

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

Planificación de la expansión del sistema de transmisión (TEP) considerando reducción de escenarios mediante la aplicación de Machine Learning.

TESIS

Previo la obtención del Título de:

Magister en Electricidad

Mención: Sistemas Eléctricos de Potencia

Presentado por:

Pacheco Hurtado Marcos Xavier

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2021

DEDICATORIA

“En primer lugar a Dios que es quien nos da las fuerzas cada día para poder seguir adelante, a mi madre la cual ha sido un pilar fundamental en nuestra familia sin ella y sus oraciones muy difícilmente hubiese llegado a este punto, a mi familia que es el puerto seguro donde puedo regresar sin importar la situación por la que este atravesando, a los verdaderos amigos que estuvieron en el momento correcto para impulsarme y darme su apoyo y a la mujer amo que soporto muchas veces la falta de tiempo para darme el espacio con el fin de cumplir con este objetivo”.

Marcos Xavier Pacheco Hurtado

AGRADECIMIENTOS

“Agradezco profundamente a mi tutor el PhD. Miguel Torres que a pesar de sus múltiples ocupaciones siempre estaba dispuesto a darme la guía necesaria para cumplir con este objetivo, al PhD. Jose Cordova que saco tiempo para darme su ayuda cuando fue necesaria, a la Ing. Diana Cervantes a quien conocí como compañera en pregrado y en el postgrado volvimos a ser compañeros y nos dimos la mano para poder salir adelante sin ahogarnos en el intento”.

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, me corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Marcos Xavier Pacheco Hurtado* doy mi consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”

Marcos Xavier Pacheco Hurtado

EVALUADORES

Msc. Fernando Vaca

PROFESOR DE LA MATERIA

PhD. Miguel Torres

PROFESOR TUTOR

PhD. Jose Cordova

PROFESOR REVISOR

RESUMEN

La Planificación de la Expansión del Sistema de Transmisión (PET) se basa en determinar las posibles variaciones del Sistema de Transmisión Eléctrico, con el objetivo de encontrar el equilibrio entre la demanda proyectada y la Generación, buscado minimizar la inversión total en el horizonte de la planificación.

Por lo tanto, la PET no es un problema que se lo pueda resolver de manera analítica, sino que se trata de un problema que requiere técnicas de optimización que ayuda a determinar la solución óptima al problema que estará sujeto a restricciones técnicas propias de los Sistemas Eléctricos como son los límites de generación, niveles de voltaje, etc.

Para el presente trabajo, el centro de atención fue la reducción de escenarios de generación debido a la inclusión de unidades de generación eólica en nuestros sistemas y determinar cómo esta inclusión afecta el análisis de la PET, la herramienta utilizada para la reducción de escenarios fue el aprendizaje de máquina en específico el algoritmo de K-means y para simplificar el análisis de la PET con la inclusión de estos escenarios se utilizó el algoritmo Lineal Disyuntivo modificado que permite el análisis de diferentes escenarios con la mayor simplicidad posible sin perder la efectividad en el análisis. Para el análisis del desempeño de la propuesta se evaluó la red GARVER y el sistema de la IEEE24 barras finalmente se utilizó el sistema simplificado de Ecuador SNI73.

ABSTRACT

The Transmission System Expansion Planning (PET) is based on determining the possible variations of the Electric Transmission System, with the objective of finding the balance between the projected demand and the Generation, seeking to minimize the total investment in the horizon of the planning.

Therefore, PET is not a problem that can be solved analytically, but it is a problem that requires optimization techniques that help us determine the optimal solution to the problem that will be subject to technical restrictions typical of the Electrical Systems such as generation limits, voltage levels, etc.

For the present work, the focus of attention was the reduction of generation scenarios due to the inclusion of wind generation units in our systems and to determine how this inclusion affects the PET analysis, the tool used for the reduction of scenarios was the Machine Learning specifically the K-means algorithm and to simplify the analysis of the PET with the inclusion of these scenarios, the modified Linear Disjunctive algorithm was used that allows us to analyze different scenarios with the greatest possible simplicity without losing the effectiveness in the analysis. For the analysis of the performance of the proposal, the GARVER network and the IEEE24 bar system were evaluated, finally the simplified system of Ecuador SNI73 was used.

SIMBOLOGÍA

v	Inversión en la construcción de nuevos circuitos - función objetivo.
ij	Ramal entre las barras i y j .
Ω_b	Conjunto de barras en la configuración existente.
Ω_l	Conjunto de circuitos de interconexión en la configuración existente y de los nuevos circuitos.
c_{ij}	Costo de construcción de un nuevo circuito en el ramal ij .
d_i	Demanda en la barra i .
f_{ij}	Flujo total de energía en los circuitos del ramal ij .
\bar{f}_{ij}	Flujo de potencia máximo de un circuito en el ramal ij .
f_{ij}^s	Flujo de potencia activa en el ramal ij en el escenario s .
$f_{ij,y}^s$	Flujo de potencia activa del circuito y en el ramal ij y escenario s .
$f_{ij}^{0,s}$	Flujo de potencia de los circuitos existentes en el escenario base en el ramal ij y en el escenario s .
$f_{ij,y}$	Flujo de potencia total en el circuito y en el ramal ij .
g_i	Potencia generada en la barra i .
\bar{g}_i	Límite máximo de potencia generada en barra i .
g_i^s	Generación en la barra i en el escenario s .
M	Parámetro disyuntivo.
n_{ij}	Número de circuitos añadidos en el ramal ij .
n_{ij}^0	Número de circuitos existentes en la configuración base.
\bar{n}_{ij}	Número máximo de circuitos que se pueden agregar en el ramal ij .
θ_i	Ángulo de tensión en la barra i .
$\bar{\theta}$	Ángulo máximo de tensión.
θ_i^s	Ángulo de tensión en la barra i en el escenario s .
θ_{ref}^s	Ángulo de referencia en el escenario s .
x_{ij}	Reactancia del circuito ij .
$w_{ij,y}$	Variables binarias que deciden si un circuito de tipo y se construirá en el ramal ij o no.
S	Conjunto de todos los escenarios s .

Tabla de contenido

1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	Objetivos.....	2
1.1.1	Objetivo general.....	2
1.1.2	Objetivos específicos.....	2
1.2	Planteamiento del Problema.....	2
1.3	Justificación.....	3
1.4	Contribución.....	4
2	Marco Teórico.....	6
2.1	Planificación de la Expansión del Sistema de Transmisión (PET).....	6
2.1.1	Técnicas para darle solución al problema de la PET.....	8
2.1.2	Modelamiento matemático del problema de la PET.....	10
2.1.3	Modelado matemático del problema de la PET con múltiples escenarios de generación.....	19
2.2	Aprendizaje de máquina.....	21
2.2.1	Retos del aprendizaje de máquina.....	22
2.2.2	Funcionamiento del aprendizaje de máquina.....	22
2.2.3	Determinación del algoritmo correcto.....	23
2.2.4	Aprendizaje supervisado.....	23
2.2.5	Aprendizaje no supervisado.....	24
3	Propuesta Integral.....	30
3.1	Análisis de datos mediante aprendizaje de máquina.....	30
3.1.1	Análisis K-means.....	31
3.1.2	Hipótesis planteadas.....	33
3.2	Modelamiento Matemático.....	37
3.2.1	Modelos para implementar.....	37
3.2.2	Redes para implementar.....	38
4	Pruebas y Resultados.....	42
4.1	Red GARVER.....	42
4.2	Red IEEE24.....	44

4.3	Red SNI73.....	46
5	Conclusiones y Recomendaciones.....	48
5.1	Conclusiones.....	48
5.2	Recomendaciones.....	49
	Referencias Bibliográficas:.....	50

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1 Escenario Hipótesis 1.....	33
Tabla 3-2 Escenarios Hipótesis 2.....	34
Tabla 3-3 Escenarios Hipótesis 3.....	36
Tabla 3-4 Modificaciones en la red GARVER	38
Tabla 3-5 Modificaciones en la red IEEE24	39
Tabla 3-6 Modificaciones en la Barra 34 de la red SNI73	40
Tabla 3-7 Modificaciones en la Barra 62 de la red SNI73	40
Tabla 4-1 Resultados de la planificación de la Red GARVER	42
Tabla 4-2 Resultados de la planificación de la Red IEEE24	44
Tabla 4-3 Resultados de la planificación de la red SNI73.....	46

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 2-1 Tipos de aprendizaje de máquina	23
Ilustración 2-2: Centroides K-means [4].....	25
Ilustración 2-3 Algoritmo K-means	26
Ilustración 2-4: K-Medoides [4].....	26
Ilustración 2-5. Agrupación jerárquica[4].....	27
Ilustración 2-6. Mapa Autoorganizado[4].....	27
Ilustración 2-7. Fuzzy c-means[4].....	28
Ilustración 2-8. Modelo mixto gaussiano[4].....	28
Ilustración 3-1 Registro histórico de Velocidad del Viento y Potencia Promedio de la Central Villonaco.....	30
Ilustración 3-2 Lectura y normalización de datos.....	32
Ilustración 3-3 Determinación de número de clústeres	32
Ilustración 3-4 Análisis mediante el K-means	33
Ilustración 3-5 Análisis mediante el método del codo Hipótesis 2.....	34
Ilustración 3-6 Análisis mediante el método del codo Hipótesis 3.....	35
Ilustración 3-7 Relación entre la Potencia generada y la Velocidad del viento.....	36
Ilustración 3-8 Procedimiento para reducción del SNI.....	39

1 INTRODUCCIÓN

El objetivo principal del Sistema eléctrico de Potencia es proveer energía eléctrica con parámetros de eficiencia técnica, económica, de calidad y confiabilidad, para esto es importante asegurar que la generación eléctrica permita responder de manera oportuna el crecimiento de la demanda. El Sistema de transmisión eléctrica juega un rol importante en el cumplimiento de este objetivo dado que es el encargado de interconectar los sistemas de generación eléctrica con los sistemas de distribución es decir interconecta la generación con la demanda.

El análisis del problema de la PET no es un tema que se pueda realizar de manera analítica porque es un problema donde se debe analizar las modificaciones que se deben realizar a la infraestructura actual cumpliendo las restricciones técnicas del sistema buscando minimizar los costos de inversión, por lo tanto, este problema para ser resuelto requiere de técnicas de optimización que permitan reducir costos mientras cumplimos las restricciones del sistema.

Actualmente el análisis del problema de la PET está siendo afectado por la inclusión de energías renovables en nuestros sistemas de generación eléctrica, los cuales no son ajustables como los sistemas de generación clásicos, sino que tienen una alta variabilidad para poder determinar cuál es la generación de energía más probable para evitar sobre dimensionar nuestros sistemas de transmisión y con eso optimizar las inversiones a realizar.

Por lo tanto, es importante determinar los escenarios de generación más probables para poder utilizarlos en nuestro problema del análisis de El problema de la PET para poder determinar un Plan de Expansión óptimo que permita cumplir con los requerimientos técnicos del sistema minimizando la inversión en los mismos.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

Reducir el tiempo del análisis de la planificación de la expansión del Sistema de Transmisión (PET) mediante la aplicación de algoritmos de aprendizaje de máquina sin perder la eficiencia del método de optimización alcanzando una respuesta optima global.

1.1.2 Objetivos específicos

- Determinar el algoritmo de aprendizaje de máquina que mejor se ajuste al problema de la reducción de escenarios en la Planificación de la expansión del Sistema de Transmisión, mediante el análisis de diferentes algoritmos describiendo sus ventajas y desventajas.
- Incorporar incertidumbres provenientes de la inserción de las fuentes renovables en la Planificación de la expansión del Sistema de Transmisión.
- Proponer un modelo de optimización robusto que incorpore el análisis de datos mediante el algoritmo de aprendizaje de máquina determinado.

1.2 Planteamiento del Problema

La planificación de la expansión del Sistema de Transmisión (PET) ha sido una de las temáticas recurrentes en la investigación académica durante varios años, sobre diferentes perspectivas como por ejemplo los métodos de solución, horizonte de la planificación, estructura del sector eléctrico, herramientas para el desarrollo de los modelos de planificación, etc[1].

El desarrollo de la generación mediante tecnologías verdes y su inserción dentro de los Sistemas de Transmisión Eléctrica, ha hecho necesario la inclusión dentro del estudio de la planificación el análisis de variables estocásticas de alta incertidumbre; dado que se encuentran muy vinculadas a la capacidad de generación que pueden entregar estas nuevas tecnologías.

Para el análisis de la PET en donde se incluye generación renovable ya no basta con ajustar un valor fijo de generación sino que implica un estudio más profundo considerando variables estocásticas como son la radiación solar o la velocidad del viento[2], las cuales presentan un alto nivel de incertidumbre, para el análisis del comportamiento de la esta generación renovable es imprescindible manejar una gran cantidad de información que permita determinar el comportamiento que va a tener esta generación en el sistema con lo cual tendremos la capacidad

de definir dentro de nuestra planificación si las inversiones a realizar serán las adecuadas desde el criterio económico y técnico.

Debido la incertidumbre presente en la generación renovable tendremos múltiples escenarios de generación que si los usamos todos es muy probable que no lleguemos a una solución óptima de la Planificación de los Sistemas de Transmisión, adicionalmente uno por uno sería una tarea poco productiva si se considera que muchos de estos escenarios no suceden tan a menudo además del tiempo y capacidad computacional que consumen, por lo tanto es necesario la implementación de metodologías que permitan la reducción de escenarios de tal manera que podamos optimizar el tiempo de análisis y la capacidad computacional.

1.3 Justificación

Como pudimos ver el problema principal de incluir generación renovable en la red es que vuelve la Planificación de los Sistemas de Transmisión mucho más compleja si consideramos el analizar todos los escenarios posibles de generación de tal forma que es poco probable llegar a una solución óptima en todos los escenarios que consumirá una gran cantidad de tiempo y recursos computacionales.

En los últimos años la investigación se ha concentrado en buscar la mejor forma de ir incluyendo nuevas restricciones sean técnicas, económicas o ambientales con el objetivo de tener una mayor flexibilidad en el sistema[2] sin sacrificar la capacidad computacional o el tiempo de análisis para esto se han desarrollado diferentes metodologías de análisis[3], que en muchos casos no han logrado este objetivo o su capacidad de aplicación es reducida a casos muy específicos.

En el caso propuesto partimos desde la premisa de que se debe reducir el número de casos a analizar para ello es necesario usar la gran cantidad de información existente de tal manera que podamos determinar cuáles son los escenarios más probables previo al análisis de la Planificación de los Sistemas de Transmisión, para lo cual hemos determinado que se requiere una herramienta que ayude al manejo adecuado de la información.

Para este propósito se ha pensado en el aprendizaje de máquina que es una estrategia para el análisis de datos que permite mediante algoritmos el aprendizaje de los computadores para realizar lo que es normal para los seres vivos: aprender de las experiencias pasadas. Los algoritmos de aprendizaje de máquina utilizan técnicas de cálculo para “aprender” de los datos

sin que esto dependa de un modelo o ecuación establecido. Dichos algoritmos incrementan su capacidad a medida que cuentan con una mayor cantidad de datos para el aprendizaje.

Con la creciente de la cantidad de información disponible, el aprendizaje de máquina es una técnica casi imprescindible en la resolución problemas en las siguientes áreas [4]:

- Procesamiento de imágenes y visión artificial
- Procesamiento del lenguaje natural
- Producción de energía
- Automoción, sector aeroespacial y fabricación
- Biología computacional
- Finanzas computacionales

Por lo antes expuesto es claro que existe una gran potencialidad para el análisis de la información por medio del aprendizaje de máquina, dicha potencialidad puede ser aprovechada de tal manera que una gran cantidad de datos o registros de información puedan ser simplificados, en nuestro caso información acerca de la generación renovable y así obtener escenarios representativos de la generación de tal manera que no se analicen n escenarios sino un numero mucho menor.

Además, es importante determinar el mejor método para poder analizar estos escenarios reducidos que obtendremos mediante el aprendizaje de máquina, de tal forma que no sacrifiquemos tiempo de análisis ni capacidad computacional, es decir debemos seleccionar el método que ayude de la manera más simplificada pero no menos efectiva de llegar a un resultado satisfactorio.

Esta propuesta permitirá no solo reducir escenarios mediante el aprendizaje de máquina sino también validar que se logra reducir el tiempo de procesamiento de los escenarios resultantes usando un método de análisis simplificado.

1.4 Contribución

El presente trabajo que describe el análisis de la PET incluyendo reducción de escenarios se contribuyó de la siguiente forma:

- Se realizó la revisión de la literatura técnica que dio como resultado un resumen de los diferentes modelos matemáticos que se aplican en la resolución de la PET lo cual se describe en el Capítulo 2.
- Se implementó el algoritmo del K-means en conjunto con el método del codo para el procesamiento y análisis de los datos obtenidos de la Central eólica Villonaco, con lo cual se obtuvieron los escenarios para ser analizados.
- Se realizó la reducción del Sistema Nacional Interconectado (SNI) con lo cual se obtuvo la red SNI73.
- Se implementó el Modelo Lineal disyuntivo en sus dos versiones para uno y varios escenarios en el AMPL, el cual se utilizó en el análisis de escenarios provenientes de los resultados del procesamiento de los datos mediante del K-means.

2 Marco Teórico

El marco teórico se encuentra dividido en dos partes importantes que son la base de la propuesta en análisis, se parte de la descripción de la PET donde se describe su importancia y la evolución que han tenido los modelos matemáticos.

La segunda parte se basa en la descripción del aprendizaje de máquina con esto también se presenta la clasificación de los algoritmos y se describen varios de ellos en donde se describe sus fortalezas para determinar cuál es el más adecuado a utilizar dependiendo del tipo de datos en análisis.

2.1 Planificación de la Expansión del Sistema de Transmisión (PET)

El problema de la PET a largo plazo es considerado como uno de los problemas clásicos en la Ingeniería Eléctrica. El objetivo del problema es encontrar un plan óptimo de expansión del sistema a un costo de inversión mínimo, definiendo cuando, donde y cuantas líneas y/o transformadores deben ser instalados a lo largo del horizonte de la planificación de tal manera que satisfaga la demanda de energía eléctrica, tomando en consideración los parámetros de seguridad y calidad. De manera general los datos de que se tienen para el análisis de este problema son: La topología base o actual del sistema, los circuitos que se pueden expandir, las restricciones de la inversión, la demanda y la generación en el horizonte de la planificación.

El problema de la PET es un problema ampliamente estudiado desde la década de 1960. Con el paso del tiempo surgen nuevas técnicas de optimización y modelos matemáticos que buscan solucionarlo. El problema de la PET está dividido en dos partes: una es el modelamiento matemático y la otra es la técnica de optimización utilizada para darle solución al problema, de forma que sea posible llegar a una solución. Para cada modelo matemático existe una técnica que mejor se ajusta para llegar a la solución. Las técnicas de optimización que se utilizan se pueden dividir en dos grupos:

- Métodos exactos
- Métodos aproximados.

En la literatura especializada se pueden encontrar diferentes modelos matemáticos que sirven para darle solución al problema de la PET, mediante modelamiento tradicional:

- Modelo de transporte
- Modelo de corriente continua (CC)

- Modelo lineal disyuntivo
- Modelos de corriente alterna (CA).

El problema de la PET visto desde horizonte de planificación puede ser tratados de dos formas diferentes:

- Planificación estática
- Planificación multietapa o dinámica.

La planificación estática considera un único periodo de horizonte de la planificación y determina las cantidades de circuitos que deben ser adicionados y la inversión que se debe realizar al inicio del periodo de planificación.

La planificación multietapa o dinámica el horizonte de planificación está dividido en varios periodos y los circuitos que se deben incluir en cada periodo del horizonte de la planificación. Las inversiones se deben realizar en los momentos más adecuados, es decir, al inicio de cada período, para que el incremento continuo de la demanda y la generación sea siempre tomado de manera óptima en la planificación. Este procedimiento facilita la toma de decisiones en cada período y permite, al final de cada etapa, revisar la planificación para etapas posteriores. Al considerar múltiples etapas en el proceso de optimización, el objetivo es minimizar el costo presente de la inversión obtenida de la suma de las inversiones realizadas a lo largo del período simulado[5].

Con la desregulación de la industria energética se empezó a discutir el monopolio, añadiendo un nuevo modelo, basado en la competencia de la actividad de generación y la estructura del mercado eléctrico, donde cada país elige un modelo que mejor se adapta a sus necesidades, ya que no existe un modelo estándar[6]. Como resultado de esta reestructuración del sector eléctrico, la energía ahora se comercializa y se puede comprar y vender.

Existen algunos modelos matemáticos propuestos en la literatura para abordar el problema desde diferentes ópticas. La mayoría de estos modelos se basan en la optimización, sean o no multiobjetivo, permitiendo al planificador tratar con diferentes objetivos e incertidumbres en la generación. Esto permite encontrar un plan de expansión óptimo, basado en un análisis de costo-beneficio[7].

El problema de la PET que considera la incertidumbre de generación presenta un comportamiento no aleatorio el cual no puede modelarse mediante funciones existentes de

distribución de probabilidad. En base a la literatura especializada, [7]–[9] para hacer frente a la incertidumbre en generación, las técnicas de solución se clasifican en tres categorías:

- Probabilístico
- Difuso
- Enfoque basado en escenarios

En los sistemas de energía, la fuente y el tipo de incertidumbre en la generación pueden comprometer la eficiencia de la técnica para analizar esta incertidumbre. Para sortear este problema, se utiliza un enfoque basado en escenarios de generación, una herramienta eficiente para modelar incertidumbres no aleatorias[10].

El problema de la PET basado en escenarios de generación consiste en abordar grandes incertidumbres, teniendo un impacto significativo en la toma de decisiones. Un escenario de generación representa el grupo de resultados obtenidos al considerar las diferentes incertidumbres en la generación de energía[9]. La idea se centra básicamente en estudiar diferentes estudios de subproblemas, es decir, diferentes escenarios de generación, capaces de descubrir tendencias y hacer posible encontrar soluciones de buena calidad para el subproblema que se acerquen más a la realidad[11].

2.1.1 Técnicas para darle solución al problema de la PET

Para darle solución al problema de la PET, es necesario seleccionar un modelo matemático apropiado, como lo son el modelo de transporte o el modelo lineal disyuntivo. Posteriormente, se elige la técnica de optimización adecuada, como algoritmos heurísticos, algoritmos de optimización clásicos y metaheurísticas.

Para darle solución al problema de la PET a largo plazo, es necesario utilizar dos tipos de técnicas de optimización y clasificarlas en los siguientes grupos:

- Métodos exactos
- Métodos aproximados.

Métodos aproximados

Método heurístico utilizado para hallar la solución del problema de la PET

En un intento por superar las dificultades que se presentan para hallar la solución al problema de la PET utilizando herramientas de optimización matemática, principalmente debido a su

naturaleza no lineal y no convexa, comenzaron a aparecer algoritmos aproximados. Estos algoritmos se dividen en los siguientes grupos: algoritmos heurísticos y metaheurísticos.

Al darle solución al problema de la PET, se presentan retos de diferentes niveles de complejidad y dificultades para encontrar soluciones de buena calidad. Una alternativa para trabajar con problemas complejos de este tipo es el uso de algoritmos heurísticos, especialmente en problemas no convexos y no lineales, los cuales son sencillos de entender e implementar técnicas, estos buscan encontrar soluciones cercanas a la respuesta óptima y con un tiempo computacional reducido.

Las técnicas heurísticas más utilizadas en la literatura técnica para darle solución al problema de la PET son: el algoritmo heurístico constructivo y el algoritmo de búsqueda de vecindarios.

Método metaheurístico

Las metaheurísticas son métodos de solución que sistematizan una interacción entre los procedimientos de búsqueda locales y las estrategias de análisis, para desarrollar procesos de optimización capaces de salir de las soluciones óptimas locales y realizar una búsqueda a través del espacio global para darle solución al problema[12].

Se presentaron varias propuestas de solución utilizando metaheurísticas para resolver problemas de optimización. Ejemplo: metaheurísticas para métodos de relajación, procesos constructivos, búsqueda por vecindad y procedimiento evolutivo[13], como se presenta a continuación:

- Métodos de relajación: son procedimientos para resolver problemas que utilizan relajaciones del modelo original, ya resuelto, la solución encontrada servirá como facilitador para la resolución del modelo original.
- Procesos constructivos: se refieren a los procedimientos que intentan encontrar la solución a través del análisis y selección gradual de los componentes que lo componen, por ejemplo, GRASP.
- Búsqueda de Vecindarios: orienta mecanismos que utilizan transformaciones o movimientos para analizar el espacio de soluciones alternativas y estructuras vecinas asociadas, como la Búsqueda de Vecindad Variable (VNS).
- Procedimiento evolutivo: es un procedimiento basado en conjuntos de soluciones que evolucionan a lo largo del espacio de búsqueda, por ejemplo, Algoritmo Genético.

Métodos exactos – técnica de optimización clásica utilizada en el modelamiento del problema de la PET

Los métodos exactos o clásicos utilizan técnicas de optimización de descomposición matemática. Las técnicas clásicas de optimización garantizan la solución óptima para ciertos tipos de problemas, sin embargo, el esfuerzo computacional es alto y la implementación no es fácil. Los principales métodos clásicos de optimización son: el algoritmo Branch and Bound (B&B) y técnicas de descomposición Benders, Bullets, Branch and Cut, métodos de plano de corte. Las metodologías indicadas se aplican en problemas de Programación Lineal entera mixta (PLIM) o también en problemas binarios.

Entre los métodos clásicos más conocidos aplicados a la resolución del problema de la PET se encuentran el algoritmo B&B y el método de descomposición de Benders, que encuentran la solución óptima al problema. Estos métodos son muy eficientes para resolver problemas PET pequeños y medianos. Para la planificación de grandes sistemas eléctricos, presentan problemas de convergencia y un alto costo computacional.

2.1.2 Modelamiento matemático del problema de la PET

En esta sección se presenta los principales modelos matemáticos encontrados en la literatura técnica para darle solución al problema de la PET, con el fin de brindar referencias que contribuyan a una mejor comprensión de los modelos matemáticos se iniciara presentara los fundamentos del modelado matemático.

Modelado Matemático

Para resolver cualquier problema de ingeniería es necesario implementar dos procesos, el primero es el modelado matemático y el segundo en escoger la técnica de análisis para resolver dicho modelo matemático. El modelado matemático representa adecuadamente un problema real, y su resolución debe permitirse mediante las técnicas de resolución disponibles. Generalmente, en el grado que se mejora el modelo matemático, la técnica de análisis escogida para resolverlo se torna más compleja. Por tanto, debe se requiere que haya un equilibrio entre el modelo seleccionado y la técnica de análisis de tal forma que se pueda optimizar el de los recursos computacionales, es decir, que no exceda la capacidad de la máquina, y se pueda obtener soluciones con un buen grado de precisión[14].

El modelado matemático ideal para describir las operaciones reales del problema de la PET sería el uso del flujo de carga AC, sin embargo, actualmente se utilizan una variedad modelos

matemáticos aproximados para realizar el modelamiento del problema de la PET, los cuales, en general, son modelos matemáticos de versiones relajadas del modelo CA. Los principales modelos son: el modelo de flujo de carga CC, también conocido como modelo CC, el modelo de transporte y los modelos híbridos lineales y no lineales.

Modelo de Transporte

En 1970, Garver presento un modelo de transporte, siendo la primera propuesta sistemática para la resolución del problema de la PET, siendo la base para el desarrollo de diferentes análisis para solucionar el problema de la PET debido a que era la única forma de optimizar el problema con las técnicas existentes en ese momento. Por tratarse de un modelo relajado, se le denominó modelo simplificado del sistema de transmisión, que proporciona una planificación considerando solo el flujo de potencia activa y, en consecuencia, resuelve solo el problema de capacidad de transmisión[15].

En este modelo, únicamente se considera la Ley de Kirchhoff y la capacidad operativa del circuito y los generadores. La formulación matemática está representada por la ecuación (1a).

$$\min v = \sum_{ij \in \Omega_l} c_{ij} n_{ij} \quad (1a)$$

Sujeto a:

$$\sum_{j \in \Omega_l} f_{ji} - \sum_{ij \in \Omega_l} f_{ij} + g_i = d_i \quad \forall i \in \Omega_b \quad (1b)$$

$$|f_{ij}| \leq (n_{ij} + n_{ij}^0) \bar{f}_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (1c)$$

$$0 \leq g_i \leq \bar{g}_i \quad \forall i \in \Omega_b \quad (1d)$$

$$0 \leq n_{ij} \leq \bar{n}_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (1e)$$

$$n_{ij} \text{ entero} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (1f)$$

La ecuación (1a) representa la inversión en la red de transmisión debido a la construcción de nuevos circuitos. La restricción expresada por la ecuación (1b) corresponde a la primera Ley de Kirchhoff, denominada ecuación de equilibrio de potencia en cada barra. La restricción (1c) es la capacidad de transmisión de cada uno de los circuitos, siendo el valor absoluto indispensable, ya que el flujo es bidireccional. La restricción representada por (1d), tenemos los límites de generación de las barras i . Restricción (1e) es la limitación en el número de circuitos que se

instalarán en el ramal ij . En la restricción (1f), la variable n_{ij} se especifica como un número entero.

El modelo de transporte es un problema de Programación Lineal Entera Mixta (PLIM), que se utiliza en grandes sistemas eléctricos. La solución de este tipo de modelo es compleja debido a la restricción (1f), ya que no es posible insertar circuitos fraccionarios en el sistema, es decir, si n_{ij} tuviera valores reales, el problema se resolvería mediante un problema de Programación Lineal, por lo que lo convierte en un problema simple, incluso para un sistema grande [14], [16], [17].

La principal ventaja que presenta el modelo de transporte es la linealización del modelo, en el que se eliminan las restricciones no lineales presentes en la segunda Ley de Kirchhoff, característica que prácticamente no hace diferencia en la modelización de problemas relacionados o problemas aislados, siguiendo los mismos patrones para su resolución. Debido a que el modelo está simplificado, apunta a una desventaja, ya que la solución encontrada a veces puede estar lejos de la solución verdadera ya que solo considera la primera Ley de Kirchhoff [17], [18].

Modelo de corriente continua (CC)

El modelo CC es un modelo modificado del modelo de flujo de carga CC, por esta razón, es el modelo más utilizado en PET. En este modelo, todos los circuitos obedecen las dos leyes de Kirchhoff. El modelo CC corresponde a un problema complejo de Programación No Lineal Entero Mixto. Para este análisis, solo se considera la potencia activa. En la literatura especializada se proponen varias técnicas de optimización para solucionarlo.

Hasta ahora, este modelo se considera el ideal para ser utilizado para darle solución al problema de la PET. Para sistemas grandes y complejos, todas las técnicas de optimización presentan solo soluciones de buena calidad. Por tanto, el modelado matemático que utiliza el modelo CC adopta la siguiente forma:

$$\min v = \sum_{ij \in \Omega_l} c_{ij} n_{ij} \quad (2a)$$

Sujeto a:

$$\sum_{ji \in \Omega_l} f_{ji} - \sum_{ij \in \Omega_l} f_{ij} + g_i = d_i \quad \forall i \in \Omega_b \quad (2b)$$

$$f_{ij} = (n_{ij} + n_{ij}^0) \frac{(\theta_i - \theta_j)}{x_{ij}} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (2c)$$

$$|f_{ij}| \leq (n_{ij} + n_{ij}^0) \bar{f}_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (2d)$$

$$0 \leq g_i \leq \bar{g}_i \quad \forall i \in \Omega_b \quad (2e)$$

$$0 \leq n_{ij} \leq \bar{n}_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (2f)$$

$$n_{ij} \text{ entero} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (2g)$$

$$\theta_i \text{ sin restricción} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (2h)$$

El modelo matemático (2) corresponde al modelo de transporte presentado por el modelo (1). La diferencia es que, en el modelo CC, se agregó la ecuación (2c), que representa la no linealidad del sistema y también la diferencia angular entre la barra i y j , que representa las ecuaciones correspondientes a la segunda Ley de Kirchhoff, presentando mayor complejidad en relación con el modelo de transporte. La restricción (2i) representa el ángulo de tensión en la barra i que no tiene restricción.

Modelo lineal disyuntivo

El modelo lineal disyuntivo es una generalización del modelo CC, es decir, es un modelo matemático equivalente al modelo CC. El modelo matemático corresponde a un problema de Programación lineal de enteros mixtos (PLIM).

Normalmente es viable convertir un problema de tipo cuadrático no lineal con variables reales y enteras en un problema lineal con variables reales y binarias mediante métodos de cálculo avanzado que permita reemplazar los términos cuadráticos con relaciones lineales [17].

Con base en el modelo CC (2), el primer paso para obtener el modelo lineal disyuntivo es representar los flujos de potencia activa de los circuitos en la configuración existente, como se muestra en la ecuación (3).

$$\min v = \sum_{ij \in \Omega_l} c_{ij} n_{ij} \quad (3a)$$

Sujeto a:

$$\sum_{j \in \Omega_l} (f_{ji} + f_{ji}^0) - \sum_{i \in \Omega_l} (f_{ij} + f_{ij}^0) + g_i = d_i \quad \forall i \in \Omega_b \quad (3b)$$

$$f_{ij}^0 = n_{ij}^0 \frac{(\theta_i - \theta_j)}{x_{ij}} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (3c)$$

$$|f_{ij}^0| \leq n_{ij}^0 \bar{f}_{ij}^0 \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (3d)$$

$$f_{ij} = n_{ij} \frac{(\theta_i - \theta_j)}{x_{ij}} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (3e)$$

$$|f_{ij}| \leq n_{ij} \bar{f}_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (3f)$$

$$0 \leq g_i \leq \bar{g}_i \quad \forall i \in \Omega_b \quad (3g)$$

$$0 \leq n_{ij} \leq \bar{n}_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (3h)$$

$$n_{ij} \text{ entero} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (3i)$$

La ecuación (3e) representa la no linealidad del problema, ya que hay una multiplicación de dos variables, siendo n_{ij} una variable entera y $(\theta_i - \theta_j)$ variables continuas.

Luego, la variable entera n_{ij} se transforma en un conjunto Y de variables binarias $w_{ij,y}$, que se representa por la suma de $w_{ij,y}$ pertenecientes al conjunto Y . La variable binaria corresponde a la suma o no de un circuito en el ramal ij , es decir, si $w = 1$ se agregará un circuito y en el ramal ij , y si $w_{ij,y} = 0$ no se agregará ningún circuito en el ramal ij . El flujo de potencia activa f_{ij} , y representa el flujo en cada circuito y en el ramal ij , por lo tanto, el modelo toma la siguiente forma:

$$\min v = \sum_{ij \in \Omega_l} c_{ij} \sum_{y \in Y} w_{ij,y} \quad (4a)$$

Sujeto a:

$$\sum_{j \in \Omega_l} \left(\sum_{y \in Y} f_{ji,y} + f_{ji}^0 \right) - \sum_{i \in \Omega_l} \left(\sum_{y \in Y} f_{ij,y} + f_{ij}^0 \right) + g_i = d_i \quad \forall i \in \Omega_b \quad (4b)$$

$$f_{ij}^0 = n_{ij}^0 \frac{(\theta_i - \theta_j)}{x_{ij}} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (4c)$$

$$|f_{ij}^0| \leq n_{ij}^0 \bar{f}_{ij}^0 \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (4d)$$

$$f_{ij,y} = w_{ij,y} \frac{(\theta_i - \theta_j)}{x_{ij}} \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall y \in Y \quad (4e)$$

$$|f_{ij,y}| \leq w_{ij,y} \bar{f}_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall y \in Y \quad (4f)$$

$$0 \leq g_i \leq \bar{g}_i \quad \forall i \in \Omega_b \quad (4g)$$

$$\sum_{y \in Y} w_{ij,y} \leq \bar{n}_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (4h)$$

$$w_{ij,y} \leq w_{ij,y-1} \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall y \in Y | y > 1 \quad (4i)$$

$w_{ij,y}$ entero

$$\forall ij \in \Omega_l, \forall y \in Y \quad (4j)$$

Para evitar soluciones iguales, es necesario agregar la restricción (4i) que garantiza la asignación de secuencias de circuitos y del conjunto Y . La ecuación (4e) presenta la no linealidad del problema, ya que hay una multiplicación de dos variables entre $w_{ij,y}$, una variable binaria y $(\theta_i - \theta_j)$ son variables continuas. Si $w_{ij,y} = 1$, las ecuaciones (4e) y (4f) toman la forma $f_{ij,y} = \frac{(\theta_i - \theta_j)}{x_{ij}} x_{ij}$ y $|f_{ij,y}| \leq w_{ij,y} \bar{f}_{ij}$ de lo contrario, $f_{ij,y} = 0$. De esta forma, se sustituyen por la siguiente restricción:

$$|x_{ij} f_{ij,y} - (\theta_i - \theta_j)| \leq M(1 - w_{ij,y}) \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall y \in Y \quad (5)$$

La ecuación (5) asegura que la diferencia de ángulo es libre si no se suma a la línea de transmisión, por otro lado, se convierte en la relación (4) cuando hay una línea de transmisión. M es un valor constante bastante grande para representar el grado de libertad de la diferencia angular en el ramal ij . Por tanto, el modelo lineal disyuntivo se reformula de la siguiente forma:

$$\min v = \sum_{ij \in \Omega_l} c_{ij} \sum_{y \in Y} w_{ij,y} \quad (6a)$$

Sujeto a:

$$\sum_{ji \in \Omega_l} \left(\sum_{y \in Y} f_{ji,y} + f_{ji}^0 \right) - \sum_{ij \in \Omega_l} \left(\sum_{y \in Y} f_{ij,y} + f_{ij}^0 \right) + g_i = d_i \quad \forall i \in \Omega_b \quad (6b)$$

$$f_{ij}^0 = n_{ij}^0 \frac{(\theta_i - \theta_j)}{x_{ij}} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (6c)$$

$$|f_{ij}^0| \leq n_{ij}^0 \bar{f}_{ij}^0 \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (6d)$$

$$|x_{ij} f_{ij,y} - (\theta_i - \theta_j)| \leq M(1 - w_{ij,y}) \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall y \in Y \quad (6e)$$

$$|f_{ij,y}| \leq w_{ij,y} \bar{f}_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall y \in Y \quad (6f)$$

$$0 \leq g_i \leq \bar{g}_i \quad \forall i \in \Omega_b \quad (6g)$$

$$\sum_{y \in Y} w_{ij,y} \leq \bar{n}_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (6h)$$

$$w_{ij,y} \leq w_{ij,y-1} \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall y \in Y | y > 1 \quad (6i)$$

$$w_{ij,y} \text{ entero} \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall y \in Y \quad (6j)$$

La función objetivo representada por la ecuación (6a) es el costo de inversión de la construcción de nuevos circuitos y w_{ij} , y es la variable binaria, que es la fuente de complejidad del problema. Las restricciones (6b), (6c) y (6d) son las ecuaciones de flujo de potencia linealizadas para los circuitos existentes y candidatos, respectivamente. La restricción (6i) permite la instalación secuencial de nuevos circuitos en el ramal ij y evita soluciones iguales. Las otras restricciones representan los límites operativos y de integridad del sistema eléctrico.

La principal diferencia entre el modelo lineal disyuntivo y el modelo CC es la extensión de las dimensiones del problema a causa de la inclusión de variables binarias $w_{ij,y}$ y que en el modelo CC se utilizan variables enteras n_{ij} , y también la elección del parámetro gran M en cada restricción que comienza a representar el factor complejo en la solución del modelo disyuntivo. La ventaja principal de este modelo está vinculada con el modelado lineal de enteros mixtos, que permite el desarrollo de algoritmos adecuados, con interesantes características de convergencia desde un punto de vista teórico [16].

Debido que el valor gran M no es un valor completamente definido se han generado diversos análisis para determinar su valor adecuado, pero el más aceptado es el que nace de la inclusión de un criterio de estabilidad donde los ángulos de las barras deben permanecer dentro de un valor máximo $|\bar{\theta}|$, de tal forma que la máxima diferencia angular posible entre dos barras sería $2\bar{\theta}$, por lo cual en lugar de utilizar el valor de la gran M podemos utilizar $2\bar{\theta}$ con lo que tenemos los suficientes grados de libertad para la diferencia angular entre dos barras [19]. Por tanto, el modelo lineal disyuntivo se reformula de la siguiente forma:

$$\min v = \sum_{ij \in \Omega_l} c_{ij} \sum_{y \in Y} w_{ij,y} \quad (7a)$$

Sujeto a:

$$\sum_{ji \in \Omega_l} \left(\sum_{y \in Y} f_{ji,y} + f_{ji}^0 \right) - \sum_{ij \in \Omega_l} \left(\sum_{y \in Y} f_{ij,y} + f_{ij}^0 \right) + g_i = d_i \quad \forall i \in \Omega_b \quad (7b)$$

$$f_{ij}^0 = n_{ij}^0 \frac{(\theta_i - \theta_j)}{x_{ij}} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (7c)$$

$$|f_{ij}^0| \leq n_{ij}^0 \bar{f}_{ij}^0 \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (7d)$$

$$|x_{ij} f_{ij,y} - (\theta_i - \theta_j)| \leq 2\bar{\theta}(1 - w_{ij,y}) \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall y \in Y \quad (7e)$$

$$|f_{ij,y}| \leq w_{ij,y} \bar{f}_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall y \in Y \quad (7f)$$

$$0 \leq g_i \leq \bar{g}_i \quad \forall i \in \Omega_b \quad (7g)$$

$$\sum_{y \in Y} w_{ij,y} \leq \bar{n}_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (7h)$$

$$w_{ij,y} \leq w_{ij,y-1} \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall y \in Y | y > 1 \quad (7i)$$

$$\theta_i \leq |\bar{\theta}| \quad \forall i \in \Omega_b \quad (7j)$$

$$w_{ij,y} \text{ entero} \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall y \in Y \quad (7k)$$

Modelo CA - Corriente Alterna

El modelo matemático para considerar el funcionamiento adecuado de un sistema eléctrico sería representar el problema a través de relaciones matemáticas del flujo de carga de corriente alterna. Las técnicas empleadas por el modelo matemático dificultan la resolución simultánea del problema de los sistemas de transmisión (construcción de líneas o transformadores) y la asignación de reactivos en el sistema eléctrico [14].

El modelo matemático CA para el problema de la PET se puede definir como una extensión del modelo CC, expresado de la siguiente manera:

$$\min v = \sum_{ij \in \Omega_l} c_{ij} n_{ij} \quad (8a)$$

Sujeto a:

$$V_i \sum_{j \in \Omega_b} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) + g_i = d_i \quad \forall i \in \Omega_b \quad (8b)$$

$$V_i \sum_{j \in \Omega_b} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} + B_{ij} \cos \theta_{ij}) = e_i - q_i \quad \forall i \in \Omega_b \quad (8c)$$

$$(n_{ij} + n_{ij}^0) s_{ij}^{de} \leq (n_{ij} + n_{ij}^0) \bar{s}_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (8d)$$

$$(n_{ij} + n_{ij}^0) s_{ij}^{para} \leq (n_{ij} + n_{ij}^0) \bar{s}_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (8e)$$

$$\underline{g}_i \leq g_i \leq \bar{g}_i \quad \forall i \in \Omega_b \quad (8f)$$

$$\underline{q}_i \leq q_i \leq \bar{q}_i \quad \forall i \in \Omega_b \quad (8g)$$

$$\underline{V} \leq V_i \leq \bar{V} \quad \forall i \in \Omega_b \quad (8h)$$

$$0 \leq n_{ij} \leq \bar{n}_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (8i)$$

$$n_{ij} \text{ entero} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (8j)$$

En donde:

q_i y e_i	Valores de generación y demanda de potencia reactiva respectivamente
\bar{q}_i y \underline{q}_i	Limites máximo y mínimo de generación de potencia reactiva
V_i , \underline{V} y \bar{V}	Magnitud de voltaje en la barra i , limites mínimo y máximo de la magnitud de voltaje
s_{ij}^{de} , s_{ij}^{para} y \bar{s}_{ij}	Flujos de potencia aparente en ambos terminales

La ecuación (8a) representa la función objetivo que es el costo de inversión de agregar nuevos circuitos. Las ecuaciones (8b) y (8c) son ecuaciones de potencia CA generalizadas convencionales, donde n_{ij} es el número de circuitos existentes (transformador y línea) como variables, donde la diferencia de fase angular entre las barras i y j está representada por $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$. La restricción (8a) y (8a) son límites de MVA en los flujos de potencia aparentes de los circuitos. Los límites de potencia activa y reactiva están dados por (8d) y (8e), respectivamente. La magnitud de la tensión representada por la ecuación (8f) y la ecuación (8g) representa el límite máximo de circuitos a construir en cada ramal. La restricción (8j) representa el carácter entero de la adición de circuitos. Los complementos del modelo CA son las siguientes ecuaciones:

$$s_{ij}^{de} = \sqrt{(p_{ij}^{de})^2 + (q_{ij}^{de})^2} \quad (9a)$$

$$p_{ij}^{de} = V_i^2 g_{ij} - V_i V_j (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (9b)$$

$$q_{ij}^{de} = -V_i^2 (b_{ij}^{sh} + b_{ij}) - V_i V_j (g_{ij} \sin \theta_{ij} + b_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (9c)$$

$$s_{ij}^{para} = \sqrt{(p_{ij}^{para})^2 + (q_{ij}^{para})^2} \quad (9d)$$

$$p_{ij}^{para} = V_j^2 g_{ij} - V_i V_j (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (9e)$$

$$q_{ij}^{para} = -V_j^2 (b_{ij}^{sh} + b_{ij}) - V_i V_j (g_{ij} \sin \theta_{ij} + b_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (9f)$$

En donde:

s_{ij}^{de} y s_{ij}^{para}	Son los flujos de potencia aparente (MVA) en el ramal en ambos terminales
p_{ij}^{de} y p_{ij}^{para}	Generación de potencia activa en el ramal ij en ambos terminales
q_{ij}^{de} y q_{ij}^{para}	Generación de potencia reactiva en el ramal ij en ambos terminales

2.1.3 Modelado matemático del problema de la PET con múltiples escenarios de generación

En esta sección se trata el problema de la PET incluyendo en el análisis escenarios múltiples de generación. Este tipo de problema fue propuesto inicialmente por [20]. Sin embargo, en esta propuesta no existe un plan de expansión que permita al sistema operar apropiadamente para todos los escenarios de generación. De hecho, lo propuesto fue buscar un plan de expansión considerando cada escenario de generación por separado. De estos planes, se elige el que tiene un mejor desempeño entre todos los escenarios de generación. Es decir, cada plan se prueba para cada uno de los escenarios de generación, donde se valida su funcionamiento y, en este contexto, se elige el plan que presenta el mejor desempeño. En este contexto, en [21] se propone encontrar un único plan de expansión considerando todos los escenarios de generación simultáneamente. Es decir, la PET resultante debe permitir que el sistema opere de manera factible para cada uno de los diferentes escenarios de generación.

La modelización matemática del problema de la PET para múltiples escenarios de generación analizados considera un solo horizonte de planificación, es decir, la planificación estática. En base a lo indicado, se puede utilizar el modelo de transporte, el modelo lineal disyuntivo o cualquier otro modelo existente en la literatura especializada. El principal interés para este análisis es utilizar el modelo lineal disyuntivo, pero, de forma didáctica, también se presenta el modelo de transporte.

Modelo de transporte – Múltiples escenarios de generación

El modelo de transporte básico de Garver se puede ampliar para el análisis de la PET incluyendo escenarios de generación múltiple. Así, la PET resultante debe permitir que el sistema sea operativo sin problemas en cada uno de los escenarios de generación previamente analizados.

La formulación de este modelo toma la siguiente forma:

$$\min v = \sum_{ij \in \Omega_l} c_{ij} n_{ij} \quad (10a)$$

Sujeto a:

$$\sum_{ji \in \Omega_l} f_{ji}^s - \sum_{ij \in \Omega_l} f_{ij}^s + g_i^s = d_i \quad \forall i \in \Omega_b, \forall s \in S \quad (10b)$$

$$|f_{ij}^s| \leq (n_{ij} + n_{ij}^0) \bar{f}_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall s \in S \quad (10c)$$

$$0 \leq g_i^s \leq \bar{g}_i \quad \forall i \in \Omega_b, \forall s \in S \quad (10d)$$

$$0 \leq n_{ij} \leq \bar{n}_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (10e)$$

$$n_{ij} \text{ entero} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (10f)$$

La restricción (10b), donde se especifica g_i^s , representa el balance de potencia activa en cada barra y en cada escenario s . La restricción (10c) limita los flujos en los circuitos a la capacidad máxima de transmisión de cada circuito y en cada escenario. La restricción (10e) limita la cantidad de circuitos que se instalarán en cada ramal ij y la restricción (10f) define la variable n_{ij} como de tipo entero.

En el modelado anterior se especifica g_i^s , es decir, es un parámetro conocido; g_i^s es el valor de generación en la barra i y en el escenario s .

Modelo lineal disyuntivo para múltiples escenarios de generación

El modelado presentado para el modelo lineal disyuntivo se desarrolló a partir de los artículos presentados por [19], [22] y [23], donde se presenta el modelo lineal disyuntivo para escenarios de generación múltiple, modelo que puede resolverse mediante técnicas de optimización encontradas en la literatura especializada.

El modelo lineal disyuntivo para darle solución al problema de la PET con múltiples escenarios de generación debe encontrar un plan de expansión óptimo adecuado para todos los escenarios de generación. El modelo se describe a continuación:

$$\min v = \sum_{ij \in \Omega_l} c_{ij} \sum_{y \in Y} w_{ij,y} \quad (11a)$$

Sujeto a:

$$\sum_{ji \in \Omega_l} \left(\sum_{y \in Y} f_{ji,y}^s + f_{ji}^{0,s} \right) - \sum_{ij \in \Omega_l} \left(\sum_{y \in Y} f_{ij,y}^s + f_{ij}^{0,s} \right) + g_i^s = d_i \quad \forall i \in \Omega_b, \forall s \in S \quad (11b)$$

$$f_{ij}^{0,s} = n_{ij}^0 \frac{(\theta_i^s - \theta_j^s)}{x_{ij}} \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall s \in S \quad (11c)$$

$$|f_{ij}^{0,s}| \leq n_{ij}^0 \bar{f}_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall s \in S \quad (11d)$$

$$|x_{ij} f_{ij}^{0,s} - (\theta_i^s - \theta_j^s)| \leq 2\bar{\theta}(1 - w_{ij,y}) \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall y \in Y, \forall s \in S \quad (11e)$$

$$|f_{ij,y}^s| \leq w_{ij,y} \bar{f}_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall y \in Y, \forall s \in S \quad (11f)$$

$$0 \leq g_i^s \leq \bar{g}_i \quad \forall i \in \Omega_b, \forall s \in S \quad (11g)$$

$$\sum_{y \in Y} w_{ij,y} \leq \bar{n}_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (11h)$$

$$w_{ij,y} \leq w_{ij,y-1} \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall y \in Y | y > 1 \quad (11i)$$

$$|\theta_i^s| \leq \bar{\theta} \quad \forall i \in \Omega_b, \forall s \in S \quad (11j)$$

$$w_{ij,y} \text{ entero} \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall y \in Y \quad (11k)$$

$$\theta_{ref}^s = 0 \quad \forall s \in S \quad (11l)$$

La función objetivo representada por la restricción (11a) representa la inversión en la construcción de nuevos circuitos, donde se especifica g_i^s . La restricción (11b) representa la primera Ley de Kirchhoff, es decir, el balance de potencia activa en cada barra del sistema eléctrico y en cada escenario s . Las restricciones (11c) y (11d) representan las ecuaciones correspondientes a los circuitos existentes, así como la ley de voltaje de Kirchhoff aplicada a los circuitos existentes y la capacidad de transmisión de cada circuito, respectivamente. La restricción (11j) representa el límite del ángulo de tensión en cada barra i en el escenario s . La restricción (11e) representa la aplicación de la ley de voltajes de Kirchhoff a cada circuito candidato; la restricción (11f) representa el límite de capacidad de transmisión en cada circuito candidato a construir; la restricción (11h) limita el número máximo de circuitos que se pueden construir en cada ramal ij ; la restricción (11i) requiere la adición secuencial de circuitos en cada ramal. Finalmente, la restricción (11k) indica que la variable $w_{ij,y}$, que representa la posibilidad de agregar un circuito, debe ser de tipo binario y la restricción (11l) fija la referencia angular del sistema en cada escenario.

2.2 Aprendizaje de máquina

El objetivo principal del aprendizaje de máquina es el desarrollo de herramientas para lograr mediante la experiencia el dominio acerca de un tema en particular, es decir traducir experiencias en un aprendizaje sesgado y cuantificar el efecto de dicho sesgo en el éxito del aprendizaje. En cuanto más supuestos previos se cuente en el inicio del proceso de aprendizaje, más fácilmente se podrá aprender de otros ejemplos. Sin embargo, cuanto más fuertes son estos supuestos previos, menos flexible es el aprendizaje; está a priori ligado a la vinculación de estos supuestos.[24]

2.2.1 Retos del aprendizaje de máquina

Los mayores retos del aprendizaje de máquina se relacionan con el manejo de datos y la búsqueda del modelo correcto, a continuación, podemos resumir los principales retos que presenta el aprendizaje de máquina:

- **Homogeneidad de los datos**

Los conjuntos de datos del mundo real pueden ser desordenados, incompletos y en una variedad de formatos. Es posible que solo tenga datos numéricos simples. Pero a veces se combinan varios tipos de datos diferentes, como señales de sensores, texto e imágenes de transmisión desde una cámara.

- **Requiere conocimientos y herramientas especializados para el preprocesamiento de datos**

Por ejemplo, para seleccionar características para entrenar un algoritmo de detección de objetos se requiere un conocimiento especializado del procesamiento de imágenes. Los diferentes tipos de datos requieren diferentes enfoques para el preprocesamiento.

- **Requiere tiempo para validar el modelo que se ajuste a los datos**

Elegir el modelo adecuado es un acto de equilibrio. Los modelos muy flexibles tienen la tendencia a sobre ajustar los datos al modelar ciertas variaciones que podrían ser ruido. Por otro lado, los modelos más sencillos pueden asumir demasiado. Siempre hay compensaciones entre la velocidad, la precisión y la complejidad del modelo.

2.2.2 Funcionamiento del aprendizaje de máquina

El aprendizaje de máquina usa dos diferentes modos de aprendizajes: el aprendizaje supervisado, el cual adiestra un modelo usando datos de entrada y salida conocidos de la característica en análisis de tal forma que este pueda pronosticar nuevas salidas, el aprendizaje no supervisado, es el que con los datos ingresados puede hallar patrones ocultos.

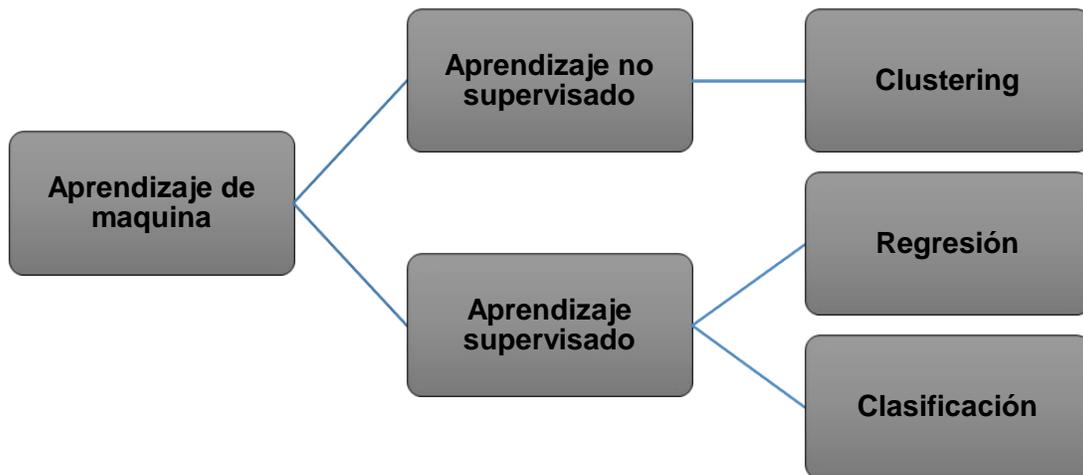


Ilustración 2-1 Tipos de aprendizaje de máquina

2.2.3 Determinación del algoritmo correcto

Seleccionar el algoritmo correcto puede ser una tarea compleja debido a que hay una variedad de algoritmos sean estos de aprendizaje supervisado o no supervisado, y cada uno de estos tiene su propio objetivo y se aplica de manera diferente.

No se puede decir que existe un mejor método o un único método que podamos aplicar en todos los casos, debido a que encontrar el algoritmo correcto es un proceso de prueba y error. La selección del algoritmo es dependiente del tipo y de la dimensión de los datos con los estemos trabajando, los resultados que desea obtener y cómo se utilizarán esos resultados.

2.2.4 Aprendizaje supervisado

Este permite crear un modelo que efectué pronósticos en base a los datos ingresados que incluyen incertidumbre. Los algoritmos de este tipo toman un grupo de datos de entrada y salida, con los cuales entrena un modelo que permita realizar pronósticos como respuesta a nuevos datos de entrada, para utilizar este tipo de aprendizaje es necesario tener datos registrados para la salida que está queriendo pronosticar.

Clasificación

Este tipo de técnicas pronostican respuestas discretas de tal manera que organizan los datos de entrada en categorías. Los usos más comunes para este tipo de técnicas son en la calificación crediticia, el reconocimiento de voz y el análisis de las imágenes médicas. Se utiliza este tipo de técnicas si los datos se pueden clasificar en grupos concretos.

Regresión

Este tipo de técnicas permiten predecir respuestas continuas; por ejemplo, variaciones en la demanda de energía o cambios de temperatura. Se utiliza este tipo de técnicas si la naturaleza de la respuesta es un número real o si se trabaja con un intervalo de datos.

2.2.5 Aprendizaje no supervisado

Este tipo de aprendizaje es aquel que permite hallar patrones ocultos en los datos de tal manera que se pueda inferir resultados a partir de un grupo de datos de entrada sin etiquetar.

Clustering

Una de las técnicas de aprendizaje más común es el clustering el cual se utiliza para el análisis de datos, esto con el objetivo de buscar agrupaciones o patrones ocultos. Entre las aplicaciones más comunes del clustering están el reconocimiento de objetos, la investigación de mercados y el análisis de secuencias genéticas.

Para el análisis de clústeres, los datos se dividen en grupos según alguna medida de similitud o característica compartida de modo que los objetos de un mismo clúster sean muy similares y los objetos de diferentes clústeres sean muy distintos.

Este tipo de algoritmos se clasifican en dos grandes grupos:

- Clúster rígido, donde los datos pertenecen a un solo clúster
- Clúster suave, donde los datos pueden pertenecer a más de un clúster

Algoritmos más comunes de clúster rígido

K-means

El algoritmo K-means es un algoritmo que permite dividir un conjunto de datos en K grupos predefinidos no superpuestos y distintos conocidos como clústeres en donde los datos individuales pertenecen a un solo clúster. Esto con el propósito de Intenta agrupar los datos

dentro de cada clúster de tal manera sean lo más similares posible y, al mismo tiempo, busca que datos diferentes se mantenga en clústeres distintos. Asigna un peso a cada uno de los datos de modo que la distancia euclidiana entre los puntos de datos y el centroide del sea el menor posible. Mientras haya una menor variación dentro de los clústeres, más similitudes tienen los datos dentro del mismo clúster. Es importante resaltar que los centroides no necesariamente coinciden con datos existentes dentro de los clústeres lo cual se puede verificar en la Ilustración 2-2: Centroides K-means.



Ilustración 2-2: Centroides K-means [4]

En la Ilustración 2-3 Algoritmo K-means se resume la metodología usada por el algoritmo K-means, la cual se describe a continuación:

1. Especificar el número de clústeres K con los que se quiere agrupar los datos.
2. Inicializar los centroides de manera aleatoria de tal manera que se seleccione K puntos de datos que serán los centroides iniciales.
3. Mantenga la iteración hasta que no haya modificaciones en los centroides. es decir, la agrupación de datos en los clústeres no está cambiando.
 - Calcule la distancia euclidiana entre datos todos los centroides.
 - Asigne cada dato al clúster con el centroide más cercano.
 - Calcule los nuevos centroides de cada clúster tomando el promedio de todos los datos que pertenecen a cada clúster.

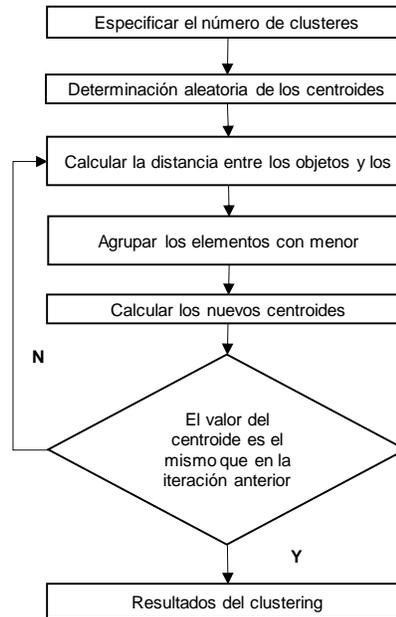


Ilustración 2-3 Algoritmo K-means

K-Medoides

Su funcionamiento es similar al K-means, con la principal diferencia de que los centroides de los clústeres deben coincidir con puntos en los datos. Su mejor aplicación se determina en los siguientes escenarios:

- Cuando se conoce la cantidad de clústeres
- Para la agrupación rápida de datos categóricos
- Escalar a grandes conjuntos de datos

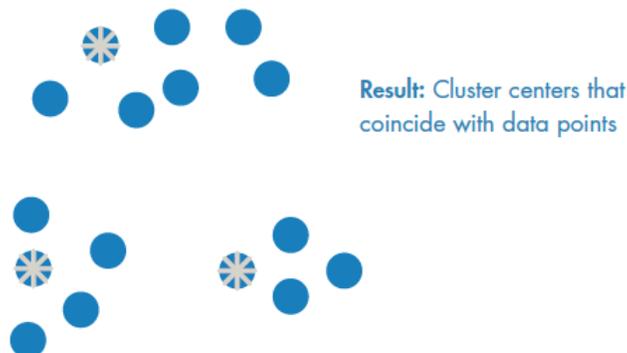


Ilustración 2-4: K-Medoides [4]

Agrupación jerárquica

Este algoritmo produce conjuntos anidados de clústeres analizando similitudes entre pares de puntos y agrupando objetos en un árbol binario jerárquico. Su mejor aplicación se determina en los siguientes escenarios:

- Cuando no sabe de antemano cuántos clústeres hay en sus datos
- Quieres que la visualización guíe tu selección



Ilustración 2-5. Agrupación jerárquica[4]

Mapa autoorganizado

Este algoritmo es una agrupación basada en redes neuronales que transforma un conjunto de datos en un mapa 2D que conserva la topología. Su mejor aplicación se determina en los siguientes escenarios:

- Para visualizar datos de alta dimensión en 2D o 3D
- Deducir la dimensionalidad de los datos conservando su topología (forma)



Ilustración 2-6. Mapa Autoorganizado[4]

Algoritmos más comunes de clúster suave

Fuzzy c-means

Es un algoritmo similar al K-means con la principal diferencia que los puntos de datos pueden pertenecer a más de un clúster. Su mejor aplicación se determina en los siguientes escenarios:

- Cuando se conoce la cantidad de clústeres
- Para el reconocimiento de patrones
- Cuando los grupos se superponen

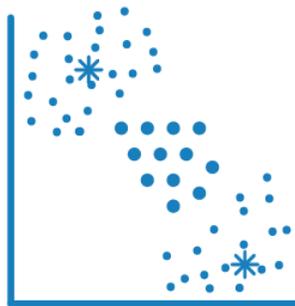


Ilustración 2-7. Fuzzy c-means[4]

Modelo de mezcla gaussiana

Es una agrupación basada en particiones donde los puntos de datos provienen de diferentes distribuciones normales multivariadas con ciertas probabilidades. Su mejor aplicación se determina en los siguientes escenarios:

- Cuando un punto de datos puede pertenecer a más de un clúster.
- Cuando los conglomerados tienen diferentes tamaños y estructuras de correlación dentro de ellos.



Ilustración 2-8. Modelo mixto gaussiano[4]

Determinación del número de clústeres

Uno de los parámetros con el cual debemos iniciar el análisis mediante K-means es el número de clústeres a usar, para lo cual se pueden usar métodos de observación de tendencia de los datos con lo cual podremos tener un número de clústeres que no necesariamente sería el adecuado para el análisis y que se ajuste mejor a los datos que estemos usando. Por lo cual, es necesario contar con una herramienta para poder determinar el número adecuado de clústeres en base a la literatura una de las herramientas más efectivas es el método gráfico conocido como el Método del codo [25].

Este método se basa en evaluar un número N de clústeres y su respectiva inercia, una vez se aplica el K-means desde el clúster 1 hasta el clúster N se calculan sus respectivos valores de inercia, con estos resultados se hace un gráfico que represente la relación entre la inercia y el número de clústeres. En este gráfico se podrá verificar que existe una variación brusca en la pendiente de la curva, teniendo la curva con una forma parecida a la de un brazo y su codo. El punto en donde se presenta esa modificación (codo) indicará la cantidad óptima de clústeres que se ajusta a los datos que estamos y que debemos seleccionar para nuestro análisis.

3 Propuesta Integral

La propuesta se basa en el procesamiento la información de la Generación de la Central Eólica Villonaco ubicada en la provincia de Loja, administrada por CELEC EP GENSUR y con una Potencia nominal de 16.5MW, con lo cual podremos obtener escenarios representativos de una Generación de alta incertidumbre.

Una vez obtenidos los escenarios se propone incluirlos en distintos modelos de red para analizarlos mediante el Modelo Lineal Disyuntivo y de esta forma validar la potencialidad del método para el análisis de la PET.

3.1 Análisis de datos mediante aprendizaje de máquina

La información entregada por CELEC EP GENSUR incluye los registros diarios de la Velocidad Promedio del Viento y la Potencia Promedio Generada desde el 1 de enero de 2014 hasta el 17 de agosto de 2021.

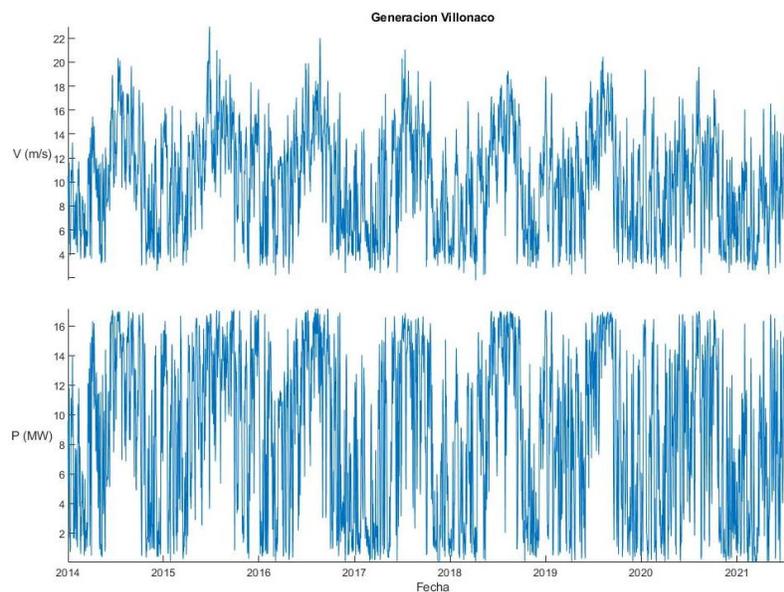


Ilustración 3-1 Registro histórico de Velocidad del Viento y Potencia Promedio de la Central Villonaco

Como se puede notar en la Ilustración 3-1 Registro histórico de Velocidad del Viento y Potencia Promedio de la Central Villonaco los registros históricos de la Potencia Promedio Generada y de la Velocidad Promedio del Viento en la Central Eólica Villonaco son muy variables, en el caso de querer usar esta información para el análisis de la PET es necesario determinar uno o más escenarios producto del procesamiento de estos datos de tal manera que se reduzca el tiempo

de análisis sin que esto afecte la calidad del resultado obtenido, para esto se vuelve necesario el uso de herramientas de análisis y procesamiento de datos tal como el aprendizaje de máquina de tal manera que los escenarios no sean discrecionales sino que sean representativos.

Una vez que se estableció que se requieren escenarios de generación que sean producto de los datos registrados se determinó que el K-means es el algoritmo por implementar más adecuado dado que este permite determinar uno o más de representantes de los datos históricos y además permite analizar no solo en 1 sino en n dimensiones donde podremos incluir dentro de nuestra propuesta la relación que hay entre la potencia generada y el viento.

Los datos de potencia generada con los que se está trabajando son relativamente pequeños comparados con el nivel de generación de un Sistema de Potencia, por determinar los escenarios de generación se decidió normalizar las potencias resultantes dividiéndolas para la Potencia nominal de Villonaco (16.5 MW), de esta forma al aplicar los resultados en las redes a analizar se modificará la generación de una o más barras multiplicando los escenarios resultantes por la potencia instalada con el objetivo que los resultados puedan ayudar a verificar la potencialidad de la propuesta.

Finalmente, se debe considerar que si plantean n escenarios de generación esto no necesariamente implica n escenarios totales a analizar, dado se debe considerar en cuantas barras se van a aplicar estos escenarios, de manera general si se aplican n escenarios de generación en m barras de nuestra red tendremos que analizar n^m escenarios totales, lo cual es una razón adicional para implementar una metodología de reducción de escenarios.

3.1.1 Análisis K-means

Para el análisis de los datos mediante el K-means se ha realizado la siguiente propuesta de código en Matlab, inicialmente se da lectura a los datos de generación y viento desde el archivo y se normaliza los datos de tal manera que se los prepara para el análisis del método del codo.

```

%Ingreso de los datos en un archivo formato Excel
filename='Datos_Villonaco2.xlsx';
Datos=xlsread(filename);
P_nom=16.5;%Potencia nominal de la central Villonaco [MW]

%Normalizacion de los datos
Fecha=Datos(:,1);
V_viento=Datos(:,2);
P_gen=Datos(:,3);

Data=[V_viento P_gen];
Data_min=min(Data);
Data_max=max(Data);
Data_rescale=rescale(Data,'InputMin',Data_min,'InputMax',Data_max);

```

Ilustración 3-2 Lectura y normalización de datos

Una vez leídos los datos estos se normalizan usando la función “rescale” esto debido a que la función “kmeans” en Matlab solo procesa datos entre 0 y 1, esta función normaliza los datos en función de sus valores máximos y mínimos es decir que una vez normalizados los datos con esta función el mínimo registrado se tomara como 0 y el máximo como 1, una vez normalizados los datos procedemos a aplicar la metodología del codo con el cual podremos determinar el número de clústeres a utilizar en el análisis mediante el algoritmo del K-means.

```

%Determinar el numero de clusteres
inercia=[];
n_cluster=[];

for n_c=1:8
    [idx,c,sumd]=kmeans(Data_rescale,n_c);
    inercia=[inercia sum(sumd)];
    n_cluster=[n_cluster n_c];
end

plot(n_cluster, inercia)
title('Codo de Jambu')
xlabel('Numero de clusteres')
ylabel('Inercia interclase')
grid on

```

Ilustración 3-3 Determinación de numero de clústeres

Ya obtenido el numero óptimo de clústeres con los cuales se debe trabajar se realiza en análisis del K-means con los cuales se obtendrán los centroides que serán los representantes de los datos analizados.

```

%Aplicacion del algoritmo Kmeans
[idx,C]=kmeans(Data_rescale,2);
figure
gscatter(Data_rescale(:,1),Data_rescale(:,2),idx,'bgm')
hold on
plot(C(:,1),C(:,2),'kx')
legend('Cluster 1','Cluster 2','Cluster Centroide')
xlabel('Potencia generada')
ylabel('Potencia generada')

datos_id=[idx Fecha Data_rescale];

[rowC2,colC2]=find(datos_id(:,1)==2);
Datos_C2=datos_id(rowC2,:);

[rowC1,colC1]=find(datos_id(:,1)==1);
Datos_C1=datos_id(rowC1,:);

%C1
C_P1a=C(1,1)*(Data_max(:,1)-Data_min(:,1)+Data_min(:,1));
C_P1b=C(1,2)*(Data_max(:,2)-Data_min(:,2)+Data_min(:,2));

%C2
C_P2a=C(2,1)*(Data_max(:,1)-Data_min(:,1)+Data_min(:,1));
C_P2b=C(2,2)*(Data_max(:,2)-Data_min(:,2)+Data_min(:,2));

Centroides=[C_P1a,C_P1b;C_P2a,C_P2b]
P_pu=[C_P1b C_P2b]/P_nom

```

Ilustración 3-4 Análisis mediante el K-means

3.1.2 Hipótesis planteadas

Una vez obtenidos los resultados mediante el K-means, es necesario realizar los análisis necesarios para validar la potencialidad del método por lo cual se presentan 3 hipótesis diferentes que permitirán validar que tan bueno en el método propuesto.

Hipótesis 1: Mediante el cálculo de la media (μ) de los registros de Potencia Promedio Generada se puede obtener un escenario representativo de los datos.

El análisis más utilizado cuando existan una gran cantidad de datos numéricos es determinar el valor de la media μ y este valor sería el único escenario de generación a analizar, una vez normalizados los datos se tuvo el siguiente resultado:

Escenario único (μ)	0.5273
---	--------

Tabla 3-1 Escenario Hipótesis 1

En la Tabla 3-1 Escenario Hipótesis 1 se presenta el promedio normalizado de la Generación de Villonaco que indica que en promedio la central produce un 52.73% de su capacidad instalada, por lo tanto, este valor será utilizado como el escenario representante de los datos analizados.

Hipótesis 2: Mediante el uso del K-means para analizar los registros de Potencia Promedio Generada se obtienen los escenarios representativos de los datos.

La segunda hipótesis planteada se basa en el análisis de la Potencia Promedio Generada aplicando inicialmente el método del codo con lo cual se determinó la cantidad óptima de clústeres teniendo los siguientes resultados:

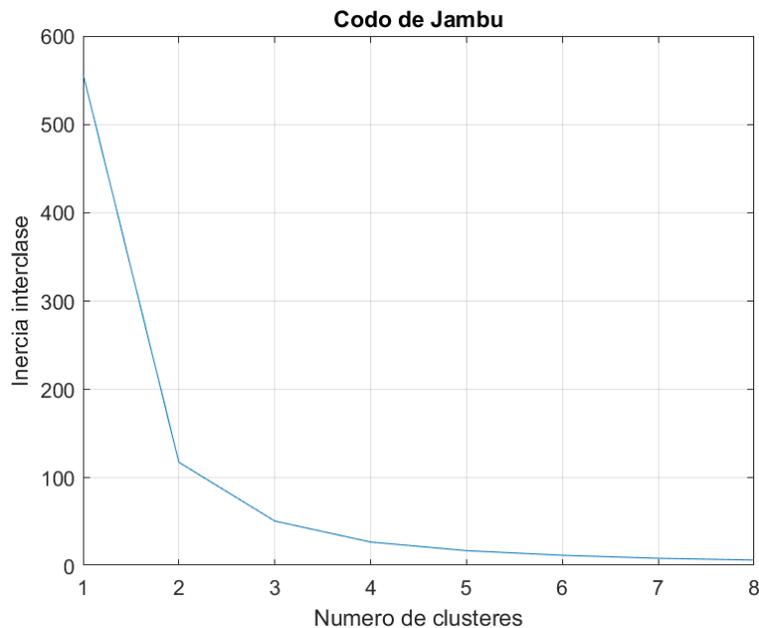


Ilustración 3-5 Análisis mediante el método del codo Hipótesis 2

En la Ilustración 3-5 Análisis mediante el método del codo Hipótesis 2 podemos verificar visualmente que el cambio más drástico en la pendiente o el codo de la gráfica se da cuando tenemos 2 clústeres el cual sería el número óptimo para la Hipótesis 2, con esto se tienen los siguientes resultados normalizados:

Escenario 1 (Centroide 1)	0.2094
Escenario 2 (Centroide 2)	0.7957

Tabla 3-2 Escenarios Hipótesis 2

En la Tabla 3-2 Escenarios Hipótesis 2 se presentan los resultados de analizar solo la potencia generada con el K-means, lo que dio como resultado que los escenarios de generación representativos son 20.94% y el 79.57%

Hipótesis 3: Mediante el uso del K-means para analizar los registros de Potencia Promedio Generada y los registros de Velocidad Promedio del Viento diaria se obtienen los escenarios representativos de los datos.

La tercera hipótesis planteada fue determinada en base al análisis de la relación que existe entre Potencia Promedio Generada y la velocidad del viento aplicando inicialmente el método del codo para determinar la cantidad óptima de clústeres teniendo el siguiente resultado:

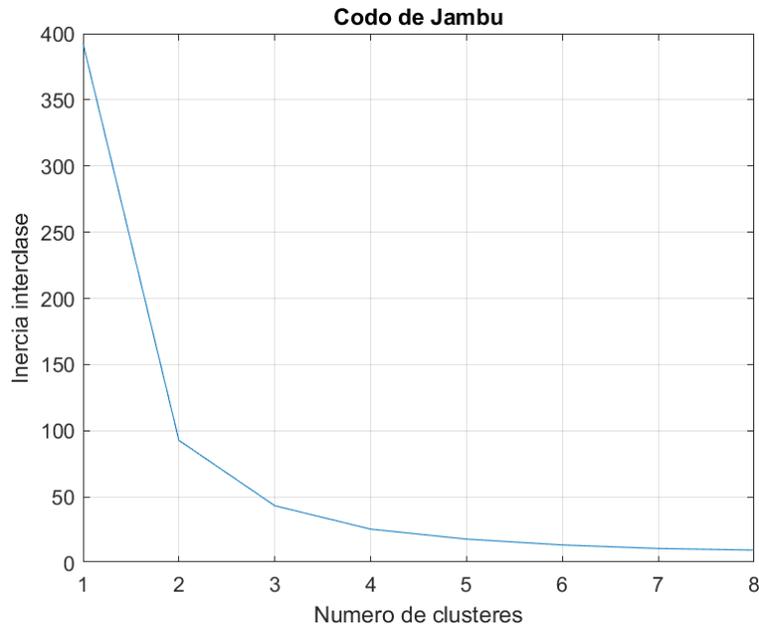


Ilustración 3-6 Análisis mediante el método del codo Hipótesis 3

En la Ilustración 3-6 Análisis mediante el método del codo Hipótesis 3 al analizar la relación entre la Potencia Promedio Generada y la Velocidad Promedio del Viento mediante el método del codo no podemos verificar visualmente si el codo de la gráfica se encuentra en 2 o en 3 clústeres, para poder determinar exactamente cuál de las dos opciones es la más adecuada se utiliza la relación gráfica entre los datos de Velocidad Promedio del Viento y Potencia Promedio Generada.

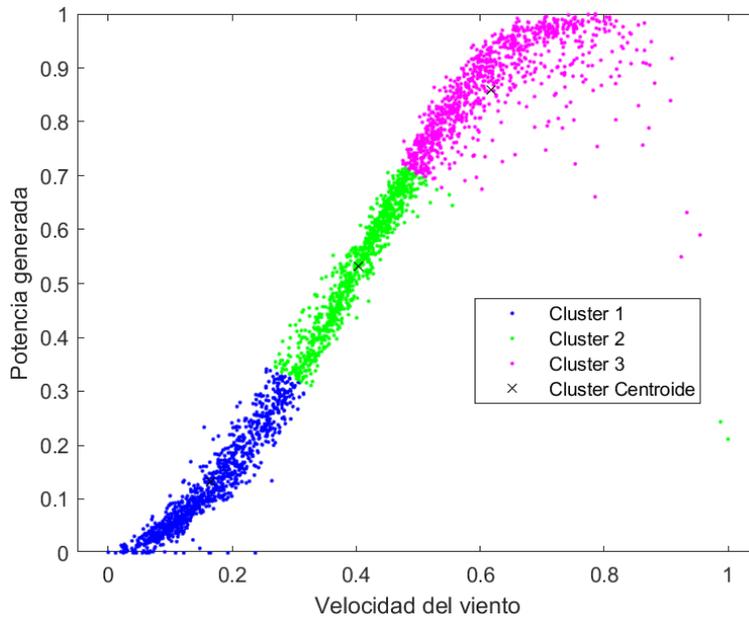


Ilustración 3-7 Relación entre la Potencia generada y la Velocidad del viento

Con la ayuda de la Ilustración 3-7 Relación entre la Potencia generada y la Velocidad del viento podemos validar visualmente que los datos se ajustan mejor a 3 clústeres, esto considerando que la relación entre los datos extremos no es lineal mientras que la relación entre los datos intermedios parece mantener una linealidad, con lo cual determinamos que 3 es el número óptimo de clústeres para la Hipótesis 3, con esto se tienen los siguientes resultados normalizados:

Escenario 1 (Centroide 1)	0.1368
Escenario 2 (Centroide 2)	0.5530
Escenario 3 (Centroide 3)	0.8940

Tabla 3-3 Escenarios Hipótesis 3

En la Tabla 3-3 Escenarios Hipótesis 3 se presentan los resultados de analizar la potencia generada junto con la velocidad del viento con el K-means, lo que dio como resultado que los escenarios de generación representativos son el 13.68%, 55.30% y el 89.40%

3.2 Modelamiento Matemático

Una vez obtenido los escenarios normalizados de generación es necesario determinar el modelo matemático a utilizar, y una vez definido el modelo se decidió en cual herramienta de programación lineal se debía implementar el modelo seleccionado, para lo cual se decidió utilizar el AMPL[26] el cual es un sistema que permite implementar modelos de optimización de manera sencilla, es decir le permite al programador implementar modelos de la manera que se los está pensando sin entrar a un nivel de detalle excesivo que no permita entender el programa.

Dado que el modelo a implementar en un modelo de programación lineal fue necesario incluir en la programación del AMPL un SOLVER adecuado para este tipo de problemas, el SOLVER seleccionado fue el CPLEX[27] desarrollado por IBM el cual permite implementar modelos de optimización lineal y cuadrática en variables continuas y enteras. Que permite tener funciones objetivo-cuadráticas convexas y no convexas, con restricciones cuadráticas convexas.

3.2.1 Modelos para implementar

En base a lo revisado en la literatura técnica y a la versatilidad del método para ajustarse a varios escenarios de generación se decidió por utilizar el Modelo Lineal disyuntivo para el análisis a ejecutar.

Modelo Lineal Disyuntivo para un escenario

Para poder realizar el análisis del escenario base y de la aplicación de la Hipótesis 1 donde se plantea un escenario único de generación a incluir, fue necesario implementar el Modelo Lineal Disyuntivo para un escenario en el AMPL.

Para validar la correcta la implementación de este modelo se lo validó utilizando la red GARVER y para verificar que los resultados fueran los correctos se los comparo con los resultados obtenidos en [15], con esta validación determinamos la correcta implementación del Modelo Lineal Disyuntivo para un escenario de generación.

Modelo Lineal Disyuntivo para múltiples escenarios

Para el realizar el análisis de las redes a implementar incluyendo los escenarios indicados en las Hipótesis 2 y 3, fue necesario implementar el Modelo Lineal Disyuntivo para múltiples escenarios en el AMPL.

Para verificar la implementación adecuada de este modelo, se lo validó con la red IEEE24 y para verificar que los resultados fueran los correctos se los comparo con los resultados obtenidos en

[21], con esta validación aunque la inversión es la misma USD 532 MM, se presentaron diferencias en el número de circuitos a construir teniendo como resultado que nuestra implementación indicó que $n_{17-18} = 2$ mientras que en la referencia se indica $n_{17-18} = 1$, para validar si fue un error en nuestra implementación se multiplico manualmente los resultados de obtenidos en nuestra implementación y en la de la referencia teniendo como resultado que con los circuitos indicadas en la referencia la inversión es de USD 512 MM, por lo cual se considera que es un error tipográfico que se dio al incluir el listado de los circuitos en el documento.

3.2.2 Redes para implementar

Una vez que se contó con los modelos implementados en el AMPL y validados se determinó en cuales redes se iba a realizar en análisis de la propuesta para esto se consideró las redes GARVER, IEEE24 y SNI73.

Red GARVER

La red GARVER es la principal red utilizada en el análisis de nuevas propuestas para el estudio de la PET, de tal forma que en la mayor parte de la literatura técnica es la primera red de análisis con este antecedente se considera indispensable la implementación de la red GARVER para este estudio.

	Escenario 1 (MW)	Escenario 2 (MW)	Escenario 3 (MW)
Escenario base	360	-	-
Hipótesis 1	189.828	-	-
Hipótesis 2	75.384	286.452	-
Hipótesis 3	49.248	199.08	321.84

Tabla 3-4 Modificaciones en la red GARVER

En la Tabla 3-4 Modificaciones en la red GARVER se presenta el escenario base de la Red GARVER en conjunto con el resultado de aplicar las hipótesis descritas en el capítulo anterior en generación de la Barra 2 (360 MW) de manera similar a lo realizado en [28], estos resultados se los incluyo en los archivos de datos que posteriormente se analizó en los modelos implementados en el AMPL.

Red IEEE24

Otra de las redes más utilizadas para evaluar propuestas en el análisis de la PET es la red IEEE24 incluyendo las modificaciones conforme a lo indicado en [21].

	Escenario 1 (MW)	Escenario 2 (MW)	Escenario 3 (MW)
Escenario base	900	-	-
Hipótesis 1	474.57	-	-
Hipótesis 2	188.46	716.13	-
Hipótesis 3	123.12	497.7	804.6

Tabla 3-5 Modificaciones en la red IEEE24

En la Tabla 3-5 Modificaciones en la red IEEE24 se presenta el escenario base de la Red IEEE24 en conjunto con el resultado de aplicar las hipótesis descritas en el capítulo anterior en la generación de las Barras 7 y 22 (900 MW) de manera similar a lo realizado en [28], estos resultados se los incluyo en los archivos de datos que posteriormente se analizó en los modelos implementados en el AMPL.

Red SNI73

Dado que lo que se busca con esta metodología es poderlo aplicar en una red real se realizó una simplificación del Sistema Nacional Interconectado (SNI) ecuatoriano que actualmente cuenta con 150 Barras entre los niveles de voltaje de 500, 230, 138 y 69kV, cabe indicar que la red base que se utilizó fue el archivo en Power Factory[29] de la planificación de CELEC EP TRANSELECTRIC del año 2012. El procedimiento para la reducción de la red se la describe en el siguiente diagrama de flujo:

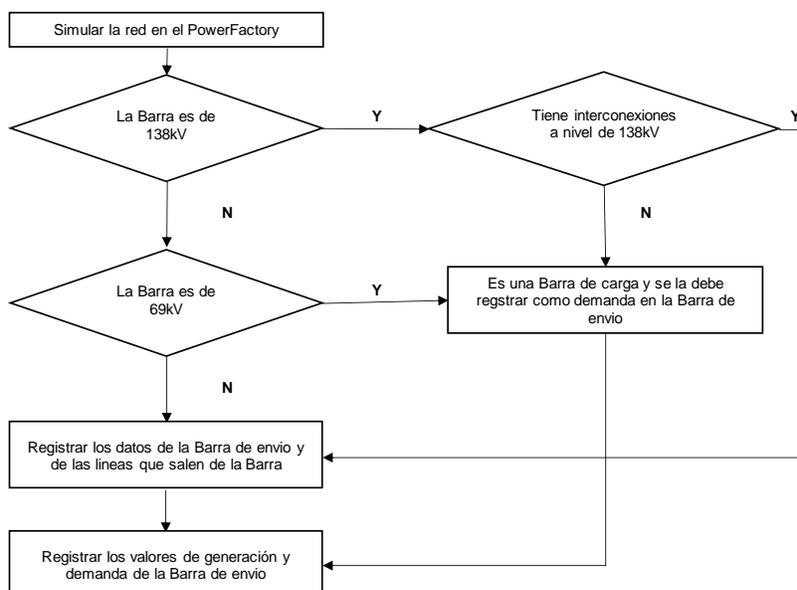


Ilustración 3-8 Procedimiento para reducción del SNI

Dentro de la red simplificado solo se incluyó la infraestructura existente, no se consideró obras que se encuentran planificadas como la interconexión con Perú a 500kV ni sus obras conexas, tampoco se consideró Sistemas de Generación en construcción.

Una vez reducido el sistema se debía tener la información de los costos de inversión de nuevas líneas con sus bahías correspondientes esta información fue tomada de los presupuestos incluidos en los contratos del Sistema de Transmisión 500kV, Sistema de Transmisión Duran 230/69 kV y Construcción de la línea de Transmisión Milagro – Babahoyo 230kV, los valores obtenidos de este contrato se los proceso de tal manera que se obtuvo el costo por kilómetro de construcción de una línea de 500kV, 230kV y 138kV estos valores no incluyen el costo de la obra civil de los mismos.

Como paso final se modificó la demanda del sistema de tal manera que paso de 4762MW planificados para el año 2023 a un total de 5694MW tomando como referencia polos de desarrollo actuales que influirán en el incremento de la demanda, luego de esto se seleccionó las barras en las cuales se incluirían los escenarios de generación para el análisis planteado, en este caso se seleccionó las Barras 34 y 62 que representan a Molino 230kV (575MW) y a Sopladora 230kV (1165.46MW) esto debido su ubicación dentro de SNI lo que permitirá una mayor cantidad de posibles modificaciones, una vez aplicadas las hipótesis se tienen los siguientes resultados:

Barra 34

	Escenario 1 (MW)	Escenario 2 (MW)	Escenario 3 (MW)
Escenario base	575	-	-
Hipótesis 1	303.1975	-	-
Hipótesis 2	120.405	457.5275	-
Hipótesis 3	78.66	317.975	514.05

Tabla 3-6 Modificaciones en la Barra 34 de la red SNI73

Barra 62

	Escenario 1 (MW)	Escenario 2 (MW)	Escenario 3 (MW)
Escenario base	1165.46	-	-
Hipótesis 1	614.5471	-	-
Hipótesis 2	244.0473	927.3565	-
Hipótesis 3	159.4349	644.4994	1041.921

Tabla 3-7 Modificaciones en la Barra 62 de la red SNI73

En la Tabla 3-6 Modificaciones en la Barra 34 de la red SNI73 y en la Tabla 3-7 Modificaciones en la Barra 62 de la red SNI73 se muestra el escenario base de la generación en conjunto con las hipótesis descritas en el capítulo anterior que fueron aplicadas a la generación de las Barras 34 (575 MW) y 62 (1165.45 MW) estos resultados se los incluyo en los archivos de datos que posteriormente se analizó en los modelos implementados en el AMPL.

4 Pruebas y Resultados

En sección anterior se determinó los criterios de análisis de las redes GARVER, IEEE24, SNI73 para que se pueda incluir escenarios de generación estocástica provenientes de los datos obtenidos de la Central Eólica Villonaco, para su procesamiento se utilizó el algoritmo del K-means para determinar los escenarios representativos que llevó a plantear las hipótesis, descritas en el capítulo anterior y las cuales vamos a considerar en el presente análisis.

En este capítulo se presentarán los resultados del análisis de cada una de las redes implementadas, si bien es cierto el análisis de los resultados se lo puede realizar de manera independiente en cada una de las hipótesis se ha considerado más conveniente realizar un análisis comparativo esto con el objeto de poder contrastar los resultados y determinar si la implementación de las hipótesis tiene efectos significativos en el análisis de El problema de la PET.

Se presentará los resultados obtenidos para las redes GARVER, IEEE24 y SNI73 en conjunto con el análisis de los diferentes resultados de la implementación de las hipótesis y se lo contrastará con el escenario base.

4.1 Red GARVER

De la aplicación de las hipótesis planteadas en la Red GARVER se tienen los siguientes resultados:

	Escenario base	Hipótesis 1	Hipótesis 2	Hipótesis 3
Escenarios de generación	1	1	2	3
Número de circuitos a construir	4	6	7	7
Circuitos que construir	$n_{3-5} = 1,$ $n_{4-6} = 3$	$n_{2-6} = 3,$ $n_{3-5} = 1,$ $n_{4-6} = 2$	$n_{1-5} = 1,$ $n_{2-6} = 4,$ $n_{4-6} = 2$	$n_{1-5} = 1,$ $n_{2-6} = 4,$ $n_{4-6} = 2$
Inversión (MM USD)	110	170	200	200
Tiempo de análisis (s)	0,078125	0,125	0,171875	0,21875

Tabla 4-1 Resultados de la planificación de la Red GARVER

En la Tabla 4-1 Resultados de la planificación de la Red GARVER se presentan los resultados obtenidos de evaluar cada una de las hipótesis en conjunto con el escenario base en la red GARVER donde podemos resaltar que pasamos de requerir incluir en la planificación 4 circuitos para escenario base a requerir 6 circuitos en el caso de la hipótesis 1 y finalmente necesitar incluir 7 nuevos circuitos en los casos de las hipótesis 2 y 3 lo cual también se ve reflejado sobre la inversión, y finalmente podemos verificar como el tiempo de procesamiento se ve afectado en el análisis de cada uno de los casos.

Análisis de resultados

Con base a los resultados descritos en la Tabla 4-1 Resultados de la planificación de la Red GARVER producto de aplicar los distintos escenarios de generación en la Barra 2 de la red en análisis se puede indicar lo siguiente:

- El efecto principal de implementar las distintas hipótesis en la Barra 2, tiene que ver con la reconfiguración de la red de tal forma que dentro de la planificación es necesario incluir nuevas interconexiones hacia la Barra 2 de tal manera que existan nuevos caminos para que fluya una mayor potencia y con esto hacia todas las Barras que depende de la Barra 2, es importante resaltar que dichas interconexiones no eran parte de los resultados de la planificación obtenidos mediante el análisis del escenario base.
- Uno de los efectos de implementar las hipótesis 2 y 3 las cuales presentan más de un escenario de generación fue que la construcción del circuito de interconexión entre las Barras 3 - 5 ya no es necesaria, en su lugar se requiere que dentro de la planificación se incluya la construcción un nuevo circuito de interconexión entre las Barras 1 - 5.
- Un resultado de implementar las hipótesis 2 y 3, que es muy particular en este caso de análisis se puede verificar cuando observamos los resultados obtenidos para la planificación los cuales son los mismos, esto se debe principalmente a la topología de la red, a la capacidad de cada uno de los circuitos y a la ubicación de la demanda. La aplicación de estas hipótesis no siempre los mismos resultados.
- Aunque los resultados de la planificación obtenidos en el análisis de las dos últimas hipótesis es el mismo, se diferencian en el tiempo de análisis esto se debe a que la cantidad de escenarios influye directamente en el tiempo de procesamiento y la obtención de un resultado óptimo.
- Aunque la diferencia en los tiempos de procesamiento pareciese insignificante, es importante notar que entre el tiempo de análisis del escenario base y el de la última hipótesis llego a triplicarse en este último caso.

4.2 Red IEEE24

De la aplicación de las hipótesis planteadas en la Red IEEE24 se tienen los siguientes resultados:

	Escenario base	Hipótesis 1	Hipótesis 2	Hipótesis 3
Escenarios de generación	1	1	4	9
Número de circuitos a construir	5	7	10	10
Circuitos que construir	$n_{6-10} = 1,$ $n_{7-8} = 2,$ $n_{10-12} = 1,$ $n_{14-16} = 1$	$n_{6-10} = 1,$ $n_{9-12} = 1,$ $n_{10-12} = 1,$ $n_{12-13} = 1,$ $n_{14-16} = 1,$ $n_{20-23} = 1,$ $n_{2-8} = 1$	$n_{3-9} = 1,$ $n_{3-24} = 1,$ $n_{6-10} = 1,$ $n_{7-8} = 1,$ $n_{8-9} = 1,$ $n_{10-11} = 1,$ $n_{11-13} = 1,$ $n_{15-24} = 1,$ $n_{2-8} = 1,$ $n_{14-23} = 1$	$n_{3-24} = 1,$ $n_{6-10} = 1,$ $n_{7-8} = 1,$ $n_{8-10} = 1,$ $n_{10-11} = 1,$ $n_{10-12} = 1,$ $n_{11-13} = 1,$ $n_{15-24} = 1,$ $n_{2-8} = 1,$ $n_{14-23} = 1$
Inversión (MM USD)	152	299	463	482
Tiempo de análisis (s)	0.609375	3.17188	140.5	870.312

Tabla 4-2 Resultados de la planificación de la Red IEEE24

En la Tabla 4-2 Resultados de la planificación de la Red IEEE24 se presentan los resultados obtenidos de evaluar cada una de las hipótesis en conjunto con el escenario base en la red IEEE24 donde podemos resaltar que se requiere incluir en la planificación 5 circuitos para escenario base, 6 circuitos en el caso de la hipótesis 1, 10 circuitos en los casos de las hipótesis 2 y 3 lo cual también se ve reflejado sobre la inversión que en las dos últimas hipótesis a pesar de tener el mismo número de circuitos estos no son los mismos por lo cual entre ambos la inversión varía, y finalmente podemos verificar como el tiempo de procesamiento se ve afectado en el análisis de cada uno de los casos.

Análisis de resultados

Con base en los resultados descritos en la Tabla 4-2 Resultados de la planificación de la Red IEEE24 producto de aplicar los distintos escenarios de generación en las Barras 7 y 22 de la red en análisis se puede indicar lo siguiente:

- Dado que los escenarios de generación fueron aplicados en dos barras de la red los escenarios totales que se analizó cuando se aplicó la hipótesis 2 fue un total de 4 y cuando se aplicó la hipótesis 3 fue un total de 9.
- Con la implementación y análisis de la hipótesis 1 podemos verificar que se requiere incluir en la planificación dos circuitos adicionales a las del escenario base, sin que esta incluya todos los circuitos resultantes en el escenario base, adicionalmente la inversión requerida pasa a ser cercana al doble comparada con la del escenario base.
- Aunque la implementación de la hipótesis 1 al igual que el escenario base solo incluye un escenario de generación el tiempo procesamiento aumenta cinco veces más, esto se debe a la topología de la red, la ubicación de la generación, así como la ubicación de la demanda.
- Con la implementación y el análisis de la hipótesis 2 podemos verificar que se necesitan incluir en la planificación un total de diez circuitos lo cual es el doble de las resultantes del análisis del escenario base, sin que este resultado incluya necesariamente los resultados del escenario base, si comparamos la inversión de este caso con el escenario base resulta ser tres veces superior.
- La implementación de la hipótesis 2 consta de cuatro escenarios de generación en total y su tiempo de procesamiento fue 200 veces superior al del escenario base, esto se debe a la topología de la red, la ubicación de la generación, así como la ubicación de la demanda, así como a la búsqueda de un resultado que satisfaga los cuatro escenarios.
- Con la implementación y el análisis de la hipótesis 3 podemos verificar que se necesitan incluir en la planificación un total de diez circuitos lo cual es el doble de las resultantes del análisis del escenario base, sin que este resultado incluya necesariamente los resultados del escenario base, si comparamos la inversión de este caso resulta ser superior a tres veces el valor del escenario base.
- Aunque del análisis de la implementación de las hipótesis 2 y 3 den como resultado el mismo número de circuitos, en este caso en particular dichos resultados son diferentes porque en los resultados de la hipótesis 2 se incluye un nuevo circuito entre las Barras 3 – 9 que en los resultados de la hipótesis 3 es sustituido por el circuito entre las Barras

10- 12, esto producto de la reconfiguración de la red para cada uno de los escenarios en análisis.

- La implementación de la hipótesis 3 consta de nueve escenarios de generación en total y su tiempo de procesamiento fue 1400 veces superior al del escenario base, esto se debe a la topología de la red, la ubicación de la generación, así como la ubicación de la demanda, así como a la búsqueda de un resultado que satisfaga los nueve escenarios.

4.3 Red SNI73

De la aplicación de las hipótesis planteadas en la Red SNI73 se tienen los siguientes resultados:

	Escenario base	Hipótesis 1	Hipótesis 2	Hipótesis 3
Escenarios de generación	1	1	4	9
Número de circuitos a construir	7	7	7	10
Circuitos que construir	$n_{31-32} = 1,$ $n_{68-69} = 1,$ $n_{3-67} = 2,$ $n_{48-47} = 1,$ $n_{67-48} = 2$	$n_{31-32} = 1,$ $n_{68-69} = 1,$ $n_{3-67} = 2,$ $n_{48-47} = 1,$ $n_{67-48} = 2$	$n_{31-32} = 1,$ $n_{68-69} = 1,$ $n_{3-67} = 2,$ $n_{48-47} = 1,$ $n_{67-48} = 2$	$n_{31-32} = 3,$ $n_{49-50} = 1,$ $n_{68-69} = 1,$ $n_{3-67} = 2,$ $n_{48-47} = 1,$ $n_{67-48} = 2$
Inversión (MM USD)	52.963	52.963	52.963	59.656
Tiempo de análisis (s)	0.234375	0.359375	1.28125	6

Tabla 4-3 Resultados de la planificación de la red SNI73

En la Tabla 4-3 Resultados de la planificación de la red SNI73 se presentan los resultados obtenidos de evaluar cada una de las hipótesis en conjunto con el escenario base en la red SNI73 donde podemos resaltar que se requiere incluir en la planificación 7 circuitos para escenario base al igual que en hipótesis 1 y en la hipótesis 2 y 10 circuitos en el caso de la hipótesis 3 lo cual también se ve reflejado sobre la inversión y finalmente podemos verificar como el tiempo de procesamiento se ve afectado en el análisis de cada uno de los casos.

Análisis de resultados

Con base en los resultados descritos en la Tabla 4-3 Resultados de la planificación de la red SNI73 producto de aplicar los distintos escenarios de generación en las Barras 34 y 62 de la red en análisis se puede indicar lo siguiente:

- Debido a que los escenarios de generación fueron aplicados en 2 barras de la red los escenarios totales a analizar cuando se aplique la hipótesis 2 serán un total de 4 y cuando se aplique la hipótesis 3 serán un total de 9.
- Con la implementación y análisis de la hipótesis 1 y 2 la planificación resultante es la misma que la obtenida en el análisis del escenario base en donde se requiere incluir en la planificación un total de siete nuevos circuitos.
- Aunque la implementación de la hipótesis 1 y 2 dan los mismos resultados que el análisis del escenario base el tiempo procesamiento es diferente siendo el del primer caso 1.5 veces superior y el del segundo caso 5.5 veces superior, esto se debe principalmente a la topología de la red, la ubicación de la generación, así como la ubicación de la demanda y a la búsqueda del resultado óptimo que satisfaga cada hipótesis.
- Con la implementación y el análisis de la hipótesis 3 podemos verificar que se necesitan incluir en la planificación un total de diez circuitos es decir tres circuitos adicionales de las resultantes del análisis del escenario base, sin que este resultado incluya necesariamente los resultados del escenario base, si comparamos la inversión de este caso con el escenario base resulta ser 12.6% superior.
- La implementación de la hipótesis 3 consta de nueve escenarios de generación en total y su tiempo de procesamiento fue 26 veces superior al del escenario base, esto se debe a la topología de la red, la ubicación de la generación, así como la ubicación de la demanda, así como a la búsqueda de un resultado que satisfaga los nueve escenarios.

5 Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones

De los resultados obtenidos en la elaboración de este trabajo se puede concluir lo siguiente:

- El utilizar el algoritmo de K-means nos ha permitido determinar escenarios representativos basado en los datos históricos obtenidos de la Central Eólica Villonaco que al ser aplicados en el modelo lineal disyuntivo permitió tener resultados para la planificación de cada una de las redes con tiempos muchos menores a los que hubiésemos tenido en el caso de utilizar todos los registros históricos.
- El algoritmo del K-means nos permitió realizar un análisis comparativo entre los resultados obtenidos del análisis de una sola variable como la Potencia Promedio y el análisis de dos variables como la Potencia Promedio Generada y la Velocidad Promedio del Viento, con lo cual comprobamos que esta herramienta solo está limitada por la cantidad y la calidad de los datos que usemos.
- Al utilizar los datos históricos de la generación de la Central Eólica Villonaco se pudo incorporar en el análisis no solo la información de la Potencia Promedio Generada sino una variable con una mayor incertidumbre que fue la Velocidad Promedio del Viento, esto permitió potenciar los resultados obtenidos, de tal manera que permitió replantear la hipótesis de que existían solo 2 posibles escenarios de generación, sino que se estableció que los datos se ajustaban para tener hasta 3 posibles escenarios de generación.
- Con la implementación del Modelo Lineal Disyuntivo se pudo tener una herramienta de análisis con una gran potencialidad y de gran flexibilidad de tal manera que mediante su codificación pudimos implementarla no solo para el análisis de uno sino para múltiples escenarios, teniendo resultados óptimos que cumplen con las restricciones técnicas de cualquier Sistema de Potencia.
- Los resultados obtenidos de cada una de las hipótesis planteadas, aunque se diferencian uno del otro, no son necesariamente incorrectos, cada uno proviene de un tipo de análisis diferente y así como en todo modelo mientras más detallado sea este, los resultados van a ser más precisos y ajustados a la realidad.
- Se presento una metodología de reducción de red para obtener la red SNI73, esta reducción a pesar de que pudo haber omitido varios elementos de la red que eran susceptibles a un reforzamiento, sirvió para demostrar la potencialidad del método planteado

- Los tiempos de procesamiento de cada una de las redes no solo tiene relación a la cantidad de escenarios analizados, sino que también guarda una estrecha relación con la configuración de la red mientras esta sea más interconectada el tiempo de análisis tiende a aumentar de manera no lineal.

5.2 Recomendaciones

De los resultados obtenidos en la elaboración de este trabajo se puede recomendar lo siguiente:

- Al utilizar K-means se debe realizar la validación previa de los datos, de esta manera evitamos que se introduzcan datos aberrantes que puedan afectar los resultados del análisis.
- Para validar la potencialidad de la metodología presentada se utilizó la información obtenida de la Central Eólica Villonaco, pero esta metodología no está limitada únicamente a este tipo de datos, sino que se puede incorporar datos de otro tipo de generación de alta incertidumbre.
- Para redes muy interconectadas con alta penetración de generación renovable se puede utilizar la metodología presentada dado que permite alcanzar resultados precisos en un tiempo relativamente pequeño.

Referencias Bibliográficas:

- [1] G. Latorre, R. D. Cruz, J. M. Areiza, y A. Villegas, «Classification of publications and models on transmission expansion planning», *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 18, n.º 2, pp. 938-946, may 2003, doi: 10.1109/TPWRS.2003.811168.
- [2] R. Hemmati, R.-A. Hooshmand, y A. Khodabakhshian, «State-of-the-art of transmission expansion planning: Comprehensive review», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 23, pp. 312-319, jul. 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.03.015.
- [3] N. Gideon Ude, H. Yskandar, y R. Coneth Graham, «A Comprehensive State-of-the-Art Survey on the Transmission Network Expansion Planning Optimization Algorithms», *IEEE Access*, vol. 7, pp. 123158-123181, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2936682.
- [4] «Machine Learning: Tres cosas que es necesario saber». <https://es.mathworks.com/discovery/machine-learning.html> (accedido may 24, 2021).
- [5] A. H. Escobar, R. A. Gallego, y R. Romero, «Multistage and Coordinated Planning of the Expansion of Transmission Systems», *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, n.º 2, pp. 735-744, may 2004, doi: 10.1109/TPWRS.2004.825920.
- [6] S. Hunt y G. Shuttleworth, *Competition and choice in electricity*. Chichester, U.K. ; New York: John Wiley & Sons, 1996.
- [7] P. Maghouli, S. H. Hosseini, M. Oloomi Buygi, y M. Shahidehpour, «A Scenario-Based Multi-Objective Model for Multi-Stage Transmission Expansion Planning», *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, n.º 1, pp. 470-478, feb. 2011, doi: 10.1109/TPWRS.2010.2048930.
- [8] M. O. Buygi, G. Balzer, H. M. Shanechi, y M. Shahidehpour, «Market-Based Transmission Expansion Planning», *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, n.º 4, pp. 2060-2067, nov. 2004, doi: 10.1109/TPWRS.2004.836252.
- [9] M. O. Buygi, H. M. Shanechi, G. Balzer, M. Shahidehpour, y N. Pariz, «Network Planning in Unbundled Power Systems», *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, n.º 3, pp. 1379-1387, ago. 2006, doi: 10.1109/TPWRS.2006.873016.
- [10] V. Miranda y L. M. Proenca, «Why risk analysis outperforms probabilistic choice as the effective decision support paradigm for power system planning», *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 13, n.º 2, pp. 643-648, may 1998, doi: 10.1109/59.667394.
- [11] R. T. Rockafellar y R. J.-B. Wets, «Scenarios and Policy Aggregation in Optimization Under Uncertainty», *Math. Oper. Res.*, vol. 16, n.º 1, pp. 119-147, feb. 1991, doi: 10.1287/moor.16.1.119.
- [12] F. Glover y G. A. Kochenberger, *Handbook of metaheuristics*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2003. Accedido: ago. 10, 2021. [En línea]. Disponible en: <http://ebooks.springerlink.com/UrlApi.aspx?action=summary&v=1&bookid=99360>
- [13] B. Melián, J. A. Moreno Perez, y J. Marcos Moreno-Vega, «Metaheuristics: A global view», *Intel. Artif.*, vol. 7, n.º 19, p. 352, jul. 2003, doi: 10.4114/ia.v7i19.713.
- [14] M. Mahdavi, C. Sabillon Antunez, M. Ajalli, y R. Romero, «Transmission Expansion Planning: Literature Review and Classification», *IEEE Syst. J.*, vol. 13, n.º 3, pp. 3129-3140, sep. 2019, doi: 10.1109/JSYST.2018.2871793.
- [15] L. Garver, «Transmission Network Estimation Using Linear Programming», *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-89, n.º 7, pp. 1688-1697, sep. 1970, doi: 10.1109/TPAS.1970.292825.
- [16] E. F. D. Silva, «PLANEJAMENTO ESTOCÁSTICO DA EXPANSÃO DA REDE DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA MULTIESTÁGIO CONSIDERANDO RESTRIÇÕES DE SEGURANÇA», p. 171, 2013.
- [17] M. Julio Rider Flores, «Planejamento da expansão de sistemas de transmissão usando os modelos CC - CA e tecnicas de programação não-linear», Doutor em Engenharia Elétrica,

Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006. doi: 10.47749/T/UNICAMP.2006.365011.

- [18] R. Romero, A. Monticelli, A. Garcia, y S. Haffner, «Test systems and mathematical models for transmission network expansion planning», *IEE Proc. - Gener. Transm. Distrib.*, vol. 149, n.º 1, p. 27, 2002, doi: 10.1049/ip-gtd:20020026.
- [19] G. Vinasco, M. J. Rider, y R. Romero, «A Strategy to Solve the Multistage Transmission Expansion Planning Problem», *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, n.º 4, pp. 2574-2576, nov. 2011, doi: 10.1109/TPWRS.2011.2126291.
- [20] R. Fang y D. J. Hill, «A New Strategy for Transmission Expansion in Competitive Electricity Markets», *IEEE Power Eng. Rev.*, vol. 22, n.º 11, pp. 60-60, nov. 2002, doi: 10.1109/MPER.2002.4311839.
- [21] S. Freitas, A. Resende, y R. Romero, «Estratégia de Planejamento Ótimo da Expansão de Sistemas de Transmissão para Múltiplos Cenários de Geração», *Simpósio Bras. Sist. Elétricos – SBSE 2016 Natal – RN An. Natal 2016 Pp1-6*, 2016.
- [22] G. C. Oliveira, S. Binato, y M. V. F. Pereira, «Value-Based Transmission Expansion Planning of Hydrothermal Systems Under Uncertainty», *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, n.º 4, pp. 1429-1435, nov. 2007, doi: 10.1109/TPWRS.2007.907161.
- [23] «Particle swarm optimization aplicada ao planejamento da expansão de sistemas de transmissão». <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/110515> (accedido ago. 19, 2021).
- [24] S. Shalev-Shwartz y S. Ben-David, *Understanding machine learning: from theory to algorithms*. New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2014.
- [25] E. Umargono, J. E. Suseno, y S. K. Vincensius Gunawan, «K-Means Clustering Optimization Using the Elbow Method and Early Centroid Determination Based on Mean and Median Formula», presentado en The 2nd International Seminar on Science and Technology (ISSTEC 2019), Yogyakarta, Indonesia, 2020. doi: 10.2991/assehr.k.201010.019.
- [26] «New in AMPL: Reporting and Display». <https://www.ampl.com/NEW/report.html> (accedido jun. 12, 2021).
- [27] «CPLEX Optimizer», sep. 30, 2021. <https://www.ibm.com/analytics/cplex-optimizer> (accedido dic. 14, 2021).
- [28] C. A. Correa-Florez, A. S. Salcedo, y G. Marulanda, «Reduced scenario methodology for treating uncertainty in transmission expansion with large wind power penetration», en *2016 IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exposition-Latin America (PES T&D-LA)*, Morelia, Mexico, sep. 2016, pp. 1-7. doi: 10.1109/TDC-LA.2016.7805634.
- [29] «PowerFactory - DigSILENT». <https://www.digsilent.de/en/powerfactory.html> (accedido dic. 14, 2021).