 0$ then $p_{i,xy}[*] \leftarrow 0$ end if end for Evaluar cada partícula $p_{i,xy}$ del enjambre (Swarm) en la función 'objetivo' FCD for ii = 1 to size(Swarm) do if $fitness_{p_{i,xy}}$ es mejor que $fitness_{pBest_{i,xy}}$ then $pBest_{i,xy}[*] \leftarrow p_{i,xy}$ $fitness_{pBest_{i,xy}} \leftarrow fitness_{p_{i,xy}}$ end if $fitness_{pgbest1_{i,xy}} \leftarrow$ máximo valor de $fitness_{Best_{i,x}}$ (costos) $fitness_{pgbest2_{i,xy}} \leftarrow$ máximo valor de $fitness_{Best_{i,y}}$ (generación) $imaginary_{pgbest_{i,xy}} \leftarrow 0.5 * fitness_{pgbest1_{i,xy}} + 0.5 * fitness_{pgbest2_{i,xy}}$ end for for ii = 1 to size(Swarm) do $v_{i,xy} \leftarrow W * v_{i,xy} + c_1 * rand1 * (pBest_{i,xy}[*] - p_{i,xy}) + c_2 * rand2 * (imaginary_{pgbest_{i,xy}} - p_{i,xy})$ $p_{i+1,xy} \leftarrow p_{i,xy} + v_{i,xy}$ end for end while Salida: la mejor encontrada </pre>
--

Figura 12. Pseudocódigo del algoritmo híbrido.

Con base en la teoría de PSO multiobjetivo (ver ítem 1.2.3) y el diagrama de flujo de PSO convencional (ver ítem 1.2.4), en la Figura 13 se propone el diagrama de flujo para PSO multiobjetivo a utilizar en el presente trabajo.

Diagrama de flujo PSO+ FCD

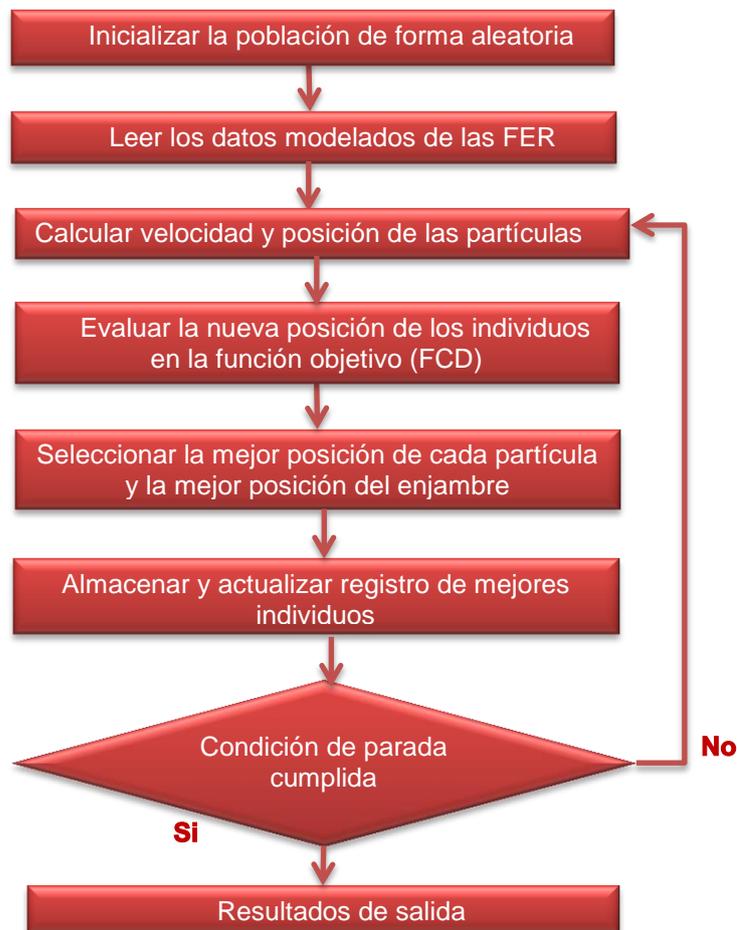


Figura 13. Diagrama de flujo PSO+FC

2.4 Evaluación de los métodos

Para determinar la viabilidad y rentabilidad económica del SGD y, el método que mejor se desempeña en la evaluación de la misma, se realiza: 1) Comparación económica, la cual consta en comparar de forma directa los resultados obtenidos por los métodos en la aplicación del caso de estudio (indicadores económicos), para determinar la viabilidad de inversión; 2) Comparación de desempeño, la cual consta en comparar las características cualitativas y cuantitativas de los métodos mediante análisis multicriterio y la

técnica AHP, que según (Blackwood & Kurka, 2013) es el más utilizado en el sector eléctrico y el único que trabaja con un proceso de participación específico para determinar el peso de los criterios.

2.4.1 Comparación de métodos mediante indicadores económicos

Acorde con la revisión de la literatura del ítem 1.2.5, los indicadores económicos utilizados con mayor frecuencia para medir y evaluar adecuadamente los proyectos de inversión son: VPN, TIR, IR, CNE y PRI, indicadores definidos como las salidas del FCD en este trabajo.

2.4.2 Comparación de métodos mediante Análisis multicriterio

Los multicriterio son una disciplina activa desde los sesentas, que emergió a partir de la necesidad de formalizar los métodos para la toma de decisiones con múltiples criterios o atributos de tipo cuantitativo y/o cualitativo, que permiten ponderar el riesgo y, en virtud de ellos, son capaces de elegir la “decisión” que, en el mejor de los casos, resulta ser la más satisfactoria, y en el peor, la menos insatisfactoria (Berumen & Llamazares, 2007).

La planeación en el sector de la energía, usando análisis multicriterio, ha llamado la atención de los decisores a lo largo del tiempo; estos métodos pueden proveer soluciones a problemas complejos de la gestión de la energía. Según (Tiberu, Joseph, & Blanco, 2011), los multicriterio proporcionan un soporte científico a la toma de decisiones, que es capaz de justificar claramente el rango de las alternativas en el sector de las energías renovables.

En general los estudios que aplican Multi-atributo, presentan cuatro etapas: 1) Jerarquizar el problema en criterios y alternativas, 2) definir el valor y pesos de los criterios, 3) aplicar el valor de los juicios y, 4) calcular el ranking final y tomar la decisión.

Proceso Analítico Jerárquico (AHP)

El método AHP es una técnica poderosa y flexible, desarrollada por Thomas L. Saaty, que permite de manera subjetiva y objetiva, tratar factores que son considerados en los procesos de toma de decisiones. Este método supone la creación de un árbol de jerarquías, en el que todos los criterios y sub-criterios, se presentan de acuerdo con su importancia. La evaluación de los criterios de los pesos y, la puntuación de los tipos de tecnologías de generación en contra de los criterios, pueden ser objetivas si existen datos verdaderos, o subjetivas por las comparaciones por pares cuando no hay datos o, cuando estos datos no expresan la intuición de alguien.

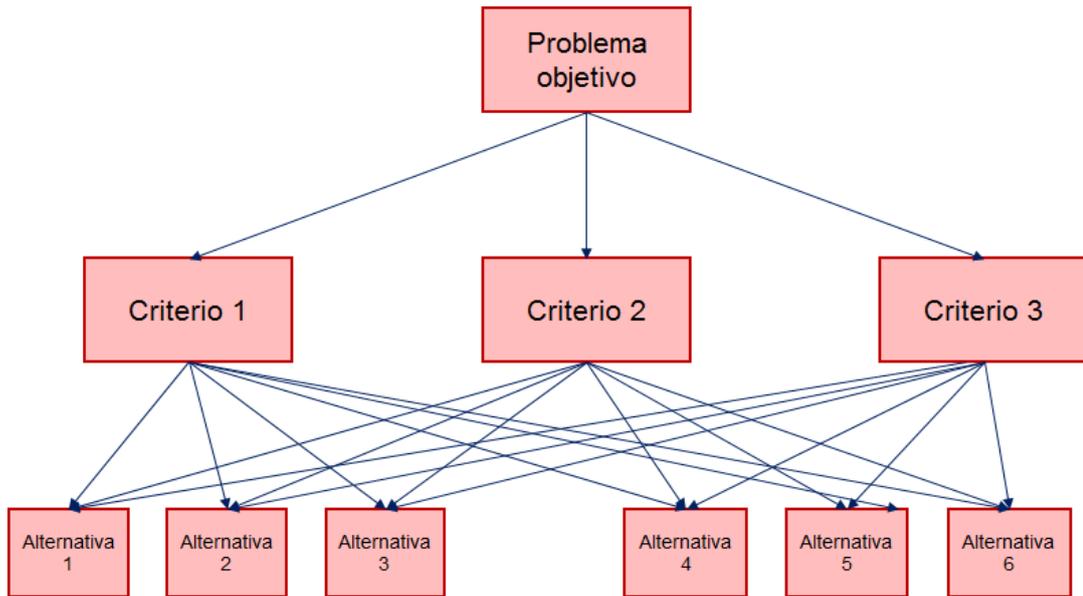


Figura 14. Estructura jerárquica para la planeación de proyectos FER.

La característica principal del AHP, es la jerarquización del problema. En la parte superior del árbol (ver Figura 14) se encuentra el problema objetivo a resolver, en el nivel intermedio se representan los criterios y sub-criterios, con base en los cuales se toma la decisión y, en la base se encuentran las alternativas a evaluar. La segunda característica, es la comparación por pares, que se realiza en cada nivel del árbol de jerarquías, con base en el nivel de contribución de cada criterio, sobre el nivel superior al cual está vinculado. Los resultados de este proceso son los ratios de importancia (si se comparan criterios) y, los ratios de preferencia (si se comparan alternativas). Una vez evaluada la contribución de cada criterio, de acuerdo con los niveles del árbol de jerarquías, se calcula la contribución global de cada alternativa al objetivo principal o meta, mediante una operación de tipo aditivo.

Metodología AHP para la comparación de los métodos

Con base en el anterior procedimiento del método AHP (ver Figura 14), para realizar la comparación del desempeño de dos o más métodos, en la Figura 15 se propone la metodología a emplear para la comparación de los métodos planteados (MH y FCD) en el presente trabajo y a continuación se explican sus etapas:

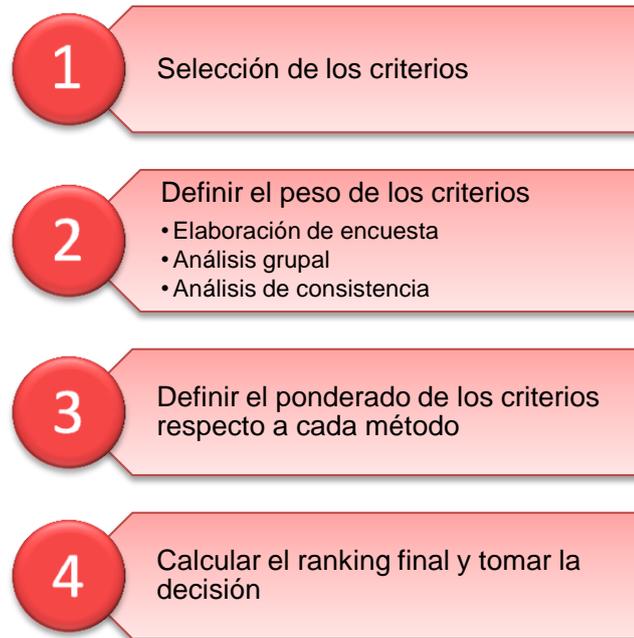


Figura 15. Metodología AHP.

1) Selección de los criterios

Para la selección de los criterios de comparación entre el FCD y MH se realiza una búsqueda en la literatura para definir el conjunto de características que permitan comparar el desempeño de los métodos. La revisión literaria se enfoca en trabajos que comparan diferentes métodos con el mismo objetivo.

2) Definir el peso de los criterios

El proceso para definir los pesos de los criterios, se divide en tres etapas:

a) Elaboración de encuesta: se realiza una encuesta a un grupo de ocho profesionales con experiencia en el desarrollo de proyectos de I+D, con el fin de obtener los juicios sobre los pesos de los criterios. Por cada profesional se obtiene una matriz de comparación por pares. (ver Anexo F, F.2)

b) Análisis grupal: una vez definida la matriz de cada evaluador, se requiere definir una solución única que represente las posiciones del grupo. Para ello se aplica la media geométrica y se normaliza la matriz para obtener el vector de pesos de los criterios. (ver Anexo F, F.1)

c) Análisis de consistencia: una vez calculada la matriz de grupo y el vector de pesos, se requiere que las comparaciones por pares de la matriz grupal arrojen resultados adecuados, para esto se debe medir la consistencia de los juicios emitidos (ver Anexo F, F.1).

3) Definir el ponderado de los criterios respecto a cada método

Para obtener el valor de ponderación de las alternativas respecto a cada criterio de comparación, se realiza un análisis subjetivo de los criterios de

comparación en cada uno de los métodos, y luego se aplica el juicio basado en la escala de Saaty. (ver tabla Matriz de alternativas, hoja Alternativas y criterios, Anexo AHP, carpeta digital)

4) Calcular el ranking final y tomar la decisión:

Una vez se obtiene los ponderados de las alternativas de cada criterio, se realiza la multiplicación vectorial entre el ponderado de cada alternativa y el vector de peso de los criterios para obtener el vector de ranking final de las alternativas. (ver tabla Matriz de ranking, hoja Alternativas y criterios, Anexo AHP, carpeta digital)

2.5 Conclusiones de capítulo

- La metodología propuesta permite comparar alternativas de inversión en renovables enmarcadas en los mecanismos de apoyo propuestos en la L1715, para que los administradores de los proyectos de auto-generación, analicen la conveniencia de utilizar diferentes estrategias y, los efectos de cada una sobre sus inversiones.
- La valoración económica de un SGD determina el porcentaje de viabilidad y rentabilidad de inversión del proyecto, a partir de la cual el inversionista toma la decisión de aplicar o no capital, esta metodología articula un híbrido entre PSO y FCD con la finalidad de minimizar los costos totales del proyecto, realizando una optimización del número de elementos a utilizar de cada tecnología que conforma el sistema.
- Para realizar la valoración económica de un SGD mediante un método híbrido, se requieren el uso de técnicas y/o métodos adecuados dentro del contexto en que van a ejercer sus operaciones, las cuales permiten realizar el tratamiento y modelación de las FER, el cálculo del FCD y, la minimización de costos de inversión.
- El FCD según (Fisher, 1907) es un método de valoración económica con una vigencia de más de cien años, que no permite realizar la valoración económica de un proyecto, el cual considere la incertidumbre asociada a las variables estocásticas y realice la optimización de las mismas, por lo que se hace necesario un método que hibride al FCD con otras técnicas que permitan contrarrestar estas deficiencias.
- La metodología AHP (ver Figura 15), permite obtener una calificación tentativa del desempeño de los métodos planteados, para compararlos y poder tomar la decisión más favorable basado en los criterios de comparación.

Capítulo 3

Aplicación y análisis de resultados

A continuación, se presenta la aplicación de los métodos expuestos (ver unidad 2) a un caso de estudio del sector industrial, que se supone se emplaza en la ciudad de Popayán. Se realiza una breve descripción de los escenarios propuestos para el caso de estudio, se presenta la modelación estocástica de las FER, se aplican los métodos de valoración y, se realiza la comparación económica de los escenarios mediante los indicadores económicos y la comparación de desempeño de los métodos mediante el análisis multicriterio.

Este capítulo se estructura de la siguiente manera: 1) se describe el caso de estudio y los escenarios propuestos, 2) se presenta el comportamiento de las variables estocásticas modeladas, 3) se aplican los métodos FCD y MH al caso de estudio, 4) se analizan los resultados y, 5) se presentan las conclusiones del capítulo.

3.1. Caso de estudio

La metodología se aplica a una empresa del sector terciario 'Tumaco Fish', la cual se supone emplazada en el sitio 'ciudadela valle del ortigal' de la ciudad de Popayán, Cauca. Esta empresa fundada en el año 2012 se dedica a la producción y comercialización de larvas, al cultivo y comercialización de camarón en cautiverio, al suministro de insumos acuícolas, inocuos sustentables y rentables, en armonía con el medio ambiente, asesoría y asistencia técnica.

La empresa opera en cuatro centros de costo: 1) Laboratorio de larvicultura, 2) Piscinas de cría y engorde de camarones con sistema extensivo, 3) Piscinas de cría y engorde de camarones en sistema supe intensivo con recirculación y biofloc y, 4) Planta de procesos (capacidad de producción 20 TON/día)

La ciudadela valle del ortigal, lugar hipotético de ubicación de la empresa, cuenta con una radiación solar que oscila entre los 3.77 y 4.47 HSP, además cuenta con un área total de 310.000 m², de la cual 171.344 m², son utilizados para edificaciones residenciales y posee una superficie disponible plana de alrededor de 110.000 m² (Curaduria urbana, 2013), suficientes para la instalación de un parque fotovoltaico. Por otro parte, este sitio es atravesado de occidente a oriente por el río Cauca, el cual presenta una velocidad oscilante entre 2.38 y 4.73 m/s, los cuales son propicios para la instalación de una matriz de turbinas hidrocínéticas.

A continuación, se presenta la información del lugar de emplazamiento (ver Tabla 8) y de las variables de interés del proyecto.

Características de emplazamiento	Valor
Coordenadas	2°27'50' N; 76°36'01' W
Altitud	1760 msnm
Velocidad promedio multianual del río Cauca	3.3 m/s
Radiación solar promedio incidente	4.03 HSP
Temperatura	14-19 °C
Humedad	77.75%

Tabla 8. Condiciones ambientales de emplazamiento.

VARIABLES DE INTERÉS DEL PROYECTO

- **Demanda:** ésta se define a partir de los datos suministrados por la prestadora del servicio de energía a la empresa caso de estudio (CEDENAR, 2015). En la Figura 16 se relaciona la serie de históricos de la demanda mensual correspondiente al año 2015, se visualiza el comportamiento de ésta, el valor máximo se registra en el mes de Junio con 83.125,500 kW/h, el valor mínimo se registra en el mes de febrero con 54.169,130 kW/h y el valor promedio 63.975,327 kW/h.

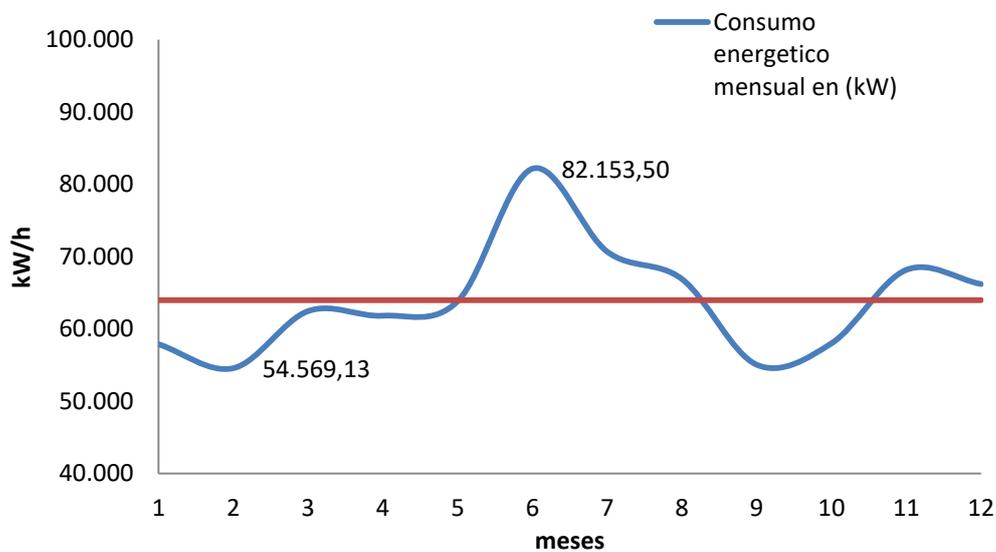


Figura 16. Consumo total mensual de la empresa en el año 2015.

- **Radiación solar:** Para calcular la energía producida por un SFV o modelar su evolución temporal, es necesario contar con información sobre la radiación incidente en el plano de su generador. Cuando se debe predecir la energía producida por el sistema en un tiempo futuro, el problema a resolver consiste en estimar la irradiación que recibirá a partir de la información disponible sobre el comportamiento de la radiación en la ubicación del SFV (Perpiñan Lamigueiro, 2015) y (Morán, Facchini, Pontoriero, & Doña, 2009).

	Radiación anual promedio									
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Enero	4,66	3,57	3,31	4,49	3,96	3,58	4,19	4,19	4,68	4,34
Febrero	5,27	3,62	3,77	4,00	3,36	3,56	3,60	3,76	5,46	4,22
Marzo	3,88	4,01	3,76	4,44	3,97	3,75	3,93	3,90	3,95	4,00
Abril	3,91	3,84	3,98	3,54	3,65	3,71	4,17	4,22	4,31	3,89
Mayo	3,67	3,67	4,13	3,93	3,80	3,71	3,46	3,81	4,11	3,86
Junio	4,07	3,83	3,86	3,54	3,74	4,44	4,14	4,24	4,37	4,08
Julio	4,74	3,87	4,92	3,62	4,13	4,29	4,16	4,65	4,44	4,18
Agosto	4,02	3,91	4,06	3,97	4,54	4,00	4,04	4,60	4,65	4,29
Septiembre	4,19	4,27	4,82	3,87	3,94	4,67	3,97	4,47	4,92	4,18
Octubre	3,73	3,84	4,51	3,64	4,29	4,02	4,31	4,05	4,16	3,96
Noviembre	3,81	3,59	4,05	3,18	4,12	3,88	3,80	3,91	3,78	3,88
Diciembre	3,06	3,52	3,90	2,99	3,42	4,04	4,00	4,13	4,84	3,57

Tabla 9. Promedio mensual de HSP (Facultad Ing. Civil Universidad del Cauca)

La ciudad de Popayán tiene una radiación solar oscilante entre 3.5 y 4.5 HSP. En la Tabla 9 se pueden ver los promedios mensuales de un histórico de datos tomados de la estación ubicada en la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad del Cauca, para un periodo de 10 años comprendido entre el año 2007 y el año 2016. De acuerdo con los datos, los valores de HSP son propicios para el aprovechamiento energético de un SFV.

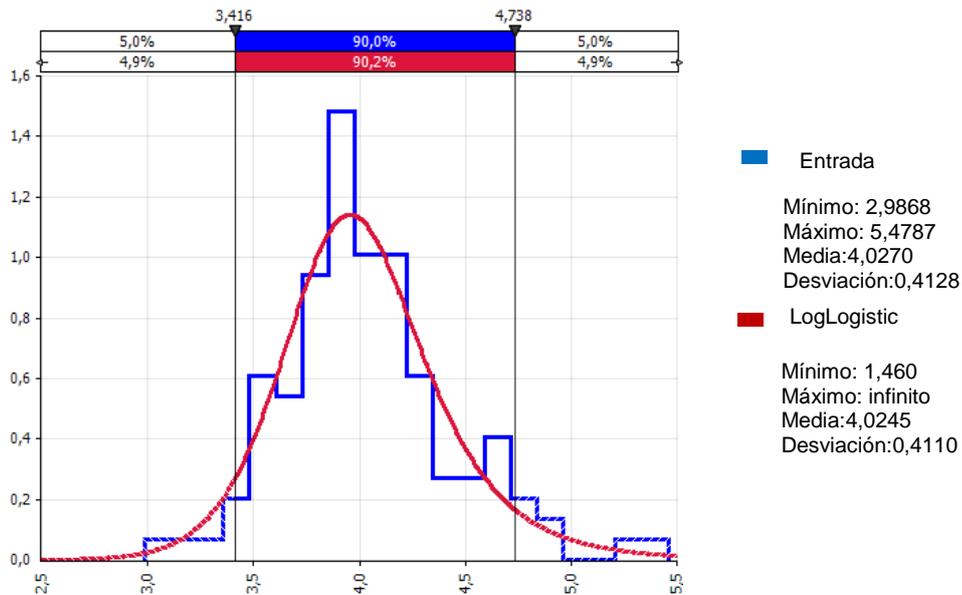


Figura 17. Distribución del modelado de los datos de radiación solar

El tratamiento de los datos de la Tabla 9, permite obtener un modelo que simula el comportamiento de las HSP en la ciudad de Popayán, en este caso la distribución que mejor describe el comportamiento de la radiación es la distribución LogLogistic, con una probabilidad del 90.2% de que los datos modelados se encuentren en el intervalo [3.416, 4.738] como se aprecia en la Figura 17.

El comportamiento de la distribución LogLogistic es similar al de la distribución Normal [ver ítem 2.1, ecuación (12)], por lo que, para efecto de facilitar los cálculos de los parámetros de ajuste, en este trabajo se resuelve utilizar la distribución Normal para la modelación de la radiación solar.

- Velocidad del agua: En la Tabla 10 se encuentran los datos históricos de la velocidad del río Cauca, tomados de la estación ubicada en la vereda Julumito de Popayán, en funcionamiento hasta el año 2006, a partir de esta serie de datos se modela la distribución que mejor se ajusta a los parámetros de la variable estocástica.

Velocidad anual promedio										
	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Enero	6,24	1,50	5,36	7,94	2,30	1,80	0,84	3,33	3,17	3,93
Febrero	4,01	1,93	6,51	4,80	1,95	1,30	1,02	1,11	4,06	2,42
Marzo	2,88	1,81	4,53	4,05	1,95	1,87	2,72	1,33	2,70	4,11
Abril	2,19	2,28	4,01	2,19	2,08	3,84	3,38	2,34	3,81	5,67
Mayo	3,48	3,16	4,15	3,79	2,16	3,50	4,51	3,13	2,85	4,57
Junio	3,09	5,47	3,60	3,02	4,35	5,49	3,16	4,66	3,31	5,28
Julio	5,61	4,15	3,30	4,15	2,32	4,47	4,89	3,39	2,35	4,80
Agosto	2,06	3,03	3,71	4,15	3,65	4,53	2,86	4,11	2,99	3,34
Septiembre	1,24	2,34	3,18	4,15	1,93	1,88	1,77	2,28	3,18	2,40
Octubre	1,77	2,84	3,25	4,15	1,45	1,78	2,74	2,98	4,23	2,67
Noviembre	2,29	5,02	6,66	4,15	1,77	2,13	2,07	5,31	5,36	4,41
Diciembre	2,22	4,06	8,52	3,24	2,64	2,59	2,73	3,92	6,83	4,50

Tabla 10. Promedios mensuales velocidad del agua (Estación de Julumito)

La velocidad del río Cauca presenta valores altos para la instalación de turbinas hidrocinéticas dentro de su cauce.

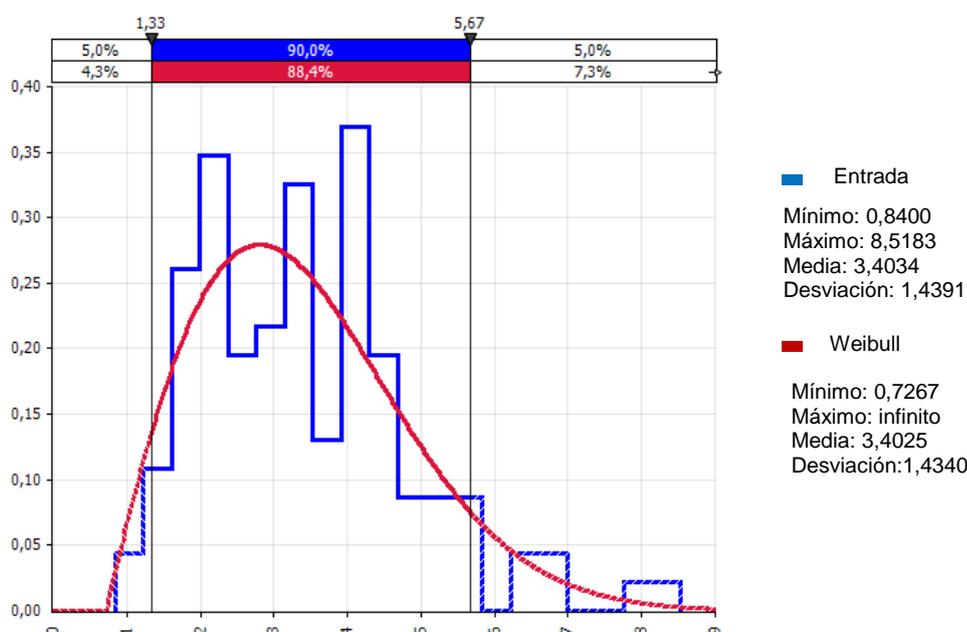


Figura 18. Distribución de Weibull del modelado de los datos de velocidad.

La modelación de la serie de datos cronológicos de las velocidades del río Cauca arroja como resultado la distribución de Weibull [ver ítem 2.1, ecuación (13)], con una probabilidad del 88.4% de que los datos modelados se encuentren en el intervalo [1.33, 5.67] como se observa en la Figura 18.

El diseño y aplicación del modelo económico se realiza en el marco de la normatividad tarifaria y la L1715, la cual busca promover el desarrollo y la utilización de las fuentes no convencionales de energía, principalmente aquellas de carácter renovable, en el sistema energético nacional, mediante su integración al mercado eléctrico.

Escenarios propuestos

En la aplicación del caso de estudio se plantean los siguientes escenarios:

Escenario 1, sistema híbrido conectado a la red sin L1715: en este escenario se trabaja la minimización en la inversión de costos iniciales para un SGD híbrido conectado a la red, esta última sirve de respaldo para suplir la demanda de potencia en horas pico donde el consumo puede sobrepasar la generación del sistema, y a su vez la red también sirve como receptor o comprador de los excedentes de energía que en horas valle pudiesen existir por parte del SGD, todo esto en el ambiente de las Smart grid; en este escenario no se tiene en cuenta la L1715.

Escenario 2, sistema híbrido conectado a la red con L1715: en este escenario se contemplan las mismas condiciones técnicas y de diseño que en el anterior escenario, pero, aquí se tiene en cuenta los beneficios tributarios de la L1715, la cual está disponible en el Anexo B.

Escenario 3, sistema híbrido conectado a la red con capacidad de almacenamiento sin L1715: en este escenario se trabaja la minimización en la inversión de costos iniciales y el diseño técnico para un sistema autogenerador que sea capaz de suplir con fiabilidad y consistencia la demanda energética del caso de estudio durante el día y la noche, además el sistema está conectado a la red con el fin de respaldar cualquier anomalía inesperada que pudiese afectar el almacenamiento o generación de energía; en este escenario no se contemplan los beneficios tributarios de la L1715.

Escenario 4, sistema híbrido conectado a la red con capacidad de almacenamiento y L1715: en este escenario se contemplan las mismas condiciones técnicas y de diseño que en el anterior escenario, pero, aquí se tiene en cuenta los beneficios tributarios que contempla la L1715.

Conforme a lo anterior y con el fin de esclarecer las diferencias técnicas y económicas que se presentan entre escenarios, a continuación, se realiza una explicación de estas y en la Tabla 11 se resumen:

- Diferencias técnicas: en los dos primeros escenarios se plantea suplir la demanda promedio anual de energía, pero debido a que el comportamiento de la misma es variable (ver Figura 19) en algunos casos no se logra cubrir el 100% de ésta, se supone que el faltante es suministrado por el comercializador. Así entonces se tiene que en las horas de menor consumo (horas Valle) el SGD genera excedentes de energía los cuales son exportados al comercializador; si en las horas de mayor consumo (horas pico) el SGD no supe por completo la demanda de energía, se hace necesario importar el faltante de energía al comercializador para satisfacer el consumo.

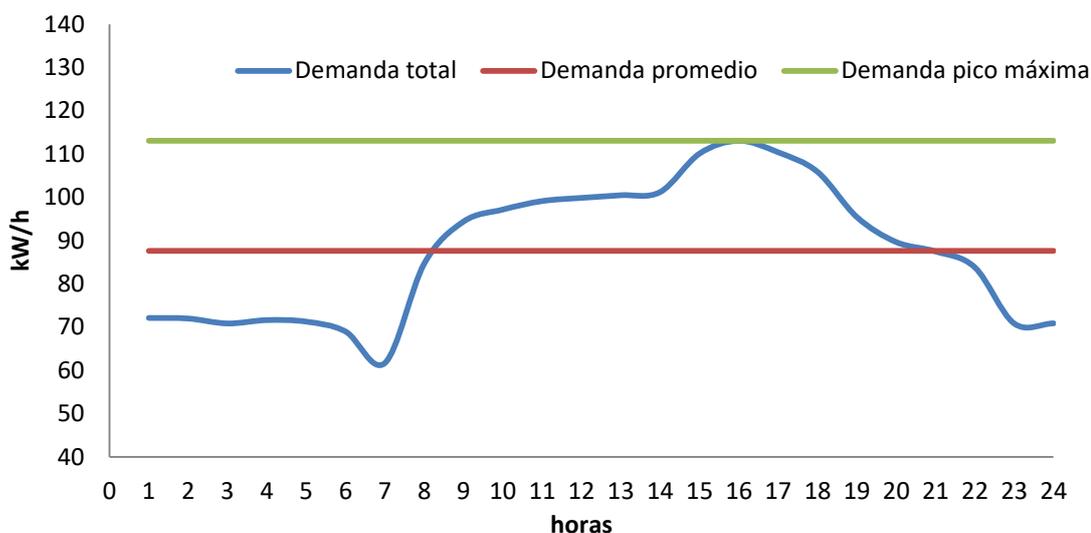


Figura 19. Consumo diario total, promedio y pico máximo de la empresa en el año 2015.

Por otro lado, en los dos últimos escenarios se plantea suplir la demanda total (día y noche), tomando como referencia el pico máximo de demanda anual. Esto es posible mediante el uso de baterías, es decir, los excedentes de energía que se producen en el día: se almacenan en las baterías para satisfacer la demanda nocturna o se exportan al comercializador, garantizando la cobertura total del sistema. La Figura 19, plantea dichos comportamientos.

- Diferencias económicas: consiste en la aplicación o no de la L1715, en los escenarios dos y cuatro se aplican estos beneficios.

Escenarios	L1715	Sistema de almacenamiento	Demanda atendida	Conectado a la red
Escenario 1	No	No	Anual promedio	Si
Escenario 2	Si	No	Anual promedio	Si
Escenario 3	No	Si	Pico anual	Si
Escenario 4	Si	Si	Pico anual	Si

Tabla 11. Tabla resumen diferencias de los escenarios.

3.2. Modelación de las FER

El software '@RISK' con simulación de 'Monte Carlo', permite un tratamiento estadísticamente confiable de variables estocásticas, éste computa y controla matemática y objetivamente gran número de futuros escenarios posibles, y luego indica las probabilidades y riesgos asociados con cada uno. En el presente trabajo esta herramienta se utiliza para analizar, seleccionar y simular la función de distribución y los parámetros que mejor se ajustan al comportamiento de las series de tiempo (radiación solar y velocidad del agua).

3.2.1 Radiación solar

Acorde al tratamiento de las series de tiempo de la radiación solar (ver Figura 17) y la velocidad del agua (ver Figura 18), se obtiene la distribución específica para cada tipo de variable, y se modela el comportamiento de las series para el horizonte de evaluación del proyecto, los resultados obtenidos se presentan a continuación:

Radiación solar de la ciudad de Popayán anual modelada										
	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
Promedio	4,03	4,03	3,96	4,14	4,30	3,77	4,15	3,96	4,07	3,90

Tabla 12. Radiación solar promedio modelada con la distribución normal.

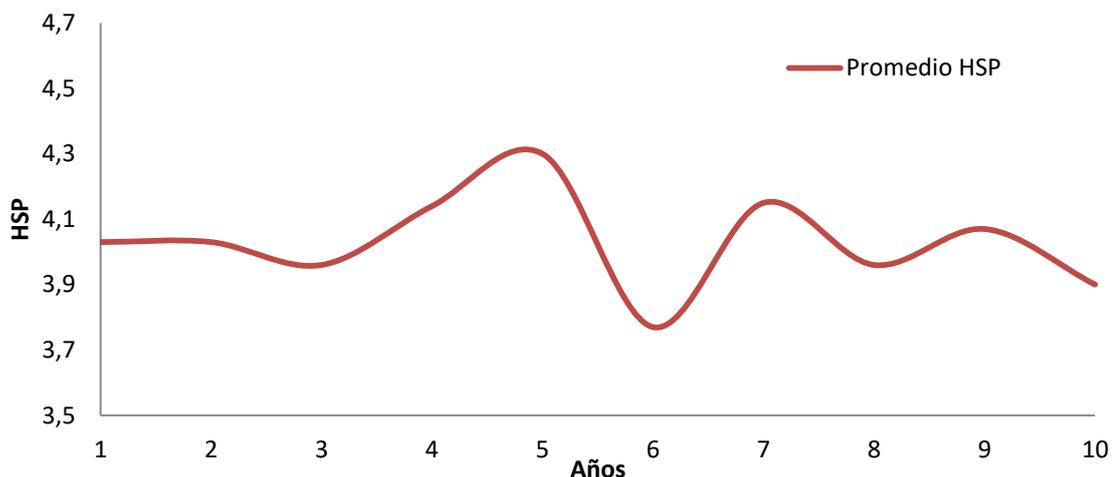


Figura 20. HSP modelada en el periodo de evaluación del proyecto.

En la Tabla 12, se visualizan los datos de la radiación solar modelados mediante la distribución Normal y su comportamiento se ilustran en la Figura 20, el cálculo de los parámetros de la media (μ) y la desviación estándar (σ) de la distribución se obtienen de la simulación de Montecarlo; el tratamiento y la

modelación estocástica de la radiación solar, permite obtener valores más cercanos a los reales del comportamiento de la misma.

3.2.2 Velocidad del flujo

Con base en el tratamiento de los datos de la velocidad del agua, se obtiene la distribución específica para esta variable estocástica, lo que permite modelar el comportamiento de la misma para el horizonte de evaluación del proyecto, los resultados obtenidos se presentan en Tabla 13:

Velocidad del flujo de agua del río Cauca en la ciudad de Popayán anual modelada										
	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
Promedio	3,25	3,44	3,80	4,18	3,71	3,58	3,21	3,78	3,56	3,25

Tabla 13. Velocidad del agua modelada con la distribución de Weibull.

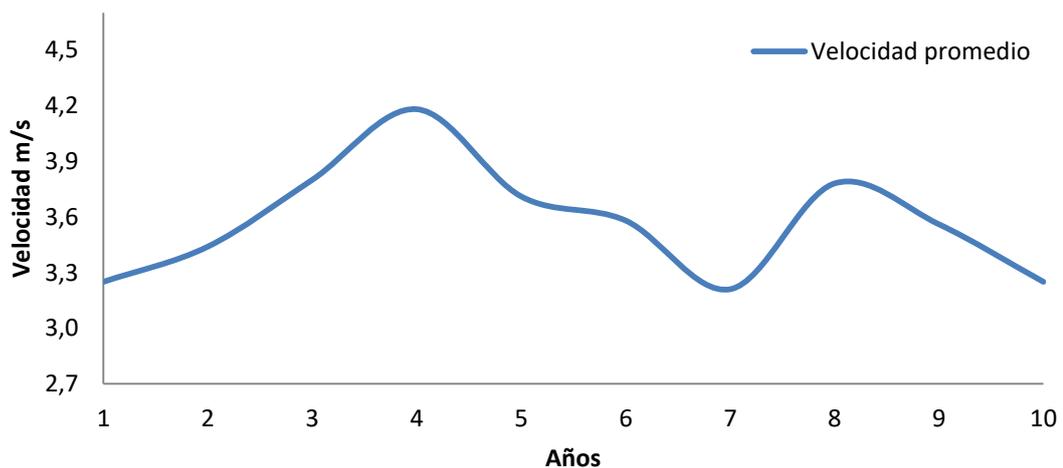


Figura 21. Velocidad del río Cauca modelada en el tiempo de evaluación del proyecto.

En la Tabla 13, se pueden ver los datos de la velocidad del flujo modelados mediante la distribución de Weibull y su comportamiento se ilustran en la Figura 21, el cálculo de los parámetros de escala (c) y de dispersión (k) de la distribución se realizan en MATLAB y están disponibles de manera digital en el archivo 'Weibull.m' dentro la carpeta (Código Matlab); el tratamiento y la modelación estocástica de la velocidad del flujo, permite obtener valores más cercanos a los reales del comportamiento de la misma.

3.3. Aplicación del método FCD

Se realiza la valoración económica del SGD para el caso de estudio en cuestión en los cuatro escenarios propuestos, el sistema puede estar conformado por paneles, turbinas o ambas (dado el caso), para esto se hace uso del método FCD y el diseño técnico de la topología del SCR; los escenarios propuestos se implementan en hojas de cálculo del software 'EXCEL 2010' de Microsoft y se encuentran disponibles en el (Anexo FCD, carpeta digital).

Los valores de entrada del FCD para los escenarios se encuentran en el Anexo A, y en las tablas 14 y 15 se presentan los resultados obtenidos de los escenarios de la siguiente manera: en la primera columna se presentan los escenarios; en la segunda columna se tienen los parámetros de salida del FCD; de la tercera a la quinta se muestran los resultados del FCD cumpliendo la demanda total con paneles solares y turbinas hidrocínicas, variando los porcentajes de participación de cada tecnología.

3.3.1 Resultados de los escenarios

En la Tabla 14 se visualizan los resultados técnicos obtenidos para cada escenario y caso propuesto con el FCD, se evidencia que todos los escenarios cumplen con la demanda total y para cada caso propuesto se tienen distintas combinaciones de paneles y turbinas.

De los resultados técnicos, se puede observar que para los escenarios uno y dos la demanda a suplir es el consumo promedio, mientras que para los escenarios tres y cuatro es el consumo pico de la empresa, lo que infiere un incremento del número de equipos para suplir la demanda respecto a los dos primeros escenarios. La variación del porcentaje de participación de las tecnologías de generación en la conformación del sistema, permite obtener una mayor diversidad de resultados en el dimensionamiento tecnológico para cada escenario propuesto.

Escenarios	Parámetros de Salida	Casos		
		Paneles (80%) y turbinas (20%)	Paneles y turbinas (50%)	Paneles (20%) y turbinas (80%)
Escenario 1	Demanda total (kWh)	7.754.159,28	7.754.159,28	7.754.159,28
	Generación total (kWh)	7.762.697,33	7.756.483,98	7.754.771,74
	# Paneles (Uds.)	1244	762	281
	# Turbinas (Uds.)	2	4	6
Escenario 2	Demanda total (kWh)	7.754.159,28	7.754.159,28	7.754.159,28
	Generación total (kWh)	7.762.697,33	7.756.483,98	7.754.771,74
	# Paneles (Uds.)	1244	762	281
	# Turbinas (Uds.)	2	4	6

Escenario 3	Demanda total (kWh)	9.906.886,60	9.906.886,60	9.906.886,60
	Generación total (kWh)	9.911.119,80	9.909.407,56	9.907.695,32
	# Paneles (Uds.)	1481	1000	519
	# Turbinas (Uds.)	3	5	7
Escenario 4	Demanda total (kWh)	9.906.886,60	9.906.886,60	9.906.886,60
	Generación total (kWh)	9.911.119,80	9.909.407,56	9.907.695,31
	# Paneles (Uds.)	1481	1000	519
	# Turbinas (Uds.)	3	5	7

Tabla 14. Resultados técnicos del FCD.

Los resultados técnicos por si solos no presentan suficiente información para determinar la viabilidad económica, por lo tanto, a continuación en la Tabla 15 se visualizan los resultados económicos obtenidos para cada escenario para los cuales se plantearon tres casos, como se puede observar los valores más favorables desde el punto de vista económico de acuerdo con los costos, los beneficios, el VPN y la TIR, se obtienen para el escenario dos en el caso tres, donde el SGD está conformado en un 80% por turbinas hidrocinéticas y en 20% por paneles solares.

Escenarios	Parámetros de Salida	Casos		
		Paneles (80%) y turbinas (20%)	Paneles y turbinas (50%)	Paneles (20%) y turbinas (80%)
Escenario 1	Costo PGD (COP)	3.853.759.633	2.575.846.169	1.283.071.746
	Beneficios totales (COP)	4.037.691.236	4.036'866.113	4.036'638.730
	CNE (kW/COP)	496,45	332,09	165,46
	VPN (COP)	-524.259.811	532'241.739	1.601.458.737
	TIR (%)	7	14	32
	PRI (años)	12,96	7,81	4,01
	IR	0,86	1,21	2,28
Escenario 2	Costo PGD (COP)	3.036.341.403	2.024.402.759	1.009.060.665
	Beneficios totales (COP)	4.037.691.236	4.036.866.113	4.036.638.730
	CNE (kW/COP)	391,15	260,99	129,10
	VPN (COP)	1.321.319.421	2.203.603.233	2.435.890.736
	TIR (%)	24	32	52
	PRI (años)	4,6	3,60	2,26
	IR	2,17	2,08	3,41
Escenario 3	Costo PGD (COP)	5.565.082.773	4.151.124.471	2.738.388.558
	Beneficios totales (COP)	5.157.757.798	5.157.530.414	5.157.303.031
	CNE (kW/COP)	561,50	418,91	276,39
	VPN (COP)	-1.038.704.968	129.988.135	1.297.680.354

	TIR (%)	5	11	20
	PRI (años)	13,46	9,77	6,21
	IR	0,80	1,03	1,52
	Costo PGD (COP)	4.455.759.607	3.335.270.031	2.215.773.597
	Beneficios totales (COP)	5.175.757.798	5.157.530.414	5.157.303.031
	CNE (kW/COP)	449,57	336,58	223,64
Escenario 4	VPN (COP)	2.290.426.688	2.700.187.860	2.954.590.769
	TIR (%)	22	28	38
	PRI (años)	4.91	3,99	3,07
	IR	1,54	1,86	2,47

Tabla 15. Resultados económicos del FCD.

Los resultados económicos proporcionan la información necesaria para analizar y determinar el mejor de los escenarios propuestos, de acuerdo a lo obtenido de los indicadores, se evidencia que las variaciones de los porcentajes de participación de las tecnologías, incrementan la gama de soluciones en la conformación del SGD, debido a que estas producen modificaciones en los costos de inversión y por consiguiente en los indicadores económicos, en la Tabla 15 este comportamiento se observa claramente en los costos del proyecto, al momento de pasar de un escenario a otro incrementando la participación de las turbinas hidrocínéticas, lo que produce una disminución significativa de los costos del proyecto. Además, esta variación permite mejorar los valores de VPN, TIR, PRI, CNE e IR para todos los escenarios infiriendo mejores resultados de rentabilidad acorde a los criterios de aceptación de los indicadores económicos. Por lo tanto para la implementación del SGD resulta más rentable la inclusión en mayor porcentaje de las turbinas hidrocínéticas para cumplir el objetivo de generación. Los escenarios dos y cuatro aplican los beneficios que otorga la L1715, beneficios que disminuyen el costo del capital fijo e incrementan los ingresos obtenidos por la exportación de la generación excedente a la red, razón por la cual estos escenarios presentan los mejores resultados económicos. La diferencia entre estos son los costos del proyecto, que para el escenario dos son menores respecto al cuatro interviniendo directamente en el cálculo del índice de rentabilidad.

3.3.2 Análisis de los resultados más favorables en el FCD

En la Tabla 16 se observa que los resultados más favorables para el método FCD se obtienen para el caso tres, de acuerdo con el objetivo de cada indicador económico (ver Tabla 6), la TIR y el PRI dependen del VPN, y el CNE es más utilizado como indicador de referencia, por lo que el VPN e IR son los más utilizados para determinar la viabilidad económica de un proyecto de inversión. De estos, el VPN permite medir las ganancias sin importar la magnitud de la inversión, mientras que el IR permite obtener de manera proporcional el cálculo

de ganancias respecto a la inversión, es decir brinda mayor claridad al inversionista en el momento de realizar una inversión; por consiguiente en este trabajo el indicador más relevante es el IR.

De acuerdo con lo anterior, en la Tabla 16 se puede observar que los escenarios dos y cuatro son más favorables, pero el VPN del escenario cuatro es más alto, y en contraparte los costos de implementación son mucho mayores que los del escenario dos, lo que traduciendo a términos de rentabilidad, favorece al escenario dos.

Parámetro, Indicador	Escenario			
	1	2	3	4
Demanda (kW)	7.754.159,28	7.754.159,28	9.906.886,60	9.906.886,60
Generación (kW)	7.754.771,74	7.754.771,74	9.907.695,32	9.907.695,31
# Paneles	281	281	519	519
# Turbinas	6	6	7	7
Costo PGD(COP)	1.283.071.746	1.009.060.665	2.738.388.558	2.215.773.597
Beneficios (COP)	4.036.638.730	4.036.638.730	5.157.303.031	5.157.303.031
CNE (COP)	165,46	129,10	276,39	223,64
VPN (COP)	1.601.458.737	2.435.890.736	1.297.680.354	2.954.590.769
TIR (%)	32	52	20	38
PRI (años)	4,01	2,26	6,21	3,07
IR	2,28	3,41	1,52	2,47

Tabla 16. Resultados más favorables con el FCD para cada escenario.

En la Figura 22 se visualizan los resultados de los indicadores económicos para los casos más favorables de cada escenario, se visualiza el VPN con el mayor valor para el escenario cuatro, el menor costo de proyecto para el escenario dos y los mayores beneficios para el escenario tres y cuatro.

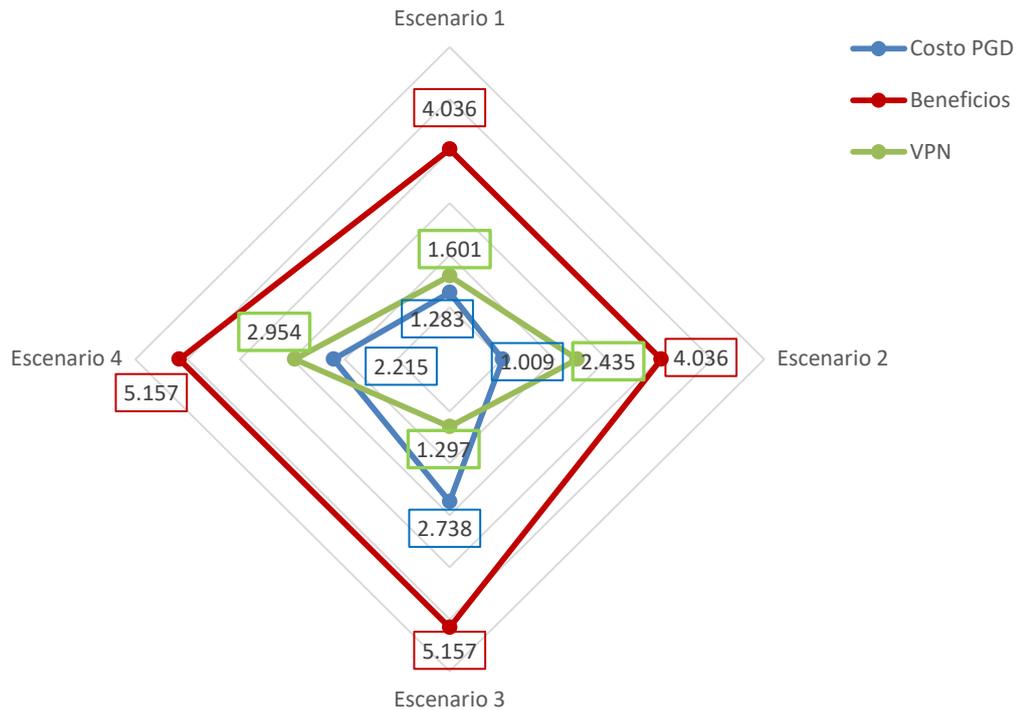


Figura 22. Indicadores económicos de salida con el FCD

Acorde con los resultados obtenidos en cada escenario se concluye:

- El SGD con la valoración económica más favorable para los cuatro escenarios, es el conformado en un 80% por turbinas hidrocínicas (ver Figura 22). Los indicadores para este sistema arrojan los mejores resultados respecto a los otros casos evaluados, permitiendo identificar la rentabilidad del SGD.
- Los casos en donde el SDG está conformado en un 80% por turbinas hidrocínicas produce excedentes de energía lo que incrementa los beneficios de exportación debido a la venta de electricidad al comercializador, por tal motivo en todos los escenarios, los beneficios totales en el horizonte de evaluación son los más elevados para esta tecnología.
- En el escenario 2 se obtienen los resultados más favorables de rentabilidad de acuerdo con los indicadores económicos empleados, en este caso los beneficios que proporciona la L1715 maximizan los resultados del FCD y el SGD a partir de turbinas hidrocínicas.
- El método FCD mide la rentabilidad de un proyecto basado en los indicadores económicos de salida del mismo, a través de los cuales se aprecia la viabilidad económica de los proyectos. Además de medidas cuantitativas durante el periodo de evaluación, presenta valores económicos concretos al inversionista que realice la toma de decisiones al momento de invertir.

3.4. Aplicación del método híbrido (FCD + PSO)

La valoración económica del SGD se realiza con el método MH para el caso de estudio y los cuatro escenarios propuestos, el sistema puede estar conformado por paneles, turbinas o ambas (dado el caso). La codificación del algoritmo principal PSO+FCD y los escenarios propuestos, se realiza en el software 'MATLAB R2012a' de la compañía The Mathworks Inc., y están disponibles en el (Anexo PSO, carpeta digital).

Respecto al algoritmo cabe mencionar que las diferencias técnicas y económicas entre los distintos escenarios, difieren solo en la función objetivo, es decir, consisten en cambios de dimensionamiento y topología, mientras que las económicas consisten en tener o no en cuenta la L1715.

Además de los valores de entrada del FCD presentes en el Anexo A; se requieren los valores de inicialización del algoritmo PSO+FCD presentes en el Anexo E. En las tablas 17 y 18 se presentan los resultados obtenidos en cada escenario de la siguiente manera: la primera columna tiene los parámetros de salida del MH; de la segunda a la cuarta los resultados del SGD variando el tamaño del enjambre de menos a más, buscando la mejor calidad de respuesta.

3.4.1. Resultados obtenidos

En la Tabla 17 se presentan los resultados técnicos obtenidos para cada escenario y caso propuesto con el MH, se evidencia que todos los escenarios cumplen con la demanda total y para cada caso propuesto se obtienen distintos resultados en cuanto al dimensionamiento tecnológico.

Al igual que en los resultados técnicos del FCD, en los escenarios uno y dos se suple la demanda promedio, y en los escenarios tres y cuatro la demanda pico de la empresa, lo que explica el aumento del dimensionamiento tecnológico en los últimos dos escenarios. Los tres casos propuestos dependen del tamaño del enjambre y este se varía de menos a más buscando la mejor calidad de respuesta tras una serie de simulaciones.

# Esc	Parámetros de Salida	Casos		
		1 swarm ≤ 100	2 150 ≥ swarm ≤ 250	3 swarm ≥ 250
1	Demanda total (kW)	7'754.159	7'754.159	7'754.159
	Generación total (kW)	7'752.829	7'701.663 ≥ Generación ≤ 7'752.829	7'701.663
	# Paneles (Uds.)	1722	0 ≥ Paneles ≤ 1722	0
	# Turbinas (Uds.)	0	0 ≥ turbinas ≤ 6	6
2	Demanda total (kW)	7'754.159	7'754.159	7'754.159
	Generación total (kW)	7'752.829	7'711.675 ≥ Generación ≤ 7'752.829	7'711.675
	# Paneles (Uds.)	1722	0 ≥ paneles ≤ 1722	0
	# Turbinas (Uds.)	0	0 ≥ turbinas ≤ 6	6

3	Demanda total (kW)	9'906.886,6	9'906.886,6	9'906.886,6
	Generación total (kW)	9'.909.394,8	9'909.394 ≥ Generación ≤ 10'282.234	10'282.234,52
	# Paneles (Uds.)	2197	0 ≥ paneles ≤ 2197	0
	# Turbinas (Uds.)	0	0 ≥ turbinas ≤ 8	8
4	Demanda total (kW)	9'906.886,6	9'906.886,6	9'906.886,6
	Generación total (kW)	9'.693.288	9'909.394 ≥ Generación ≤ 10'282.234	10'282.234,5
	# Paneles (Uds.)	2153	0 ≥ paneles ≤ 2153	0
	# Turbinas (Uds.)	0	0 ≥ turbinas ≤ 8	8

Tabla 17. Resultados técnicos con el MH.

Los resultados técnicos por si solos no presentan suficiente información para determinar la viabilidad económica, por lo tanto, a continuación en la Tabla 18, se presentan los indicadores económicos obtenidos para cada escenario y sus respectivos casos propuestos, se observa que el VPN y la TIR para los escenarios uno y tres del primer caso son negativos y por ende no hay PRI, lo que significan pérdidas al momento de finalizar el horizonte de evaluación (10 años); por otro lado para los escenarios dos y cuatro del mismo caso, el VPN y la TIR son positivas, y el PRI está contenido dentro del horizonte de evaluación, sin embargo los resultados más favorables encabezados por el IR son menores que para el caso tres, por lo que este último escenario representa nuevamente la mejor opción para la implementación del SGD.

# Esc	Parámetros de Salida	Casos		
		1	2	3
		swarm ≤ 100	150 ≥ swarm ≤ 250	swarm ≥ 250
1	Costo PGD (COP)	5.362'519.440,52	446'631.922 ≥ Costo ≤ 5.362.519.440	446'631.922
	Beneficios totales (COP)	3.534'475.404	3.270'062.408 ≥ CNE ≤ 3.534'475.404	3.270'062.408
	CNE (kW/COP)	691,69	57,99 ≥ CNE ≤ 691,7	57,99
	VPN (COP)	-2.250'281.387	-2250'281.387 ≥ VPN ≤ 1520'166.187	1.520'166.187
	TIR (%)	-0,925	-0,925 ≥ TIR ≤ 61,34	61,34
	PRI (años)	No	PRI ≤ 2,03	2,03
	IR	0,565	0,57 ≥ IR ≤ 4,48	4,48
	2	Costo PGD (COP)	4.199'637.713	354'333.807 ≥ Costo ≤ 4199'637.713
Beneficios totales (COP)		3.534'475.404	3273'229.924 ≥ Ben. ≤ 3534'475.404	3.273'229.924
CNE (kW/COP)		541,69	45,95 ≥ CNE ≤ 541,69	45,95
VPN (COP)		1.811'971.776	1811'971.776 ≥ VPN ≤ 1900'125.005	1.900'125.005
TIR (%)		18,93	18,93 ≥ TIR ≤ 87,5	87,5
PRI (años)		5,037	1,3 ≥ PRI ≤ 5,04	1,3
IR		1,45	1,45 ≥ IR ≤ 6,5	6,5

	Costo PGD (COP)	7.723'569.420	$758'200.797 \geq \text{Costo} \leq 7723'569.420$	758'200.797
	Beneficios totales (COP)	4.527'775.458	$4527'775.458 \geq \text{Ben.} \leq 4716'345.524$	4.716'345.524
	CNE (kW/COP)	780,84	$73,74 \geq \text{CNE} \leq 780,84$	73,74
3	VPN (COP)	-3.548'757.974	$-3548'757.974 \geq \text{VPN} \leq 2264'191.481$	2.264'191.481
	TIR (%)	-2,29	$-2,29 \geq \text{TIR} \leq 60,15$	60,15
	PRI (años)	No	$0 \geq \text{PRI} \leq 2,08$	2,08
	IR	0,525	$0,525 \geq \text{IR} \leq 4,36$	4,36
	Costo PGD (COP)	3.727'835.811	$616'818.150 \geq \text{Costo} \leq 3727'835.811$	616'818.150
	Beneficios totales (COP)	4437'096.296	$4437'096.296 \geq \text{Ben.} \leq 4716'345.524$	4716'345.524
	CNE (kW/COP)	384,57	$59,98 \geq \text{CNE} \leq 384,6$	59,98
4	VPN (COP)	2706'.626.833	$2706'626.833 \geq \text{VPN} \leq 2842'983.121$	2842'983.121
	TIR (%)	24,95	$24,95 \geq \text{TIR} \leq 85,4$	85,4
	PRI (años)	3,21	$1,3 \geq \text{PRI} \leq 3,21$	1,3
	IR	1,76	$0,525 \geq \text{IR} \leq 4,36$	6,35

Tabla 18. Resultados económicos con el MH

3.4.2 Análisis de los resultados más favorables en el MH

En la Tabla 19 los resultados más favorables para el caso tres en cada escenario propuesto, donde el SGD está conformado por turbinas hidrocinéticas en su totalidad, debido al proceso de optimización de los costos de inversión inicial, el cual determinó que las turbinas hidrocinéticas son la opción más rentable. Por otro lado, en los escenarios dos y cuatro (los cuales aplican L1715) se presentan las opciones más viables económicamente, y con base el IR el cual prima sobre el resto de los indicadores, el escenario dos representa la mejor opción para la implementación del SGD, aun teniendo el VPN menor.

Parámetro, Indicador	Escenario			
	1	2	3	4
Demanda (kW)	7'754.159,28	7'754.159,28	9'906.886,6	9'906.886,6
Generación (kW)	7'701.663,72	7,711.675,89	10'282.234,52	10'282.234,5
# Paneles	0	0	0	0
# Turbinas	6	6	8	8
Costo PGD(COP)	446'631.922,67	354'333.807,3	758'200.797	616'818.150
Beneficios (COP)	3.270'062.408	3.273'229.924	4.716'345.524	4.716'345.524
CNE (COP)	57,99	45,95	73,74	59,98
VPN (COP)	1.520'166.187	1.900'125.005	2.264'191.481	2.842'983.121

TIR (%)	61,34	87,5	60,15	85,4
PRI (años)	2,03	1,3	2,08	1,3
IR	4,48	6,5	4,36	6,35

Tabla 19. Resultados más favorables con el MH en cada escenario.

En la Figura 23 se visualizan los resultados obtenidos por los indicadores económicos para los casos más favorables de cada escenario, se visualiza el VPN con el mayor valor para el escenario cuatro, el menor costo de proyecto para el escenario dos y los mayores beneficios para el escenario tres y cuatro.

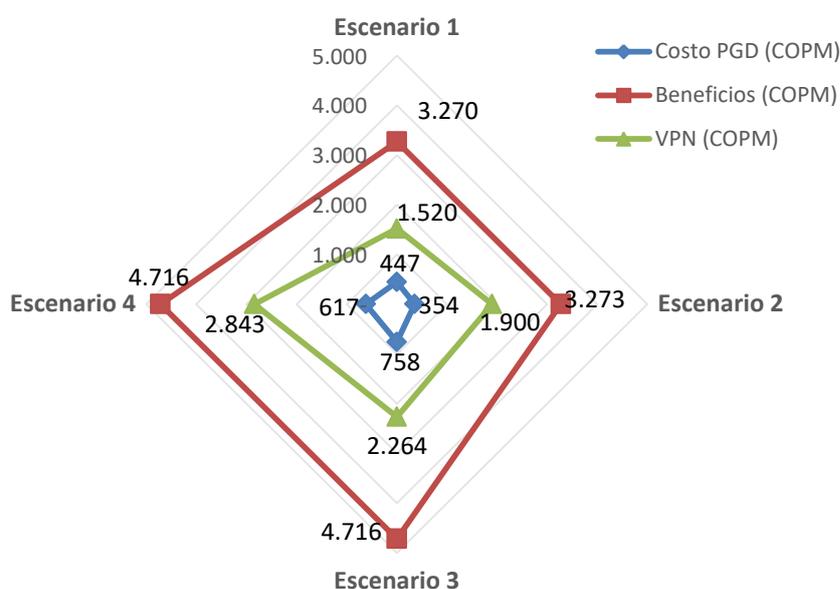


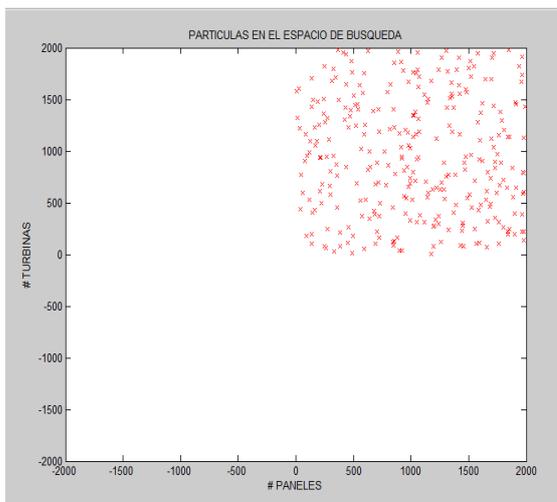
Figura 23. Indicadores del proyecto con el MH.

Acorde con los resultados obtenidos, se concluye:

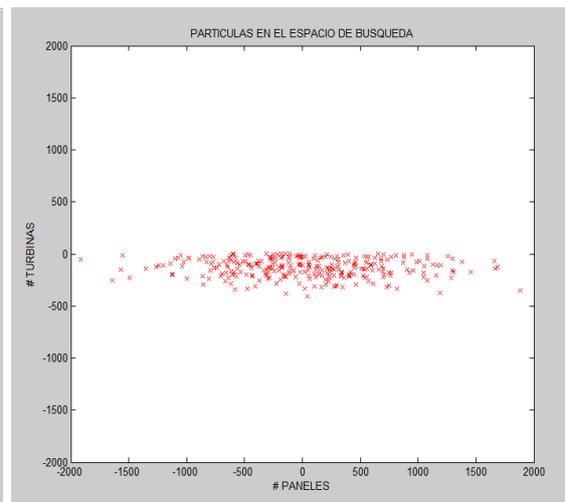
- La aplicación del MH permite obtener indicadores económicamente viables en todos los escenarios (ver Figura 23), puesto que optimiza el dimensionamiento de los equipos de cada tecnología considerada. En este caso, el sistema óptimo está conformado solo por turbinas.
- El primer y tercer escenario no consideran los beneficios tributarios de la L1715, se observa que el IR es menor en comparación con los obtenidos por el segundo y cuarto escenario que si lo aplican (ver Tabla 19). Esto evidencia el gran impacto económico que genera la aplicación de la ley.
- En los escenarios tres y cuatro (sistema con almacenamiento) la generación cubre el pico más alto de la demanda (ver Figura 19), a diferencia de los dos primeros el sistema no importa energía de la red; los excedentes de energía son almacenados y los utiliza en caso de ser requeridos por el sistema o los exporta a la red (dado el caso), disminuyendo egresos por importación y aumentando ingresos por exportación de electricidad (ver Figura 23).

3.4.3. Desplazamiento del enjambre en el espacio de búsqueda

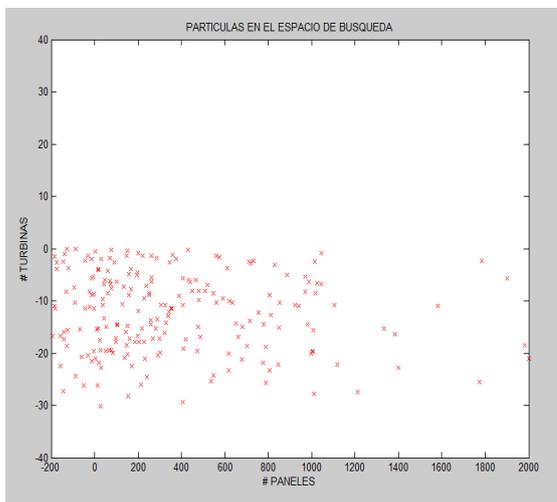
En la Figura 24 se observa el movimiento de las partículas, que varían a medida que aumenta el número de iteraciones. El comportamiento se describe de la siguiente manera: (a) inicialización aleatoria de partículas, (b) y (c) etapa de exploración en el espacio, (d) etapa de convergencia, (e) etapa de intensificación y, (f) etapa de búsqueda del mínimo global (no se garantiza el óptimo debido a que las técnicas meta-heurísticas encuentran soluciones cuasi óptimas).



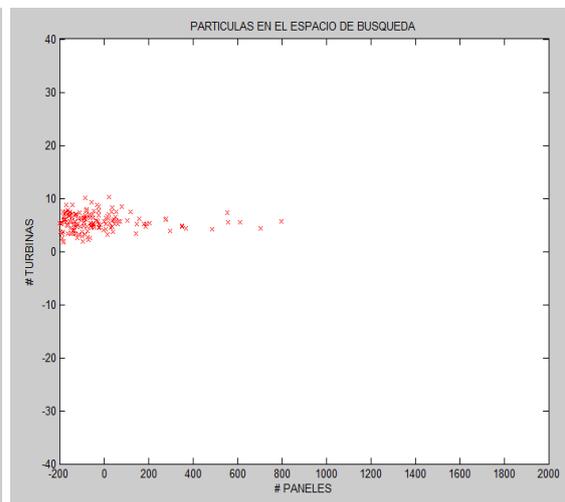
(a) Iteración = 0



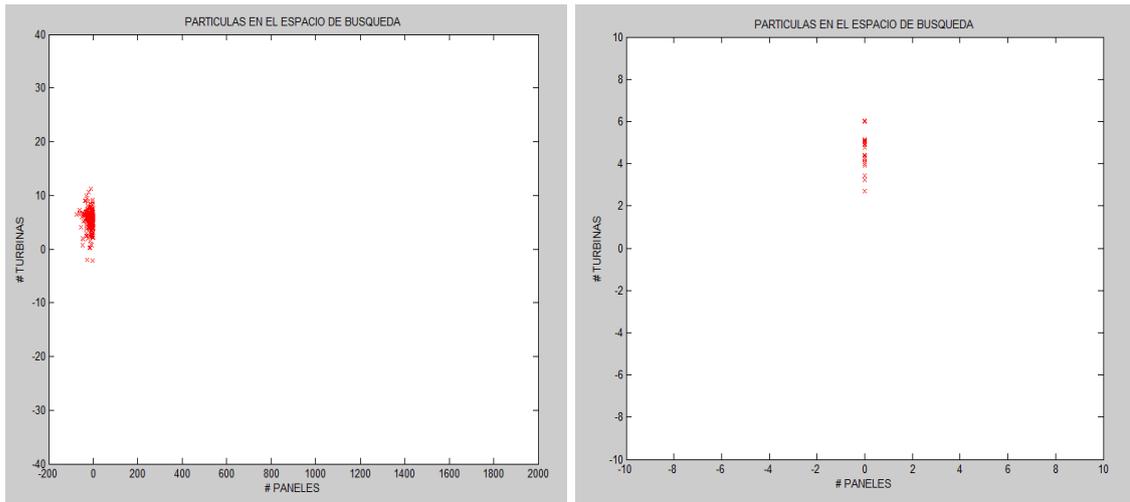
(b) Iteración = 50



(c) Iteración = 75



(d) Iteración = 100



(e) Iteración = 125

(f) Iteración = 150

Figura 24. Evolución del desplazamiento del enjambre en el espacio de búsqueda.

3.5. Comparación de los indicadores económicos

Con el fin de realizar una comparación y análisis que permita determinar: la capacidad de generación, el dimensionamiento, los costos y beneficios, e indicadores económicos, de la opción tecnológica más rentable para un SGD, en la Tabla 20 se presentan los mejores resultados obtenidos en cada escenario evaluado por los dos métodos.

Los mejores resultados obtenidos en cada escenario por ambos métodos presentan diferentes combinaciones tecnológicas, dadas por el consumo energético a suplir y en el caso del método híbrido por el proceso de optimización de los recursos, las turbinas hidrocinéticas presentan mejores condiciones de rentabilidad por lo cual el algoritmo converge hacia soluciones donde se ignoran los paneles solares y se tienen exclusivamente turbinas en la conformación del SGD. Acorde a esto, los mejores indicadores económicos se presentan para el escenario dos evaluado por el método híbrido con las siguientes características: el SGD está conformado por seis turbinas y cero paneles, el CNE es el más bajo de todos los escenarios, la TIR y el PRI dependen del VPN, y este aunque no es el mejor respecto a los costos de inversión del proyecto, brinda la mejor relación costo-beneficio.

Indicador	Método FCD				Método híbrido PSO+FCD			
	Esc. 1	Esc. 2	Esc. 3	Esc. 4	Esc. 1	Esc. 2	Esc. 3	Esc. 4
# Paneles	281	281	519	519	0	0	0	0
# Turbinas	6	6	7	7	6	6	8	8
CNE(kW/COP)	165,46	129,10	276,39	223,64	57,99	45,95	73,74	59,98

VPN(COP)	1.601'45 8.737	2.358'13 7.212	1.297'6 80.354	2.855'2 51.134	1.520'16 6.187	1.900'12 5.005	2.264'19 1.481	2.842'98 3.121
TIR (%)	32	52	20	38	61,34	87,45	60,15	85,4
PRI(Años)	3,77	2,26	6,21	3,07	2,03	1,3	2,08	1,3
IR	4,82	3,34	1,52	2,42	4,48	6,52	4,36	6,35

Tabla 20. Mejores resultados obtenidos en cada método.

En la Figura 25 se visualizan los resultados obtenidos (VPN vs. Costo PGD), por cada escenario en la aplicación de los métodos, se evidencia que los mejores resultados se obtienen con el MH, puesto que este optimiza los costos de inversión.

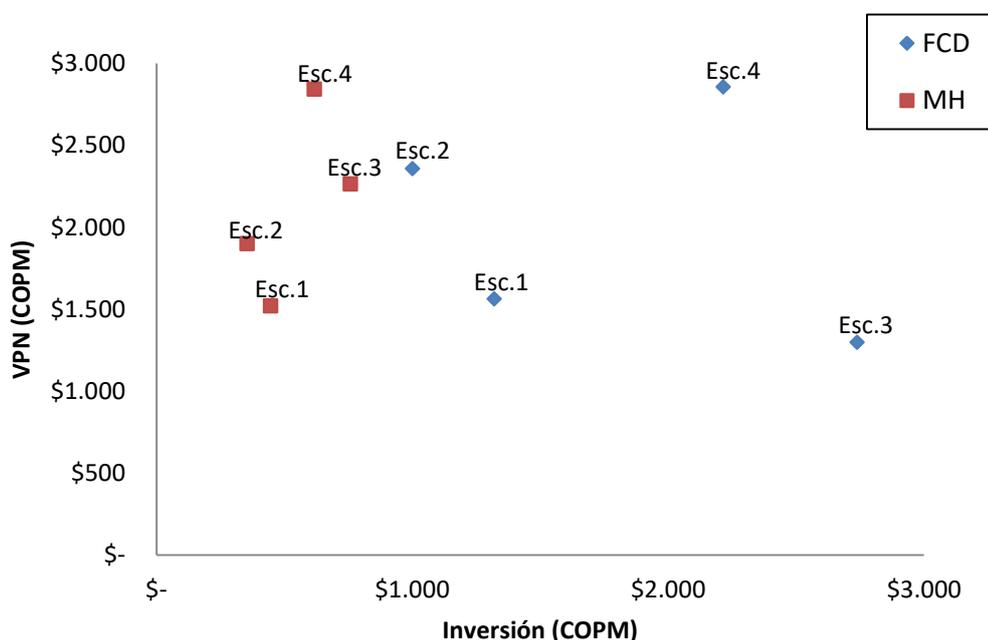


Figura 25. Evaluación de los escenarios

A partir de esta información se concluye:

- La tecnología de generación hidrocínética es más rentable, debido principalmente a: bajo costo de equipos (inversión inicial), generación continua (24 horas de día), gran potencial de energía (velocidad del agua) en el caso de estudio y, óptimas condiciones de emplazamiento del sistema.
- Con el método FCD se evaluó sistemas de generación híbridos (FV y HC) obteniendo los resultados más favorables en el escenario dos conformado en su mayoría por turbinas hidrocínéticas, mientras que con el MH se optimizaron los resultados y se determinó que el escenario dos conformado solo por turbinas hidrocínéticas, representa la opción de mayor rentabilidad para conformar el SGD.

- En el MH el segundo y cuarto escenario tienen resultados de indicadores semejantes entre sí, pero el VPN del cuarto escenario es mayor, de tal modo que aparenta ser la mejor opción (ver Figura 25). Sin embargo, el costo de inversión inicial del segundo escenario es mucho menor (ver Tabla 20), significándole mayor rentabilidad y por ende ser la mejor opción.
- PSO logro mejorar los resultados de los indicadores económicos respecto a FCD (ver Tabla 20), debido a que realizó: optimización de recursos y, modelación de variables estocásticas (FER).
- Los resultados de los indicadores económicos van en torno al horizonte de evaluación (10 años), sin embargo, si este se amplía, los resultados deben mejorar considerablemente; por el contrario, al reducirle tienden a empeorar ineludiblemente hasta dejar de ser un proyecto viable económicamente.

3.6. Comparación del desempeño de los métodos

En este ítem se presenta la aplicación del análisis multicriterio para la evaluación del desempeño de los métodos, se aplicó la técnica de proceso analítico jerárquico (AHP), la cual permitió determinar de manera cuantitativa el desempeño de los métodos. Este procedimiento se realiza en 'EXCEL 2010' y se encuentra disponible en el (Anexo AHP, carpeta digital).

Con base en la metodología planteada (ver Figura 15), se obtuvieron los siguientes resultados en cada una de las etapas de ésta:

1- Selección de los criterios

A partir de la revisión de la literatura se relacionan en la Tabla 21 los criterios que con mayor frecuencia se usan para la comparación de dos (o más). En la primera columna se tiene la característica de comparación, en la segunda la definición técnica y, en la tercera los trabajos que lo aplican:

Característica	Definición	Trabajos que lo aplican
Flexibilidad	Capacidad para adaptarse a diversas circunstancias o para acomodar las normas a distintas situaciones o necesidades	(Cheng, Chen, & Fleming, 2015), (Jamian, Mustafa, & Mokhlis, 2015), (H. Moradi, Hajinazari, Jamasb, & Paripour, 2013), (Saif, Pandi, Zeineldin, & Kennedy, 2013), (Gómez-González, López, & Jurado, 2013), (Kansal, Kumar, & Tyagi, 2016), (Jiang, Ji, & Shen, 2014), (Moradi & Eskandari, 2014), (H. Moradi, Eskandari, & Showkati, 2014), (Mandal & Chakraborty, 2012)
Confiabilidad	Es la probabilidad de obtener datos más cercanos a los valores reales	(Cheng, Chen, & Fleming, 2015), (Jamian, Mustafa, & Mokhlis, 2015), (Saif, Pandi, Zeineldin, & Kennedy, 2013), (Moradi & Eskandari, 2014), (H. Moradi, Eskandari, & Showkati, 2014), (Mandal & Chakraborty, 2012)

Optimalidad	Capacidad de obtener una respuesta cercana al mínimo global	(Cheng, Chen, & Fleming, 2015), (Jamian, Mustafa, & Mokhlis, 2015), (H. Moradi, Hajinazari, Jamasb, & Paripour, 2013), (Saif, Pandi, Zeineldin, & Kennedy, 2013), (Gómez-González, López, & Jurado, 2013), (Kansal, Kumar, & Tyagi, 2016), (Jiang, Ji, & Shen, 2014), (Moradi & Eskandari, 2014), (H. Moradi, Eskandari, & Showkati, 2014), (Mandal & Chakraborty, 2012)
Recursos computacionales	La carga computacional requerida para la implementación y ejecución de los métodos	(Cheng, Chen, & Fleming, 2015), (Jamian, Mustafa, & Mokhlis, 2015), (Gómez-González, López, & Jurado, 2013), (Jiang, Ji, & Shen, 2014), (Moradi & Eskandari, 2014), (H. Moradi, Eskandari, & Showkati, 2014)

Tabla 21. Criterios de comparación de los métodos

En la Tabla 21, los criterios que se emplean con mayor frecuencia para la comparación de métodos son la optimalidad y la flexibilidad y, los menos utilizados son la confiabilidad y los recursos computacionales.

2- Definir el peso de los criterios

En la Tabla 22 se presenta la matriz de comparación por pares grupal, el vector de pesos de los criterios (\bar{w}) y el ratio de consistencia (RC).

	Flexibilidad	Confiabilidad	Optimalidad	Recurso computacional	\bar{w}
Flexibilidad	1	35/6	2	3/4	0.12
Confiabilidad	1/4	1	2/7	1/6	0.56
Optimalidad	1/2	31/2	1	1/4	0.23
Recurso Computacional	11/3	6	4	1	0.08
$RC = 0.024$					

Tabla 22. Matriz de comparación por pares.

En la Tabla 22 del vector de pesos de los criterios (\bar{w}), la confiabilidad es el criterio con mayor ponderación e inversamente los recursos computacionales tienen la menor ponderación. Por otro lado, y según (Saaty & Vargas, 2001) el ratio de consistencia de la matriz (RC) es aceptable, infiriendo coherencia en los datos obtenidos de los evaluadores.

3- Definir el ponderado de los criterios respecto a cada método

El análisis subjetivo de los criterios de comparación de cada uno de los métodos como se muestra en la Tabla 23.

Método	FCD	Hibrido PSOFC
Característica		
Flexibilidad	Estática, basado en el cálculo de los ingresos y egresos durante la vida útil del proyecto.	La función objetivo de optimización se puede ajustar de acuerdo con el tipo de resultado que se quiera obtener.
Confiabilidad	Los resultados de salida se basan en los datos determinísticos de entrada de las FER.	Realiza un tratamiento estocástico de las FER mediante la simulación de Monte Carlo
Optimalidad	No está diseñado para optimizar su respuesta. (Calcula el número de paneles y turbinas para generar cierta cantidad de electricidad, pero sin tener en cuenta la minimización de costos)	PSO es una técnica de optimización basada en el comportamiento social de las aves, que evolucionan su posición hasta encontrar una respuesta aceptable. (Número de paneles y número de turbinas para generar cierta cantidad de electricidad al menor costo posible)
Recursos computacionales	Utiliza recursos hardware y software bajos	Utiliza recursos hardware y software medios

Tabla 23. Análisis subjetivo de los criterios para los métodos

El análisis subjetivo de la Tabla 23 denota que el MH tiene mejores características de desempeño que el FCD.

Una vez realizado el análisis subjetivo, se aplicó el juicio basado en la escala de Saaty, para obtener las matrices de los criterios y su respectiva normalización, obteniendo los valores de ponderación para cada método, este procedimiento se aprecia en el Anexo AHP, hoja Alternativas y criterios, tabla Matriz de alternativas.

Criterios	Flexibilidad	Confiabilidad	Optimalidad	Recursos Computacionales
FCD	0,2	0,2	0,1	0,8
MH	0,8	0,8	0,9	0,2

Tabla 24. Matriz de valores de ponderación para cada método

En la Tabla 24 se presentan los resultados de ponderación de las alternativas respecto a cada uno de los criterios, donde prima el MH en tres de los cuatro criterios y solamente es sobrepasado por el FCD en los recursos computacionales.

4- Calcular el ranking final y tomar la decisión:

Se realizó la multiplicación vectorial entre el ponderado de cada alternativa y el vector de peso de los criterios, obteniendo el siguiente vector de ranking final de las alternativas:

Criterios	Ranking
FCD	0,2
MH	0,8

Tabla 25. Resultados del método AHP.

En la Tabla 25 se presenta la calificación individual del desempeño de los métodos, se evidencia que el MH supera significativamente al FCD, bajo las condiciones consideradas inicialmente para la comparación.

3.7. Comparación con otros métodos híbridos

En el ítem 3.6 se obtuvo que el MH presentó una mejor valoración; de acuerdo con los resultados obtenidos y con el ánimo de comparar este método con otros métodos híbridos presentados en la literatura científica, en la Tabla 26 se presenta la recopilación de algunos trabajos que emplean métodos híbridos de PSO aplicados a SGD. Los trabajos se clasifican según el método híbrido empleado; además para la comparación se incluyen el tipo de criterios de comparación empleados, la modelación de las incertidumbres, el objetivo de optimización y, los incentivos tributarios. El objetivo de la comparación es identificar las diferentes técnicas implementadas en la literatura, las distintas maneras de abordar los problemas de optimización y las variadas soluciones que se logran obtener acorde a la función objetivo a cumplir; además de los criterios de comparación utilizados en los métodos.

Hibridación	Modelación incertidumbre	Objetivo	Criterios de Comparación	Valoración económica	Normatividad	Trabajos que lo Aplican
PSO Multiproyección con Estrategia de Preferencia	No	Pérdidas de cobre, perfil de tensión, capacidad de generación del SGD.	Optimización, flexibilidad, certeza, recursos computacionales.	No	Ley de castigo contra emisiones contaminantes. (China)	(Cheng, Chen, & Fleming, 2015)
PSO con programación evolutiva	No	Reducción de los costos de generación.	Optimización, flexibilidad, certeza, recursos computacionales.	Si	No específica	(Jamian, Mustafa, & Mokhlis, 2015)
Algoritmos genéticos con PSO	No	Pérdidas de cobre, desviación de tensión, estabilidad de tensión.	No específica.	No	No específica	(Moradi & Abedini, 2012)
PSO con programación lineal difusa	Conjuntos difusos para tratar las incertidumbres de la demanda	Maximización del VPN	Flexibilidad, optimización.	Si	No específica	(H. Moradi, Hajinazari, Jamasb, & Paripour, 2013)

		eléctrica y térmica, precio de electricidad y, el precio del gas natural.				
PSO y flujo dinámico óptimo de potencia		Modelación de la demanda total, radiación solar y velocidad del viento mediante series de tiempo.	Disminución de la carga, energía comprada de la red, costo total anual.	Optimización, flexibilidad, certeza.	No	No especifica (Saif, Pandi, Zeineldin, & Kennedy, 2013)
PSO con flujo de potencia optimo	No		Minimización de los costos de inversión inicial.	Recursos computacionales, optimización, flexibilidad.	Si	No especifica (Gómez-González, López, & Jurado, 2013)
PSO-método analítico	No		Minimizar la pérdida de distribución de energía.	Optimización, flexibilidad.	No	No especifica (Kansal, Kumar, & Tyagi, 2016)
PSO hibrido con Algoritmo de Búsqueda Gravitacional	No		Minimización de costos de combustible como de los niveles por emisiones contaminantes.	Recursos computacionales, optimización, flexibilidad.	No	No especifica (Jiang, Ji, & Shen, 2014)
PSO con Programación Cuadrática		El precio de la electricidad es modelado por la teoría fuzzy. Se consideran también la radiación solar y la velocidad del viento.	Valor actual neto (VAN) como un objetivo económico, mientras que las emisiones se traducen en métricas económicas.	Optimización, flexibilidad, certeza, recursos computacionales.	Si	No especifica (Moradi & Eskandari, 2014), (H. Moradi, Eskandari, & Showkati, 2014)
Evolución diferencial y PSO	No		Minimización del costo del combustible de las plantas térmicas.	Optimización, flexibilidad, certeza.	Si	No especifica (Mandal & Chakraborty, 2012)
PSO y programación matemática multiobjetivo	No		Minimización de costes de operación y mantenimiento, de la energía nos distribuida y perdidas de potencia activa	Confiabledad, optimización, flexibilidad.	Si	No especifica (Jamshid, Muttaqi, Azizivahed, & Gitizadeh, 2014)
PSO y algoritmo de búsqueda gravitacional		La distribución normal y distribución de Weibull se emplea para modelar las variables de entrada	Gestión optima de la energía de unidades generadora	Optimización, confiabilidad	Si	No especifica (Nikman, Golestaneh, & Malekpour, 2012)
PSO y red		Perfil de la	Pronosticar	Optimización,	No	No especifica (Anand &

neuronal artificial	demanda de energía	los precios de la demanda de energía	flexibilidad, confiabilidad			Suganthi, 2017)
PSO y coeficientes de aceleración variables en el tiempo	No	Minimizar el costo total de generación de las unidades generadoras con el fin de satisfacer la demanda de energía al tiempo que se satisfacen las restricciones de la red.	Optimización, Confiabilidad	Si	No especifica	(Solanki, PATidar, & Chaturvedi, 2014)
PSO mono objetivo y multiobjetivo con el software de simulación EnergyPlus	Se predecir el comportamiento térmico del edificio y el consumo de energía.	minimizar la demanda energética anual total de un edificio	Optimización	No	No especifica	(Delgama, Sajadia, Kowsarya, & Delgamb, 2016)
PSO y flujo de caja	La radiación solar y velocidad del agua, se modelan empleando el software RISK y la simulación de Monte Carlo.	Minimización del costo total del proyecto.	Optimización, confiabilidad, flexibilidad, recursos computacionales.	SI	Ley 1715 beneficios tributarios por la inversión en generación a partir de renovables. (Colombia)	Presente trabajo

Tabla 26. Comparación con otros métodos híbridos de PSO.

De la anterior tabla comparativa con referencia al presente trabajo se concluye:

- En los trabajos similares la evaluación económica del SGD no emplea un método directo en la hibridación con el PSO, se emplean técnicas complementarias después de realizar la optimización del sistema, en este trabajo el híbrido entre PSO y FCD realiza la valoración económica directa del SGD, donde se modelan las variables estocásticas relacionadas con las FER, provenientes de la radiación solar y de la velocidad del agua, el método FCD determina la viabilidad económica, al cual ingresan la L1715 y dimensionamiento del SGD y el PSO realiza la optimización de los costos del proyecto utilizando los indicadores de salida FCD como función objetivo.
- Para tener soluciones realistas en la valoración económica de los SGD, las variables estocásticas de las unidades generadoras basadas en FER, así como las incertidumbres de la demanda y precios de la electricidad deben ser consideradas y modeladas. Sin embargo, solo en algunos trabajos de investigación, las incertidumbres se han tenido en cuenta.
- Dado que la potencia de salida de los SGD basados en FER tienen una naturaleza probabilística, en la mayoría de los trabajos de investigación consultados no se han tenido en cuenta las incertidumbres ambientales de los SGD. La debida consideración de éstas en las unidades generadoras

conduce a soluciones más confiables para el problema de valoración económica.

- Los parámetros de control de los algoritmos de optimización meta-heurística pueden afectar significativamente su rendimiento computacional, la configuración incorrecta de estos puede conducir a soluciones inapropiadas. Diferentes problemas de optimización tienen un conjunto adecuado de parámetros de control, por lo tanto, para cada problema, el conjunto adecuado de parámetros puede determinarse mediante un proceso de prueba y error.
- En esta revisión, diferentes trabajos de investigación han utilizado distintos objetivos, restricciones y variables de decisión, por lo que no es posible comparar el rendimiento de los distintos algoritmos de optimización. Se recomienda comparar diferentes algoritmos de optimización con la misma función objetivo.

3.8 Conclusiones de capítulo

- La aplicación de PSO en algoritmos híbridos ha sido ampliamente utilizada para la búsqueda de soluciones óptimas en proyectos del sector eléctrico (Nikman, Golestaneh, & Malekpour, 2012). En este trabajo se hibrida PSO con FCD para realizar la valoración económica de un SGD, permitiendo contrarrestar debilidades como optimización y confiabilidad de resultados presentadas en un proceso de valoración mediante FCD.
- Existen diversos medios para encontrar la distribución que mejor modele los datos pertenecientes a las series de tiempo. En este trabajo el software empleado para el tratamiento de las variables estocásticas consideradas en es @RISK con simulación de Montecarlo, a través del cual se analizan los datos cronológicos y se determina la mejor distribución para la modelación estocástica, obteniendo como resultado una función de distribución que permite pronosticar el comportamiento en el tiempo de las FER.
- Los escenarios evaluados mediante el FCD no consideran las variables estocásticas FER, por lo tanto, los resultados obtenidos no representan una visión confiable del comportamiento del proyecto a lo largo del horizonte de evaluación, disminuyendo la probabilidad de inversión debido a los riesgos asociados con las incertidumbres.
- El tamaño de la nube de partículas es muy importante, puesto que determina el equilibrio entre la calidad de las soluciones obtenidas y el

número de iteraciones necesarias para alcanzar una buena solución en un bajo tiempo computacional. La determinación óptima del tamaño del enjambre y el número de iteraciones del algoritmo se ajustan en función de los resultados obtenidos en las simulaciones de cada escenario.

- La aplicación de la L1715 en proyectos de generación eléctrica con FER representa la mejor opción en el momento de invertir en este tipo de proyectos, debido a los beneficios que ofrece cuando se realiza la valoración económica, dado que los resultados obtenidos conllevan a indicadores económicos favorables y proyectos rentables.
- La aplicación del análisis multicriterio permite obtener una medida cuantitativa del desempeño de los métodos, donde los resultados obtenidos de la técnica AHP determinan que el MH tiene mejor desempeño que el FCD basado en los criterios de comparación.

Conclusiones generales y trabajos Futuros

Se presentan las conclusiones generales y los principales aportes de este trabajo a nivel académico.

Conclusiones generales

- Se comparó la valoración económica de un SGD evaluado por los métodos MH y FCD, esta se abordó desde la perspectiva económica y de desempeño y, se logró determinar que el MH es la mejor opción para realizar el proceso de valoración.
- Se formuló un método híbrido (MH) articulado con la técnica de optimización PSO y el método de valoración FCD, para valorar económicamente un SGD conformado por tecnologías FER. Se determinó la factibilidad de hibridar PSO y FCD para la valoración del sistema.
- Los indicadores económicos y las características de desempeño definidos como criterios de comparación en este trabajo, se obtuvieron con base en la literatura científica aplicada en el sector eléctrico.
- Se evaluó el MH frente al FCD desde el punto de vista económico mediante los resultados de los indicadores y, de desempeño con la técnica AHP basada en los criterios de comparación.
- La comparación de los métodos planteados en el presente trabajo se abordó desde la perspectiva económica y de las características de desempeño, basada en los indicadores económicos y los criterios de comparación respectivamente, para determinar la factibilidad de hibridar PSO con FCD para valorar económicamente un SGD.
- La consideración de la incertidumbre en las diferentes etapas de aplicación de las metodologías propuestas en este trabajo, permitió contrarrestar las debilidades que se han identificado en la aplicación de técnicas como el FCD. Se demostró, a través del caso de estudio, que técnicas como PSO y simulación de Montecarlo, contribuyen a obtener resultados más óptimos y confiables respectivamente en cada escenario evaluado.
- En la ubicación seleccionada las tecnologías (FV y HC) son viables por la disponibilidad de los recursos ambientales, pero como el objetivo del MH es la minimización de los costos totales del proyecto, las turbinas hidrocinéticas representaron la mejor opción debido a la generación continua durante las veinticuatro horas del día, mientras que los paneles solo generan durante las horas de radiación solar (6 a 8 horas diarias).

- La inclusión de tecnologías hidrocinéticas y fotovoltaicas en un SGD se presenta como una opción de diversidad, que emerge como una hibridación que se complementa entre sí desde el punto de vista de la fiabilidad de la generación eléctrica. Sin embargo, en este trabajo la elección de las tecnologías que conforman el SGD, se aborda desde el punto de vista económico, donde los bajos costos de equipos, la capacidad de generación, el potencial de las FER, entre otras, pueden determinar la opción más rentable.
- El enfoque desarrollado en este trabajo, que cubre desde la modelación de las variables estocásticas, el dimensionamiento del SGD, la articulación del método híbrido, la evaluación económica del sistema empleando dos métodos (MH y FCD) y, la posterior comparación de los mismos, todo esto enfocado a los SGD, ameritó la utilización de herramientas y técnicas complementarias que contribuyeron a la obtención de datos cuantificables y confiables. La articulación del método híbrido que además de tratar las incertidumbres de las FER, realiza la valoración económica del SGD basada en la optimización de los costos totales permitió la refinación del proceso en comparación al método FCD, mejorando los resultados y dando una visión clara al inversionista al momento de realizar la inversión.

Trabajos futuros

- Diseñar un método híbrido conformado por FCD y otra técnica meta-heurística como redes neuronales, algoritmos genéticos, colonia de hormigas, etc., para realizar la valoración económica del SGD objeto caso de estudio y, comparar el desempeño de los métodos de valoración.
- Realizar la valoración económica de un SGD, que realice tratamiento y modelación estocástica a todas las entradas del flujo de caja descontado, utilizando el método de monte Carlo u otras técnicas/métodos.
- Con el método híbrido (MH) propuesto, valorar económicamente un SGD conformado por distintas tecnologías de generación y para diferentes regiones del país, respecto a las establecidas en este trabajo.
- Diseñar un método híbrido que emplee otras técnicas de optimización como redes neuronales, búsqueda gravitacional, computación evolutiva, etc., para el pronóstico de los precios de la electricidad, consolidando un método con mayor índice de confiabilidad en los resultados al incluir el mayor número de incertidumbres en la valoración económica.
- Diseñar un sistema óptimo para la estrategia de conexión/desconexión del SGD, que realice la gestión y control de la importación y/o exportación de excedentes de energía con la red de distribución, en las horas pico y valle de la demanda.

Bibliografía

- A., R., & Al, A. (2016). Internet of things Role in the Renewable Energy Resources. *Energy Procedia Vol. 100*, 34-38.
- Anand, A., & Suganthi, L. (2017). Forecasting of Electricity Demand by Hybrid ANN-PSO Models. *International Journal of Energy Optimization and Engineering Vol. 6 Issue 4*.
- Bakos, G. (2011). Distributed power generation: A case study of small scale PV power plant in Greece. *Applied Energy 86*, 1757-1766.
- Baziar, A., & Kavousi-Fard, A. (2013). Considering uncertainty in the optimal energy management of renewable micro-grids including storage devices. *Renawabe Energy 59*, 158-166.
- Behrang, M., Assareh, E., Noghrehabadi, A., & Ghanbarzadeh, A. (2011). New sunshine-based models for predicting global solar radiation using PSO (particle swarm optimization) technique. *Energy Volume 36, Issue 5*, 3036-3049.
- Bensebaa, F. (2010). Solar based large scales power plants: what is the best option? *Progress in PHOTOVOLTAICS: Research and Applications 19, n° 2*, 240-246.
- Berumen, S. A., & Llamazares, F. (2007). La utilidad de los Métodos de Decisión Multicriterio (como el AHP) en un entorno de competitividad Creciente. *Cuadernos de Administración (Universidad Javeriana)*, 65-87.
- Besharat, F., & Dehghan, A. A. (2013). Empirical models for estimating global solar radiation: A review case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews(21)*, 798-821.
- Blackwood, D., & Kurka, T. (2013). election of MCA methods to support decision making for renewable energy developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews vol.27*, 225-233.
- Brezze, P. (2014). *Power Generation Technologies*. The boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford: Elsevier.
- Buitrago Arroyave, L. F., & López Lezama, J. M. (2013). Valoración de los impactos técnicos de la generación distribuida en sistemas de energía eléctrica. *Tecnura Vol.17 N°36*, 50-60.
- Cavazzini, G., Santolin, A., Pavesi, G., & Ardizzon, G. (2016). Accurate estimation model for small and micro hydropower plants costs in hybrid energy systems modelling. *Energy Vo.103*, 746-757.

- CEDENAR. (2015). *www.cedenar.com.co*. Obtenido de *www.cedenar.com.co*: <http://www.cedenar.com.co/index.php/productos-servicios/administracion-documental>
- CEO. (20 de Octubre de 2017). *www.energeticadeoccidente.com*. Obtenido de <http://www.energeticadeoccidente.com>: <http://www.energeticadeoccidente.com/downloads/tarifas/Oct2017.pdf>
- Cheng, S., Chen, M.-Y., & Fleming, P. (2015). Improved multi-objective particle swarm optimization with preference strategy for optimal DG integration into the distribution system. *Neurocomputing* 148, 9-23.
- Coello Coello, C. A., Van Veldhuizen, D. A., & Lamont, G. B. (2007). *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems*. Springer.
- Córdoba Padilla, M. (2013). *Formulación y Evaluación de Proyectos*. Bogota : ECOEDICIONES.
- Curaduría urbana, 1. (07 de 02 de 2013). *Curaduría urbana 1 municipio de popayán*. Obtenido de Curaduría urbana 1 municipio de popayán: www.curaduria1popayan.com
- de Cardona Ortín, M. S. (s.f.). Capítulo del libro "Fundamentos, dimensionado y de aplicaciones" . En M. S. de Cardona Ortín, *Fundamentos, dimensionado y de aplicaciones*. CIEMAT.
- Delgama, N., Sajadia, B., Kowsarya, F., & Delgarmb, S. (2016). Multi-objective optimization of the building energy performance: A simulation-based approach by means of particle swarm optimization (PSO). *Applied Energy* Vol. 170, 293-303.
- Fisher, I. (1907). *The Rate of Interest: Its Nature, Determination, and Relation to Economic Phenomena*. New York: The McMillan Company.
- Fu, X., Li, A., Wang, L., & Ji, C. (2011). Short-term scheduling of cascade reservoirs using an immune algorithm-based particle swarm optimization. *Computers and Mathematics with Applications*, 2463-2471.
- García Nieto, J. M. (2006). *Algoritmos basados en cúmulos de partículas para la resolución de problemas complejos*. Malaga, España.
- García, M. (2009). Métodos para la comparación de alternativa mediante un sistema de ayuda a la decisión (S.A.D) y "Soft computing". Tesis PhD. Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena .
- Gharavi, H., & Reza, G. (2011). Smart Grid: The Electric Energy System of the Future. *Proceedings of the IEEE*, 917-921.
- Gokarna R., A. (2013). Transmuted Log-Logistic Distribution. *Journal of Statistics Applications & Probability* 2 N°1, 11-20.

- Gómez-González, M., López, A., & Jurado, F. (2013). Hybrid discrete PSO and OPF approach for optimization of biomass fueled micro-scale energy system. *Energy Conversion and Management* 65, 539–545.
- Gonzales Chávez, S. (2014). pRONÓSTICO EFICIENTE DE LA DEMANDA DIARIA DEL SISTEMA ELECTRICO INTERCONECTADO DEL PERU MEDIANTE ANALISIS ESTOCASTICO ARIMA CON SUSCESOS EXTERNOS. *TECNIA Vol.24*, 88-98.
- Guney, M. S., & Kaygusuz, K. (2010). Hydrokinetic energy conversion systems: A technology status review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2996-3004.
- H. Moradi, M., Eskandari, M., & Showkati, H. (2014). A hybrid method for simultaneous optimization of DG capacity and operational strategy in microgrids utilizing renewable energy resources. *Electrical Power and Energy Systems* (56), 241-248.
- H. Moradi, M., Hajnazari, M., Jamasb, S., & Paripour, M. (2013). An energy management system (EMS) strategy for combined heat and power (CHP) systems based on a hybrid optimization method employing fuzzy programming. *Energy* 49, 86-101.
- Holdermann, C., Kissel, J., & Beigel, J. (2014). Distributed photovoltaic generation in Brazil: An economic viability analysis of small-scale photovoltaic systems in the residential and commercial sectors. *Energy Policy* 67, 612-617.
- Hossain, S., El-Shafie, A., & Mohtar, W. (2015). Application of intelligent optimization techniques and investigating the effect of reservoir size in calibrating the reservoir operating policy. *Water Policy*, 1143-1162.
- IDEAM. (2017). www.ideam.gov.co. Obtenido de www.ideam.gov.co: <http://visor.ideam.gov.co:8530/geovisor/#!/profiles/4>
- Illana, J. I. (Enero de 2013). *Universidad de Granada*. Obtenido de High energy theory group: <http://www.ugr.es/~jillana/Docencia/FM/mc.pdf>
- Ishaque, K., & Salam, Z. (2013). A Deterministic Particle Swarm Optimization Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic System Under Partial Shading Condition. *IEEE Transactions on Industrial Electronics Volume: 60, Issue: 8*, 3195-3206.
- Jamian, J., Mustafa, M., & Mokhlis, H. (2015). Optimal multiple distributed generation output through rank evolutionary particle swarm optimization. *Neurocomputing* (152), 190-198.
- Jamshid Mousavi, S., & Shourian, M. (2010). Adaptive sequentially space-filling metamodeling applied in optimal water quantity allocation at basin scale. *AGU Publications*.
- Jamshid, A., Muttaqi, K. M., Azizvahed, A., & Gitizadeh, M. (2014). Distribution expansion planning considering reliability and security of energy using

- modified PSO (Particle Swarm Optimization) algorithm. *Energy* 65, 398-411.
- Jiang, J., Wang, Zhang, You-Yin, Jing, C.-f., & Zheng, G.-Z. (2009). Review on Multicriteria decision analysis and in sustainable energy decision-making. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* vol.13 No.9, 2263-2278.
- Jiang, S., Ji, Z., & Shen, Y. (2014). A novel hybrid particle swarm optimization and gravitational search algorithm for solving economic emission load dispatch problems with various practical constraints. *Electrical Power and Energy Systems* 55 , 628–644.
- Jiekang, W., Jianquan, Z., Guotong, C., & Hongliang, Z. (2012). A Hybrid Method for Optimal Scheduling of Short-Term Electric Power Generation of Cascaded Hydroelectric Plants Based on Particle Swarm Optimization and Chance-Constrained Programming. *IEEE Transactions on Power Systems* (Volume: 23, Issue: 4), 1570-1579.
- Jordehi, A. R. (2016). Allocation of distributed generation units in electric power systems= A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Vol. 56, 893-905.
- Joredi, A. R. (2016). Allocation of distributed generation units in electric power systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 56 , 893–905.
- Kang, J. Y., Kang, D. W., Kim, T. S., & Hur, K. B. (2014). Comparative economic analysis of gas turbine-based power generation and combined heat and power systems using biogas fuel. *Energy* 67, 309-318.
- Kansal, S., Kumar, V., & Tyagi, B. (2016). Hybrid approach for optimal placement of multiple DGs of multiple types in distribution networks. *Electrical Power and Energy Systems* 75 (2016) 226–235, 226–235.
- Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995). Particle Swarm Optimization . *Purdue School of Engineering and Technology, IEEE*, 1942, 1948.
- khan, J., & Bhuyan, G. (2009). *Ocean energy: global technology development status*. Paris: Ocean Energy Systems, International Energy Agency (IEA-OES),.
- Mandal, K., & Chakraborty, N. (2012). Daily combined economic emission scheduling of hydrothermal systems with cascaded reservoirs using self organizing hierarchial particle swarm optimization technique. *Expert Systems with Applications* (39), 3438-3443.
- Marini, F., & Walczack, B. (2015). Particle swarm optimization (PSO). A tutorial. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* (149), 153-165.
- Mohan, N., Ananthapadmanabha, T., & Kulkarni, A. D. (2015). A Weighted Multi-objective Index Based Optimal Distributed Generation Planning in Distribution System. *Procedia Technology*, 279-286.

- Mohandes, M. (2012). Modeling global solar radiation using Particle Swarm Optimization (PSO) Volume 86 Issue 1. *Solar Energy*, 3137-3145.
- Monjas-Barroso, M., & Balibrea-Iniesta, J. (2013). Valuation of projects for power generation with renewable energy: A comparative study based on real regulatory options. *Energy Policy* (55), 335-352.
- Montoya-Bueno, S., Muñoz-Hernández, J., & Contreras, J. (2016). Uncertainty management of renewable distributed generation . *Journal of Cleaner Production Vol. 138 Part 1*, 103-118.
- Moradi, M. H., & Eskandari, M. (2014). A hybrid method for simultaneous optimization of DG capacity and operational strategy in microgrids considering uncertainty in electricity price forecasting. *Renewable Energy* 68, 697-714.
- Moradi, M., & Abedini, M. (2012). A combination of genetic algorithm and particle swarm optimization for optimal DG location and sizing in distribution systems. *Electrical Power and Energy Systems* 34, 66-74.
- Morán, F. A., Facchini, M. L., Pontoriero, D. H., & Doña, V. M. (2009). INSERCIÓN DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA A TRAVÉS DE INSTALACIONES FOTOVOLTAICAS DOMICILIARIAS AJUSTADAS A LAS CURVAS TÍPICAS DE DEMANDA RESIDENCIAL. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 13, 93-99.
- Mousavi, S. J., & Shourian, M. (2010). Capacity optimization of hydropower storage projects using particle swarm optimization algorithm. *Journal of Hydroinformatics vol. 12 no. 3*, 275-291.
- Nikman, T., Golestaneh, F., & Malekpour, A. (2012). Probabilistic energy and operation management of a microgrid containing wind/photovoltaic/fuel cell generation and energy storage devices based on point estimate method and self-adaptive gravitational search algorithm. *Energy* 43, 427-437.
- Parrales Vásquez, S. L., Vallejo Lozano, K. A., & Montealegre, J. (2011). Dimensionamiento de una instalación fotovoltaica de generación distribuida conectada a red para autoconsumo en un edificio de la administración pública en la provincia del Guayas y análisis de viabilidad técnica y económica. *ESPOL*.
- Parsopoulos, K. E., & Vrahatis, M. N. (2008). *Multi-Objective Particles Swarm Optimization Approaches*. IGI Global.
- Perpiñan Lamigueiro, O. (2015). *Energía Solar Fotovoltaica*. Creative Commons.
- Pless, J., Arent, D. J., Logan, J., Cochran, J., & Zinaman, O. (2016). Quantifying the value of investing in distributed natural gas and renewable electricity systems as complements: Applications of discounted cash flow and real options analysis with stochastic inputs. *Energy Policy* 97, 378-390.

- Ramírez Ramírez, J. D., Garcés Ruiz, A., & Arrieta Giraldo, J. S. (2016). Distribución óptima de turbinas en parques eólicos mediante PSO considerando el efecto sombra. *Tecnura Vol. 20 No 47*, 49-55.
- Ramos Mora, C. L. (2016). Análisis costo-beneficio de la implementación de las energías renovables no convencionales en la industria química. *Universidad Militar Nueva Granada*.
- Restrepo Garcés, Á. R. (2014). Valoración de un portafolio de fuentes de generación de energías renovables. Cali, Valle del Cauca, Colombia: Univalle.
- Restrepo-Garcés, A. R., Manotas-Duque, D. F., & Lozano, C. A. (2016). Portafolio para Auto-Generación de Electricidad con Fuentes Renovables en Edificios Comerciales. *Información Tecnológica Vol. 27*, 91-104.
- Reyes Sierra, M., & Coello Coello, C. A. (2006). Multi-Objective Particle Swarm Optimizers: A survey of the state-of-the-art. *International Journal of Computational Intelligence Research*, 287-308.
- Rezam Khorram, N., Aliasghar, B., & Abdollah Kavousi, F. (2013). A Novel Stochastic Framework for the Optimal Placement and Sizing of Distribution Static Compensator. *Scientific Research*, 90-98.
- Rodrigues, S., Chenb, X., & Morgado-Diasa, F. (2017). Economic analysis of photovoltaic systems for the residential market under China's new regulation. *Energy Policy 101*, 467–472.
- Saaty, T., & Vargas, L. (2001). *Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process.1.Vol 34*. New York: Springer.
- Saif, A., Pandi, V. R., Zeineldin, H., & Kennedy, S. (2013). Optimal allocation of distributed energy resources through simulation-based optimization. *Electric Power Systems Research Vol. 104*, 1-8.
- Sapag Chain, N., & Sapag Chain, R. (2008). *Preparación y evaluación de proyectos Quinta Edición*. Bogota: Mc Graw-Hill.
- Serrano, J. C. (2013). Comparación de métodos para determinar los parámetros de Weibull para la generación de energía eólica. *Scientia et Technica (Universidad Tecnológica de Pereira) 18 n°2*, 315-320.
- Syedmahmoudian, M., Mekhilef, S., Rahmani, R., Yusof, R., Shojaei, & Asghar, A. (2014). Maximum power point tracking of partial shaded photovoltaic array using an evolutionary algorithm: A particle swarm optimization technique. *Journal of Renewable and Sustainable Energy 6 Issue 2*.
- SMART HYDRO POWER. (2010). *SMART HYDRO POWER*. Obtenido de SMART HYDRO POWER: <http://www.smart-hydro.de/es/>
- Solanki, R., PATidar, N., & Chaturvedi, K. (2014). A New modified particle swarm Optimization (PSO) Technique for Non-Convex Economic Dispatch. *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE)*, 81-88.

- Spertino, F., Di Leo, P., & Cocina, V. (2013). Economic analysis of investment in the rooftop photovoltaic systems: A long-term research in the two main markets. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 28, 531-540.
- Su, S.-Y., Lu, C.-N., Chang, R.-F., & Gutierrez-Alcaraz, G. (2011). Distributed Generation Interconnection Planning: A Wind Power Case Study. *IEEE Transactions on Smart Grid Volume: 2, Issue: 1*, 181-189.
- Tiberu, C., Joseph, V., & Blanco, E. (2011). Multi-source energy systems analysis using a multi-criteria decision aid methodology. *Renewable Energy (Elsevier Ltd.) vol. 36*, 2245-2252.
- Twidell, J., & Weir, T. (2015). *Renewable Energy Resources Thir Edition*. London and New York: Routledge.
- UPME. (20 de Noviembre de 2017). Obtenido de <http://www1.upme.gov.co/Paginas/Energias-renovables.aspx>
- Vélez-Pereira, A., Vergara, E., Barraza, W., & Agudelo, D. (2013). Determinación de un modelo paramétrico para estimar la radiación solar. *Ingenium* 7 (18), 11-17.
- Wang, W., Xu, D., Chau, K., & Chen, S. (2013). Improved annual rainfall-runoff forecasting using PSO–SVM model based on EEMD. *Journal of Hydroinformatics Vol. 15 Issue 4*, 1377-1390.
- Xia, N., Zou, P., Liu, X., Wang, X., & Zhu, R. (2018). A hybrid BN-HFACS model for predicting safety performance in constructions projects. *Safety Science*, 332-343.
- XM. (17 de Octubre de 2017). www.xm.com.co. Obtenido de www.xm.com.co: <http://www.xm.com.co/Paginas/Informes.aspx>
- Yang, M., & Blyth, W. (2007). *Modeling Investment Riks and Uncertainties with Real Options Approach*. Paris: OECD.
- Yi Su, C., Lu, C.-N., Shang, R.-F., & Gutierrez-Alcaraz, G. (2011). Distributed Generation Interconnection Planning: A wind Power Case Study. *IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID vol.2 No.1*, 181-189.
- Yun, Y., Shijie, Z., & Yunhan, X. (2017). Optimal design of distributed energy resource systems based on two-stage stochastic programming. *Applied Thermal Engenieering Vol. 110*, 1358-1370.
- Zhang, F., Deng, H., Margolis, R., & Su, J. (2015). Analysis of distributed-generation photovoltaic deployment, installation time and cost, market barriers, and policies in China. *Energy Policy* 81, 43-55.

Anexo A

Parámetros determinísticos para el cálculo del FCD

Los siguientes valores son considerados para el cálculo del FCD.

Entrada	Valor	Observación	Fuente
Retención en la fuente	34%	Impuesto de la legislación colombiana	(DIAN2016)
IPC	5.75%	Inflación	(DIAN(2016))
Tasa de descuento	9.8%	Según la legislación colombiana para proyectos de generación de electricidad se encuentra entre el 8% y 10%.	(CREG 2014)
Impuesto al valor agregado	19%	Impuesto sobre las compras	Ley 1819 de 2016 (Congreso de la república de Colombia 2016)
Periodo de depreciación	10 y 5	5 para los escenarios donde se aplica la ley 1715	Ley 1715 de 2014 (Congreso de la República de Colombia 2014)
Descuento al impuesto de la renta	50%	Beneficio de la ley 1715 que se aplica durante los cinco primeros años.	Ley 1715 de 2014 (Congreso de la República de Colombia 2014)
Costos de operación y mantenimiento	0.4%	Monto que se considera fijo durante los diez años	(Bensebaa, 2010)
Tarifa de sustitución	Tc	Igual a precio promedio de los contratos	(Restrepo Garcés, 2014)
Tarifa de exportación	Tv	Igual al precio promedio del kW en el mercado.	(Restrepo Garcés, 2014)
Horizonte evaluación	10		

Tabla A. 1. Valores para la inicialización del FCD

Anexo B

Beneficios de la aplicación de la ley 1715 de 2014

Los beneficios que se adquieren al adoptar la ley 1715 de 2014 en un PGD, se exhiben a continuación:

- Deducción especial en el impuesto de la renta.
- Depreciación acelerada de los activos en las inversiones realizadas en el impuesto de renta.
- Exclusión de IVA
- Exclusión de arancel

Deducción especial en el impuesto a la renta

Artículo 11. Incentivos a la generación de energías no convencionales.

Como fomento a la investigación, desarrollo e inversión en el ámbito de la producción y utilización de energía a partir de FNCE, la gestión eficiente de la energía, los obligados a declarar renta que realicen directamente inversiones en este sentido, tendrán derecho a reducir anualmente de su renta, por los 5 años siguientes al año gravable en que hayan realizado la inversión, el cincuenta por ciento (50%) del valor total de la inversión realizada.

El valor a deducir por este concepto, en ningún caso podrá ser superior al 50% de la renta líquida del contribuyente determinado antes de restar el valor de la inversión.

Exclusión de IVA

Artículo 12 Instrumentos para la promoción de las FNCE. Incentivo tributario IVA.

Para fomentar el uso de la energía procedente de FNCE, los equipos, elementos, maquinaria y servicios nacionales o importados que se destinen a la preinversión e inversión, para la producción y utilización de energía a partir de las fuentes no convencionales, así como para la medición y evaluación de los potenciales recursos estarán excluidos de IVA.

Exclusión de arancel

Artículo 13. Instrumentos para la promoción de las energías renovables. Incentivo arancelario.

Las personas naturales o jurídicas que a partir de la vigencia de la presente ley sean titulares de nuevas inversiones en nuevos proyectos de FNCE gozarán de

exención del pago de los Derechos Arancelarios de Importación de maquinaria, equipos, materiales e insumos destinados exclusivamente para labores de pre inversión y de inversión de proyectos con dichas fuentes. Este beneficio arancelario será aplicable y recaerá sobre maquinaria, equipos, materiales e insumos que no sean producidos por la industria nacional y su único medio de adquisición esté sujeto a la importación de los mismos.

Depreciación acelerada

Artículo 14. Instrumentos para la promoción de las FNCE. Incentivo contable depreciación acelerada de activos. La actividad de generación a partir de FNCE, gozará del régimen de depreciación acelerada.

La depreciación acelerada será aplicable a las maquinarias, equipos y obras civiles necesarias para la pre inversión, inversión y operación de la generación con FNCE, que sean adquiridos y/o construidos, exclusivamente para ese fin, a partir de la vigencia de la presente ley. Para estos efectos, la tasa anual de depreciación será no mayor de veinte por ciento (20%) como tasa global anual. La tasa podrá ser variada anualmente por el titular del proyecto, previa comunicación a la DIAN, sin exceder el límite señalado en este artículo, excepto en los casos en que la ley autorice porcentajes globales mayores.

Anexo C

Topología de un Sistema conectado a la red

Sistema Fotovoltaico conectado a red (SFCR):

Para el diseño técnico de una instalación fotovoltaica se toman en consideración la demanda de energía que se quiere suplir como principal factor para la elección de los elementos eléctricos que conforman el SGD.

El diseño de un SGD conformado por paneles solares se realiza basado en las siguientes ecuaciones que determinan la disposición del número de paneles en serie y paralelo por modulo necesarios para cumplir la demanda energética requerida, además del número de inversores y reguladores requeridos para el diseño de la instalación.

Según (Perpiñan Lamigueiro, 2015) y (Twidell & Weir, 2015), para el cálculo del número de paneles en serie hay que realizar tres comprobaciones:

$$\bullet \quad V_{max}(T_{min}) = V_{mp} \cdot N_s(1 + \alpha \cdot (T_{min} - T_{amb})) \quad (11)$$

$$\bullet \quad V_{max}(T_{max}) = V_{mp} \cdot N_s(1 + \alpha \cdot (T_{max} - T_{amb})) \quad (12)$$

$$\bullet \quad V_{oc}(T_{min}) = V_{oc} \cdot N_s(1 + \alpha \cdot (T_{min} - T_{amb})) \quad (13)$$

Siendo:

- V_{mp} : tensión óptima de operación del panel en condiciones estándar
- V_{oc} : tensión en circuito abierto del panel
- N_s : número de paneles en serie
- T_{min} : temperatura mínima de los paneles
- T_{max} : temperatura máxima de los paneles
- T_{amb} : temperatura ambiente de los paneles en condiciones estándar

En función del cumplimiento de estas tres ecuaciones se obtiene el número de paneles en serie de la instalación fotovoltaica.

Para calcular el número de módulos máximo en paralelo ($N_{p \max}$) también hay que tener en cuenta la temperatura. En este caso la restricción viene dada por la corriente continua máxima admisible por el inversor.

$$I_{sc}(T_{max}) = I_{sc} \cdot N_{p \max} (1 + \beta \cdot (T_{max} - T_{min})) \quad (14)$$

De donde obtenemos:

$$N_{p \max} = \frac{I_{sc}(T_{max})}{I_{sc} \cdot (1 + \beta \cdot (T_{max} - T_{min}))} \quad (15)$$

Para este método, el margen de seguridad establecido es de 10 A (por lo que $I_{sc}(T_{max})$ debe considerar con una reducción de 10A para el desarrollo de los cálculos).

Una vez calculado el número máximo de módulos en paralelo del sistema FV, se calcula el número exacto de ramas en paralelo a partir de la ecuación:

Número de módulos en paralelo:

$$N_{p \max} = \frac{Nm}{Ns} \quad (16)$$

Donde Nm , número total de paneles del sistema fotovoltaico y Ns número de módulos en serie del sistema.

Para un adecuado diseño de la instalación fotovoltaica hay que realizar algunos cálculos adicionales acorde a las siguientes ecuaciones:

$$NI = \frac{DD * CA * (1 + CS)}{PI} \quad (17)$$

La ecuación NI se aplica para realizar el cálculo del número de inversores necesarios para la instalación fotovoltaica, donde DD, es la demanda diaria en watts, CA es el porcentaje de corriente alterna del sistema, CS es el coeficiente de seguridad que se aplica a este tipo de sistemas, PI es la potencia que soporta el inversor.

$$NR = \frac{I_{sc} * Nm * CC}{I_r} \quad (18)$$

La ecuación NR, se aplica al diseño de sistemas fotovoltaicos para el cálculo del número de reguladores de la instalación, donde I_{sc} es la corriente en corto circuito del panel solar, Nm es el número de paneles del sistema, CC es el coeficiente de corrección del regulador, I_r es la corriente del regulador.

Un SGD se conforma de variados elementos eléctricos que lo componen, los cuales son la base para su dimensionamiento, a partir de las características eléctricas de los elementos se realizan los cálculos necesarios, tanto para la el SGD conformado por paneles solares como para el SGD conformado por turbinas hidrocínéticas, para cumplir con la demanda de potencia de la instalación.

Con el fin de dar claridad sobre los elementos que conforman el SGD en este ítem se conceptualiza sobre los equipos que constituyen la instalación solar fotovoltaica e hidrocínética.

Modulo fotovoltaico

Las características eléctricas de una célula solar no son suficientes para alimentar las cargas convencionales. Es necesario realizar agrupaciones en serie y paralelo para entregar tensión y corriente adecuadas. Un módulo fotovoltaico es una asociación de células que convierten la radiación solar en electricidad, a las que protege físicamente de la intemperie y aísla eléctricamente del exterior, dando rigidez mecánica al conjunto. Existen multitud de módulos diferentes, tanto por su configuración eléctrica como por sus características estructurales y estéticas. (Perpiñan Lamigueiro, 2015).

Generador Fotovoltaico

Un generador fotovoltaico es una asociación eléctrica de módulos fotovoltaicos para adaptarse a las condiciones de funcionamiento de una aplicación determinada. Se compone de un total de $N_p \cdot N_s$ módulos, siendo N_p el número de ramas y N_s el número de módulos en cada serie. El número de ramas define la corriente total del generador, $I_g = N_p \cdot I_m$, y el número de módulos por serie define la tensión del generador, $V_g = N_s \cdot V_m$. La muestra un generador fotovoltaico compuesto por 2 ramas de 3 módulos en serie (Twidell & Weir, 2015) y (Perpiñan Lamigueiro, 2015).

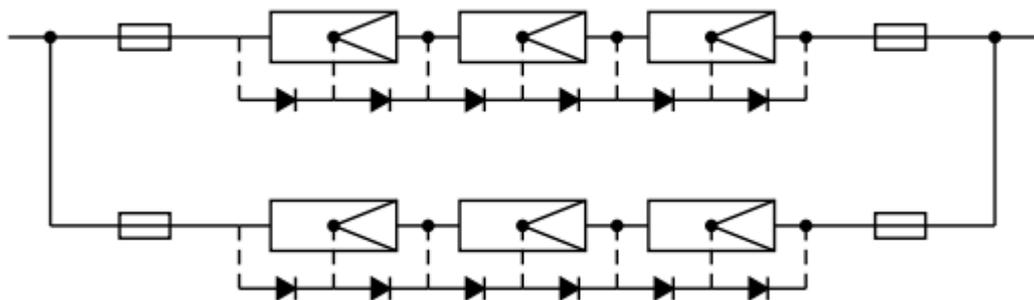


Ilustración 1, Esquema de un generador fotovoltaico compuesto por dos ramas en paralelo de 3 módulos en serie, fuente: (Perpiñan Lamigueiro, 2015).

Batería

Una batería es un acumulador electroquímico, capaz de almacenar energía eléctrica mediante una transformación en energía electroquímica. Es capaz de dar autonomía al sistema fotovoltaico al satisfacer los requerimientos de consumo en cualquier momento, independientemente de la generación. También contribuye al buen funcionamiento del sistema al aportar picos de intensidad superiores a los que proporciona el generador FV y al estabilizar el voltaje del sistema, evitando fluctuaciones dañinas en los equipos de consumo (Perpiñan Lamigueiro, 2015).

Regulador de carga

El regulador de carga es un dispositivo que permite al panel solar entregar su carga a la batería. El regulador también permite conectar la batería a la carga o aplicación en uso.

La necesidad de montar un controlador o regulador está dada porque un panel solar entrega electricidad durante las horas de luz día, pero durante la noche, el panel se transforma en una resistencia que consume electricidad. Si un panel se conecta directamente a las baterías consume parte de la energía que entregó durante el día. El regulador previene este consumo innecesario y también evita la sobrecarga o aplicación de tensión excesiva a las baterías cuando estén totalmente cargadas (Perpiñan Lamigueiro, 2015).

Inversor de tensión

La señal de potencia suministrada por un generador fotovoltaico iluminado es en tensión continua, que debe ser acondicionada para permitir el correcto acoplamiento a la red eléctrica. El equipo de acondicionamiento de potencia, denominado inversor DC/AC, realiza la conversión de continua a alterna cumpliendo con determinados requisitos de tensión eficaz, frecuencia, distorsión armónica de las ondas de tensión y corriente, eficiencia y rendimiento, seguridad eléctrica, etc. (Twidell & Weir, 2015) y (Perpiñan Lamigueiro, 2015).

Sistema hidrocínético conectado a red (SHCR):

El dimensionamiento de la instalación conformada por turbinas hidrocínicas presenta la estructura como se muestra en la Figura 26. Esquema de diseño de un SGD con turbinas hidrocínicas conectado a la red, fuente: Smart Hydro Power Figura 26.

Sistema de gestión de energía Smart de las turbinas hidrocinéticas

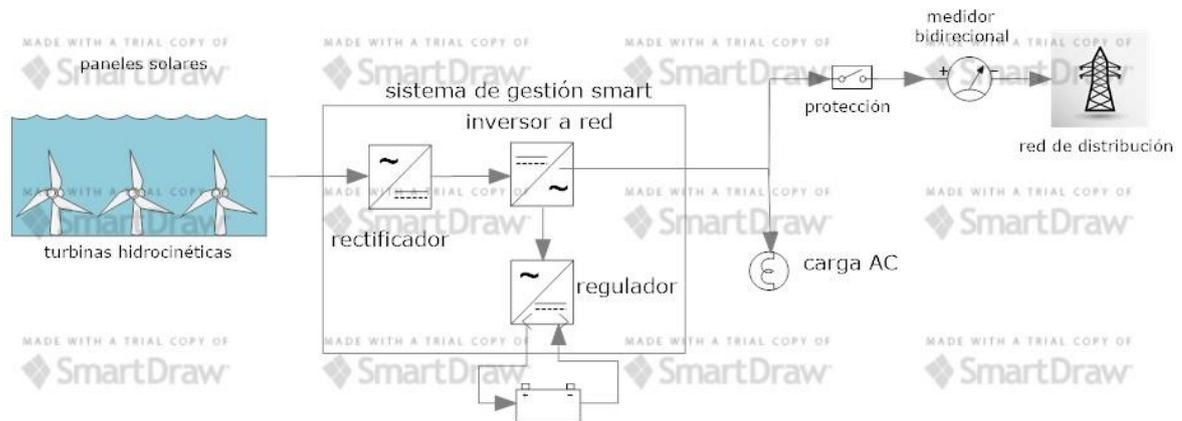


Figura 26. Esquema de diseño de un SGD con turbinas hidrocinéticas conectado a la red, fuente: Smart Hydro Power

Turbinas hidrocinéticas

La turbina hidrocinética, es una turbina diseñada para generar electricidad, utilizando solamente la energía cinética de la corriente de agua en los ríos. Las turbinas de río funcionan básicamente como un molino de viento sumergido en el agua. Aprovechan la energía cinética de los ríos para transformarla en electricidad o fuerza mecánica. Estos equipos, a diferencia de las usuales turbinas hidráulicas que utilizan la energía potencial del agua por diferencia de alturas, aprovechan la velocidad del agua en relieves planos. Este uso de la energía cinética es calificado como una alternativa o forma no convencional para generar electricidad, que emplea una FER. La mayoría de los principios de esta clase de turbinas son derivados de las turbinas de viento porque su operación es similar (Twidell & Weir, 2015).

El sistema de gestión de energía es el cerebro del sistema de energía renovable con turbinas hidrocinéticas. Maximiza la eficiencia de su uso mediante la regularización del abastecimiento de la energía según vayan cambiando las necesidades del usuario. El sistema de gestión de carga patentado y desarrollado para el SMART Hydro Power, permite establecer prioridad de cargas de acuerdo con el perfil de uso, optimizando el consumo de energía.



El sistema de gestión de energía está conformado por los siguientes elementos eléctricos:

- **Rectificador**

Rectifica la corriente alterna de la turbina hidrocínética a un voltaje variable de corriente continua. Aplica la dump load resistiva externa cuando la tensión CC supera los 500 V CC.

- **Inversor de conexión a red**

Acepta entradas en CC del rectificador y del conjunto fotovoltaico. Esto se convierte a 230 V AC y debe sincronizar con una red 230 V AC existente. Sincronizará con el inversor no conectado a la red, de estar presente.

- **Inversor no conectado a la red**

Regula la potencia hacia y desde las baterías. Crea una red estable a 230 V AC que el inversor conectado a la red sincroniza. Si el sistema en su conjunto no produce suficiente energía para la carga conectada, la energía es suministrada por un generador de respaldo que se activa automáticamente o de una red eléctrica de respaldo.

- **Componente conectado a la red**

Realiza el suministro del relé de seguridad y el control de mantenimiento de la turbina, además monitorea: energía, potencia voltaje en línea y tiene un control del inversor conectado a la red.

- **Monitoreo**

(GPRS, Wi-fi, Ethernet) Monitorea: energía, potencia y voltaje en línea y tiene un control del inversor.

Anexo D

Características técnicas de los equipos

En la Tabla D. 1 se presentan los costos de los equipos que conforman el SGD:

SGD	Equipo	Costo unitario (COP)	Fuente
Sistema fotovoltaico	Panel Solar World Sun module SW 340W XL Mono	846.000	http://webosolar.com/store/es/panel-solar-interconexion/1899-panel-solar-solarworld-sunmodule-sw-340w-xl-mono.html
	Inversor Red 15000W Trifásico INGECON Sun 3PLAY 15TL	10'743.000	https://autosolar.es/inversores-de-red-trifasicos/inversor-red-15000w-trifasico-ingecon-sun-3play-15tl
	Regulador MPPT-80 A Schneider Xantrex	1'700.563	https://autosolar.es/reguladores-de-carga-mppt/regulador-mppt-80-a-schneider-xantrex
	Caja de conexión	6.750	https://autosolar.es/
	Batería Estacionaria 1700Ah 2V UP-GC42 2RE	1'332.140,51	https://autosolar.es/baterias-solares-2v/bateria-estacionaria-1700ah-2v-up-gc42-2re
	Medidor bidireccional trifásico net billing	1'001.186	http://www.aquitosolar.cl/medidores-energia-solar/632-EL14D3FB.html
Sistema hidrocinético	Sistema de gestión conectado a la red	11'359.821	http://www.smart-hydro.de/es/sistemas-de-energia-renovable/sistemas-de-gestion-de-energia/
	Turbina monofloat	50'805.578	http://www.smart-hydro.de/es/sistemas-de-energia-renovable/turbinas-para-rios-y-canales/
	Sistemas de boyas y anclaje	958.267	http://www.smart-hydro.de/es/sistemas-de-energia-renovable/servicios-auxiliares-analisis-de-sitios/
	Sistema OFF/GRID fuera de red	30'141.855	http://www.smart-hydro.de/es/sistemas-de-energia-renovable/sistemas-de-gestion-de-energia/

Tabla D. 1. Costos unitarios de los equipos del SGD.

Anexo E

Parámetros de inicialización del MH

Entrada	Tipo	Valor / fuente
Análisis económico	Impuestos	Anexo A.
	Precios mano de obra	Anexo A.
	Costo equipos	Anexo D.
	Operación y Mantenimiento	Anexo A.
	Importación de energía	Anexo A.
	Exportación de energía	Anexo A.
	Horizonte evaluación	10
Generación Hidrocinética	Área de barrido	3,1416 m.
	Radio	1 m.
	Densidad del agua	1000 kg/m ²
	Límite de Betz (k)	20 %
	Velocidad del agua	Simulación Montecarlo
Generación Fotovoltaica	Potencia nominal	Anexo D.
	Eficiencia	Anexo D.
	HSP	Simulación Montecarlo
Dimensionamiento	Demanda sistema sin almacenamiento	7'754.159,3 kW/año
	Demanda sistema con almacenamiento	9'906.886,6 kW/año
Inicialización	Tamaño de enjambre (partículas)	300
	Número iteraciones	200
	Factor de corrección	1
	Inercia máxima	1
	Inercia mínima	0,6

Tabla E. 1. Parámetros de inicialización del MH

Proceso analítico jerárquico (AHP)

F.1 Análisis grupal

Cuando la evaluación es realizada en grupo (como es el caso de este proyecto), es decir, hay un conjunto de individuos que influyen en el proceso de decisión, se requiere definir una solución única que represente las posiciones del grupo. Para obtener la matriz (W) del grupo, se aplica la media geométrica [Ecuación (1)]; se ha comprobado que calcular la media geométrica de las valoraciones es un procedimiento aceptable, sencillo y rápido; además cumple las condiciones de simetría y de homogeneidad lineal (García, 2009):

$$\bar{X} = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n X_i} \quad (\text{F.1})$$

Para el caso de estudio se tiene una matriz simétrica del tipo

$$C = \begin{bmatrix} 1 & c_{12} & \dots & c_{1j} \\ 1/c_{21} & 1 & \dots & c_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/c_{i1} & 1/c_{i2} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{F.2})$$

Siendo C la matriz de comparación por pares de los criterios según el juicio de los evaluadores (ingenieros físicos, eléctricos, automáticos, electrónicos y de sistemas de la Universidad del Cauca); [$C_1, C_2 \dots C_n$] son los criterios de comparación, ej: flexibilidad, optimización, etc. y, C_{ij} un número que nos proporciona el resultado de la comparación de entre sí en la posición i, j .

En el paso siguiente a la agregación, se calcula el peso de la matriz resultante, para lo cual se utiliza el vector de pesos de la matriz simétrica por el método de la media geométrica. Tenemos, por consiguiente:

$$V_i = (c_{i1} * c_{i2} * \dots * c_{ij})^{\frac{1}{n}} \quad (\text{F.3})$$

Donde V_i es el vector conformado por el valor de cada uno de los criterios (c_n) de la posición (ij), obtenidos de cada matriz de comparación y, n representa el número de matrices (o evaluadores) de comparación. Cuando se obtiene la matriz de grupo, se calcula el vector de pesos de la matriz (\vec{w}).

El vector de pesos de la matriz es el cálculo de la media geométrica normalizada, que consiste en elevar la matriz de comparaciones pareadas a

potencias sucesivas, sumar las filas y, normalizar, de forma que la fila sea la unidad. De este modo, los vectores convergen en función de la precisión en decimales que se desee.

Una vez calculada la matriz del grupo W y el vector de pesos (\vec{w}), se requiere que las comparaciones por pares de la matriz grupal arrojen resultados adecuados; hay varias formas de detectar la inconsistencia de la matriz y, medir la consistencia de los juicios emitidos. Una consiste en resolver, tras construir la matriz W , la ecuación:

$$\lambda = \frac{W \cdot \vec{w}}{w_n} \tag{F.4}$$

Donde λ_{max} es denominado lambda y, es el valor máximo que se obtenga del producto de la matriz grupal W y el vector \vec{w} , el cual es dividido entre cada uno de los valores (w_n) que conforman \vec{w} . La mayor consistencia de los juicios se presenta si hay proximidad de λ_{max} a n , siendo n la dimensión de la matriz grupal.

No es posible obtener siempre una coherencia total de los juicios, que λ_{max} sea igual a n . Esto se debe, tanto al propio decisor, como a la escala de valoración, lo que hace necesario construir una función para medir la consistencia de los juicios. La consistencia se puede medir mediante el índice de consistencia (IC), que tiene la siguiente expresión:

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \tag{F.5}$$

Donde λ_{max} se obtiene de la ecuación anterior y n es el tamaño de la matriz.

El resultado de IC se compara con el dato de la tabla 2, que representa el índice de consistencia aleatorio (IA) en función de la matriz n . Del cálculo del cociente entre el IC y el IA , se obtiene el ratio de consistencia (RC).

$$RC = \frac{IC}{IA} \tag{F.6}$$

Si el valor obtenido es ≤ 0.10 , se acepta la consistencia de la matriz y, el auto-vector de pesos se admite como válido. (Saaty & Vargas, 2001) proponen los siguientes valores umbrales: 0,05 y 0,08 para $n=3$ y $n=4$ respectivamente. Para $n \geq 5$, si RC es mayor que 0,10 excede el umbral, caso en el cual, el juicio de la matriz W debe ser revisado.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
IA	0	0	0	0.52	0.89	1.11	1.25	1.40	1.45	1.49	1.51	1.54

Tabla E. 2. Valores de consistencia aleatorio. Con base en (Saaty & Vargas, 2001)

Si IA es menor que un valor umbral, entonces se puede considerar que la matriz tiene una consistencia aceptable, y las prioridades derivadas de la matriz de comparación son significativas.

Obteniendo el vector de prioridades $\vec{w} = [w_1, w_2, \dots, w_n]$, se analizan los resultados y se establece definitivamente el vector \vec{w} .

F.2 Encuesta

Título: Encuesta para asignación de pesos a los criterios de comparación entre dos métodos de valoración económica.

Proyecto: Valoración económica de un SGD mediante un método híbrido objeto caso de estudio.

Director: Dr. Álvaro Rene Restrepo Garcés

Estudiantes: Sergio Andrés Hoyos y Luis Miguel Castillo

Contextualización:

El proyecto realiza la valoración económica de un sistema de generación distribuida empleando los métodos: flujo de caja descontado y un híbrido entre la técnica de optimización por enjambre de partículas y flujo de caja descontado, con la siguiente encuesta se busca determinar los pesos para los criterios de comparación entre los métodos, haciendo uso del análisis multicriterio y la técnica AHP.

Criterios

- **Flexibilidad:** Capacidad para adaptarse a diversas circunstancias o para acomodar las normas a distintas situaciones o necesidades.
- **Confiabilidad:** Es la probabilidad de obtener datos más cercanos a valores reales.
- **Optimalidad:** Capacidad de obtener una respuesta cercana al mínimo global.
- **Recursos computacionales:** Carga computacional requerida para la ejecución de los métodos.

Diligenciar la siguiente encuesta asignando un valor numérico a cada una de las celdas de la matriz de acuerdo con la información presenté en la Tabla 1. Escala de Saaty,

Encuesta

Criterio (i) \ Criterio (j)	Flexibilidad	Confiabilidad	Optimalidad	Recurso computacional
Flexibilidad	1	-----	-----	-----
Confiabilidad		1	-----	-----
Optimalidad			1	-----
Recurso Computacional				1

Escala numérica	Escala verbal
1	El criterio i y el criterio j son igualmente importantes
3	El criterio i es ligeramente más importante que j
5	El criterio i es fuertemente más importante que j
7	El criterio i está demostradamente más fuerte que j
9	El criterio es absolutamente más importante que j.
2,4,6,8	Valores intermedios entre dos juicios adyacente, usados como valores de consenso entre dos juicios
2	Entre igualmente y moderadamente preferible
4	Entre moderadamente y fuertemente preferible
6	Entre fuertemente y extremadamente preferible
8	Entre muy fuertemente preferible y extremadamente preferible

Tabla E. 3. Escala de Saaty.

Considera su nivel de conocimiento en sistemas de generación distribuida, técnicas de optimización y análisis multicriterio: Alto___ Medio___ Bajo___

Nombre:
Cargo:
Entidad:
Profesión:
Email:

Firma: _____

Título: Encuesta para asignación de pesos a los criterios de comparación entre dos métodos de valoración económica.

Proyecto: Valoración económica de un SGD mediante un método híbrido objeto caso de estudio.

Director: Dr. Álvaro Rene Restrepo Garcés

Estudiantes: Sergio Andrés Hoyos y Luis Miguel Castillo

Contextualización:

El proyecto realiza la valoración económica de un sistema de generación distribuida empleando los métodos: flujo de caja descontado y un híbrido entre la técnica de optimización por enjambre de partículas y flujo de caja descontado, con la siguiente encuesta se busca determinar los pesos para los criterios de comparación entre los métodos, haciendo uso del análisis multicriterio y la técnica AHP.

Criterios

- **Flexibilidad:** Capacidad para adaptarse a diversas circunstancias o para acomodar las normas a distintas situaciones o necesidades.
- **Confiabilidad:** Es la probabilidad de obtener datos más cercanos a valores reales.
- **Optimalidad:** Capacidad de obtener una respuesta cercana al mínimo global.
- **Recursos computacionales:** Carga computacional requerida para la implementación y ejecución de los métodos.

Diligenciar la siguiente encuesta asignando un valor numérico a cada una de las celdas de la matriz de acuerdo a la información presenté en la Tabla 1. Escala de Saaty,

Encuesta : 2

Criterio (i) \ Criterio (j)	Flexibilidad	Confiabilidad	Optimalidad	Recurso computacional
Flexibilidad	1	-----	-----	-----
Confiabilidad	1/4	1	-----	-----
Optimalidad	1/2	4	1	-----
Recurso Computacional	7	5	2	1

Tabla 1. Escala de Saaty

Escala numérica	Escala verbal
1	El criterio i y el criterio j son igualmente importantes
3	El criterio i es ligeramente más importante que j
5	El criterio i es fuertemente más importante que j
7	El criterio i está demostradamente más fuerte que j
9	El criterio es absolutamente más importante que j.
2,4,6,8	Valores intermedios entre dos juicios adyacente, usados como valores de consenso entre dos juicios
2	Entre igualmente y moderadamente preferible
4	Entre moderadamente y fuertemente preferible
6	Entre fuertemente y extremadamente preferible
8	Entre muy fuertemente preferible y extremadamente preferible

Considera su nivel de conocimiento en sistemas de generación distribuida, técnicas de optimización y análisis multicriterio: Alto ___ Medio Bajo ___

Nombre: Julio Ariel Hurtado
 Cargo: Profesor Titular FIE T
 Entidad: Unicauca
 Profesión: Ing. Electrónica y Telecom.
 Email: jhurtado@unicauca.edu.co

Firma: 

Título: Encuesta para asignación de pesos a los criterios de comparación entre dos métodos de valoración económica.

Proyecto: Valoración económica de un SGD mediante un método híbrido objeto caso de estudio.

Director: Dr. Álvaro Rene Restrepo Garcés

Estudiantes: Sergio Andrés Hoyos y Luis Miguel Castillo

Contextualización:

El proyecto realiza la valoración económica de un sistema de generación distribuida empleando los métodos: flujo de caja descontado y un híbrido entre la técnica de optimización por enjambre de partículas y flujo de caja descontado, con la siguiente encuesta se busca determinar los pesos para los criterios de comparación entre los métodos, haciendo uso del análisis multicriterio y la técnica AHP.

Criterios

- **Flexibilidad:** Capacidad para adaptarse a diversas circunstancias o para acomodar las normas a distintas situaciones o necesidades.
- **Confiabilidad:** Es la probabilidad de obtener datos más cercanos a valores reales.
- **Optimalidad:** Capacidad de obtener una respuesta cercana al mínimo global.
- **Recursos computacionales:** Carga computacional requerida para la implementación y ejecución de los métodos.

Diligenciar la siguiente encuesta asignando un valor numérico a cada una de las celdas de la matriz de acuerdo a la información presenté en la Tabla 1. Escala de Saaty,

Encuesta : **3**

Criterio (i) \ Criterio (j)	Flexibilidad	Confiabilidad	Optimalidad	Recurso computacional
Flexibilidad	1	-----	-----	-----
Confiabilidad	1/3	1	-----	-----
Optimalidad	1/3	3	1	-----
Recurso Computacional	1/3	5	3	1

Tabla 1. Escala de Saaty

Escala numérica	Escala verbal
1	El criterio i y el criterio j son igualmente importantes
3	El criterio i es ligeramente más importante que j
5	El criterio i es fuertemente más importante que j
7	El criterio i está demostradamente más fuerte que j
9	El criterio es absolutamente más importante que j.
2,4,6,8	Valores intermedios entre dos juicios adyacente, usados como valores de consenso entre dos juicios
2	Entre igualmente y moderadamente preferible
4	Entre moderadamente y fuertemente preferible
6	Entre fuertemente y extremadamente preferible
8	Entre muy fuertemente preferible y extremadamente preferible

Considera su nivel de conocimiento en sistemas de generación distribuida, técnicas de optimización y análisis multicriterio: Alto ___ Medio ___ Bajo X

Nombre: Libardo Pantoja y
 Cargo: Docente
 Entidad: Unicauca
 Profesión: Ing. Systems
 Email: wpantoja@un--

Firma: Libardo Pantoja y

Título: Encuesta para asignación de pesos a los criterios de comparación entre dos métodos de valoración económica.

Proyecto: Valoración económica de un SGD mediante un método híbrido objeto caso de estudio.

Director: Dr. Álvaro Rene Restrepo Garcés

Estudiantes: Sergio Andrés Hoyos y Luis Miguel Castillo

Contextualización:

El proyecto realiza la valoración económica de un sistema de generación distribuida empleando los métodos: flujo de caja descontado y un híbrido entre la técnica de optimización por enjambre de partículas y flujo de caja descontado, con la siguiente encuesta se busca determinar los pesos para los criterios de comparación entre los métodos, haciendo uso del análisis multicriterio y la técnica AHP.

Criterios

- **Flexibilidad:** Capacidad para adaptarse a diversas circunstancias o para acomodar las normas a distintas situaciones o necesidades.
- **Confiabilidad:** Es la probabilidad de obtener datos más cercanos a valores reales.
- **Optimalidad:** Capacidad de obtener una respuesta cercana al mínimo global.
- **Recursos computacionales:** Carga computacional requerida para la implementación y ejecución de los métodos.

Diligenciar la siguiente encuesta asignando un valor numérico a cada una de las celdas de la matriz de acuerdo a la información presenté en la Tabla 1. Escala de Saaty,

Encuesta

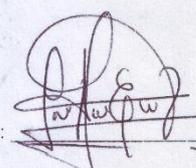
Criterio (i) \ Criterio (j)	Flexibilidad	Confiabilidad	Optimalidad	Recurso computacional
Flexibilidad	1	-----	-----	-----
Confiabilidad	1/7	1	-----	-----
Optimalidad	3	5	1	-----
Recurso Computacional	2	5	3	1

Tabla 1. Escala de Saaty

Escala numérica	Escala verbal
1	El criterio i y el criterio j son igualmente importantes
3	El criterio i es ligeramente más importante que j
5	El criterio i es fuertemente más importante que j
7	El criterio i está demostradamente más fuerte que j
9	El criterio es absolutamente más importante que j.
2,4,6,8	Valores intermedios entre dos juicios adyacente, usados como valores de consenso entre dos juicios
2	Entre igualmente y moderadamente preferible
4	Entre moderadamente y fuertemente preferible
6	Entre fuertemente y extremadamente preferible
8	Entre muy fuertemente preferible y extremadamente preferible

Considera su nivel de conocimiento en sistemas de generación distribuida, técnicas de optimización y análisis multicriterio: Alto ___ Medio Bajo ___

Nombre: Andrea Enríquez Zúñiga
 Cargo: Docente
 Entidad: Unicauca
 Profesión: Ingeniería Automática
 Email: andreita.enriquez@gmail.com

Firma: 

Título: Encuesta para asignación de pesos a los criterios de comparación entre dos métodos de valoración económica.

Proyecto: Valoración económica de un SGD mediante un método híbrido objeto caso de estudio.

Director: Dr. Álvaro Rene Restrepo Garcés

Estudiantes: Sergio Andrés Hoyos y Luis Miguel Castillo

Contextualización:

El proyecto realiza la valoración económica de un sistema de generación distribuida empleando los métodos: flujo de caja descontado y un híbrido entre la técnica de optimización por enjambre de partículas y flujo de caja descontado, con la siguiente encuesta se busca determinar los pesos para los criterios de comparación entre los métodos, haciendo uso del análisis multicriterio y la técnica AHP.

Criterios

- **Flexibilidad:** Capacidad para adaptarse a diversas circunstancias o para acomodar las normas a distintas situaciones o necesidades.
- **Confiabilidad:** Es la probabilidad de obtener datos más cercanos a valores reales.
- **Optimalidad:** Capacidad de obtener una respuesta cercana al mínimo global.
- **Recursos computacionales:** Carga computacional requerida para la implementación y ejecución de los métodos.

Diligenciar la siguiente encuesta asignando un valor numérico a cada una de las celdas de la matriz de acuerdo a la información presenté en la Tabla 1. Escala de Saaty,

Encuesta

Criterio (i) \ Criterio (j)	Flexibilidad	Confiabilidad	Optimalidad	Recurso computacional
Flexibilidad	1	-----	-----	-----
Confiabilidad	1/6	1	-----	-----
Optimalidad	1/8	1	1	-----
Recurso Computacional	1/5	5	5	1

Tabla 1. Escala de Saaty

Escala numérica	Escala verbal
1	El criterio i y el criterio j son igualmente importantes
3	El criterio i es ligeramente más importante que j
5	El criterio i es fuertemente más importante que j
7	El criterio i está demostradamente más fuerte que j
9	El criterio es absolutamente más importante que j.
2,4,6,8	Valores intermedios entre dos juicios adyacente, usados como valores de consenso entre dos juicios
2	Entre igualmente y moderadamente preferible
4	Entre moderadamente y fuertemente preferible
6	Entre fuertemente y extremadamente preferible
8	Entre muy fuertemente preferible y extremadamente preferible

Considera su nivel de conocimiento en sistemas de generación distribuida, técnicas de optimización y análisis multicriterio: Alto ___ Medio Bajo ___

Nombre: Lisbeth Luisa Martínez Ortega

Cargo: Docente OTC

Entidad: Unicauca

Profesión: Ingeniería Física - Magister en Metrología

Email: lmartinez@unicauca.edu.co

Firma: Lisbeth Martínez O.

Título: Encuesta para asignación de pesos a los criterios de comparación entre dos métodos

Proyecto: Valoración económica de un SGD mediante un método híbrido objeto caso de estudio.

Director: Dr. Álvaro Rene Restrepo Garcés

Estudiantes: Sergio Andrés Hoyos y Luis Miguel Castillo

Contextualización:

El proyecto realiza la valoración económica de un sistema de generación distribuida empleando los métodos: flujo de caja descontado y un híbrido entre la técnica de optimización por enjambre de partículas y flujo de caja descontado, con la siguiente encuesta se busca determinar los pesos para los criterios de comparación entre los métodos, haciendo uso del análisis multicriterio y la técnica AHP.

Criterios

- **Flexibilidad:** Capacidad para adaptarse a diversas circunstancias o para acomodar las normas a distintas situaciones o necesidades.
- **Confiabilidad:** Es la probabilidad de obtener datos más cercanos a valores reales.
- **Optimización:** Optimizar es realizar una mejor gestión de los recursos para obtener mayores beneficios, en función del objetivo planteado
- **Recursos computacionales:** Son los distintos medios o ayudas que se utilizan para conseguir un fin o satisfacer una necesidad informática.

Diligenciar la siguiente encuesta asignando un valor numérico a cada una de las celdas de la matriz de acuerdo a la información presenté en la Tabla 1. Escala de Saaty,

Encuesta

Criterio (i) \ Criterio (j)	Flexibilidad	Confiabilidad	Optimización	Recurso computacional
Flexibilidad	1	-----	-----	-----
Confiabilidad	1/9	1	-----	-----
Optimización	1/5	7	1	-----
Recurso Computacional	3	9	7	1

Tabla 1. Escala de Saaty

Escala numérica	Escala verbal
1	El criterio i y el criterio j son igualmente importantes
3	El criterio i es ligeramente más importante que j
5	El criterio i es fuertemente más importante que j
7	El criterio i está demostradamente más fuerte que j
9	El criterio es absolutamente más importante que j.
2,4,6,8	Valores intermedios entre dos juicios adyacente, usados como valores de consenso entre dos juicios
2	Entre igualmente y moderadamente preferible
4	Entre moderadamente y fuertemente preferible
6	Entre fuertemente y extremadamente preferible
8	Entre muy fuertemente preferible y extremadamente preferible

Considera su nivel de conocimiento en sistemas de generación distribuida, técnicas de optimización y análisis multicriterio: Alto ___ Medio ___ Bajo X

Nombre: Elena Muñoz España
 Cargo: Docente
 Entidad: Universidad del Cauca
 Profesión: Ing. en electrónica y telec.
 Email: elenam@unicauca.edu.co

Firma: Elena M

Título: Encuesta para asignación de pesos a los criterios de comparación entre dos métodos de valoración económica.

Proyecto: Valoración económica de un SGD mediante un método híbrido objeto caso de estudio.

Director: Dr. Álvaro Rene Restrepo Garcés

Estudiantes: Sergio Andrés Hoyos y Luis Miguel Castillo

Contextualización:

El proyecto realiza la valoración económica de un sistema de generación distribuida empleando los métodos: flujo de caja descontado y un híbrido entre la técnica de optimización por enjambre de partículas y flujo de caja descontado, con la siguiente encuesta se busca determinar los pesos para los criterios de comparación entre los métodos, haciendo uso del análisis multicriterio y la técnica AHP.

Criterios

- **Flexibilidad:** Capacidad para adaptarse a diversas circunstancias o para acomodar las normas a distintas situaciones o necesidades.
- **Confiabilidad:** Es la probabilidad de obtener datos más cercanos a valores reales.
- **Optimalidad:** Capacidad de obtener una respuesta cercana al mínimo global.
- **Recursos computacionales:** Carga computacional requerida para la ejecución de los métodos.

Diligenciar la siguiente encuesta asignando un valor numérico a cada una de las celdas de la matriz de acuerdo a la información presenté en la Tabla 1. Escala de Saaty,

Encuesta

Criterio (i) \ Criterio (j)	Flexibilidad	Confiabilidad	Optimalidad	Recurso computacional
Flexibilidad	1	-----	-----	-----
Confiabilidad	$\frac{1}{9}$	1	-----	-----
Optimalidad	$\frac{1}{5}$	3	1	-----
Recurso Computacional	1	9	5	1

Tabla 1. Escala de Saaty

Escala numérica	Escala verbal
1	El criterio i y el criterio j son igualmente importantes
3	El criterio i es ligeramente más importante que j
5	El criterio i es fuertemente más importante que j
7	El criterio i está demostradamente más fuerte que j
9	El criterio es absolutamente más importante que j.
2,4,6,8	Valores intermedios entre dos juicios adyacente, usados como valores de consenso entre dos juicios
2	Entre igualmente y moderadamente preferible
4	Entre moderadamente y fuertemente preferible
6	Entre fuertemente y extremadamente preferible
8	Entre muy fuertemente preferible y extremadamente preferible

Considera su nivel de conocimiento en sistemas de generación distribuida, técnicas de optimización y análisis multicriterio: Alto ___ Medio Bajo ___

Nombre: Carlos Felipe Rengifo Rodas
 Cargo: Docente FIET
 Entidad: Universidad del Cauca
 Profesión: Ingeniero Eléctrico
 Email: caferen@unicauca.edu.co

Firma: Carlos Rengifo R.

Título: Encuesta para asignación de pesos a los criterios de comparación entre dos métodos de valoración económica.

Proyecto: Valoración económica de un SGD mediante un método híbrido objeto caso de estudio.

Director: Dr. Álvaro Rene Restrepo Garcés

Estudiantes: Sergio Andrés Hoyos y Luis Miguel Castillo

Contextualización:

El proyecto realiza la valoración económica de un sistema de generación distribuida empleando los métodos: flujo de caja descontado y un híbrido entre la técnica de optimización por enjambre de partículas y flujo de caja descontado, con la siguiente encuesta se busca determinar los pesos para los criterios de comparación entre los métodos, haciendo uso del análisis multicriterio y la técnica AHP.

Criterios

- **Flexibilidad:** Capacidad para adaptarse a diversas circunstancias o para acomodar las normas a distintas situaciones o necesidades.
- **Confiabilidad:** Es la probabilidad de obtener datos más cercanos a valores reales.
- **Optimalidad:** Capacidad de obtener una respuesta cercana al mínimo global.
- **Recursos computacionales:** Carga computacional requerida para la implementación y ejecución de los métodos.

Diligenciar la siguiente encuesta asignando un valor numérico a cada una de las celdas de la matriz de acuerdo a la información presenté en la Tabla 1. Escala de Saaty,

Encuesta

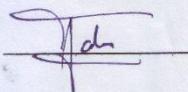
Criterio (i) \ Criterio (j)	Flexibilidad	Confiabilidad	Optimalidad	Recurso computacional
Flexibilidad	1	<u>1</u>	<u>4</u>	<u>8</u>
Confiabilidad		1	<u>4</u>	<u>2</u>
Optimalidad			1	<u>8</u>
Recurso Computacional				1

Tabla 1. Escala de Saaty

Escala numérica	Escala verbal
1	El criterio i y el criterio j son igualmente importantes
3	El criterio i es ligeramente más importante que j
5	El criterio i es fuertemente más importante que j
7	El criterio i está demostradamente más fuerte que j
9	El criterio es absolutamente más importante que j.
2,4,6,8	Valores intermedios entre dos juicios adyacente, usados como valores de consenso entre dos juicios
2	Entre igualmente y moderadamente preferible
4	Entre moderadamente y fuertemente preferible
6	Entre fuertemente y extremadamente preferible
8	Entre muy fuertemente preferible y extremadamente preferible

Considera su nivel de conocimiento en sistemas de generación distribuida, técnicas de optimización y análisis multicriterio: Alto ___ Medio Bajo ___

Nombre: Fabio Rojas
 Cargo: Docente
 Entidad: Urcuena
 Profesión: Ing. Finco
 Email: f.rosas@gmail.com

Firma: 

Título: Encuesta para asignación de pesos a los criterios de comparación entre dos métodos de valoración económica.

Proyecto: Valoración económica de un SGD mediante un método híbrido objeto caso de estudio.

Director: Dr. Álvaro Rene Restrepo Garcés

Estudiantes: Sergio Andrés Hoyos y Luis Miguel Castillo

Contextualización:

El proyecto realiza la valoración económica de un sistema de generación distribuida empleando los métodos: flujo de caja descontado y un híbrido entre la técnica de optimización por enjambre de partículas y flujo de caja descontado, con la siguiente encuesta se busca determinar los pesos para los criterios de comparación entre los métodos, haciendo uso del análisis multicriterio y la técnica AHP.

Criterios

- **Flexibilidad:** Capacidad para adaptarse a diversas circunstancias o para acomodar las normas a distintas situaciones o necesidades.
- **Confiabilidad:** Es la probabilidad de obtener datos más cercanos a valores reales.
- **Optimalidad:** Capacidad de obtener una respuesta cercana al mínimo global.
- **Recursos computacionales:** Carga computacional requerida para la implementación y ejecución de los métodos.

Diligenciar la siguiente encuesta asignando un valor numérico a cada una de las celdas de la matriz de acuerdo a la información presenté en la Tabla 1. Escala de Saaty,

Encuesta : **1**

Criterio (i) \ Criterio (j)	Flexibilidad	Confiabilidad	Optimalidad	Recurso computacional
Flexibilidad	1	-----	-----	-----
Confiabilidad	8	1	-----	-----
Optimalidad	9	6	1	-----
Recurso Computacional	4	4	4	1

Tabla 1. Escala de Saaty

Escala numérica	Escala verbal
1	El criterio i y el criterio j son igualmente importantes
3	El criterio i es ligeramente más importante que j
5	El criterio i es fuertemente más importante que j
7	El criterio i está demostradamente más fuerte que j
9	El criterio es absolutamente más importante que j.
2,4,6,8	Valores intermedios entre dos juicios adyacente, usados como valores de consenso entre dos juicios
2	Entre igualmente y moderadamente preferible
4	Entre moderadamente y fuertemente preferible
6	Entre fuertemente y extremadamente preferible
8	Entre muy fuertemente preferible y extremadamente preferible

Considera su nivel de conocimiento en sistemas de generación distribuida, técnicas de optimización y análisis multicriterio: Alto ___ Medio ___ Bajo X

Nombre: CESAR COLLAZO
 Cargo: PROF. UNIV.
 Entidad: U. CAUCA
 Profesión: ING. SISTEMAS
 Email: ccollazo@unicauca.edu.co

Firma: 