



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**  
**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS**  
**INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD**

**PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

**APLICACIÓN DE MÉTODOS DETERMINISTAS PARA LA PLANIFICACIÓN  
DE LA EXPANSIÓN DE LA RED DE TRANSMISIÓN EN ECUADOR**

Proyecto de Titulación presentado previo a la obtención del Título de Ingeniero Eléctrico

**Autor:**

Alex Dario Lata Gualancañay

Fausto Andrés Quintero Ross

**Tutor Académico:**

Ing. Guamán Cuenca Wilian Patricio M.Sc.

**LATACUNGA – ECUADOR**

**2023**

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros **LATA GUALANCAÑAY ALEX DARIO**, y **QUINTERO ROSS FAUSTO ANDRES** declaramos ser los autores del presente proyecto tecnológico: “**APLICACIÓN DE MÉTODOS DETERMINISTAS PARA LA PLANIFICACIÓN DE LA EXPANSIÓN DE LA RED DE TRANSMISIÓN EN ECUADOR**”, siendo **Ing. WILIAN PATRICIO GUAMÁN CUENCA M.Sc.** tutor del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.



.....  
Lata Gualancañay Alex Dario  
CC: 172317845-3



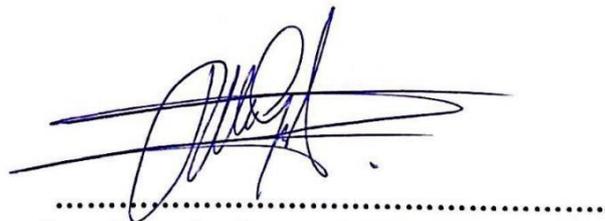
.....  
Quintero Ross Fausto Andres  
CC: 080415697-4

## **AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN**

En calidad de Tutor del Trabajo del proyecto tecnológico sobre el título:

**“APLICACIÓN DE MÉTODOS DETERMINISTAS PARA LA PLANIFICACIÓN DE LA EXPANSIÓN DE LA RED DE TRANSMISIÓN EN ECUADOR”**, de los estudiantes **LATA GUALANCAÑAY ALEX DARIO**, y **QUINTERO ROSS FAUSTO ANDRES** de la carrera Ingeniería en Electricidad, considero que dicha propuesta tecnológica cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnicos suficientes para ser sometidos a la evaluación del Tribunal de Validación de Proyecto que el Consejo Directivo de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas de la Universidad Técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, febrero, 2023



**Tutor de Titulación**

Ing. Wilian Patricio Guamán Cuenca M.Sc.  
**CC:0603578956**

## APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y por la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas; por cuanto, los postulantes **LATA GUALANCAÑAY ALEX DARIO**, y **QUINTERO ROSS FAUSTO ANDRES** con el título de Proyecto de titulación “**APLICACIÓN DE MÉTODOS DETERMINISTAS PARA LA PLANIFICACIÓN DE LA EXPANSIÓN DE LA RED DE TRANSMISIÓN EN ECUADOR**”, han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de Sustentación de Proyecto.

Por lo antes expuesto, se autoriza realizar los empastados correspondientes, según la normativa institucional.

Latacunga, febrero, 2023

Para constancia firman:



.....  
**Lector 1 (presidente)**  
Ing. Carlos Ivan Quinatoa Caiza M.Sc.  
CC: 0503287864



.....  
**Lector 2**  
Ing. Proaño Maldonado Xavier Alfonso M.Sc.  
CC: 0502656424



.....  
**Lector 3**  
Ing. Diego Leonardo Jiménez Jiménez M.Sc.  
CC: 0503493702

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, agradezco a Dios, por cuidar y bendecir mi camino, permitiéndome encontrar magnificas personas, por brindarme salud, felicidad y aprendizaje en cada etapa de mi vida.

A mi madre María Victoria Gualancañay, por todo el amor y el apoyo que me han brindado a lo largo de mi vida, por creer siempre en mí y por los hermosos momentos juntos que me supo guiar y darme su apoyo moral y económico, para poder realizar mi sueño de ser profesional gracias por todo.

A mi hermano, Darwin Lata, por sus palabras de aliento para no darme por vencido durante toda mi carrera universitaria al igual que mis dos hermanos Jorge Lata y María Lata por tener la dicha de crecer a su lado, por compartir las risas, las lágrimas y los sueños, por todos los bellos momentos vividos y por seguir de la mano siempre.

A mis amigos de la universidad por estar siempre presentes, acompañándome a lo largo de esta etapa, compartiendo momentos muy gratos en mi vida universitaria.

Además, quiero agradecer a la Universidad Técnica de Cotopaxi, que me acogió durante el periodo de formación, mis sinceros agradecimientos con la carrera de Ingeniería Eléctrica y los señores profesores que la conforman, permitiéndome formar como un profesional de excelencia y calidad para la sociedad. A nuestro tutor de tesis, el Ing. Wilian Guamán M.Sc. por su guía durante todo el proceso, al Ing. Carlos Quinatoa M.Sc quien, gracias a sus consejos y conocimientos brindados, nos apoyó para alcanzar este objetivo, así mismo a cada uno de los lectores, al Ing. Diego Jiménez M.Sc. y al Ing. Proaño Xavier M.Sc. por las acertadas y oportunas recomendaciones para mejorar este trabajo, por tomar parte de su valioso tiempo para ayudarnos.

***LATA ALEX***

Para empezar, quisiera agradecer a Dios por permitirme cumplir con este objetivo que tanto anhelaba, por permitirme rodearme de personas que han sido parte de mi crecimiento personal y me han compartido sus conocimientos.

A mi madre, la Sra. Diana Amelia Ross Guerrero, quien fue parte fundamental en este proceso, le debo en gran parte el cumplimiento de este sueño. Sin su ayuda, cumplir este objetivo de seguro sería algo complicado.

A mi padre, Elvis Fernando Quintero Perlaza, quien siempre estuvo ahí brindándome su apoyo. A mis hermanos, Ever Fernando Loo Ross, Jardel Steven Quintero Ross y Jandry José Angulo Ross, por ser siempre un apoyo y estar ahí dándome su apoyo en momentos difíciles, por sus palabras de aliento cada vez que pasaba por momentos malos en mi proceso universitario. También a cada uno de esos amigos que llegué a conocer durante estos años en mi vida universitaria, con quienes compartí muchos momentos que serán memorables a lo largo de mi vida.

Por último, agradecer a cada uno de los docentes que formaron parte de mi proceso de aprendizaje en esta prestigiosa universidad, agradecer a nuestro tutor de tesis, el Ing. Wilian Guamán M.Sc., por compartir su conocimiento y ser una buena guía durante todo el proceso, y a cada uno de los lectores que, gracias a sus observaciones y recomendaciones, se pudo mejorar este trabajo.

***QUINTERO FAUSTO***

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a Dios por brindarme el don de la sabiduría y la fortaleza, para el desarrollo de este trabajo de investigación. A mis padres por apoyarme incondicionalmente y saber guiarme de mejor manera en la parte moral y económica durante el periodo académico. A mis hermanos, por acompañarme en el proceso educativo y brindarme su apoyo día tras día en el transcurso de los años de mi carrera universitaria.

A toda mi familia por confiar en mí dándome alientos y consejos.

***LATA ALEX  
QUINTERO FAUSTO***

## ÍNDICE GENERAL

1	INFORMACIÓN GENERAL .....	1
2	INTRODUCCIÓN .....	2
2.1	EL PROBLEMA .....	2
2.1.1	Situación Problemática .....	2
2.1.2	Formulación del Problema.....	3
2.2	OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN .....	4
2.3	BENEFICIARIOS.....	4
2.3.1	Beneficiarios Directos: .....	4
2.3.2	Beneficiarios Indirectos:.....	4
2.4	JUSTIFICACIÓN .....	4
2.5	HIPOTESIS.....	6
2.6	OBJETIVOS .....	6
2.6.1	Objetivo General.....	6
2.6.2	Objetivos Específicos .....	6
2.7	SISTEMA DE TAREAS.....	7
3	FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	9
3.1	ANTECEDENTES .....	9
3.2	SECTOR ELÉCTRICO DE ECUADOR.....	12
3.2.1	La infraestructura del sector eléctrico de Ecuador y su evolución .....	14
3.2.2	El sector eléctrico en la actualidad .....	16
3.3	PET EN EL MERCADO ELÉCTRICO ENTORNO DESREGULADO.....	16
3.4	PLANEACIÓN DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA .....	18
3.5	PLANIFICACIÓN DE LA EXPANSIÓN DE LA GENERACIÓN .....	20
3.5.1	Métodos de optimización en PEG .....	21
3.5.2	Costos de generación .....	22
3.6	PLANIFICACIÓN DE LA EXPANSIÓN DE LA TRANSMISIÓN.....	23

3.6.1	Clases de restricciones del PET .....	25
3.6.2	Métodos de resolución de PET .....	25
3.6.3	Métodos de optimización matemática .....	27
3.6.4	Métodos de optimización Metaheurística.....	27
3.6.5	PET asociado a la fiabilidad .....	28
3.6.6	Equilibrio entre la congestión y la demanda .....	30
3.7	MODELOS MATEMÁTICOS DE LA PLANEACIÓN ESTÁTICA .....	31
3.7.1	Planificación estática .....	32
3.7.2	Modelo de Transporte.....	32
3.7.3	Modelo DC .....	33
3.7.4	Modelo Híbrido .....	34
3.7.5	Modelo Disyuntivo .....	36
3.8	MODELO MATEMÁTICO DE LA PLANEACIÓN DINÁMICA.....	37
3.8.1	Planeación pseudodinámica.....	38
3.8.2	Modelado de la demanda.....	38
3.8.3	Planificación dinámica o multietapa.....	38
3.9	HORIZONTE DE TIEMPO .....	43
4	METODOLOGÍA .....	44
4.1	PLAN DE EXPANSIÓN DE TRANSMISIÓN .....	45
4.1.1	Horizonte de planeación .....	46
4.1.2	Evaluación económica de proyectos.....	47
4.2	ESTRUCTURA DE LOS PROGRAMAS COMPUTACIONALES .....	48
4.2.1	Etapas en el desarrollo de un modelo .....	49
4.2.2	Solucionadores.....	51
4.2.3	Lenguaje de los diferentes programas computacionales .....	52
4.2.4	<i>Software</i> AMPL.....	54
4.2.5	<i>Software</i> GAMS .....	55

4.2.6	<i>Software Python (PYOMO)</i> .....	55
4.3	SELECCIÓN DE LOS CASOS DE ESTUDIO PARA LA PET .....	56
4.3.1	Sistema Garver (6 Barras) .....	56
4.3.2	Sistema IEEE 24 (24 Barras).....	57
4.3.3	<i>45-Bus SNI-230 kV Ecuador System</i> .....	58
4.3.4	Líneas de transmisión proyectadas .....	60
4.4	MODELACIÓN DE PROBLEMAS DE OPTIMIZACIÓN PARA LA PET.....	63
4.4.1	Modelo de Transporte.....	63
4.4.2	Modelo DC no lineal .....	63
4.4.3	Modelo Híbrido Lineal .....	64
4.4.4	Modelo Disyuntivo .....	64
4.4.5	Modelo Dinámico (Multi etapa) .....	65
4.5	EVALUACIÓN DE RESULTADOS PARA SU COMPARACIÓN CON LOS DISTINTOS MODELOS Y PROGRAMAS.....	66
4.5.1	Costos de inversión.....	66
4.5.2	<i>Solvers</i> .....	67
4.5.3	Tiempo de ejecución.....	67
4.5.4	Líneas adicionales.....	67
5	ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	69
5.1	RESULTADOS DE LA PLANEACIÓN ESTÁTICA UTILIZANDO EL SISTEMA GARVER (6 BARRAS) .....	69
5.1.1	Modelo de Transporte.....	69
5.1.2	Modelo DC .....	71
5.1.3	Modelo Híbrido .....	72
5.1.4	Modelo Disyuntivo .....	73
5.1.5	Modelo Dinámico Disyuntivo (Multietapa) .....	74
5.2	RESULTADOS DE LA PLANEACIÓN ESTÁTICA UTILIZANDO EL SISTEMA IEEE (24 BARRAS) .....	75

5.2.1	Modelo de Transporte.....	76
5.2.2	Modelo Híbrido .....	77
5.2.3	Modelo DC .....	79
5.2.4	Modelo Disyuntivo .....	80
5.2.5	Modelo Dinámico Disyuntivo (Multietapa) .....	81
5.3	RESULTADOS DE LA PLANEACIÓN ESTÁTICA UTILIZANDO <i>45-BUS SNI-230 KV ECUADOR SYSTEM</i> .....	84
5.3.1	Modelo de Transporte.....	84
5.3.2	Modelo DC .....	86
5.3.3	Modelo Híbrido .....	87
5.3.4	Modelo Disyuntivo .....	88
5.3.5	Modelo Dinámico Disyuntivo (Multietapa) .....	89
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	93
6.1	CONCLUSIONES .....	93
6.2	RECOMENDACIONES.....	94
7	REFERENCIAS .....	95
8	ANEXOS.....	98
8.1	ANEXO A.....	98
8.2	ANEXO B.....	100
8.2.1	Datos del sistema Garver (6 Barras).....	100
8.2.2	Datos del sistema IEEE 24 (24 Barras). .....	101
8.2.3	Datos del <i>45-Bus SNI-230 kV Ecuador System</i> .....	103
8.3	ANEXO C.....	106
8.3.1	Matriz de incidencia para sistema Garver (6 Barras). .....	106
8.3.2	Matriz de incidencia del sistema IEEE 24 (24 barras) .....	111
8.3.3	Matriz de incidencia del <i>45-Bus SNI-230 kV Ecuador System</i> .....	115
8.4	ANEXO D.....	127

8.4.1	Código AMPL .....	127
8.4.2	Código GAMS.....	145
8.4.3	Código PYOMO .....	156
8.5	ANEXO E .....	179
8.5.1	Diagrama de flujo software AMPL .....	179
8.5.2	Diagrama de flujo software GAMS.....	180
8.5.3	Diagrama de flujo software Python (PYOMO).....	181
8.6	ANEXO F .....	182
8.6.1	Manual software AMPL .....	182
8.6.2	Manual software GAMS.....	209

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 Procedimiento de planificación de expansión de transmisión en el sistema de potencia (ambiente regulado) [14].....	17
Figura 3.2 Procedimiento de planificación de expansión de transmisión en el sistema de potencia (entorno desregulado) [14].....	18
Figura 3.3 Programación según las ventanas de tiempo [14].....	19
Figura 3.4 Procedimiento de trabajo tradicional para la planificación de sistemas de potencia. ....	30
Figura 3.5 Procedimiento de planificación dinámica [22]. ....	40
Figura 4.1 Planeación multietapa de sistemas coordinados. ....	46
Figura 4.2 Planeación multietapa de sistemas no coordinados. ....	46
Figura 4.3 Características de los programas computacionales. ....	49
Figura 4.4 Características de los programas computacionales. ....	51
Figura 4.5 Modelado de un problema de flujo de costo mínimo en AMPL [32]. ....	53
Figura 4.6 Modelado de un problema de flujo de costo mínimo en GAMS [32].....	53
Figura 4.7 Modelado de un problema de flujo de costo mínimo en PYOMO [32]. ....	54
Figura 4.8 Diagrama sistema Garver 6 Barras [2].....	57
Figura 4.9 Diagrama sistema IEEE 24 Barras [23]. ....	58
Figura 4.10 Diagrama <i>45-Bus SNI-230 kV Ecuador System</i> [26].....	62
Figura 4.11 Costo de inversión en Neos Server. ....	66
Figura 4.12 <i>Solver</i> en Neos Server. ....	67
Figura 4.13 Tiempo de ejecución en Neos Server.....	67
Figura 4.14 Líneas adicionales en Neos Server.....	68
Figura 5.1 Solución del modelo de Transporte con el sistema Garver (6 Barras) utilizando el <i>software</i> AMPL, GAMS y PYOMO. ....	70
Figura 5.2 Solución del modelo DC y Disyuntivo con el sistema Garber (6 Barras) utilizando el <i>software</i> AMPL, GAMS y PYOMO. ....	71
Figura 5.3 Solución del modelo Híbrido con el sistema Garber (6 Barras) utilizando el <i>software</i> AMPL, GAMS, PYOMO. ....	72
Figura 5.4 Solución del modelo de Transporte con el sistema IEEE 24 (24 Barras) utilizando el <i>software</i> AMPL, GAMS y PYOMO. ....	76
Figura 5.5 Solución del modelo Híbrido con el sistema IEEE 24 (24 Barras) utilizando el <i>software</i> AMPL, GAMS y PYOMO. ....	78

Figura 5.6 Solución del modelo DC y Disyuntivo con el sistema IEEE 24 (24 Barras) utilizando el <i>software</i> AMPL, GAMS y PYOMO. ....	79
Figura 5.7 Solución del modelo Dinámico (Periodo completo) con el sistema IEEE 24 Barras utilizando el <i>software</i> AMPL. ....	82
Figura 5.8 Solución del modelo de Transporte, Híbrido, Disyuntivo con <i>45-Bus SNI-230 kV Ecuador System</i> utilizando el <i>software</i> AMPL, PYOMO y GAMS.....	85
Figura 5.9 Solución del modelo de DC, Híbrido, Disyuntivo con el <i>45-Bus SNI-230 kV Ecuador System</i> , utilizando el <i>software</i> AMPL, PYOMO y GAMS. ....	86
Figura 8.1 Sistema de ejemplo nodos [37]. ....	108
Figura 8.2 Matriz de incidencia original [37]. ....	108
Figura 8.3 Matriz de incidencia reducida [37]. ....	109
Figura 8.4 Diagrama de flujo de la programación AMPL.....	179
Figura 8.5 Diagrama de flujo de la programación GAMS. ....	180
Figura 8.6 Diagrama de flujo de la programación PYOMO. ....	181
Figura 8.7 Plataforma APMPL (iniciar sesión).....	182
Figura 8.8 Link de confirmación de correo electrónico. ....	183
Figura 8.9 Iniciar sección con su correo electrónico asociado. ....	183
Figura 8.10 Descargar AMPL en su edición gratuita para Windows.....	184
Figura 8.11 Copiamos la licencia DEMO que nos entrega AMPL. ....	184
Figura 8.12 Dirección a pegar la carpeta extraída del zip descargado desde el sitio oficial de AMPL. ....	185
Figura 8.13 Aplicación de licencia DEMO para AMPL. ....	186
Figura 8.14 Acceder a las propiedades del equipo, primera parte para añadir una variable al sistema. ....	186
Figura 8.15 Acceder a la configuración avanzada del sistema, segunda parte para añadir una variable al sistema. ....	187
Figura 8.16 Definir una variable en el entorno de Windows, tercera parte para añadir una variable al sistema. ....	188
Figura 8.17 Definir una variable del sistema en Path, cuarta parte para añadir una variable al sistema. ....	189
Figura 8.18 Definir como variable del sistema a AMPL mediante su ubicación en el disco. ....	190
Figura 8.19 Instalador de Notepad++ desde su página oficial. ....	190
Figura 8.20 Definir lenguaje de AMPL en Notepad++. Figura obtenida del <i>software</i> . ....	191

Figura 8.21 Importar archivo del lenguaje de AMPL a Notepad ++ en la dirección determinada por el usuario (diferente a la carpeta de descargas). Figura obtenida de Notepad++ .....	192
Figura 8.22 Administrador de <i>Plugins</i> de Notepad++ . Figura obtenida del <i>software</i> Notepad++ .....	192
Figura 8.23 Activar opción Follow del plugin NppExc. Figura obtenida de Notepad++ .....	193
Figura 8.24 Programación final para vincular AMPL con Notepad++ .....	193
Figura 8.25 Verificación de vínculo con el <i>software</i> . Figura obtenida mediante el <i>software</i> Notepad++ .....	194
Figura 8.26 Declaración de conjuntos en AMPL. ....	196
Figura 8.27 Declaración de parámetros en el lenguaje AMPL.....	197
Figura 8.28 Declaración de variables. ....	198
Figura 8.29 Declaración de restricciones en líneas de código en el lenguaje AMPL. ....	199
Figura 8.30 Funciones de generación de var. aleatorias en AMPL [33]. ....	200
Figura 8.31 Funciones aritméticas en AMPL [33]. ....	201
Figura 8.32 Función Objetivo en AMPL.....	202
Figura 8.33 Declaración de conjuntos a utilizar en el archivo “.dat”.....	202
Figura 8.34 Declaración de parámetros en el “.dat” una dimensión, ....	202
Figura 8.35 Declaración de parámetros en el “.dat” dos dimensiones. ....	203
Figura 8.36 Inicialización de variables y normalización “.dat”. ....	204
Figura 8.37 Comandos del entorno AMPL [33]......	205
Figura 8.38 Estructura del “.run” en Notepad++.....	206
Figura 8.39 Archivos subidos a Neos Server y solución entregada, ....	207
Figura 8.40 Pagina de descarga oficial de GAMS.....	209
Figura 8.41 Solicitud para adquirir licencia DEMO.....	210
Figura 8.42 Verificación de correo electrónico. ....	211
Figura 8.43 Licencia DEMO activada para GAMS. ....	211
Figura 8.44 Verificación de licencia en el correo electrónico para GAMS. ....	212
Figura 8.45 Instalación del programa GAMS. ....	212
Figura 8.46 Instalación de programa GAMS.....	213
Figura 8.47 Ubicación de la instalación del programa GAMS.....	213
Figura 8.48 Instalación de programa GAMS Studio o IDE. ....	214
Figura 8.49 Validación de licencia DEMO. ....	215
Figura 8.50 Final de instalación del programa GAMS.....	215

Figura 8.51 Resultados del ejemplo para el funcionamiento en GAMS. ....	216
Figura 8.52 Declaración de los conjuntos en GAMS. ....	218
Figura 8.53 Tabla para dos dimensiones en GAMS. ....	219
Figura 8.54 Tabla para más de dos dimensiones en GAMS.....	219
Figura 8.55 Declaración de variables. ....	220
Figura 8.56 Variables definidas.....	221
Figura 8.57 Descripción de las ecuaciones en el programa GAMS. ....	222
Figura 8.58 Declaración del modelo en GAMS. ....	222
Figura 8.59 Especificación del tipo de solucionador a utilizar.....	222
Figura 8.60 Distintos solvers que típicamente contiene GAMS [38].....	223

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1 Descripción de los principales solvers y algoritmos de resolución. ....	51
Tabla 4.2 Elementos conectados a las barras del <i>45-Bus SNI-230 kV Ecuador System</i> Parte A. .....	59
Tabla 4.3 Elementos conectados a las barras del <i>45-Bus SNI-230 kV Ecuador System</i> Parte B. .....	60
Tabla 4.4 Estructura del modelo de transporte. ....	63
Tabla 4.5 Estructura del modelo de DC. ....	64
Tabla 4.6 Estructura del modelo de Híbrido Lineal. ....	64
Tabla 4.7 Estructura del modelo de Disyuntivo. ....	65
Tabla 4.8 Estructura del modelo de Dinámico (Multi etapa). ....	66
Tabla 5.1 Tabla comparativa de los distintos programas computacionales con el Sistema Garver (6 Barras). ....	70
Tabla 5.2 Tabla comparativa de los distintos programas computacionales con el Sistema Garver (6 Barras). ....	71
Tabla 5.3 Tabla comparativa de los distintos programas computacionales con el Sistema Garver (6 Barras). ....	73
Tabla 5.4 Tabla comparativa de los distintos programas computacionales con el Sistema Garver (6 Barras). ....	73
Tabla 5.5 Tabla de resultados de la planeación dinámica a largo plazo (10 años) utilizando el programa computacional Garver (6 Barras). ....	74
Tabla 5.6 Tabla de resultados de los 10 años de estudio.....	75
Tabla 5.7 Tabla comparativa de los distintos programas computacionales con el Sistema IEEE 24 (24 Barras). ....	76
Tabla 5.8 Tabla comparativa de los distintos programas computacionales con el Sistema IEEE 24 (24 Barras). ....	78
Tabla 5.9 Tabla comparativa de los distintos programas computacionales con el Sistema IEEE 24 (24 Barras). ....	80
Tabla 5.10 Tabla comparativa de los distintos programas computacionales con el Sistema IEEE (24 Barras). ....	80
Tabla 5.11 Tabla de resultados de los 10 años de estudio. ....	82
Tabla 5.12 Tabla de resultados de los 10 años de estudio Parte A. ....	83
Tabla 5.13 Tabla de resultados de los 10 años de estudio Parte B. ....	84

Tabla 5.14 Tabla comparativa de los distintos programas computacionales con el caso <i>45-Bus SNI-230 kV Ecuador System</i> .....	85
Tabla 5.15 Tabla comparativa de los distintos programas computacionales con el Sistema <i>45-Bus SNI-230 kV Ecuador System</i> .....	87
Tabla 5.16 Tabla comparativa de los distintos programas computacionales con el Sistema <i>45-Bus SNI-230 kV Ecuador System</i> .....	88
Tabla 5.17 Tabla comparativa de los distintos programas computacionales con el Sistema <i>45-Bus SNI-230 kV Ecuador System</i> .....	89
Tabla 5.18 Tabla comparativa de los distintos programas computacionales con el Sistema <i>45-Bus SNI-230 kV Ecuador System</i> .....	90
Tabla 5.19 Tabla de resultados de los 10 años de estudio (Parte A). .....	90
Tabla 5.20 Tabla de resultados de los 10 años de estudio (Parte B). .....	91
Tabla 5.21 Tabla de resultados de los 10 años de estudio (Parte C). .....	92
Tabla 8.1 Datos de Barra, generación y carga del sistema Garver (6 Barras).....	100
Tabla 8.2 Datos de Líneas de transmisión del sistema Garver (6 Barras) (Parte A). .....	100
Tabla 8.3 Datos de Líneas de transmisión del sistema Garver (6 Barras) (Parte B). .....	100
Tabla 8.4 Datos de Barra, generación y carga del sistema IEEE 24 (24 Barras). .....	101
Tabla 8.5 Datos de Líneas de transmisión del sistema IEEE 24 (24 Barras). .....	102
Tabla 8.6. Datos de Barra, generación y carga <i>45-Bus SNI-230 kV Ecuador System</i> (Parte A). .....	103
Tabla 8.7 Datos de Barra, generación y carga <i>45-Bus SNI-230 kV Ecuador System</i> (Parte B). .....	104
Tabla 8.8 Datos de líneas de transmisión y transformadores <i>45-Bus SNI-230 kV Ecuador System</i> (Parte A). .....	104
Tabla 8.9 Datos de líneas de transmisión y transformadores <i>45-Bus SNI-230 kV Ecuador System</i> (Parte B).....	105
Tabla 8.10 Valores en la entrada y salida para la construcción de la matriz de incidencia [37]. .....	108
Tabla 8.11 Matriz de incidencia futuras del sistema Garber (6 Barras). .....	110
Tabla 8.12 Matriz de incidencia actuales del sistema Garber (6 Barras). .....	110
Tabla 8.13 Matriz de incidencia futuras del sistema IEEE 24 (24 Barras) (Parte A).....	111
Tabla 8.14 Matriz de incidencia futuras del sistema IEEE 24 (24Barras) (Parte B).....	112
Tabla 8.15 Matriz de incidencia actuales del sistema IEEE 24 (24 Barras) (Parte A).....	113

Tabla 8.16 Matriz de incidencia actuales del sistema IEEE 24 (24 Barras) (Parte B).....	114
Tabla 8.17 Matriz de incidencia futuras <i>45-Bus SNI-230 kV Ecuador System</i> (Parte A1).....	115
Tabla 8.18 Matriz de incidencia futuras <i>45-Bus SNI-230 kV Ecuador System</i> (Parte A2).....	116
Tabla 8.19 Matriz de incidencia futuras <i>45-Bus SNI-230 kV Ecuador System</i> (Parte B1).....	117
Tabla 8.20 Matriz de incidencia futuras <i>45-Bus SNI-230 kV Ecuador System</i> (Parte B2).....	118
Tabla 8.21 Matriz de incidencia futuras <i>45-Bus SNI-230 kV Ecuador System</i> (Parte C1).....	119
Tabla 8.22 Matriz de incidencia futuras <i>45-Bus SNI-230 kV Ecuador System</i> (Parte C2).....	120
Tabla 8.23 Matriz de incidencia actuales <i>45-Bus SNI-230 kV Ecuador System</i> (Parte A1)...	121
Tabla 8.24 Matriz de incidencia actuales <i>45-Bus SNI-230 kV Ecuador System</i> (Parte A2)...	122
Tabla 8.25 Matriz de incidencia actuales <i>45-Bus SNI-230 kV Ecuador System</i> (Parte B1)...	123
Tabla 8.26 Matriz de incidencia actuales <i>45-Bus SNI-230 kV Ecuador System</i> (Parte B2)...	124
Tabla 8.27 Matriz de incidencia actuales <i>45-Bus SNI-230 kV Ecuador System</i> (Parte C1)...	125
Tabla 8.28 Matriz de incidencia actuales <i>45-Bus SNI-230 kV Ecuador System</i> (Parte C2)...	126
Tabla 8.29 Código de Programación Modelo de Transporte Archivo .mod (Parte A).....	128
Tabla 8.30 Código de Programación Modelo de Transporte Archivo .mod (Parte B).....	129
Tabla 8.31 Código de Programación Modelo de Transporte Archivo .dat.....	129
Tabla 8.32 Código de Programación Modelo de Transporte Archivo .run. ....	130
Tabla 8.33 Código de Programación Modelo Híbrido Archivo .mod (Parte A). ....	131
Tabla 8.34 Código de Programación Modelo Híbrido Archivo .mod (Parte B). ....	132
Tabla 8.35 Código de Programación Modelo Híbrido Archivo .dat. ....	133
Tabla 8.36 Código de Programación Modelo Híbrido Archivo .run.....	133
Tabla 8.37 Código de Programación Modelo DC Archivo .mod (Parte A). ....	134
Tabla 8.38 Código de Programación Modelo DC Archivo .mod (Parte B). ....	135
Tabla 8.39 Código de Programación Modelo DC Archivo .dat. ....	135
Tabla 8.40 Código de Programación Modelo DC Archivo .run.....	136
Tabla 8.41 Código de Programación Modelo Disyuntivo Archivo .mod (Parte A).....	137
Tabla 8.42 Código de Programación Modelo Disyuntivo Archivo .mod (Parte B). ....	138
Tabla 8.43 Código de Programación Modelo Disyuntivo Archivo .mod (Parte C). ....	139
Tabla 8.44 Código de Programación Modelo Disyuntivo Archivo .dat.....	139
Tabla 8.45 Código de Programación Modelo Disyuntivo Archivo .run. ....	140
Tabla 8.46 Código de Programación Modelo Disyuntivo Dinámico (Multietapa) Archivo .mod (Parte A). ....	141

Tabla 8.47 Código de Programación Modelo Disyuntivo Dinámico (Multietapa) Archivo .mod (Parte B).....	142
Tabla 8.48 Código de Programación Modelo Disyuntivo Dinámico (Multietapa) Archivo .mod (Parte C).....	143
Tabla 8.49 Código de Programación Modelo Disyuntivo Dinámico (Multietapa) Archivo .dat. ....	143
Tabla 8.50 Código de Programación Modelo Disyuntivo Dinámico (Multietapa) Archivo .run. ....	144
Tabla 8.51 Código de Programación Modelo de Transporte GAMS (Parte A). ....	145
Tabla 8.52 Código de Programación Modelo de Transporte GAMS (Parte B). ....	146
Tabla 8.53 Código de Programación Modelo DC en GAMS (Parte B). ....	148
Tabla 8.54 Código de Programación Modelo Híbrido en GAMS (Parte A). ....	149
Tabla 8.55 Código de Programación Modelo Híbrido en GAMS (Parte B). ....	150
Tabla 8.56 Código de Programación Modelo Disyuntivo en GAMS (Parte A).....	151
Tabla 8.57 Código de Programación Modelo Disyuntivo en GAMS (Parte B).....	152
Tabla 8.58 Código de Programación Modelo Disyuntivo en GAMS (Parte C).....	153
Tabla 8.59 Código de Programación Modelo Disyuntivo Dinámico (Multietapa) en GAMS (Parte A). ....	153
Tabla 8.60 Código de Programación Modelo Disyuntivo Dinámico (Multietapa) en GAMS (Parte B).....	154
Tabla 8.61 Código de Programación Modelo Disyuntivo en GAMS (Parte C).....	154
Tabla 8.62 Código de Programación Modelo Disyuntivo Dinámico (Multietapa) en GAMS (Parte D). ....	155
Tabla 8.63 Código de Programación Modelo Disyuntivo Dinámico (Multietapa) en GAMS (Parte E).....	155
Tabla 8.64 Código de Programación Modelo Transporte en PYOMO (Parte A). ....	156
Tabla 8.65 Código de Programación Modelo Transporte en PYOMO (Parte B).....	157
Tabla 8.66 Código de Programación Modelo Transporte en PYOMO (Parte C).....	158
Tabla 8.67 Código de Programación Modelo Transporte en PYOMO (Parte D). ....	159
Tabla 8.68 Código de Programación Modelo DC en PYOMO (Parte A). ....	160
Tabla 8.69 Código de Programación Modelo DC en PYOMO (Parte B). ....	161
Tabla 8.70 Código de Programación Modelo DC en PYOMO (Parte C). ....	162
Tabla 8.71 Código de Programación Modelo DC en PYOMO (Parte D). ....	163

Tabla 8.72 Código de Programación Modelo Híbrido en PYOMO (Parte A). .....	164
Tabla 8.73 Código de Programación Modelo Híbrido en PYOMO (Parte B). .....	165
Tabla 8.74 Código de Programación Modelo Híbrido en PYOMO (Parte C). .....	166
Tabla 8.75 Código de Programación Modelo Híbrido en PYOMO (Parte D). .....	167
Tabla 8.76 Código de Programación Modelo Disyuntivo en PYOMO (Parte A). .....	168
Tabla 8.77 Código de Programación Modelo Disyuntivo en PYOMO (Parte B). .....	169
Tabla 8.78 Código de Programación Modelo Disyuntivo en PYOMO (Parte C). .....	170
Tabla 8.79 Código de Programación Modelo Disyuntivo en PYOMO (Parte D). .....	171
Tabla 8.80 Código de Programación Modelo Disyuntivo en PYOMO (Parte E). .....	172
Tabla 8.81 Código de Programación Modelo Disyuntivo Dinámico (Multietapa) en PYOMO (Parte A). .....	173
Tabla 8.82 Código de Programación Modelo Disyuntivo Dinámico (Multietapa) en PYOMO (Parte B). .....	174
Tabla 8.83 Código de Programación Modelo Disyuntivo Dinámico (Multietapa) en PYOMO (Parte C). .....	175
Tabla 8.84 Código de Programación Modelo Disyuntivo Dinámico (Multietapa) en PYOMO (Parte D). .....	176
Tabla 8.85 Código de Programación Modelo Disyuntivo Dinámico (Multietapa) en PYOMO (Parte E). .....	177
Tabla 8.86 Código de Programación Modelo Disyuntivo Dinámico (Multietapa) en PYOMO (Parte F). .....	178
Tabla 8.87 Estructura del modelo y descripción [33]. .....	195
Tabla 8.88 Lista de atributos opcionalmente [33]. .....	196
Tabla 8.89 Declaración de conjuntos. ....	196
Tabla 8.90 Lista de atributos opcionales [33]. .....	197
Tabla 8.91 Lista de atributos opcionalmente [33]. .....	198
Tabla 8.92 Formatos de restricción [33]. .....	199
Tabla 8.93 Operadores aritméticos (A), lógicos (L) y de conjuntos (S) [33]. .....	200
Tabla 8.94 Optimizadores conocidos por la versión estudiante de AMPL[33]. .....	208
Tabla 8.95 Los bloques obligatorios básicos [38]. .....	218
Tabla 8.96 Los bloques opcionales [38]. .....	218
Tabla 8.97 Tipo de variables para GAMS [38] .....	220
Tabla 8.98 Restricciones sobre las variables [38] .....	220

Tabla 8.99 Declaración de ecuaciones (distintos tipos) [38].....	221
Tabla 8.100 Tipos de problemas y optimizadores [38]. .....	223

## NOMENCLATURA

$i \in OB$	Donde $i$ es el número de barra que pertenece al conjunto de barras $OB$ .
$k, i, j \in OL$	Donde $k$ es el número del tramo, $i$ es la barra de salida del tramo y $j$ es la barra de llegada del tramo que pertenece al conjunto de tramos $OL$ .
$y \in Y$	Donde $y$ es el número de líneas nuevas que entran en el sistema y pertenece al conjunto $Y$ .
$t \in T$	Donde $t$ es el año de estudio que pertenece al conjunto de horizonte de tiempo $T$ .
$Sbase$	Valor base que se le asigna al sistema en [MVA].
$\bar{\theta}$	Ángulo máximo que se puede alcanzar en las barras en [grad].
$Nombre_i$	Valor simbólico en el modelo al que se le asigna el nombre de cada barra para toda $i$ en el conjunto $OB$ .
$Tb_i$	Describe el tipo de barra para toda barra $i$ perteneciente al conjunto $OB$ : 3 sí es <i>slack</i> , 2 sí es <i>PV</i> y 0 sí es <i>PQ</i> .
$\theta_i^0$	Ángulo inicial para toda barra $i$ perteneciente al conjunto $OB$ en [grad].
$P_i^d$	Potencia activa demandada en el sistema para toda barra $i$ perteneciente al conjunto $OB$ en [MW].
$P_{i,t}^d$	Potencia activa demandada en el sistema para toda barra $i$ perteneciente al conjunto $OB$ , en el año $t$ perteneciente al horizonte de tiempo $T$ en [MW].
$\underline{P}_i^g$	Potencia activa mínima generada en el sistema para toda barra $i$ perteneciente al conjunto $OB$ en [MW].
$\overline{P}_i^g$	Potencia activa máxima generada en el sistema para toda barra $i$ perteneciente al conjunto $OB$ en [MW].
$\underline{P}_{i,t}^g$	Potencia activa mínima generada en el sistema para toda barra $i$ perteneciente al conjunto $OB$ , en el año $t$ perteneciente al horizonte de tiempo $T$ en [MW].
$\overline{P}_{i,t}^g$	Potencia activa máxima generada en el sistema para toda barra $i$ perteneciente al conjunto $OB$ , en el año $t$ perteneciente al horizonte de tiempo $T$ en [MW].
$Tr_{ij}$	Valor que describe el tipo de tramo $ij$ perteneciente al conjunto $OL$ : 0 si es línea, 1 si es transformador.
$x_{ij}$	Reactancia del de tramo $ij$ perteneciente al conjunto $OL$ en [pu].

$C_{ij}$	Costo de la nueva línea que se instalará en el tramo $ij$ perteneciente al conjunto $OL$ en [Millones USD].
$n_{ij}^0$	Cantidad de líneas existentes en el tramo $ij$ perteneciente al conjunto $OL$ .
$\overline{n}_{ij}$	Cantidad máxima de nuevas líneas que se pueden instalar en el tramo $ij$ perteneciente al conjunto $OL$ .
$\overline{P}_{ij}$	Flujo de potencia máximo que puede pasar por el tramo $ij$ perteneciente al conjunto $OL$ en [MW].
$\theta_i$	Ángulo que alcanza toda barra $i$ perteneciente al conjunto $OB$ en [deg].
$P_i^g$	Potencia activa generada para toda barra $i$ perteneciente al conjunto $OB$ [MW].
$P_{ji}^0$	Flujo de potencia activa existente en los tramos $ij$ perteneciente al conjunto $OL$ en [MW].
$P_{ij,t}^0$	Flujo de potencia activa existente en los tramos $ij$ perteneciente al conjunto $OL$ , en el año $t$ perteneciente al horizonte de tiempo $T$ en [MW].
$P_{ij}$	Flujo de potencia activa nueva en los tramos $ij$ perteneciente al conjunto $OL$ en [MW].
$P_{ij,y}$	Flujo de potencia activa nueva en los tramos $ij$ perteneciente al conjunto $OL$ que pende del nuevo número de ramales $y$ perteneciente al conjunto $Y$ en [MW].
$w_{ij,y}$	Ingreso de nuevo ramal en el tramo $ij$ perteneciente al conjunto $OL$ que pende del nuevo número de ramales $y$ perteneciente al conjunto $Y$ .
$n_{ij}$	Cantidad de nuevas líneas que ingresan en el tramo $ij$ perteneciente al conjunto $OL$ .
$P_{i,t}^g$	Potencia activa generada para toda barra $i$ perteneciente al conjunto $OB$ , en el año $t$ perteneciente al horizonte de tiempo $T$ en [MW].
$P_{ij,y,t}$	Flujo de potencia activa existente en los tramos $ij$ perteneciente al conjunto $OL$ que pende del nuevo número de ramales $y$ perteneciente al conjunto $Y$ , en el año $t$ perteneciente al horizonte de tiempo $T$ en [MW].
$w_{ij,y,t}$	Ingreso de nuevo ramal en el tramo $ij$ perteneciente al conjunto $OL$ que pende del nuevo número de ramales $y$ perteneciente al conjunto $Y$ , en el año $t$ perteneciente al conjunto $T$ .
$n_{ij,t}$	Cantidad de nuevas líneas que ingresan en el tramo $ij$ perteneciente al

conjunto  $OL$  en el año  $t$  perteneciente al conjunto  $T$ .

$\alpha_t$

Factor de actualización de capital (costos de inversión, operación y energía no suministrada) a valor presente

## RESUMEN

**TÍTULO:** “APLICACIÓN DE MÉTODOS DETERMINISTAS PARA LA PLANIFICACIÓN DE LA EXPANSIÓN DE LA RED DE TRANSMISIÓN EN ECUADOR”

**Autores:**

Alex Dario Lata Gualancañay

Fausto Andrés Quintero Ross

En este proyecto de investigación se desarrolló el modelamiento de métodos deterministas para la planificación de la expansión de la transmisión (PET), con el propósito de evaluar el mejor modelo de planeación, para satisfacer el progresivo incremento que sufre la demanda eléctrica en redes de transmisión, y poder transportar la respectiva cantidad de energía eléctrica proyectada a un respectivo horizonte determinado de tiempo de estudio 2022 – 2032.

Se evalúa el sistema reducido de 230kV y se ajusta de manera adecuada para su transformación al sistema *45-Bus SNI-230 kV Ecuador System*, acorde a las necesidades específicas del estudio mediante la utilización del *software DigSILENT PowerFactory*, y adquirir los datos necesarios para la utilización de distintos programas computacionales como AMPL, GAMS y PYOMO, a este sistema se le une dos sistemas adicionales de prueba que serán el punto de inicio: Garver (6 BARRAS) e IEEE 24 (24 BARRAS), a todos ellos se aplican diferentes modelos de planeación de la expansión de la transmisión, comparando las metodologías de planeación estática con la planeación dinámica (multietapa), presentando la comparación que existen entre programas computacionales ya sea en tiempo de ejecución, *solver* y función objetivo. Finalmente, con los resultados obtenidos y las comparaciones hechas se determina el mejor modelo de planeación, para cuando el sistema eléctrico de potencia debe ser reforzado, considerando un escenario futuro de demanda de 10 años de estudio, manteniendo el sistema operando fuera de condiciones de sobrecarga y a un mínimo costo.

**Palabras Clave:** Planeación, Sistema Nacional Interconectado, Modelo, Programa, Optimo.

## ABSTRACT

**THEME:** “APPLICATION OF DETERMINISTIC METHODS FOR PLANNING THE EXPANSION OF THE TRANSMISSION NETWORK IN ECUADOR.”

**Authors:**

Alex Dario Lata Gualancañay

Fausto Andrés Quintero Ross

This research project developed the modeling of deterministic methods for transmission expansion planning (TEP) to evaluate the best planning model to satisfy the progressive increase in electricity demand in transmission networks and to be able to transport the respective amount of electricity projected to a given time horizon of 2022 - 2032.

The reduced 230kV system is evaluated and adjusted appropriately for its transformation to the 45-Bus SNI-230 kV Ecuador System, according to the specific needs of the study using Digsilent PowerFactory software and to acquire the necessary data for the use of different computer programs such as AMPL, GAMS, PYOMOo, and JuMP; this system is joined by two different test systems that will be the starting point: Garver (6 Bus) and IEEE (24 Bus), to all of them different transmission expansion planning models are applied, comparing static planning methodologies with dynamic (multi-period) planning, presenting the comparison that exists between computer programs either in execution time, solver and objective function. Finally, with the results and the comparisons made, the best planning model is determined for when the electrical power system should be reinforced, considering a future demand scenario of 10 years of study, keeping the system operating out of overload conditions and at a minimum cost.

**Keywords:** Planning, National Interconnected System, Model, Programme, Optimal.

## ***AVAL DE TRADUCCIÓN***

En calidad de Docente del Idioma Inglés del Centro de Idiomas de la Universidad Técnica de Cotopaxi; en forma legal **CERTIFICO** que:

La traducción del resumen al idioma Inglés del proyecto de investigación cuyo título versa: “**APLICACIÓN DE MÉTODOS DETERMINISTAS PARA LA PLANIFICACIÓN DE LA EXPANSIÓN DE LA RED DE TRANSMISIÓN EN ECUADOR**” presentado por: **Lata Gualancañay Alex Dario**, egresado de la Carrera de: **Ingeniería en Electricidad**, perteneciente a la **Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas**, lo realizaron bajo mi supervisión y cumple con una correcta estructura gramatical del Idioma.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad y autorizo al peticionario hacer uso del presente aval para los fines académicos legales.

Latacunga, febrero del 2023

Atentamente,



-----  
**Mg. Bolívar Maximiliano Cevallos Galarza**  
**DOCENTE CENTRO DE IDIOMAS-UTC**  
**CI: 0910821669**

## 1 INFORMACIÓN GENERAL

**Título:** Aplicación de métodos deterministas para la planificación de la expansión de la red de transmisión en Ecuador.

**Fecha de inicio:** Octubre 2022

**Fecha de finalización:** Marzo 2023

**Lugar de ejecución:** No aplica

**Facultad que auspicia:** Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas.

**Carrera que auspicia:** Carrera Electricidad

**Proyecto Macro Asociado:** Desarrollo de sistemas eficientes para el abastecimiento y uso de energía eléctrica a nivel local, regional o nacional.

**Equipo de Trabajo:**

**Grupo de Investigación:** Sistemas Eléctricos de Potencia

**Tutor de Titulación:** Ing. M.Sc. Wilian Guamán

**Estudiantes:** Alex Darío Lata Gualancañay

Fausto Andrés Quintero Ross

**Área de Conocimiento:** 07 Ingeniería, Industria y Construcción / 071 Ingeniería y Profesiones Afines / 0713 Electricidad y Energía.

**Línea de investigación:** Energías Alternativas y Renovables, Eficiencia Energética y Protección Ambiental.

**Sublíneas de investigación de la Carrera:**

Sublínea 1: Explotación y diseño de Sistemas eléctricos de potencia

Grupos Temáticos:

1. Planificación y operación de Sistemas Eléctricos de Potencia.
2. Sistemas de Transmisión y Distribución de energía

## **2 INTRODUCCIÓN**

La planificación de la expansión de la red de transmisión eléctrica es un proceso clave para garantizar el suministro de energía a nivel nacional. En Ecuador, la planificación de la expansión de la red de transmisión ha sido históricamente un tema complejo. Sin embargo, en las últimas décadas, ha habido un esfuerzo por mejorar la planificación de la expansión de la red de transmisión en el país, y se ha comenzado a utilizar métodos deterministas para lograr una planificación más eficiente y con resultados efectivos.

El objetivo de la investigación es analizar la aplicación de métodos deterministas en la planificación de la expansión de la red de transmisión eléctrica en Ecuador, para lo que toma casos de estudio clásicos y a su vez un sistema real de la red. En particular, se estudiarán los métodos de planificación deterministas estáticos, así como también el método dinámico (Multietapa). A diferencia de la planificación estática, la planificación dinámica (Multietapa) toma en cuenta las incertidumbres y cambios en el sistema eléctrico a lo largo de un horizonte tiempo, lo que permite una mejor adaptación a las condiciones cambiantes del mercado y una mayor capacidad de respuesta ante eventos impensables.

A través de esta investigación, se evaluarán las ventajas y limitaciones de cada método y se presentarán casos de estudio que demuestren su eficacia en la planificación de la expansión de la red de transmisión eléctrica en el país, además, se identifica las mejores prácticas para la aplicación de métodos deterministas en la planificación de la expansión de la red de transmisión eléctrica en Ecuador, y se puedan proponer recomendaciones para mejorar la eficiencia y eficacia de este proceso en el futuro.

### **2.1 EL PROBLEMA**

#### **2.1.1 Situación Problemática**

Un sistema eléctrico de potencia (SEP), comprende un sin fin de dificultades que puede tener esto comprende desde su generación, transmisión y consumo, por lo que se realiza un estudio y análisis para poder tener un óptimo funcionamiento de sus componentes, cuyo objetivo es transferir energía eléctrica capaz de abastecer a todos los consumidores tan económicamente como sea posible, en la cantidad deseada y con un nivel admisible de calidad, seguridad y confiabilidad.

El SEP es de naturaleza dinámica cambiante y compleja debido a que la demanda de energía eléctrica en un país o región crece de manera variable, es decir, que para definir un plan de expansión es preciso considerar diversos factores que van cambiando conforme pasa el tiempo, por lo cual es necesario utilizar métodos dinámicos o multietapa.

En Ecuador, la transmisión de electricidad es una parte fundamental del sistema eléctrico nacional debido a la creciente demanda, es esencial que el sistema esté bien estructurado con la infraestructura adecuada para garantizar la conformación adecuada del SEP. Sin embargo, esto hace que la planificación sea más compleja debido a las incertidumbres relacionadas con las cargas y los mercados de la electricidad.

En la planificación de la expansión de la transmisión (PET), surgen desafíos al aumentar el número de líneas en una red existente, es crucial que estas líneas funcionen de manera óptima con el sistema ya existente y que el nuevo sistema de transmisión se adapte a un aumento en la carga eléctrica, este proceso permite determinar el plan necesario para fortalecer el sistema de tal sentido es importante que el servicio cumpla con los requisitos técnicos y de confiabilidad, al tiempo que asegure una carga eléctrica ininterrumpida [1].

La existencia de inconvenientes al hablar de un problema multietapa, el planteamiento bastante complejo, puesto que el planificador debe responder también la interrogante de cuándo es el momento indicado para agregar un nuevo elemento al sistema. Es decir, el problema suma la variable tiempo a su formulación. Esto ocasiona que el espacio de búsqueda aumente de forma substancial requiriendo grandes esfuerzos computacionales para resolverlo. Por tal motivo, no ha sido tan ampliamente estudiado como el planeamiento estático. No obstante, en Ecuador el Plan Maestro de Electricidad (PME) no toma en consideración para la elaboración del Plan de Expansión de Transmisión 2018–2027, CELEC EP – TRANSELECTRIC, realiza los análisis de diagnóstico del sistema para el corto y largo plazo, mas no para una multietapa.

En el PME, no se identifica un modelo específico y claro para expandir la red, por lo que es necesario estructurar el modelo a utilizar que garantice que se cumplan los límites y restricciones operativas para cada escenario de generación y demanda.

### **2.1.2 Formulación del Problema**

El crecimiento poblacional en Ecuador es constante, lo que provoca un aumento significativo en la demanda del servicio eléctrico afectando principalmente a sistemas de transmisión y subtransmisión.

## 2.2 OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN

- **Objeto:**
- El objeto de estudio es la planificación de la expansión de la red de transmisión del sistema nacional interconectado (SNI) en Ecuador.
- **Campo de Acción:**
- El campo de acción para el proyecto: 330000 ciencias Tecnológicas / 3306 Ingeniería y Tecnología Eléctricas / 3306.99 Transmisión y Distribución.

## 2.3 BENEFICIARIOS

### 2.3.1 Beneficiarios Directos:

Los beneficiarios directos de este trabajo de investigación son especialistas del área de Planeamiento de Expansión de la Transmisión como CELEC-TRANSELECTRIC.

### 2.3.2 Beneficiarios Indirectos:

Los beneficiarios indirectos son empresas eléctricas del área de subtransmisión, estudiantes y profesionales del sector eléctrico.

## 2.4 JUSTIFICACIÓN

La presente investigación toma en consideración el plan maestro de electrificación el cual debe sustentarse mediante en un análisis integral, en el crecimiento de las redes de transmisión y subtransmisión, para lograr esto, se emplea una metodología que permite establecer una expansión adecuada del sistema, buscando un plan óptimo de expansión con la inversión mínima posible, el objetivo es definir cuándo, dónde y cuántas líneas y/o deben instalarse para satisfacer la demanda de energía eléctrica, considerando los parámetros de seguridad y calidad, de esta manera, se busca compensar la demanda de energía eléctrica y asegurar la calidad y seguridad del sistema en todo momento.

La investigación tendría como beneficiario principal a la empresa eléctrica CELEC-TRANSELECTRIC la cual presenta el plan de expansión de redes de transmisión al consejo Nacional de Electricidad (CONELEC), otros que se verían beneficiados serían también empresas eléctricas de subtransmisión, estudiantes y profesionales relacionadas a sistemas eléctricos de potencia.

El análisis de las metodologías de la expansión de la transmisión puede resultar complejo cuando se trata de comparar la planificación dinámica con la planificación estática, no obstante, se espera que la planificación dinámica produzca mejores resultados debido a su alcance más amplio que este modelo ofrece, es necesario seguir un camino adecuado para encontrar la solución óptima, en este caso la mejor opción es realizar una planificación multietapa que cubra un periodo de diez años en proyección, utilizando el Sistema Nacional Interconectado (SNI) como caso de estudio, dicho enfoque permitirá obtener resultados más precisos y eficientes en la expansión de la transmisión.

La planificación de la expansión de sistemas de transmisión eléctrica es una actividad fundamental para asegurar el suministro de energía en Ecuador, esto toma mayor peso debido al crecimiento poblacional económico e industrial, la demanda de energía eléctrica también se incrementa, lo que se traduce en una mayor exigencia del sistema de transmisión, para abordar estos desafíos, se ha desarrollado un proyecto de investigación que busca soluciones a través de la modelación de un programa que utiliza los datos extraídos del SNI. En este proceso, se estudian las metodologías para la planificación y se utilizan modelos de la literatura clásica.

El estudio de metodologías de planeación considerando los diferentes modelos de PET, tomando como caso de estudio el SNI, es una alternativa factible si se habla de un problema estático ya que se toma en consideración un solo periodo de estudio, dicho problema de PET tiene el objetivo de determinar qué, cuándo y dónde construir o implementar los elementos que permitan un funcionamiento óptimo y económico, no obstante, al referirnos a modelo multietapa el estudio se torna complejo y a su vez preciso, por lo que este modelo considera varios períodos de tiempo, planes de generación y escenarios de demanda futura, lo cual permite determinar con mayor exactitud dónde y cuándo deben realizarse las inversiones necesarias para el aumento de infraestructura a menor costo, esto sin tener una operación viable (sin sobrecargas) en el sistema, llevando así a un problema de estudio más complejo [2]. Este análisis sirve de apoyo para entender mediante aplicaciones prácticas, la planeación de la transmisión el mismo que ayudará en trabajos futuros para implementar modelos más detallados del mercado eléctrico y de la red de transmisión, ahorrando tiempo en elegir la metodología más cercana a los requerimientos de la investigación a realizar.

La industria energética ha experimentado grandes cambios en los últimos años gracias al avance tecnológico. Para adaptarse a estos cambios, se requiere de una planificación adecuada de la red energética, que permita un desarrollo sostenible y eficiente de la industria. Esta

planificación es fundamental para el cumplimiento de los objetivos estratégicos nacionales en eficiencia energética, tal y como se establece en el Plan Nacional de Energía (PNE) y el Plan de Expansión de Generación Eléctrica (PEG). Al promover una planificación adecuada de la red energética, se puede garantizar un suministro de energía seguro y sostenible para el país, contribuyendo así al desarrollo económico y social del mismo.

## **2.5 HIPOTESIS**

La expansión de la red propuesta por métodos dinámicos es más económica que los escenarios de expansión obtenidos por métodos estáticos.

## **2.6 OBJETIVOS**

### **2.6.1 Objetivo General**

Aplicar métodos deterministas para la planificación de la expansión de la red de transmisión en Ecuador utilizando *software* especializado.

### **2.6.2 Objetivos Específicos**

- Investigar metodologías de expansión de la red de transmisión mediante una revisión sistemática de la literatura.
- Desarrollar un caso de estudio de la red de transmisión de Ecuador utilizando el software DigSilent PowerFactory.
- Simular los distintos sistemas utilizando los diferentes modelos de planeación determinística con los distintos *software* de optimización.
- Comparar las metodologías deterministas de expansión de transmisión utilizando casos de estudio.
- Determinar el modelo más eficiente para la planificación de redes de transmisión eléctricas usando métodos deterministas.

2.7 SISTEMA DE TAREAS

Objetivos específicos	Actividades (tareas)	Resultados esperados	Medios e Instrumentos
Investigar metodologías de expansión de la red de transmisión mediante una revisión sistemática de la literatura.	-Revisión bibliográfica sobre metodologías de la planeación.	-Información sobre la clasificación de metodologías de la planeación.	- Libros. - Tesis. - Artículos científicos. - Páginas Web.
Desarrollar un caso de estudio de la red de transmisión de Ecuador utilizando el software DigSILENT PowerFactory.	-Adquisición del modelo reducido del SNI (230 kV), en el software DigSILENT PowerFactory.  -Recopilación de datos del SNI (230 kV), acoplado para nuestra utilización mediante la utilización de software Excel.  -Creación de un “.dat” para el correspondiente uso en los distintos software.	-Archivo ejecutable en formato PFD para la versión 15.1.7 del Software DigSILENT PowerFactory.  -Información extraída del caso de estudio de la red de transmisión del Ecuador (230 kV) en el software Excel.  -Base de datos valida extraída directamente de Software DigSILENT PowerFactory al software Excel.	- Libros. - Tesis. -Artículos científicos. -Software Excel.  - Software A Modelling Language for Mathematical Programing (AMPL). - Software General Algebraic Modeling System (GAMS). - Software Python (PYOMO). - Software DigSILENT PowerFactory.
Desarrollar un caso de estudio de la red de transmisión de Ecuador utilizando el software DigSilent PowerFactory.	- Adquisición de datos de los casos de estudio, para la correspondiente utilización en los distintos software.  -Modelación matemática para los distintos programas computacionales, para que ayuden a resolver el problema de PET, a partir	-Archivo “.dat” de los distintos casos de estudio a analizar.  -Modelo de planeación multietapa y estática, que requiere de una menor inversión, óptimo y satisface al porcentaje de incremento anual de la demanda eléctrica.	- Libros. - Tesis. -Artículos científicos. -Software Excel.  - AMPL. - GMAS - PYOMO - Software DigSILENT PowerFactory.

	<p>de la implementación de metodologías deterministas basadas en modelos, estáticos y multietapa.</p> <p>-Programación de los modelos clásicos de la literatura con la utilización de los distintos sistemas de prueba,</p>	<p>-Programas funcionales y con su correcta ejecución.</p>	
<p>Comparar las metodologías deterministas de expansión de transmisión utilizando casos de estudio.</p>	<p>-Validación de modelo propuesto mediante la comparación con estudios antes elaborados.</p> <p>-Comparación de resultados obtenidos de los distintos sistemas con los diferentes modelos.</p>	<p>-Cuadro comparativo de resultados sobre las metodologías de PET.</p>	<p>- Libros.</p> <p>- Tesis.</p> <p>- <i>Software</i> Excel.</p> <p>- <i>Software</i> AMPL</p> <p>- <i>Software</i> GAMS</p> <p>- <i>Software</i> Python (PYOMO).</p>
<p>Determinar el modelo más eficiente para la planificación de redes de transmisión eléctricas usando métodos deterministas.</p>	<p>- Análisis de resultados obtenidos del modelo elaborado la red de transmisión de Ecuador y sistemas clásicos de la literatura utilizando <i>software</i> especializados.</p> <p>-Comparación del tiempo de ejecución de las diferentes plataformas de modelación matemática</p>	<p>- Resultados validados por otros estudios antes realizados, teniendo efectos viables para un estudio de PET.</p> <p>- Alternativa más viable y rápida en la ejecución de un lenguaje de programación con un determinado horizonte de planeación.</p>	<p>- Libros.</p> <p>- Tesis.</p> <p>- <i>Software</i> Excel.</p> <p>- <i>Software</i> AMPL</p> <p>-<i>Software</i> GAMS</p> <p>- <i>Software</i> Python (PYOMO).</p>

### 3 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

El capítulo describe la fundamentación teórica elaborada, mediante una exhaustiva investigación que explica sobre la constante evolución que se fue dando en la planificación para la expansión de sistemas de transmisión hasta hoy en día y sus diferentes métodos y modelos a utilizar en diferentes casos de estudio, y como son estos importantes en el sector eléctrico, todo esto para la sustentación del capítulo 4, en la Sección 3.1 se presenta la base del estudio que se va a realizar, el punto de partida para el desarrollo de la investigación y hacia donde está dirigida la investigación y conocer estudios que ya han sido realizados desde los inicios hasta la actualidad, en la Sección 3.2 se explica la situación del país actual teniendo en cuenta que costa de un entorno desregulado, la misma que cuenta con una matriz eléctrica con alta participación de generación hidroeléctrica y una reducida generación termoeléctrica, en la Sección 3.3 tenemos el por qué Ecuador es un entorno desregulado, en la Sección 3.4 importancia de la planeación de un sistema eléctrico de potencia, en la Sección 3.5 explica la planeación para la expansión de la generación, en la Sección 3.6 se presenta los distintos métodos y modelos para la planeación de un sistema de transmisión, en la Sección 3.7 tenemos los distintos modelos para una planeación estática, en la Sección 3.8 el modelo que se utilizara en la planeación dinámica (Multietapa), en la Sección 3.9 se explica el horizonte de tiempo al cual puede ser desarrollado el modelo dinámico para la expansión de la transmisión.

#### 3.1 ANTECEDENTES

En los últimos años el crecimiento de la demanda ha creado la necesidad de planificar la expansión de los SEP en todos sus niveles. Los métodos de planificación para la expansión de sistemas de transmisión han ido en constante evolución, gracias a los avances científicos y tecnológicos se ha podido implementar nuevos métodos de optimización y mejoras en los modelos convencionales permitiendo así optimizar el diseño y operación de los SEP [2].

Con la aparición de las primeras computadoras digitales, al inicio de los años 50's, se utilizaron las primeras metodologías de programación para resolver el problema de planeación, Len L. Garver, ingeniero de *General Electric* fue uno de los pioneros en el estudio el de problemas de la expansión de transmisión en sistemas de potencia, desarrollo varios estudios sobre la implementación de métodos para la planeación utilizando programación (PLEM), en las décadas de los años 60's y 70's [2].

Desde los años 70's la planificación de la expansión de los PET se solucionan considerándolos como problemas de optimización en el trabajo desarrollado por Len L. Garver [3], estima la planeación de expansión de una red de transmisión usando programación lineal, a pesar de que el modelo de red lineal difería del modelo de red eléctrica, Garver concluyó que el método de flujo lineal resulto efectivo para el desarrollo de diseños preliminares de redes eléctricas. La técnica de estimación de flujo, cuando se combina con un procedimiento para seleccionar adiciones de circuitos, produce un método de estimación de red para la síntesis de futuras redes de transmisión. Los resultados se confirmaron mediante cálculos de flujo de carga de corriente alterna (CA) y se usaron para determinar los costos de inversión en transmisión en los estudios de expansión de generación-transmisión.

En los años 70's [3], los métodos probabilísticos comienzan a tener más relevancia en las actividades de planeación, aparecen metodologías de planeación de la transmisión más sofisticadas, estos pueden determinarse a partir de estudios de probabilidad de pérdida de carga. El estudio de diversas áreas proporciona información cuantitativa sobre los requerimientos de reservas futuras ante fallas e incertidumbre en la demanda.

El modelo formulado por Garver [3], es también conocido como modelo de transporte, este fue el primer método propuesto como método de optimización, este método produce una red de transmisión factible con adiciones mínimas de inversión a circuitos y/o elementos al sistema, se consideran dos pasos en dicho método: estimación de flujo lineal y selección de nuevos circuitos adicionales, en el cual se aplicó programación lineal, esta metodología consiste básicamente en resolver el modelo DC relajando la integralidad de las variables de inversión y la primera ley de Kirchhoff. Relajar la integralidad significa permitir que las variables enteras discretas del problema puedan ser tratadas como variables reales continuas durante el proceso de solución. En el caso particular del planeamiento de la expansión de la transmisión, esto significa permitir que el número de líneas que puede tener una rama pueda tener parte entera y parte fraccionaria, esto permite obtener planes de expansión de la transmisión más precisos y confiables, estas ocupan técnicas de programación lineal para ser resueltas [4].

Otra aportación importante de Garver [5], trata sobre la planeación a largo plazo de los sistemas de energía eléctrica, lo que implica la exploración de varios diseños para la red de transmisión de energía. La fortaleza de la metodología de Garver radica en su fácil implementación gracias a la simplicidad del algoritmo, el cual se basa en la sucesión de soluciones mediante programación lineal. No obstante, su principal desventaja es que no asegura la obtención de la

solución óptima del sistema diseñado, por lo que se trata de una metodología fundamentalmente heurística.

En 1981 [6], se describe un nuevo método para estudiar el efecto de las alternativas de ubicación de la generación en los costos de expansión del sistema de transmisión, este procedimiento automatizado identifica los ahorros de transmisión asociados con la generación dispersa, adiciones de transmisión año por año y los costos de expansión de la transmisión los resultados de este estudio incluyen la ubicación de las unidades generadoras y la expansión de la transmisión para cada año, años más tarde en 1985, se presenta dos metodologías de planeación la nueva característica es que se resuelve el problema de planeación de la expansión de la transmisión aplicando el método de flujos de potencia de corriente directa (DC) en conjunto con el modelo de transporte, dicha metodología es aplicada en los estudios de largo plazo, es decir, considerando un horizonte de planeación de diez años o mayor a este, dando comienzo a la planeación multietapa a largo plazo.

En el mismo año [7], con el diseño del *software* comercial AMPL desarrollado por Robert Fourer, David Gay y Brian Kernighan en *Bell Laboratories* la implementación de técnicas de programación no lineal entera mixta tomó mayor importancia. AMPL admite decenas de solucionadores, tanto de código abierto como de *software* comercial, incluidos CBC, CPLEX, FortMP, Gurobi, MINOS, IPOPT, SNOPT, KNITRO y LGO. Para el año 1990 se publica un artículo en *Management Science* que describe el lenguaje de modelado AMPL. En 2002 [8], se propone una formulación modificada del problema de planeación de la expansión de sistemas de transmisión incluyendo en las restricciones de operación el término de pérdida de potencia por efecto corona. En consecuencia, la función objetivo incluye el costo de inversión de las líneas de transmisión, la pérdida de potencia óhmica, así como la pérdida de potencia corona, lo que revela una función objetivo altamente no lineal. Por lo tanto, las técnicas de optimización no convexa se utilizan para resolver tales problemas prácticos a gran escala.

En [9], se presenta un análisis de estudio previamente realizado en Ecuador sobre la expansión de sistemas de transmisión usando criterios de óptima potencia en AC mediante el uso del flujo óptimo de potencia (AC-OPF) el cual proporciona una descripción más precisa del flujo de potencia en la red teniendo como función objetivo la minimización de las pérdidas de potencia.

Otro estudio previo realizado en Ecuador referente al tema es [10], donde estudia la Planificación de la Expansión de los sistemas eléctricos de Transmisión Multietapa (PETM), conocida también como planificación dinámica dada esta en períodos, el mismo que realiza el

horizonte de planificación de quince años, y cada etapa es de cinco años, tomando en total tres etapas, el objetivo principal fue determinar dónde, cuántos y cuándo debían agregarse nuevos elementos como líneas de transmisión o transformadores al Sistema Eléctrico de Potencia (SEP), para permitir una operación adecuada y eficiente a lo largo de todo el horizonte de planificación. Esta investigación se enfocó en proporcionar respuestas concretas a estas preguntas, para lograr una expansión óptima y eficiente del sistema.

El PME [11], se presenta como el principal referente que da soporte al futuro crecimiento de la economía, tomando como prioridad la consecución de metas y objetivos a corto, mediano y largo plazo, esto tomando en consideración un horizonte de tiempo determinado, la planificación es considerada como una herramienta fundamental de trabajo de optimización, que genera beneficios a través de las acciones emprendidas en el desarrollo energético del Ecuador, lo que se busca primordialmente es fortalecer el sector energético, continuar promoviendo cambios positivos, respetar los principios establecidos, transparentar la gestión y privilegiar los intereses del país. El PME busca ser una guía y un marco de referencia para la toma de decisiones en el sector energético, garantizando un desarrollo sostenible y equilibrado en el país.

### **3.2 SECTOR ELÉCTRICO DE ECUADOR**

En el año 1961 se fundó el Instituto Ecuatoriano de Electrificación (INECEL), con el objetivo de planificar, ejecutar, operar, controlar y regular el sector eléctrico en el Ecuador, dentro del mismo periodo de tiempo se aprobó el primer pliego tarifario y el INECEL se convirtió en el primer accionista de las empresas eléctricas de distribución o subtransmisión (EED) del país, desde su creación, el INECEL ha tenido un papel fundamental en el desarrollo del sector eléctrico ecuatoriano, contribuyendo a la expansión de la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica a nivel nacional, en la actualidad el INECEL se ha convertido en la Corporación Eléctrica del Ecuador (CELEC EP), una empresa pública que continúa liderando el desarrollo del sector eléctrico en el país [12].

En 1996, se implementaron medidas para satisfacer las crecientes necesidades energéticas del país. Se publicó la Ley de Régimen del Sector Eléctrico (LRSE) y se elaboró el Primer Plan Nacional de Electrificación. Como parte de esta ley, se creó el Consejo Nacional de Electricidad (CONELEC) para regular y planificar el sector eléctrico y delegar funciones de generación, transmisión, distribución y comercialización a otros sectores. La LRSE también estableció el

Centro Nacional de Control de la Energía (CENACE), el Consejo de Modernización del Sector Eléctrico (COMOSEL) y el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable (MEER), para estructurar y modernizar el sector eléctrico [12].

Las entidades encargadas del manejo técnico y económico de la energía en bloque en el sector eléctrico incluyen el CENACE, cuyas funciones incluyen la realización de estudios para modernizar el sector, la elaboración de bases para la calificación de operadores interesados en la capitalización del sector, y la convocatoria de operadores interesados. Por otro lado, el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable (MEER) es el encargado de satisfacer las necesidades de energía eléctrica del país a través de la formulación de normativas, planes de desarrollo y crecimiento de demanda, y políticas sectoriales para el aprovechamiento eficiente de los recursos.

En 2007, se produjo un cambio significativo en el sector eléctrico a través del Mandato Constituyente Núm.15 (MC-15). Con este mandato, el Estado asumió un papel central en el sector y decidió que las inversiones en infraestructura eléctrica se financiarían a través del presupuesto general del Estado, mientras que, la operación y el mantenimiento se financiarían a través de la tarifa eléctrica. En 2009, se creó la Corporación Nacional de Electricidad S.A (CNEL) para la gestión empresarial de las Empresas Eléctricas y de Telecomunicaciones en las que el Fondo de Solidaridad tenía una participación mayoritaria [12].

En 2010 el Decreto Núm. 220 creó la Empresa Pública Estratégica Corporación Eléctrica del Ecuador (CELEC EP), con la finalidad de realizar actividades de generación, transmisión, distribución, comercialización, importación y exportación de energía eléctrica.

En 2014 el MEER anunció cambios al esquema de recaudación y pagos del servicio eléctrico que venía operando a través de un fideicomiso con la participación de la banca local, la cual fue remplazada en el nuevo esquema por el Banco Central de Ecuador (BCE). Las tarifas eléctricas en Ecuador se aprueban anualmente en base a los costos y la recaudación tarifaria, incluyendo el aporte por tarifa dignidad, se lleva a cabo de través del BCE y del recientemente creado Comité Técnico de Supervisión y Control integrado por el MEER, dos representantes de las EED, dos representantes del mercado de generación y transmisión, y un representante del CENACE y del CONELEC [12].

En 2015 [12], se publicó en el Registro Oficial, la Ley Orgánica del Servicio Público de Energía Eléctrica (LOSPEE), la cual mantiene la estructura sectorial de responsabilidades, focalizando los roles del MEER, CONELEC, y CENACE según su mandato. El CONELEC se convirtió en

la Agencia de Regulación y Control de Electricidad (ARCONEL), y se inició el proceso para que las EED, que operaban como sociedades mixtas, se integrasen como empresas públicas.

### **3.2.1 La infraestructura del sector eléctrico de Ecuador y su evolución**

En el año 2009, el sector eléctrico en Ecuador poseía una capacidad efectiva de generación instalada de 4.396 MW, distribuida en generación térmica con un 55,7%, hidroeléctrica con un 43,8%, y fuentes renovables no convencionales con un 0,07%. En ese mismo año, diversas empresas generadoras de energía eléctrica como Hidroagoyan S.A., Hidropaute S.A., Termoesmeraldas S.A., Termopichincha S.A., Electroguayas S.A., así como la empresa de transmisión Transelectric S.A. se fusionaron para formar una nueva entidad CELEC S.A, la cual posteriormente cambió su denominación a CELEC EP.

En 2010 el Gobierno de Ecuador inició un programa mayor de inversiones en generación eléctrica para incrementar la capacidad con hidroelectricidad. Se consideraron prioritarios ocho proyectos para su construcción. Los primeros proyectos hidroeléctricos emblemáticos entraron en operación a fines de 2015. Se espera un aporte adicional de capacidad de 2.827 MW, equivalente en 16.202 GWh.5 [12].

En cuanto a la estructura del sistema de transmisión eléctrica en el país, en 2013 se contabilizaron 1.841 km de líneas de transmisión en 230 kV y 1.718 km en 138 kV, incluyendo conexiones internacionales con Colombia y Perú. Se registraron 39 subestaciones eléctricas con una capacidad total de transformación de 8.521 MVA y una capacidad de reserva de 917 MVA. Durante el mismo año, se recibieron 20.159 GWh de energía en el Sistema Nacional de Transmisión (SNT) con un nivel de pérdidas asociadas del 2,94% (592 GWh). Las pérdidas atribuibles al SNT son la diferencia entre la energía recibida desde las fuentes de generación y la energía entregada a las empresas distribuidoras en los puntos de compra [13].

Estas pérdidas se originan en conductores, transformadores y equipos del SNT, producto del transporte de la energía hacia los puntos de entrega. Actualmente la función de distribución de electricidad se lleva a cabo a través de once EED, distribuidas a lo largo del país y de la CNEL. A su vez, la CNEL concentra diez unidades de negocio de distribución y ofrece el servicio de distribución eléctrica a un total de 1,3 millones de abonados (36% del mercado de clientes de Ecuador). Otras empresas responsables de proveer el servicio a 1,7 millones de abonados (46% del mercado de clientes de Ecuador) son la Empresa Eléctrica de Quito S.A. (EEQ S.A.), la

Unidad Eléctrica de Guayaquil, la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur S.A., la Empresa Eléctrica Azogues S.A., y la Empresa Eléctrica Riobamba [12].

La capacidad instalada en transformadores de distribución a nivel nacional es de 9.010 MVA, de los cuales 4.952 MVA corresponden a la CNEL y 4.059 MVA a las EED. A nivel de subtransmisión se cuenta con 4.608 km de red, con 2.747 km instalados en la CNEL y 1.861 en las EED. La longitud de las líneas de alimentadores de medio voltaje a nivel nacional es de 75.847 km, de los cuales 36.771 km se encuentran en el área de concesión de la CNEL y 39.076 km en las demás EED.

Para atender la demanda eléctrica de los clientes de su área de prestación de servicios, las EED adquieren la energía mediante la compra por contratos en el mercado eléctrico, empleando la red de subtransmisión, o por abastecimiento con generación propia (en sistemas de distribución no incorporados al SNT). La energía disponible en el Sistema Nacional de Distribución (SND) alcanza 19.538 GWh, y las empresas CNEL Guayaquil y la EEQ S.A. concentran la mayor parte de la energía, con un 26% y un 20% respectivamente [12].

Las EED ejecutan sus inversiones según lo establecido en el Plan de Expansión de la Distribución (PED). A su vez, el PED se ejecuta a través de varios planes estratégicos: el Plan de Electrificación Rural y Urbano Marginal (FERUM), el Plan de Reducción de las Pérdidas Eléctricas (PLANREP), y el Plan de Mejoramiento de la Red de Distribución (PMD). Estos, de manera directa y transversal, contribuyen a expandir la red de distribución en favor de una mayor cobertura eléctrica, a disminuir las pérdidas eléctricas, y a mejorar los índices de calidad del servicio eléctrico [13].

La planificación y desarrollo de la infraestructura de distribución eléctrica es responsabilidad de las EED, las cuales deben realizar estudios técnicos para determinar las necesidades de expansión y mejora de sus sistemas y así satisfacer la demanda de sus clientes. Estas necesidades se presentan a las autoridades regulatorias pertinentes con base en diagnósticos técnicos que contemplan la Ampliación de líneas de subtransmisión, subestaciones de distribución, circuitos primarios, transformadores de distribución, y redes de alto y bajo voltaje, para cumplir con los parámetros técnicos establecidos por la normativa del país y los contratos de concesión de las EED.

### **3.2.2 El sector eléctrico en la actualidad**

En las últimas cuatro décadas el sector eléctrico ha sufrido distintos cambios pasando de un modelo centralista hacia una estructura que buscaba privatizar las diferentes empresas que conforman el sector, y que en la actualidad mediante la emisión de un mandato constitucional es el estado el principal responsable del sector eléctrico. Un análisis a las políticas implantadas por el gobierno del expresidente Rafael Correa, se observa que en promedio el Estado tendrá que cubrir MUSD 1.123,563 anuales por aproximadamente una década para que se puedan cumplir con los objetivos establecidos por los lineamientos de la nueva política, por tanto, implica que la existencia de un consenso político para dar continuidad a los proyectos y seguimiento, por tal razón se requiere un modelo de gestión independiente posición política del gobierno de turno [13].

### **3.3 PET EN EL MERCADO ELÉCTRICO ENTORNO DESREGULADO**

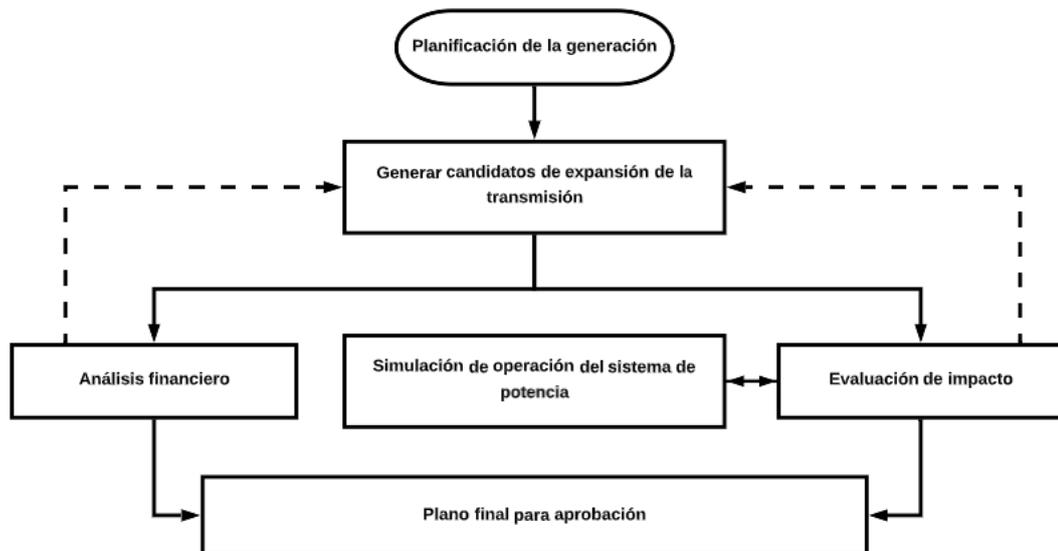
El Mercado Eléctrico (ME) estará constituido por los Generadores, Distribuidores, Grandes Consumidores, Comercializadores, Importadores y Exportadores incorporados al SNI, quienes actuarán como Agentes del ME debidamente acreditados por la respectiva, concesión, permiso, licencia expedidos por el CONELEC. Según lo establece por la normativa del Régimen del Sector Eléctrico y su Reglamento General, el CENACE tiene a su cargo la coordinación técnica y la gestión del ME, así como la supervisión de la adecuada aplicación de las tarifas establecidas y el cumplimiento de las disposiciones legales y regulaciones emitidas por el CONELEC en materia eléctrica.

El Reglamento de Despacho y Operación del SNI establece las normas y procedimientos para la administración técnica del ME. Con la reestructuración de los mercados de electricidad, las líneas de transmisión han atraído más la atención de los accionistas, participantes, operadores independientes del sistema. La PET tradicional ya no es viable en un sistema eléctrico reestructurado. Un esquema PET óptimo en este nuevo entorno requiere nuevos métodos y herramientas.

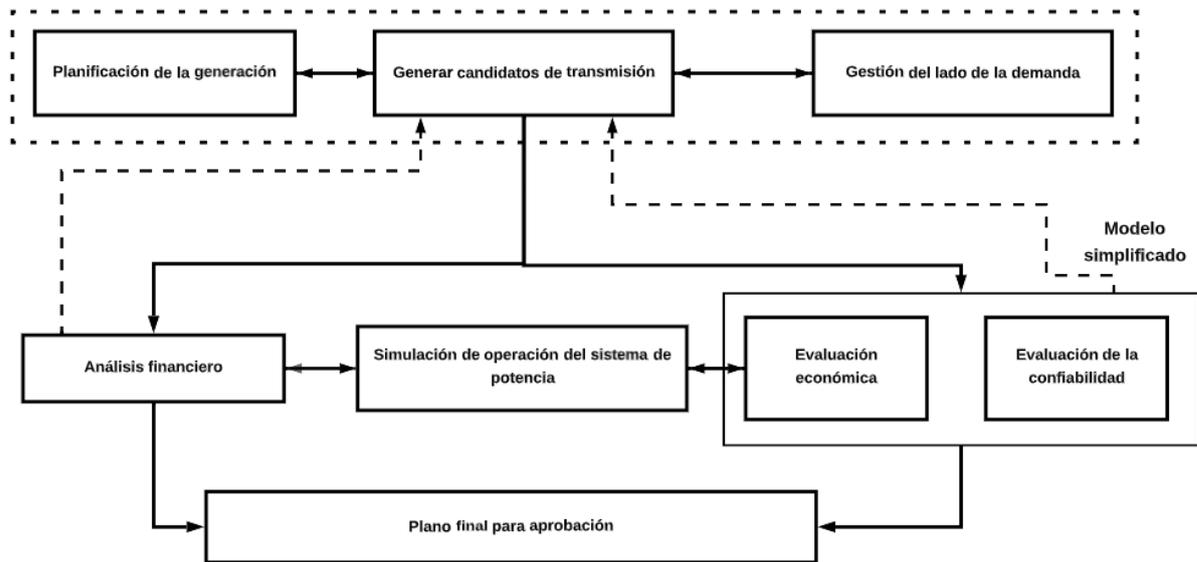
En los mercados eléctricos regulados, el objetivo es minimizar los costos de inversión de nuevas líneas de transmisión, sujeto a restricciones operativas como la satisfacción de la demanda. Sin embargo, en los mercados eléctricos desregulados, el objetivo principal de la PET es proporcionar un entorno competitivo y no discriminatorio para todas las partes interesadas considerando la confiabilidad del sistema eléctrico [14].

En la Figura 3.1 y 3.2, muestra el procedimiento del problema PET en mercados eléctricos regulados y desregulados respectivamente. La Figura 3.1, muestra que el problema PET en los sistemas tradicionales se lleva a cabo para minimizar el costo y la consideración de las restricciones operativas del sistema. En este entorno el procedimiento tiene un orden vertical.

Pero, en el mercado eléctrico desregulado como se muestra en la Figura 3.2, el orden no es vertical y se introducen señales de retroalimentación. En entornos desregulados, el problema de la PET se ha investigado desde diferentes puntos de vista, como considerar los precios nodales, el costo de reducción de carga, el costo de congestión de transmisión y el bienestar social y minimizar riesgo de mercado. También se ha reportado el problema de la PET en un mercado desregulado imperfecto en el que solo el sector generador está desregulado [14].



**Figura 3.1** Procedimiento de planificación de expansión de transmisión en el sistema de potencia (ambiente regulado) [14].



**Figura 3.2** Procedimiento de planificación de expansión de transmisión en el sistema de potencia (entorno desregulado) [14].

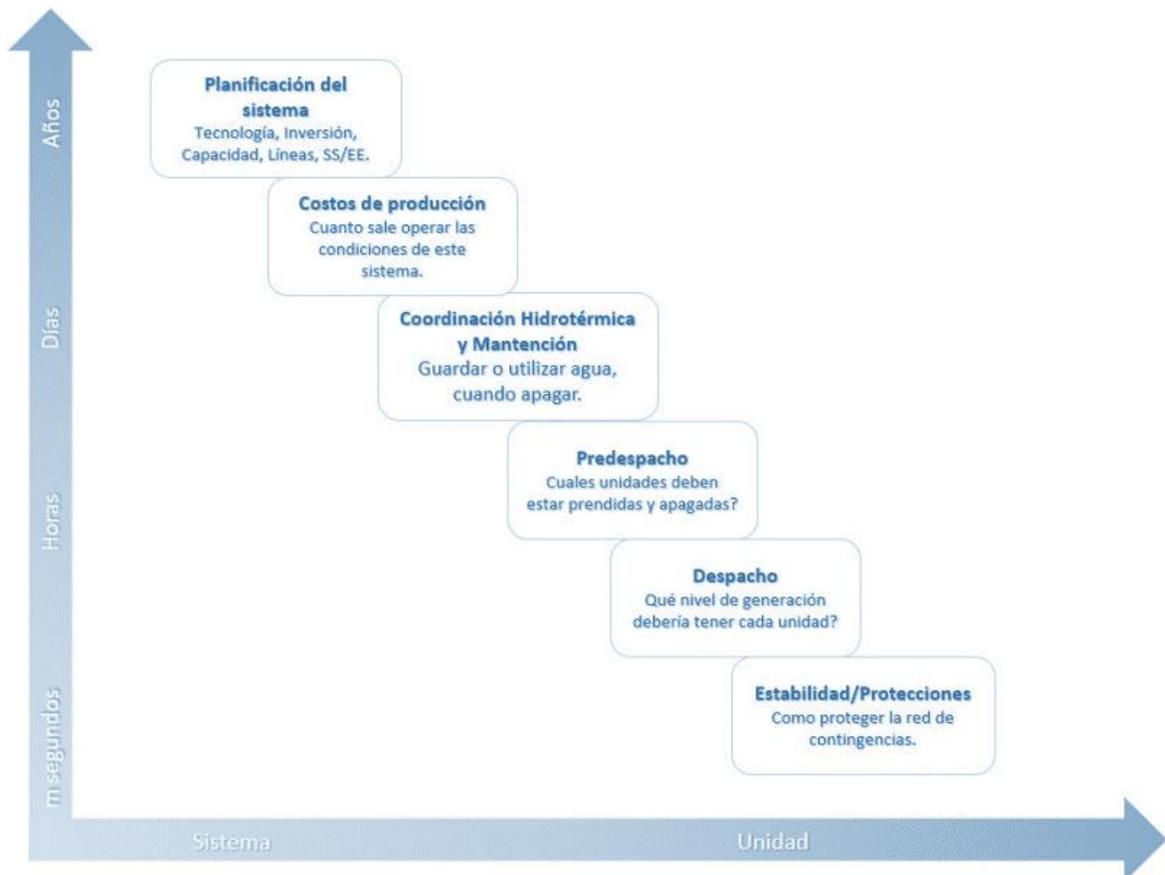
### 3.4 PLANEACIÓN DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

La planificación, diseño y operación de un SEP requiere de un análisis continuo y comprensivo para evaluar su operación y establecer la efectividad de este diseño o los planes alternativos si el sistema necesita expandirse, para ello se utilizan distintos métodos y modelos para la planeación de un sistema, ya sea, de distribución, generación o transmisión, estos estudios identifican y evitan las posibles deficiencias en un sistema antes de que éste entre en operación, a su vez, ayudan a localizar la causa de una falla o mala operación de los equipos y determinar medidas correctivas para mejorar su funcionamiento, dependiendo con el objetivo que quiera obtener [15].

La confiabilidad del sistema eléctrico se vuelve dependiente de la capacidad del sistema para adaptarse a perturbaciones y cambios esperados e inesperados, al mismo tiempo que se mantiene la calidad y la continuidad del servicio a los clientes. Dada la extensión y la complejidad de sus factores, resulta común que la planificación y el funcionamiento del sistema eléctrico se dividan en diferentes escalas de tiempo, que varían desde años hasta milisegundos. En cada una de estas escalas, existen distintas limitaciones, simplificaciones, información y consecuencias técnicas y económicas.

Hoy en día existe un compromiso entre el nivel de detalle de las simulaciones y el horizonte de tiempo que tiene la simulación, es por esto por lo que, para una escala pequeña de tiempo, ya sea de segundos, minutos o una pequeña cantidad de horas, se permite incorporar un gran nivel

de detalle. En cambio, para planificaciones de varios años, se deben realizar simplificaciones, de manera de que la carga computacional no sea excesiva y por tanto el problema de gran tamaño pueda ser resuelto. Se puede observar en la Figura 3.3, la programación que se realiza tomando en consideración las diversas ventanas de tiempo [15].



**Figura 3.3** Programación según las ventanas de tiempo [14].

Los modelos empleados en diferentes simulaciones se aplican para llevar a cabo estudios que posibiliten una operación segura y fiable en variadas situaciones, incluyendo condiciones normales y de contingencia. En este sentido, la utilización de escalas de tiempo que abarcan desde fracciones de segundo hasta menos de una hora tiene como objetivo principal mantener el voltaje y la frecuencia en los márgenes adecuados. Por otro lado, el despacho económico, que se extiende desde minutos hasta horas, se enfoca en establecer los niveles de generación para cada una de las unidades operativas, a fin de satisfacer la demanda requerida.

### 3.5 PLANIFICACIÓN DE LA EXPANSIÓN DE LA GENERACIÓN

La planeación expansión de la generación (PEG) representa de alguna manera la parte más importante de la planeación de un sistema eléctrico de potencia, considerando los costos de producción por tecnología y la necesidad de mantener el suministro para todos los usuarios en forma ininterrumpida prácticamente, lo cual implica mantener reservas de generación en términos de la disponibilidad y rapidez para la entrada en servicio en caso de deficiencia por algún disturbio [2].

La PEG es un problema de optimización que consiste en determinar qué unidades generadoras deben ser construidas para un determinado horizonte de tiempo. En el caso de planificación multietapa, el horizonte de planificación es dividido en periodos que entregan el momento exacto en que ciertas unidades de generación deben ser construidas y entrar en funcionamiento. En la planificación estática, toda la inversión de generación es planificada para un cierto horizonte de tiempo sin tener etapas de inversión. Es decir, se busca un portafolio que satisfaga las necesidades del SEP al final de un cierto periodo [15].

La parte metodológica de la planeación se desarrolla principalmente bajo modelos que consideran simultáneamente los aspectos técnicos y económicos, conocidos recientemente como modelos econométricos. En general, cualquier modelo de la planeación de la generación debe considerar los siguientes aspectos [15]:

- El crecimiento de la demanda a un período de quince años, con etapas de cinco y diez años.
- La incorporación de nuevas regulaciones relacionadas con el impacto ambiental.
- El uso de combustibles que sean menos agresivos para el medio ambiente.
- El uso de nuevas tecnologías en las centrales de ciclo combinado.
- La política energética de un país o de una empresa dentro de un país.
- La incorporación de tecnologías para generación son energías renovables.
- Las tendencias tecnológicas mundiales.
- Los costos financieros y el impacto económico de los proyectos.
- El concepto de la confiabilidad en la generación.

El PEG en sus inicios abordó las necesidades de los sistemas de energía centralizados, con empresas de electricidad estatales con monopolios en los sectores de generación, transmisión,

distribución y venta de energía. Sin embargo, tanto la liberación de los mercados eléctricos como los desarrollos tecnológicos han llevado a una rápida transformación de los sistemas eléctricos [15], Algunos desafíos que en la actualidad el PEG está teniendo son:

- Integración conjunta del sistema de generación y transmisión
- Integración de vehículos eléctricos.
- Integración de PEG con la operación de sistemas de energía a corto plazo.
- Consideración de sistemas de almacenamiento en el PEG.
- Respuesta de la demanda ante la consideración PEG.
- Implicaciones políticas sobre las inversiones en energía, destacando el papel del suministro de seguridad.

### 3.5.1 Métodos de optimización en PEG

El problema PEG es complejo, no lineal y de gran escala, en el cual se deben evaluar gran cantidad de soluciones en cuanto a tecnologías, capacidad y ubicación. Una solución efectiva y precisa del problema PEG es de suma importancia para planificar de buena manera el sistema eléctrico, teniendo presente ciertas restricciones asociadas, como son niveles de seguridad y emisiones en el sistema [2]. Dado este problema, se plantean diversos métodos de resolución para el problema matemático que plantea el PEG, los cuales son:

- **Optimización matemática:** Mediante el uso de técnicas de optimización matemática se puede obtener un plan de expansión que sea óptimo en términos económicos y técnicos. Para lograr esto, se utiliza un algoritmo que resuelve una formulación matemática precisa del problema. Sin embargo, debido a la complejidad del problema de planificación, no es posible considerar todos los aspectos de manera exhaustiva, por lo que se deben realizar simplificaciones significativas para obtener un plan óptimo que sea viable en la práctica.
- **Optimización heurística:** El término heurístico significa hallar o inventar. La optimización en este tipo de estrategias se realiza paso a paso, en donde se generan, evalúan y se seleccionan opciones de expansión con o sin la ayuda del usuario. En este tipo de optimizaciones principalmente se realizan búsquedas locales de acuerdo con reglas lógicas y/o sensibilidades. Estas reglas se ocupan para generar y clasificar las opciones durante la búsqueda de la solución. El proceso se realiza hasta que no se encuentra un plan mejor teniendo presente los criterios de evaluación que se plantearon

en un inicio. Algunas desventajas de este tipo de optimizaciones recaen principalmente en las aproximaciones que se pueden llegar a obtener del valor realmente óptimo, y el tiempo de simulación también puede ser mayor que en el caso con optimización matemática [15].

- **Optimización metaheurística:** Este tipo de métodos integran características asociadas a optimizaciones del tipo matemática y heurística, de manera de realizar una combinación óptima de ambas.

### 3.5.2 Costos de generación

Para determinar los costos totales de operación de una central eléctrica con cualquier tipo de tecnología de generación y también a partir de esto aportar la información necesaria para la elaboración de las tarifas, es necesario considerar lo que se llama los costos de generación para fines de planeación.

Los costos de una central eléctrica se dividen en dos tipos principalmente: costos fijos y costos de operación. Los costos fijos se refieren principalmente a los costos asociados a la inversión para construcción de la obra, los intereses de financiamiento, el financiamiento y los seguros del proyecto. Los costos variables también se llaman costos de operación y se refieren principalmente a los costos del combustible, mantenimiento y salarios del personal operativo [2].

Los costos totales asociados a la central se obtienen como la Ecuación (1) :

$$\text{Costos totales} = \text{Costos fijos} + \text{Costos de operación} \quad (1)$$

Según el ámbito en que se desarrollan estos costos se pueden expresar como potencia (\$/MW) o como energía (\$/MWh). El primer caso es de utilidad para evaluar el costo de la potencia producida, asociada a la eficiencia. En el segundo caso, que es más general se orienta hacia el costo referido al tiempo, que se toma como la hora de medida para la producción y el consumo. Dependiendo del tamaño de la central y los requerimientos de la planeación, cuando se orienta hacia las necesidades de inversión se maneja el (KW/h), de manera que, en la generación de energía eléctrica, el costo se mide en las barras de salida, restándole el consumo para servicios propios [2].

Según el análisis de Alfredo Mena, la tarifa de Ecuador era extremadamente alta. Puesto que la estructura de generación hidroeléctrica en países vecinos superaba el 70%. Mientras que, en Ecuador era del 50%, sumado a los altos costos del diésel para la producción de energía. Siendo en aquel entonces, el 11% de la energía producida con diésel, alrededor del 28% se producida con búnker, y menos del 2% se producida con gas orgánico [13].

Por tanto, Eduardo Villarreal, planteó que la estructura de generación de electricidad en Ecuador de aquel entonces era perversa, donde el potencial hidroeléctrico fue relegado impidiendo una fijación de precios reducida [13].

### **3.6 PLANIFICACIÓN DE LA EXPANSIÓN DE LA TRANSMISIÓN**

En las últimas décadas se ha incrementado la demanda de energía eléctrica y para atender el complejo crecimiento, es indispensable la óptima expansión de los sistemas de transmisión ya que es la columna vertebral del SEP; el sistema de transmisión tiene que ser estructurado adecuadamente. Sin embargo, la problemática para los planificadores es que, tienen que analizar distintas restricciones, las cuales buscan fortalecer la red para que sea estable, segura, confiable, que este al margen de las normativas y que cumpla con las exigencias que se van dando al pasar los años [16].

El problema de la PET es un problema Ampliamente estudiado desde 1960. Con el tiempo, han surgido nuevas técnicas de optimización y modelos matemáticos con el objetivo de encontrar soluciones adecuadas a esta cuestión. En particular, el problema de la PET se divide en dos partes fundamentales: por un lado, el modelamiento matemático y, por otro, la elección de la técnica de optimización adecuada para resolver el problema de manera efectiva. Cada modelo matemático requiere de una técnica específica de optimización que mejor se adapte a sus particularidades para alcanzar una solución satisfactoria. Las técnicas de optimización se pueden agrupar en dos categorías distintas:

- Métodos exactos
- Métodos aproximados

Estos métodos de planeación en la literatura se pueden encontrar diferentes modelos matemáticos que sirven para darle solución al problema de la PET, mediante modelamiento tradicional [17], entre los más comunes se tienen:

- Modelo de Transporte

- Modelo DC
- Modelo Híbrido
- Modelo Disyuntivo
- Modelo Disyuntivo Dinámico (Multietapa)

La pregunta que debe responderse la PET es cuándo y qué derecho de paso se debe seleccionar para construir una nueva línea, realizar una reconfiguración, construir una nueva subestación o instalar controladores de flujo de energía.

Como una cuestión de hecho, obtener la aceptación del público para la construcción de nuevas líneas de transmisión se ha vuelto un problema desafiante para los propietarios de activos de redes de transmisión, esto dificulta al operador del sistema de transmisión mantenga el desempeño técnico y económico de red de transmisión alta, teniendo en cuenta este aspecto se crean distintas funciones objetivo, las cuales suelen definirse como el costo total de operación y planificación, teniendo dicha consideración se han propuesto diferentes modelos para PET [18], los mismos que se pueden clasificar en los siguientes:

- PET probabilístico considerando las incertidumbres de carga y generación de energía eólica.
- PET de múltiples etapas basado en programación entera mixta (MIP) considerando pérdidas, costos del generador y las restricciones de seguridad N-1.
- PET basado en algoritmos genéticos considerando la incertidumbre de la demanda.
- PET basado en la reducción de la congestión.
- PET robusta basada en optimización considerando las incertidumbres de y carga generación renovable.
- Algoritmo de rama y límite para PET.
- Modelo PET basado en MIP que considera diferentes niveles de demanda, restricciones de seguridad de la red N 1 y restricciones ambientales.
- PET multiobjetivo considerando los costos sociales totales, el arrepentimiento máximo (criterio de robustez) y el costo máximo de ajuste (criterio de flexibilidad) como tres funciones objetivas.
- PET con base en Monte-Carlo considerando cortes aleatorios de unidades generadoras y líneas de transmisión, así como imprecisiones en el pronóstico de carga a largo plazo.
- Un método de punto interior que considera las restricciones de flujo de potencia de CA total.

- PET multiobjetivo considerando costo de inversión, confiabilidad (tanto a Ecuación como seguridad) y costos de congestión.
- Consideración PET con restricciones de azar de las incertidumbres de carga y viento.

El problema de la PET visto desde horizonte de planificación para estudios clásicos de comprensión puede ser tratados de dos formas diferentes las cuales son:

- Planificación estática (Minimización de costos de líneas nuevas y flujos de potencias).
- Planificación multietapa o dinámica (Minimización de costos de líneas nuevas).

### 3.6.1 Clases de restricciones del PET

Desde el punto de vista del modelado matemático, PET es una programación de optimización no lineal restringida de enteros mixtos, los problemas clásicos de optimización, como PET, generalmente contienen dos partes como función objetivo y restricciones, la flexibilidad del problema de planeación se cambia al considerar diferentes funciones y restricciones objetivas [19], por ello las restricciones del problema del PET también se pueden clasificar en dos secciones que son restricciones obligatorias y restricciones opcionales estas importantes para la construcción del modelado matemático:

**Las restricciones obligatorias:** son las restricciones operativas del sistema de potencia, como los límites de la potencia de salida del generador, los límites de los niveles de tensión y los límites de la potencia de transmisión en las líneas.

**Las restricciones opcionales:** son las restricciones adicionales, como los límites de la inversión, los límites de confiabilidad y seguridad y los límites de impacto ambiental. Las restricciones obligatorias deben incluirse en el problema PET, pero las restricciones opcionales solo se usan para tener más flexibilidad y no son obligatorias en el modelado y la implementación de ellos en los programas de optimización, con base en las descripciones propuestas, la optimización del problema PET se puede gestionar que la función de objetivo está sujeta mínimo a restricciones obligatorias y restricciones opcionales.

### 3.6.2 Métodos de resolución de PET

En el problema PET, los objetivos de planificación están en conflicto entre sí y este es un desafío importante, en la planificación tradicional, el objetivo de PET es minimizar el costo de

inversión de la red. Sin embargo, en la planificación avanzada, la planificación debe realizarse con diferentes objetivos como [19]:

- Facilitar la competencia entre los accionistas del mercado.
- Proporcionar un entorno competitivo y no discriminatorio para todos los accionistas.
- Mitigación de la congestión de transmisión.
- Minimización de costo de inversión.
- Minimización de riesgos.
- Mejora de la confiabilidad y la seguridad.
- Consideración de la generación distribuida.
- Minimización del impacto ambiental.

Los objetivos propuestos a menudo están en conflicto y no siempre se pueden cumplir al mismo tiempo. Por lo tanto, el problema PET se convierte en un problema de optimización de objetivos múltiples que no puede resolverse de manera efectiva mediante los métodos de planificación tradicionales. En este sentido, se han llevado a cabo muchos métodos diferentes para resolver el problema de optimización multiobjetivo propuesto, dichos casos de métodos de resolución se pueden dividir en dos métodos principales [19]:

- Métodos de optimización matemáticos.
- Métodos de optimización Metaheurísticos.

#### **Ventajas**

- La solución óptima suele ser precisa y el tiempo de resolución es bajo.
- Su estructuración matemática es más práctica y fácil de entender.
- Se obtiene una convergencia adecuada.

#### **Desventajas**

- Convertir las ecuaciones del sistema de potencia en un modelo de programación de optimización es difícil y problemático y es más complicado en los sistemas de potencia a gran escala.
- Para insertar una nueva restricción, se debe reorganizar el modelo y se deben incluir nuevas ecuaciones.
- El modelo del sistema de potencia se convierte en un conjunto de ecuaciones lineales o no lineales, por lo tanto, los estudios estáticos solo se pueden usar y los estudios dinámicos, como el análisis de estabilidad, no se pueden realizar.

Tomando en consideración las conclusiones que se llaga para los modelos matemáticos presentados, se puede decir que este método es más comprensible y fácil de implementar en cualquier estudio que se realice del mismo, pero teniendo en cuenta que este método no es tan exacto y efectivo con el método heurístico, pero este último método el tiempo de ejecución o simulación es más tardado para dar una solución que el otro, todo esto teniendo en cuenta los distintos aspectos que se dan para el modelado matemático y los resultados entregados.

### **3.6.3 Métodos de optimización matemática**

Los métodos utilizados para la resolución de un problema de PET utilizando optimización matemática tiene el objetivo de poder realizar un proceso que nos permita tomar las decisiones, habitualmente trata el estudio de complejas situaciones reales, con la finalidad de mejorar su funcionamiento u optimizarlo, los cuales se dividen en los siguientes [19]:

- Programación lineal.
- Programación no lineal.
- Programación entera mixta.
- Descomposición de Bender.
- Método de ramificación.
- Teoría de juegos.
- Algoritmo heurístico basado en el índice de sensibilidad.
- Descomposición jerárquica.
- Programación dinámica.

### **3.6.4 Métodos de optimización Metaheurística**

Los procedimientos metaheurísticos son métodos aproximados diseñados para resolver problemas complicados de optimización combinatoria, en los que los heurísticos clásicos no son efectivos, se pueden dividir en los siguientes [19].

- Colonia de hormigas.
- Sistema inmunitario artificial.
- Redes neuronales artificiales.
- Algoritmo de abeja y caos.
- Evolución diferencial.

- Sistema experto.
- Algoritmo de salto de rana.
- *Fuzzy*.
- Algoritmos genéticos.
- Algoritmos genéticos con codificación decimal.
- Algoritmos genéticos con codificación real.
- Búsqueda aleatoria codiciosa.
- Búsqueda de armonía, PSO, Algoritmo de búsqueda en cuadrícula.
- Recocido simulado y búsqueda tabú.

Se ve que ambos métodos (matemático y heurístico) han sido Ampliamente utilizados para resolver problemas de optimización PET. Al revisar los documentos, las ventajas y desventajas de estos métodos se pueden concluir de la siguiente manera:

#### **Ventajas**

- En los métodos propuestos, no se requiere la conversión del modelo del sistema de potencia en un conjunto de programaciones de optimización. En su lugar, el análisis del sistema de potencia, tales como el flujo de carga, el flujo de carga óptimo o el análisis de estabilidad, puede realizarse mediante un paquete analizador del sistema de potencia, como por ejemplo DigSILENT PowerFactory, y posteriormente, las respuestas obtenidas se introducen en el método de optimización correspondiente. En efecto, estos métodos solo necesitan las respuestas de salida del paquete analizador para resolver el problema en cuestión.
- La implementación de estos métodos es fácil y se puede realizar estudios dinámicos con análisis de estabilidad y confiabilidad.

#### **Desventajas**

- La solución óptima está asociada con aproximaciones y el tiempo de simulación suele ser alto.
- Es posible caer en mínimos locales en lugar de mínimos globales.
- La posibilidad de la divergencia es más que los métodos matemáticos.

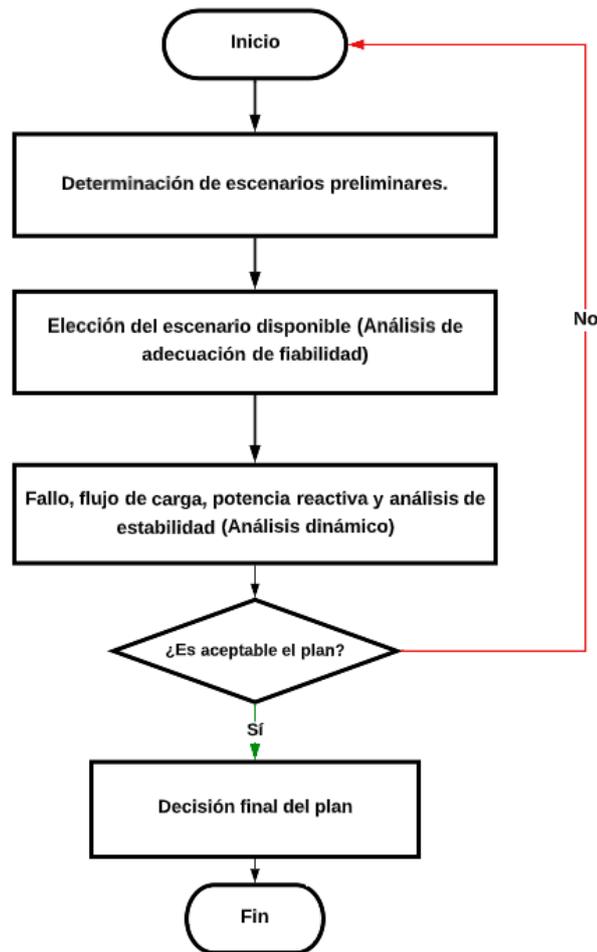
### **3.6.5 PET asociado a la fiabilidad**

La razonabilidad de la planificación de un sistema eléctrico típico se evalúa en dos etapas macro y micro. La etapa macro está relacionada con el estudio de la planificación desde la perspectiva de la política estratégica, pero la etapa micro está relacionada con el estudio de la planificación desde la perspectiva de la ingeniería de viabilidad. Los análisis de ecuación, seguridad y confiabilidad están relacionados con la etapa macro y el análisis técnico, como el análisis de fallas y el análisis de estabilidad, están relacionados con la etapa micro. El procedimiento convencional para la planificación de sistemas de potencia se muestra en la Figura 3.4. Se ve que los análisis de confiabilidad y ecuación se llevan a cabo antes que los análisis de estabilidad y fallas. Por lo tanto, cualquier planificación de un sistema de potencia, como PET, debe asociarse con un análisis de confiabilidad/seguridad [20].

Por otro lado, la evaluación de la confiabilidad debe incorporarse en cualquier planificación a largo plazo como PET, de lo contrario, no hay garantía de un suministro confiable para las demandas. Sin embargo, un plan Ampliado debe satisfacer el criterio de confiabilidad y garantizar los requisitos de confiabilidad. En el problema PET, la confiabilidad se ha investigado de diferentes formas, esto quiere decir que la confiabilidad del sistema se puede incluir como una restricción o como parte de la función objetivo, los índices más comunes se utilizan para evaluar la confiabilidad del sistema, entre los que tenemos [20]:

- Pérdida de expectativa de carga (LOLE).
- Evaluación de confiabilidad jerárquica.
- Costo de pérdida de carga (LOLC).
- Energía esperada no suministrada (EENS).
- Índice de mejora de la fiabilidad.

A demás, la seguridad se puede incluir en el problema PET. El análisis de seguridad es para garantizar los requisitos de desempeño.



**Figura 3.4** Procedimiento de trabajo tradicional para la planificación de sistemas de potencia.

### 3.6.6 Equilibrio entre la congestión y la demanda

El crecimiento acelerado en la demanda de energía eléctrica por parte de los consumidores es uno de los desafíos más grandes a los que se enfrentan las empresas eléctricas, ya que puede generar problemas de insuficiencia en la transferencia de energía de la red eléctrica disponible. Por lo tanto, estas empresas deben asegurarse de abastecer la demanda de electricidad en el futuro, garantizando altos niveles de fiabilidad, calidad y seguridad en el suministro de energía eléctrica. Uno de los mayores aspectos que causan problemas que afectan este ámbito, es la incertidumbre de la carga, que se trata de una variable estocástica que puede tener un impacto directo en el sistema de transmisión debido al incremento desproporcionado que este provoca, lo que determina si el sistema se encuentra en un estado normal o congestionado.

La congestión en el sistema de transmisión eléctrica puede tener graves consecuencias en términos de precios y competencia en el mercado energético, cuando la demanda de energía supera los límites térmicos de la red de transmisión, se produce una congestión que impide la

transferencia de energía entre ambas partes, lo que puede llevar a un aumento de los precios por encima de los costos marginales, para evitar esto, se necesita una gestión eficiente de la congestión que garantice la capacidad de la red en un mercado competitivo, por lo cual la identificación y gestión adecuada de la congestión se ha convertido en uno de los indicadores más importantes del diseño de un mercado de energía eficiente y sostenible [20].

Los sistemas de energía eléctrica son cada vez más complejos debido a diversos factores, entre los cuales se destacan los cuellos de botella en las redes de transmisión, la incertidumbre en la demanda y la creciente heterogeneidad de los procesos de generación de energía, la consecuencia, se ha registrado un aumento en la cantidad de apagones, y la congestión en la red ha restringido la capacidad de abastecer la demanda de un conjunto de transacciones de energía. Por tanto, se hace necesario abordar estos desafíos para garantizar la seguridad y fiabilidad del suministro eléctrico.

Con el fin de cubrir la demanda energética de los operadores, se necesita que el mercado energético tenga una oferta adecuada que tenga en cuenta las pérdidas que se producen en la red, además, es importante considerar la gestión de la transmisión, la cual tiene pérdidas por transmisión que se denominan la diferencia entre la demanda y la generación, aunque su impacto de pérdidas es pequeño, es necesario tenerlas presentes [19].

Cuando una línea de transmisión está congestionada, se presentan problemas que transforman los sistemas en imperfectos, generando una ineficiencia en el mercado debido a los límites de la red. La reestructuración del sector eléctrico ha fomentado una mayor interacción entre los aspectos técnicos, lo que se espera resulte en una mejora en la calidad del servicio en el futuro [20].

### **3.7 MODELOS MATEMÁTICOS DE LA PLANEACIÓN ESTÁTICA**

En la planificación estática, se analiza la red eléctrica durante un solo período de tiempo, generalmente un año. Meses o días, si se tiene que hacer un despacho, pero teniendo en cuenta que no se tomara el momento específico en el que se deberán realizar las instalaciones necesarias, la principal idea de esta metodología es determinar los elementos necesarios para conseguir la configuración ideal de la red eléctrica para una situación futura específica, este enfoque indica que los cambios necesarios no son relevantes y solo se busca la solución óptima final.

### 3.7.1 Planificación estática

La planificación estática es un método que se utiliza para identificar los elementos que deben ser añadidos a la red eléctrica sin considerar el momento en que deben ser instalados, ya que esta planeación toma a nivel general los resultados, esto quiere decir que no se tendrá en conocimiento cuando entra en operación un elemento de la red, esta metodología busca encontrar la mejor configuración final de la red eléctrica para una situación futura específica, sin preocuparse por el proceso o secuencia de los cambios necesarios. Esta mismo toma consideración de crecimiento de demanda futura.

### 3.7.2 Modelo de Transporte

En 1970, Garver propuso un modelo de transporte para resolver el problema de la PET, siendo una de las primeras propuestas sistemáticas para abordar este problema, a partir de este modelo se desarrollaron diferentes análisis para solucionar el problema de la PET, este modelo fue denominado como modelo simplificado del sistema de transmisión, ya que considera solamente el flujo de potencia activa y, por ende, resuelve únicamente el problema de capacidad de transmisión, en este modelo, se toman en cuenta únicamente las variables de flujo de potencia y la capacidad de las líneas de transmisión (LT), pero aunque este modelo ha sido mejorado y superado por otros más complejos, sigue siendo relevante para entender los fundamentos de la planificación de la expansión de la transmisión [14]:

- Balance de Potencia.
- Capacidad de operación de LT.
- Capacidad de operación de generadores.

La Ecuación (2) representa la función objetivo del modelo de Transporte para resolver el problema de PET el cual tiene la función de minimizar costos de nuevas líneas, es considerado un modelo de programación lineal entera mixta de muy baja complejidad.

La Ecuación (3) modela el balance de potencia activa del sistema, la Ecuación (4) expresa la cargabilidad máxima de la línea (dividida en dos partes porque existen dos variables a los dos lados), la Ecuación (5) es el límite de potencia generada, la Ecuación (6) es el límite de líneas nuevas que se pueden agregar en el ramal, y la Ecuación (7) indica que el número de líneas a instalar en el ramal debe ser un número entero.

$$\text{Minimizar } v = \sum_{ij \in \Omega L} C_{ij} n_{ij} \quad (2)$$

Sujeta al conjunto de restricciones comprendido por las Ecuaciones (3) – (7):

$$P_i^g - P_i^d + \sum_{ji \in \Omega L} P_{ji} - \sum_{ij \in \Omega L} P_{ij} = 0 \quad ; \forall i \in \Omega B \quad (3)$$

$$-(n_{ij}^0 + n_{ij}) \overline{P}_{ij} \leq P_{ij} \leq (n_{ij}^0 + n_{ij}) \overline{P}_{ij} \quad ; \forall i \in \Omega L \quad (4)$$

$$\underline{P}_i^g \leq P_i^g \leq \overline{P}_i^g \quad ; \forall i \in \Omega B \quad (5)$$

$$0 \leq n_{ij} \leq \overline{n}_{ij} \quad ; \forall i \in \Omega L \quad (6)$$

$$n_{ij} \text{ es Entero} \quad ; \forall i \in \Omega L \quad (7)$$

### 3.7.3 Modelo DC

El modelo DC, es una de las formulaciones clásicas para resolver el problema de PET, en esta metodología son utilizados los flujos de carga en corriente directa para modelar la red de transmisión, por lo que es considerado como un modelo ideal y factible para realizar los trabajos preliminares de planeación de sistemas de transmisión, de acuerdo con sus características intrínsecas resulta tratarse de un modelo de naturaleza no lineal [14].

Este modelo debe satisfacer la primera y segunda ley de Kirchhoff. Es decir, en sus restricciones se considera únicamente:

- Balance de Potencia.
- Capacidad de operación de LT.
- Capacidad de operación de generadores.
- Flujos de potencia en CC.
- Ángulos en las barras

La Ecuación (8) representa la función objetivo del modelo DC la cual tiene como objeto minimizar los costos de nuevas líneas al igual que pueda visualizar los flujos de potencia. El modelo es considerado programación no lineal entera mixta (PNLME) debido a que se multiplican dos variables y esto presenta una no linealidad.

La Ecuación (9) modela el balance de potencia activa del sistema, La Ecuación (10) expresa el flujo de potencia a través de las líneas candidatas, la Ecuación (11) indica la cargabilidad máxima de la línea (dividida en dos partes por existe dos variables a los dos lados), la Ecuación (12) es el límite de potencia generada, la Ecuación (13) es el límite de líneas nuevas que se pueden agregar en el ramal, la Ecuación (14) indica el ángulo inicial de las barras la cual en el caso de la barra *Slack* será cero y la Ecuación (15) que el número de líneas a instalar en el ramal debe ser un número entero.

$$\text{Minimizar } v = \sum_{ij \in \Omega L} C_{ij} n_{ij} \quad (8)$$

Sujeta al conjunto de restricciones comprendido por las Ecuaciones (8) – (15):

$$P_i^g - P_i^d + \sum_{ji \in \Omega L} P_{ji} - \sum_{ij \in \Omega L} P_{ij} = 0 \quad ; \forall i \in \Omega B \quad (9)$$

$$P_{ij} = \frac{(\theta_i - \theta_j)}{x_{ij}} (n_{ij}^0 + n_{ij}) \quad ; \forall i \in \Omega L \quad (10)$$

$$-(n_{ij}^0 + n_{ij}) \overline{P_{ij}} \leq P_{ij} \leq (n_{ij}^0 + n_{ij}) \overline{P_{ij}} \quad ; \forall i \in \Omega L \quad (11)$$

$$\underline{P_i^g} \leq P_i^g \leq \overline{P_i^g} \quad ; \forall i \in \Omega B \quad (12)$$

$$0 \leq n_{ij} \leq \overline{n_{ij}} \quad ; \forall i \in \Omega L \quad (13)$$

$$\theta_i = \theta_i^0 \quad ; \forall i \in \Omega B \quad (14)$$

$$|Tb = 3(\text{Slack})$$

$$n_{ij} \text{ es Entero} \quad ; \forall i \in \Omega L \quad (15)$$

### 3.7.4 Modelo Híbrido

Este modelo fue presentado por Villasana en 1980. Este modelo debe satisfacer la primera ley de Kirchhoff y solo un subconjunto de líneas debe cumplir la segunda ley de Kirchhoff. Es decir, en sus restricciones se considera únicamente:

- Balance de Potencia.
- Capacidad de operación de LT.
- Capacidad de operación de generadores.
- Flujos de potencia en CC para líneas existentes.

- Ángulos en las barras.

La Ecuación (16) expresa la función objetivo del modelo Híbrido lineal, cuya función es minimizar los costos de las nuevas líneas que se pueden agregar en el sistema, es considerador un modelo de programación lineal entera mixta de muy baja complejidad.

Las Ecuación (17) modela el balance de potencia activa del sistema, que a diferencia de los anteriores modelos este caso incluye el flujo de potencias inicial, La Ecuación (18) expresa el flujo de potencia a través de las líneas candidatas, la Ecuación (19) indica la cargabilidad máxima de la línea existente (dividida en dos partes por existe 2 variables a los dos lados), la Ecuación (20) indica la cargabilidad máxima de la línea que se va a instalar (dividida en dos partes por existe dos variables a los dos lados), la Ecuación (21) es el límite de potencia generada, la Ecuación (22) es el límite de líneas nuevas que se pueden agregar en el ramal, la Ecuación nueva es la (23) la cual fija el ángulo de fase en la barra *Slack*, la Ecuación (24) que el número de líneas a instalar en el ramal debe ser un número entero.

$$\text{Minimizar } v = \sum_{ij \in \Omega L} C_{ij} n_{ij} \quad (16)$$

Sujeta al conjunto de restricciones comprendido por las Ecuaciones (17) –(24):

$$P_i^g - P_i^d + \sum_{ji \in \Omega L} P_{ji} + \sum_{ji \in \Omega L} P_{ji}^0 - \sum_{ij \in \Omega L} P_{ij} - \sum_{ij \in \Omega L} P_{ij}^0 \quad ; \forall i \in \Omega B \quad (17)$$

$$P_{ij}^0 = \frac{(\theta_i - \theta_j)}{x_{ij}} (n_{ij}^0) \quad ; \forall ij \in \Omega L \quad (18)$$

$$-(n_{ij}^0) \overline{P_{ij}} \leq P_{ij}^0 \leq (n_{ij}^0) \overline{P_{ij}} \quad ; \forall ij \in \Omega L \quad (19)$$

$$-(n_{ij}) \overline{P_{ij}} \leq P_{ij} \leq (n_{ij}) \overline{P_{ij}} \quad ; \forall ij \in \Omega L \quad (20)$$

$$\underline{P_i^g} \leq P_i^g \leq \overline{P_i^g} \quad ; \forall i \in \Omega L \quad (21)$$

$$0 \leq n_{ij} \leq \overline{n_{ij}} \quad ; \forall ij \in \Omega L \quad (22)$$

$$\theta_i = \theta_i^0 \quad ; \forall i \in \Omega B \quad (23)$$

$$n_{ij} \text{ es Entero} \quad ; \forall ij \in \Omega L \quad (24)$$

### 3.7.5 Modelo Disyuntivo

Este modelo fue presentado por Bahiense en 2001. Convierte el modelo no lineal DC en un modelo lineal entero mixto. Cuando todas las líneas deben cumplir la segunda ley de Kirchhoff. Es decir, en sus restricciones se considera únicamente:

- Balance de Potencia.
- Capacidad de operación de LT.
- Capacidad de operación de generadores.
- Flujos de potencia en CC.
- Ángulos en las barras

La Ecuación (25) indica la función objetivo del modelo Disyuntivo, en este caso se trata de minimizar los costos de las nuevas líneas que se agregan, la cual se obtiene multiplicando la sumatoria de los costos de las nuevas líneas por la sumatoria de las nuevas líneas que se adicionan en el sistema.

En el modelo de programación lineal disyuntivo, es crucial establecer el valor del parámetro "M", también conocido como el parámetro disyuntivo  $2 * \theta_{\text{máx}}$ . Este valor debe ser lo suficientemente grande para no incluir una restricción adicional para la diferencia angular entre un par de nodos. Sin embargo, si se elige un valor demasiado grande para M, esto podría ocasionar inestabilidades numéricas en las aplicaciones prácticas. Es importante encontrar un equilibrio entre ambos factores para garantizar una solución óptima y estable [2].

La Ecuación (26) representa la ley de conservación de la energía, conocida como la primera ley de Kirchhoff. En el modelo Híbrido lineal, se separan los flujos de potencia de las líneas existentes y candidatas. La Ecuación (27) expresa la segunda ley de Kirchhoff. La Ecuación (28) depende del número máximo de líneas que se pueden agregar y cada posible línea debe ser considerada de forma independiente como una variable binaria. La Ecuación (29) establece la capacidad de flujo de potencia activa de las líneas existentes y candidatas. La Ecuación (30) indica la máxima carga que la línea puede soportar y puede ser dividida en dos partes. La Ecuación (31) establece los límites de generación del sistema, mientras que, la Ecuación (32) representa el límite angular. Las Ecuaciones (33) y (34) modelan la secuencia de entrada de líneas nuevas, y la Ecuación (35) fija el ángulo de fase en la barra *Slack*. Por último, la ecuación (36) indica que la variable de decisión es un valor binario, mientras que, el flujo de potencia puede tomar valores positivos, negativos o cero.

$$\text{Minimizar } v = \sum_{ij \in \Omega l} \sum_{y \in Y} w_{ij,y} * C_{ij} \quad (25)$$

Sujeta al conjunto de restricciones comprendido por las Ecuaciones (26) – (36):

$$\sum_{ij \in \Omega l} \left( P_{ji}^0 + \sum_{y \in Y} P_{ji,y} \right) - \sum_{ij \in \Omega l} \left( P_{ij}^0 + \sum_{y \in Y} P_{ij,y} \right) + P_i^g = P_i^d \quad ; \forall ij \in \Omega B \quad (26)$$

$$P_{ij}^0 = \frac{(\theta_i - \theta_j)}{x_{ij}} (n_{ij}^0) \quad ; \forall ij \in \Omega L \quad (27)$$

$$-2\bar{\theta}_l(1 - w_{ij,y}) \leq P_{ji,y} * x_{ij} - (\theta_i - \theta_j) \leq 2\bar{\theta}_l(1 - w_{ij,y}) \quad ; \forall ij \in \Omega L \quad (28)$$

;  $\forall y \in Y$

$$-(n_{ij}^0)\bar{P}_{ij} \leq P_{ij}^0 \leq (n_{ij}^0)\bar{P}_{ij} \quad ; \forall ij \in \Omega L \quad (29)$$

$$-w_{ij,y} * \bar{P}_{ij} \leq P_{ij,y} \leq w_{ij,y} * \bar{P}_{ij} \quad ; \forall ij \in \Omega L \quad (30)$$

;  $\forall y \in Y$

$$\underline{P}_i^g \leq P_i^g \leq \bar{P}_i^g \quad ; \forall ij \in \Omega B \quad (31)$$

$$-\bar{\theta}_i \leq \theta_i \leq \bar{\theta}_i \quad ; \forall ij \in \Omega B \quad (32)$$

$$\sum_{y \in Y} w_{ij,y} \leq \bar{n}_{ij} \quad ; \forall ij \in \Omega L \quad (33)$$

$$w_{ij,y} \leq w_{ij,y-1} \quad ; \forall ij \in \Omega L \quad (34)$$

;  $\forall y \in Y | y > 1$

$$\theta_i = \theta_i^0 \quad ; \forall i \in \Omega B \quad (35)$$

$$w_{ij,y} \text{ es Binario} \quad ; \forall i \in \Omega L \quad (36)$$

;  $\forall y \in Y$

### 3.8 MODELO MATEMÁTICO DE LA PLANEACIÓN DINÁMICA

El problema de planeación de la expansión de la transmisión se resuelve de manera conjunta con los planes de generación y los pronósticos de la demanda, minimizando los costos de inversión y de operación del sistema, de manera que la nueva red sea técnica, económica y financieramente factible, además de cumplir con los parámetros de calidad y confiabilidad requeridos, estos planes de PET, se hacen más relevantes al explicar temas relacionados con un

periodo de tiempo de estudio con lo que podemos ver el crecimiento de demanda a nivel de años futuros.

### **3.8.1 Planeación pseudodinámica**

Esta metodología consiste en realizar una aproximación a la solución de una secuencia de subproblemas estáticos, es decir, se aplica un procedimiento pseudodinámico en el cual se resuelve sucesivamente de manera estática el problema de PET para cada año del horizonte de tiempo, considerando los resultados obtenidos en otros períodos.

La planeación pseudodinámica se puede desarrollar mediante dos procedimientos: hacia adelante y hacia atrás, el procedimiento hacia adelante resuelve secuencialmente el problema de planeación estática para todos los períodos del horizonte de tiempo, empezando por el primer año y considerando las adiciones de equipo de cada período en la topología de la red del año siguiente.

La Planeación pseudodinámica es un proceso iterativo de resolución de problemas de transmisión eléctrica de potencia, en el cual se trabaja desde el futuro hacia el presente. Se determina la necesidad de agregar nuevos equipos en el último año del horizonte de tiempo, y se busca resolver el problema de PET para los períodos iniciales e intermedios con estos elementos agregados. Este método tiene mayor aceptación porque aborda la resolución del problema de PET en las condiciones más críticas del sistema [2].

### **3.8.2 Modelado de la demanda**

En el proceso de planeación de la expansión de sistemas de transmisión, a diferencia del plan de generación, la demanda es modelada típicamente como el valor pico o demanda máxima del sistema. Esto debido a que se requiere que el sistema de transmisión sea capaz de operar adecuadamente bajo las condiciones más severas. Para la metodología dinámica, se asume que la demanda aumenta linealmente conforme a un porcentaje previamente definido.

### **3.8.3 Planificación dinámica o multietapa**

La planeación dinámica o multietapa, como su nombre lo indica, considera varios períodos de tiempo, planes de generación y escenarios de demanda a futura, lo cual permite determinar con

mayor exactitud dónde y cuándo deben realizarse las inversiones necesarias para tener una operación viable (sin sobrecargas) en el sistema.

Las decisiones sobre las inversiones en transmisión, en una planeación dinámica son realizadas simultáneamente, a lo largo de los períodos que constituyen el horizonte de tiempo. A partir de las informaciones referentes a los valores de la demanda previstos para cada período, junto con las capacidades instaladas y por instalarse de generación y transmisión (con sus costos de operación e instalación respectivamente en el periodo de tiempo), se determina dónde y cuántos nuevos equipos deben ser instalados y también se determina cuándo deben ser realizadas las nuevas inversiones de tal manera que el costo presente y futuro total de operación y expansión del sistema eléctrico sea lo mínimo posible.

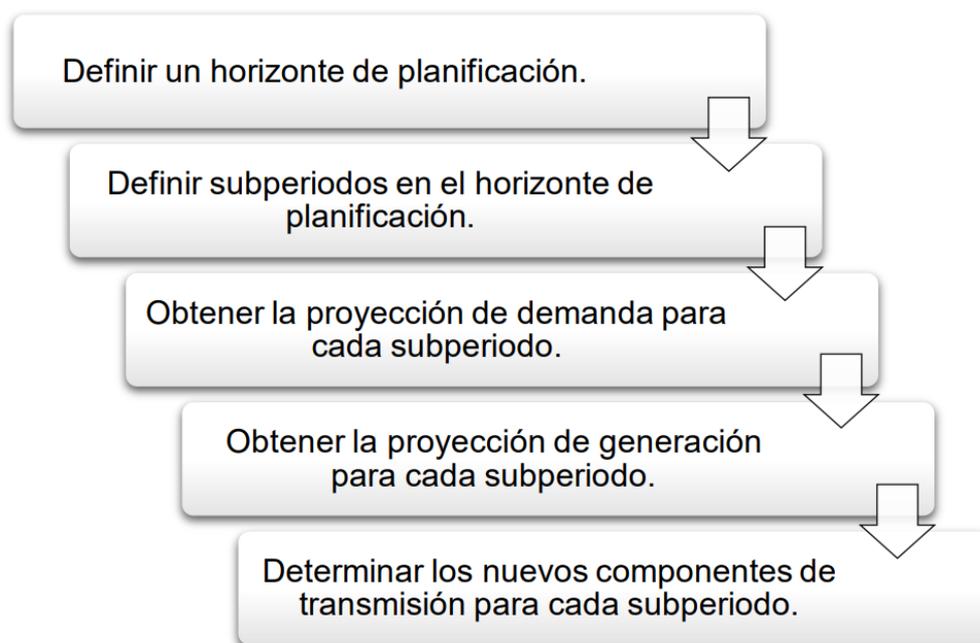
Una de las cualidades de la planeación dinámica es que permite abaratar los costos de la función objetivo (costos de construcción), debido a que no realiza la inversión hasta que las condiciones de demanda futura así lo indiquen en un determinado período de tiempo de estudio, siendo que, si la configuración o topología actual de la red es capaz de transportar la potencia generada, no se efectúa gasto alguno y ese capital puede ser utilizado de una manera distinta, en otro proyecto que otorgue ganancias a menor plazo o ganar intereses con alguna institución bancaria [21].

El modelo disyuntivo dinámico, tiene la principal desventaja de que el número de variables aumenta en comparación con otras metodologías, sin embargo, su naturaleza lineal entera mixta lo hace más atractivo [2].

La planificación de la expansión del sistema eléctrico es un desafío clave para las empresas de energía y los planificadores gubernamentales en todo el mundo. El objetivo principal es encontrar un equilibrio entre la satisfacción de la demanda de energía eléctrica a largo plazo y la optimización de la inversión, a fin de garantizar un suministro eléctrico confiable y eficiente. La planificación debe ser capaz de anticipar la evolución de la demanda y la evolución de las tecnologías de producción y distribución de electricidad, para tomar decisiones informadas sobre cuándo, dónde y cuántas nuevas líneas y transformadores se deben instalar. Esto implica el uso de técnicas avanzadas de modelado y simulación, así como un conocimiento detallado de los mercados energéticos, las regulaciones y las políticas gubernamentales [2].

La formulación de planificación dinámica describe eficazmente el problema real de expansión de transmisión; no obstante, en la práctica es posible utilizar una mezcla de las dos alternativas, la planificación estática, que permite determinar inicialmente los requerimientos de la red al

final del horizonte de planificación, así como también, las mejores rutas de todo el conjunto de posibilidades para posteriormente definir mediante planificación dinámica el plan de inversión e instalación de los elementos seleccionados [22]. El procedimiento que se debe realizar para la planificación dinámica se detalla en la Figura 3.5.



**Figura 3.5** Procedimiento de planificación dinámica [22].

La presente investigación está orientada hacia el problema de planificación de la expansión de la transmisión mediante una planeación multietapa a mediano plazo, tomando en consideración el levantamiento de información de sistema de transmisión de 230 KV, que conforma la red de transmisión en el Ecuador.

En la planeación dinámica, las decisiones sobre las inversiones en transmisión son realizadas simultáneamente, a lo largo de los períodos que constituyen el horizonte de tiempo. A partir de las informaciones referentes a los valores de la demanda previstos para cada período, junto con las capacidades instaladas y por instalarse de generación y transmisión (con sus costos de operación e instalación respectivamente), se determina dónde y cuántos nuevos equipos deben ser instalados y también se determina cuando deben ser realizadas las nuevas inversiones de modo que el valor presente o futuro del costo total de operación y expansión del sistema eléctrico sea minimizado.

El modelo disyuntivo multietapa, es una modificación del modelo disyuntivo que se acopla con el aumento de un nuevo conjunto, un enfoque de este modelo se basa en una estructura que

permite la acumulación de las adiciones realizadas en una etapa anterior en las variables de decisión de las etapas posteriores. De esta manera, se busca optimizar el proceso de toma de decisiones en la planificación y gestión de proyectos, con el fin de alcanzar los objetivos previstos de la manera más eficiente posible [23].

El proceso de determinar el costo de inversión o función objetivo se lleva a cabo en la Ecuación (37) la cual tiene en cuenta la identificación de las etapas que llevan a la construcción de nuevas líneas, este enfoque garantiza una óptima planificación del sistema eléctrico a largo plazo, teniendo en cuenta la seguridad, calidad y eficacia en la transmisión de energía eléctrica [24].

La Ecuación (38) expresa la primera ley de Kirchhoff, la que es utilizada para los flujos de potencia en cada una de las etapas del horizonte de planeamiento. La Ecuación (39) representa la segunda ley de Kirchhoff para todos los tramos de la red de transmisión durante todas las etapas, la Ecuación (40) depende del número máximo de líneas que se puedan adicionar (cada posible línea a implementar tiene que ser considerado de forma individual como una variable binaria). Las Ecuación (41) modela los límites de flujo de potencia activa de la red y los nuevos elementos a adicionar durante cada una de las etapas del análisis de estudio, la Ecuación (42) expresa el modelo matemático de la cargabilidad máxima de la línea  $w_{ij,y}$  (esta se puede dividir en dos etapas por encontrar dos variables a los dos lados), Por último, las Ecuación (43) establecen los límites de generación del sistema, la Ecuación (44) representa el límite de ángulo máximo, la Ecuación (45) expresa el límite de líneas nuevas que puede tener el ramal, la Ecuación (46) modela la sucesión de entrada de líneas nuevas asociadas a la variable binaria. Mientras que, la Ecuación (47) garantiza que una línea instalada en una etapa debe estar presente en etapas posteriores y la Ecuación (48) indica que la variable de decisión es un valor binario es decir cero o uno y el flujo de potencia puede tomar valores positivos, negativos o ceros [25].

$$\begin{aligned}
 \text{Minimizar } v = & \alpha_1 * \sum_{ij \in \Omega l} \sum_{y \in Y} w_{ij,y,1} * C_{ij} \\
 & + \sum_{t \in T / t > 1} \alpha_t \sum_{ij \in \Omega l} C_{ij} \sum_{y \in Y} (w_{ij,y,t} - w_{ij,y,t-1})
 \end{aligned} \tag{37}$$

Sujeta al conjunto de restricciones comprendido por las Ecuaciones (38) – (48).

$$\sum_{ij \in \Omega l} \left( P_{ji,t}^0 + \sum_{ij \in \Omega l} + \sum_{y \in Y} P_{ji,y,t} \right) - \sum_{ij \in \Omega l} \left( P_{ij,t}^0 + \sum_{ij \in \Omega l} + \sum_{y \in Y} P_{ij,y,t} \right) \quad ; \forall ij \in \Omega B$$

$$+ P_i^g = P_i^d \quad ; \forall t \in \Omega T \quad (38)$$

$$P_{ij,t}^0 = \frac{(\theta_{i,t} - \theta_{j,t})}{x_{ij}} (n_{ij}^0) \quad ; \forall ij \in \Omega L$$

$$\quad ; \forall t \in \Omega T \quad (39)$$

$$-2\bar{\theta}_l(1 - w_{ij,y,t}) \leq P_{ji,y,t} * x_{ij} - (\theta_{i,t} - \theta_{j,t}) \leq 2\bar{\theta}_l(1 - w_{ij,y,t}) \quad ; \forall ij \in \Omega L$$

$$\quad ; \forall y \in Y \quad ; \forall t \in \Omega T \quad (40)$$

$$-(n_{ij}^0)\bar{P}_{ij} \leq P_{ij,t}^0 \leq (n_{ij}^0)\bar{P}_{ij} \quad ; \forall ij \in \Omega L$$

$$\quad ; \forall t \in \Omega T \quad (41)$$

$$-w_{ij,y,t} * \bar{P}_{ij} \leq P_{ij,y,t} \leq w_{ij,y} * \bar{P}_{ij} \quad ; \forall ij \in \Omega L$$

$$\quad ; \forall y \in Y \quad ; \forall t \in \Omega T \quad (42)$$

$$\underline{P}_{i,t}^g \leq P_{i,t}^g \leq \bar{P}_{i,t}^g \quad ; \forall ij \in \Omega B$$

$$\quad ; \forall t \in \Omega T \quad (43)$$

$$-\bar{\theta}_i \leq \theta_{i,t} \leq \bar{\theta}_i \quad ; \forall ij \in \Omega B$$

$$\quad ; \forall t \in \Omega T \quad (44)$$

$$\sum_{y \in Y} w_{ij,y,|T|} \leq \bar{n}_{ij} \quad ; \forall ij \in \Omega L$$

$$\quad ; \forall t \in \Omega T \quad (45)$$

$$w_{ij,y,t} \leq w_{ij,y-1,t} \quad ; \forall ij \in \Omega L$$

$$\quad ; \forall y \in Y | y > 1 \quad ; \forall t \in \Omega T \quad (46)$$

$$w_{ij,y,t-1} \leq w_{ij,y,t} \quad ; \forall ij \in \Omega L$$

$$\quad ; \forall y \in Y | y > 1 \quad (47)$$

$$\begin{aligned}
 & ; \forall t \in \Omega T \\
 & ; \forall i \in \Omega L \\
 w_{ij,y,t} \text{ es Binario} & ; \forall y \in Y \quad (48) \\
 & ; \forall t \in \Omega T
 \end{aligned}$$

### 3.9 HORIZONTE DE TIEMPO

El horizonte de tiempo considerado en los planes de expansión puede variar entre uno y treinta años. Un horizonte de tiempo mayor a veinte años puede ser dividido en largo, mediano y corto plazo, los cuales interactúan entre sí durante las diferentes etapas del proceso de planeación.

En el horizonte de tiempo a largo plazo (diez años o más) se toman decisiones estratégicas, se realizan estudios de factibilidad de los posibles proyectos futuros y se definen los posibles planes de expansión del sistema, estos pueden ser distintos correspondientes al objetivo que se busque llegar a analizar.

En el horizonte de mediano plazo, se determinan los elementos necesarios para aumentar la capacidad del sistema de transmisión a través de técnicas de optimización y un modelado completo del sistema eléctrico de potencia. Se realiza un análisis técnico, económico y de riesgos para evaluar las alternativas de expansión, y se toma una decisión final sobre si se construirá o no un determinado plan de expansión, basándose en un análisis costo-beneficio.

En el horizonte de corto plazo, los equipos de ingeniería trabajan en el desarrollo detallado del plan óptimo de expansión de la red de transmisión. Esta etapa incluye el diseño, la adquisición de materiales y la construcción de las nuevas líneas, transformadores, subestaciones, y otros equipos necesarios para aumentar la capacidad del sistema. Es importante asegurar que los equipos y materiales sean de alta calidad y cumplan con los estándares requeridos para garantizar una operación segura y eficiente de la red de transmisión [2].

## 4 METODOLOGÍA

Para el desarrollo de esta investigación se toma como punto de partida la investigación realizada por V. Reséndiz Estrada [2], el cual plantea métodos deterministas para la planeación de la expansión de sistemas de transmisión utilizando tanto modelos estáticos como dinámicos, esto utilizando distintos sistemas de prueba clásicos de la literatura. Este capítulo, se presenta el proceso sistemático que se tiene que dar para poder desarrollar la planeación de sistemas eléctricos, en primer lugar en la Sección 4.1 contempla la metodología utilizada para el desarrollo del proyecto de investigación, Más adelante, en la Sección 4.2 se explica los criterios utilizados para la estructura de los modelos de programación, a continuación en la Sección 4.3 especificamos los sistemas que se va a utilizar como Garver (6 Barras) y IEEE 24 (24 Barras) para llegar con el sistema real *45-Bus SNI-230 kV Ecuador System* tomado este último como referencia el trabajo realizado por D. Reinoso Acosta [26], y acoplado para utilizar la base de datos como punto de partida de la investigación. En la Sección 4.4 Especifica los modelados matemáticos clásicos de la literatura, como el modelo de Transporte, Híbrido, DC, Disyuntivo linealizado y Dinámico (Multietapa), para su correspondiente utilización en los distintos programas computacionales de optimización, por último, en la Sección 4.5 tenemos la evaluación de resultados donde se explica los aspectos a evaluar para su comparación con los distintos modelos y programas de la PET.

### Gestión de tareas

Con la finalidad de explicar de forma detallada el trabajo, se subdivide en cinco etapas y estas con sus respectivas actividades detalladas a continuación:

#### I. Plan de la expansión de transmisión

Actividades:

- Horizonte de planeación.
- Evaluación económica de proyectos.

#### II. Estructura de los programas computacionales

Actividades:

- Etapas en el desarrollo de un modelo.
- Solucionadores.

- Lenguaje de los diferentes programas computacionales.
  - ✓ *Software* AMPL
  - ✓ *Software* GAMS
  - ✓ *Software* Python (PYOMO)

III. Selección de los casos de estudio para la PET.

Actividades:

- Sistema Garver (6 Barras).
- Sistema IEEE 24 (24 Barras).
- *45-Bus SNI-230 kV Ecuador System.*

IV. Modelación de problemas de optimización para la PET

Actividades:

- Modelo de Transporte.
- Modelo DC no lineal.
- Modelo Híbrido lineal.
- Modelo lineal Disyuntivo.
- Modelo Dinámico (Multietapa).

V. Evaluación de resultados para su comparación con los distintos modelos y programas.

Actividades:

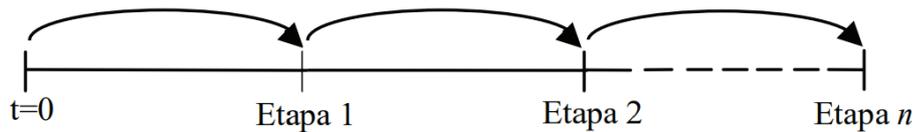
- Costo de inversión.
- *Solvers.*
- Tiempo de ejecución.
- Líneas adicionadas.

#### **4.1 PLAN DE EXPANSIÓN DE TRANSMISIÓN**

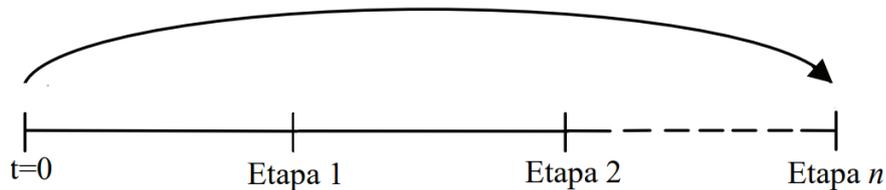
La Ampliación de la capacidad y eficiencia de la red de transmisión eléctrica es una estrategia esencial que se enfoca en la planificación, diseño y construcción de nuevas líneas de transmisión y subestaciones, el principal objetivo que se busca de esta metodología de investigación es satisfacer la creciente demanda de energía eléctrica y modernizar la infraestructura existente para garantizar una transmisión segura y abastezca a los consumidores finales.

#### 4.1.1 Horizonte de planeación

La planeación de los sistemas eléctricos se solucionan considerando una etapa (mono etapa o estático) o varias etapas (multietapa), al hablar de los modelos estáticos la inversión se asume al inicio del periodo de estudio, esta atiende las necesidades de la demanda hasta el final del periodo analizado, por otro lado, en los modelos multietapa el horizonte de tiempo se divide en varias etapas para el estudio, donde cada uno de estos periodos considera un crecimiento de la demanda, dichos modelos se dividen en dos categorías: planeamiento multietapa no coordinado y coordinado como se aprecia en la Figura 4.1 y Figura 4.2 [27].



**Figura 4.1** Planeación multietapa de sistemas coordinados.



**Figura 4.2** Planeación multietapa de sistemas no coordinados.

Para este estudio de PET, se realiza un análisis de planeamiento multietapa coordinado para el primer estudio de costos de construcción de nuevas líneas aquí se consideran un número  $n$  de etapas, donde la solución final de cada etapa se usa como configuración inicial para la siguiente etapa, en este sentido cada configuración (comienzo de cada etapa) anterior, la demanda se incrementa por la tasa de descuento predefinida por la empresa. Este procedimiento se repite para cada etapa  $n$ , es decir, realmente se realizan  $n$  procesos de optimización de forma separada, sin embargo, el costo total involucra el valor de cada etapa expresado en valor presente [27].

En el estudio de los distintos sistemas se realizará un análisis de diez años de planeación en donde se subdividen en diez etapas, cada estudio se realiza anualmente para apreciar de mejor manera cuando y donde ingresa una línea en el periodo establecido.

A diferencia del planeamiento anterior (multietapa coordinada), en el planeamiento multietapa coordinado, las  $n$  etapas se consideran de forma simultánea. En otras palabras, en lugar de  $n$

procesos de optimización, solamente se realiza uno, con todas las etapas consideradas al mismo tiempo.

#### 4.1.2 Evaluación económica de proyectos

Los métodos más comunes para realizar la evaluación económica de proyectos incluyen el análisis de costo-beneficio, el análisis de la tasa interna de retorno (TIR) y el análisis de la tasa de descuento, el análisis de costo-beneficio compara los costos de inversión de un proyecto con los ingresos totales esperados, con el objetivo de determinar si los ingresos superan los costos y, por lo tanto, si el proyecto es rentable [28].

En esta investigación se considera el método de análisis del factor de descuento que mide la rentabilidad del proyecto en términos de la tasa de descuento aplicada a los flujos de caja futuros, expresado en la Ecuación (49). Si el valor presente de los flujos de caja es mayor que la inversión inicial, se considera que el proyecto es rentable. En resumen, la evaluación económica de proyectos es esencial para tomar decisiones informadas sobre la inversión y para asegurarse de que los recursos se utilizan de manera efectiva.

$$\alpha_t = \frac{1}{(1+i)^t} \quad (49)$$

Donde:

$i$  es la tasa de descuento, que refleja el costo de oportunidad de tener el dinero disponible ahora en lugar de en el futuro.

$t$  es el período de tiempo en el que se espera el flujo de caja.

Lo propuesto en [29], diferencian cuatro períodos de evaluación de la tasa de descuento para proyectos entre el corto y largo plazo: futuro inmediato (1 a 5 años), futuro mediano (6 a 20 años), futuro lejano (21 a 50 años) y futuro muy lejano (51 a 100 años). Sus resultados sugieren el uso de una tasa del 11% para el futuro inmediato, del 4% para el futuro mediano, del 3% para el futuro lejano y del 2% para el futuro muy lejano (para períodos superiores a 100 años, se recomienda emplear el 1%). Por lo tanto, al estar en el rango de 6 a 10 años la tasa de descuento a usar es de 4% por estar en el futuro mediano.

El Valor Presente (VP) es un concepto económico que se refiere al valor actual de un flujo futuro de caja, descontado a una tasa determinada. La idea detrás del cálculo del VP es que una unidad de moneda hoy vale más que una unidad de la misma moneda en el futuro debido al poder adquisitivo de la moneda [28]. El Valor Presente se puede calcular utilizando la Ecuación (50).

$$VP_t = \frac{VF_t}{(1+i)^t} \quad (50)$$

Donde:

$VF_t$  es el monto de dinero que se espera recibir o pagar en un momento determinado en el futuro.

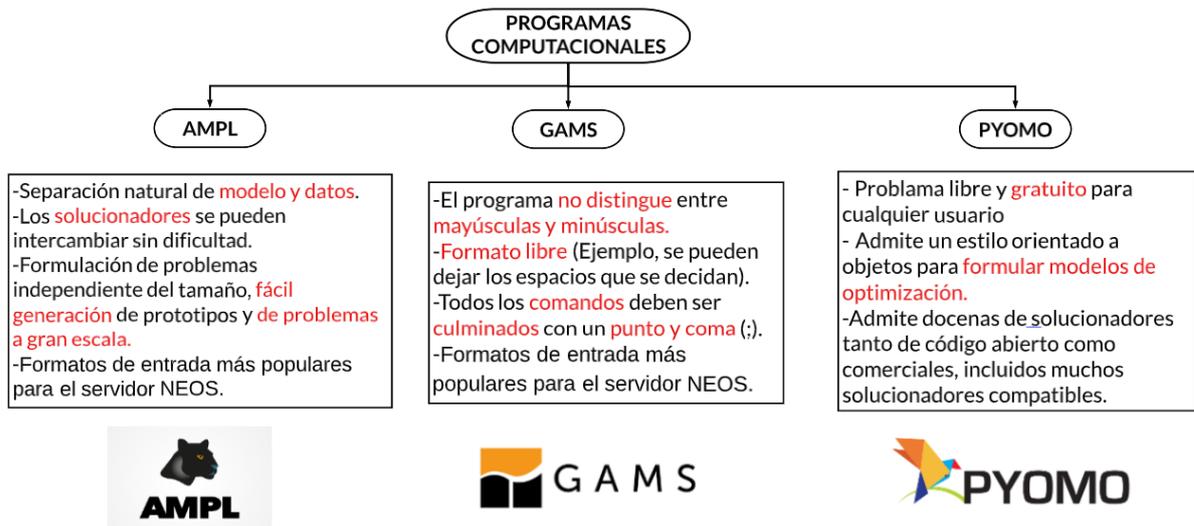
$i$  es la tasa que refleja el costo de oportunidad de tener el dinero disponible en el presente en lugar de en el futuro.

$t$  es el número de períodos futuros hasta el momento en que se espera recibir o pagar el flujo de caja.

El VP se utiliza en una variedad de aplicaciones financieras, incluyendo la evaluación de proyectos de inversión, la valuación de activos y la medición de la rentabilidad de una inversión. Al calcular el VP de diferentes flujos de caja futuros, se puede determinar cuál es el flujo de caja más valioso en el presente y, por lo tanto, tomar decisiones más informadas sobre la inversión y el gasto.

## 4.2 ESTRUCTURA DE LOS PROGRAMAS COMPUTACIONALES

Para resolver el problema de planeación de la expansión de sistemas de transmisión, en esta investigación se utilizan distintos programas computacionales. Estos son el *software* AMPL, *software* GAMS y *software* Python (PYOMO), las cuales corresponden a las metodologías de planeación y a su vez el programa DigSILENT PowerFactory para el modelamiento de la red del SNI y adquisición de datos, las características principales de los tres programas se presentan en la Figura 4.3.



**Figura 4.3** Características de los programas computacionales.

#### 4.2.1 Etapas en el desarrollo de un modelo

Las etapas para la realización de los algoritmos se muestran en la Figura 4.4.

##### Identificación del problema

- Recolección de información relevante.
- Definición del problema en términos vagos.
- Interpretación y traducción a términos precisos.
- Datos son vitales, suelen ser cuello de botella.
- Etapa fundamental para que decisiones sean Útiles [30].

##### Especificación matemática y formulación

- Definición de variables, ecuaciones, función objetivo, parámetros.
- Análisis de tamaño y estructura del problema.
- Identificación de tipo de problema (LP, MIP, NLP, MINLP).
- Énfasis en precisión y belleza en la formulación.

##### Resolución

- Algoritmo de obtención de solución óptima, cuasi óptima, satisfactoria.
- Diferentes métodos de solución.
- Diferentes implantaciones del algoritmo elegido.

**Verificación, validación y refinamiento**

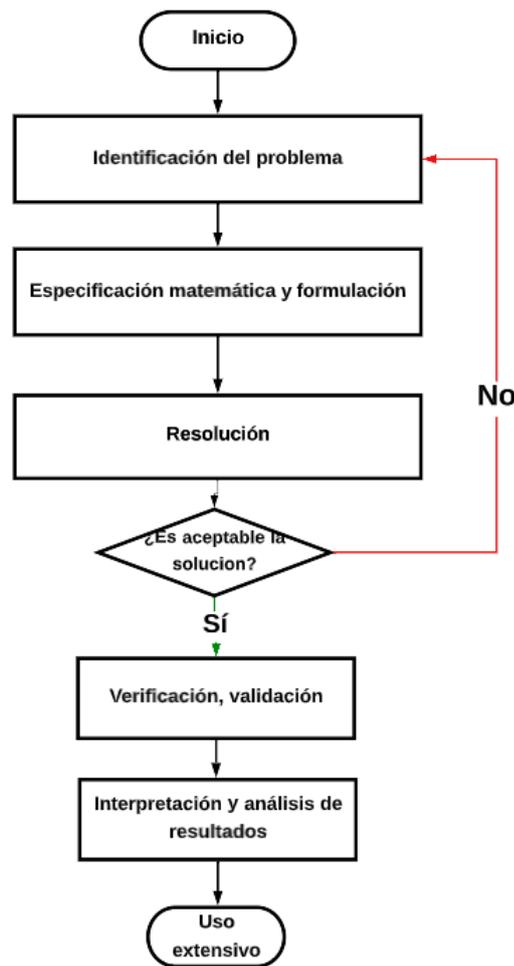
- Eliminación de errores en codificación.
- Comprobar validez de simplificaciones adoptadas.
- Comprobación de adaptación a la realidad.
- Ampliación en el modelado por nuevas necesidades [30].

**Interpretación y análisis de resultados**

- Análisis de sensibilidad en parámetros de entrada.
- Solución óptima.
- Detección de soluciones cuasi óptimas atractivas.

**Uso, documentación y mantenimiento**

- Etapa fundamental para el éxito de un modelo.
- Documentación clara, precisa y completa.
- Manual de usuario con especificación técnica funcional, matemática e informática [30].



**Figura 4.4** Características de los programas computacionales.

#### 4.2.2 Solucionadores

En la Tabla 4.1 se aprecia los principales solucionadores de programación disponible, entre los más comunes para los distintos programas computacionales tenemos los siguientes.

**Tabla 4.1** Descripción de los principales solvers y algoritmos de resolución.

Tipo de modelo	Sigla	Solvers	Términos y variables
Programación lineal	LP	BARON, CPLEX, GUSS, KESTREL, KNITRO, entre otros.	Sin términos no lineales, ni variables discretas
Programación no lineal	NLP	BARON, COUENNE, GUSS, KESTREL, entre otros.	Términos generales no lineales sin variables binarias
Programación mixta	MIP	BARON, CPLEX, SCIP, entre otros.	Variables binarias, enteras, sin términos no lineales.
Programación no lineal entera mixta	MINLP	BONMIN, COUENNE, DICOPT, entre otros.	Términos no lineales y variables discretas.

La primera opción vistas en la Tabla 4.1, es la programación lineal (LP) la misma que podemos plantear problemas simplificados o sencillos y alcanzar la solución óptima de una forma bastante eficiente y segura al ser la programación lineal un campo prácticamente cerrado. Las capacidades de modelar con este tipo de programación son menores que en los otros casos, aun así, a veces es conveniente contar con versiones LP orientativas de nuestros modelos.

La siguiente opción es la programación lineal entera mixta (MILP). Con ella se pueden tratar casos muy complejos de planificación, este tipo de programas es más o menos difícil de resolver dependiendo del número y la influencia de las variables discretas consideradas, para casos de gran número de variables existen numerosas técnicas heurísticas que permiten encontrar soluciones muy buenas, válidas pese a no ser la óptima en cada caso. Muchas veces, por ser un tipo de programación más sencillo de tratar, los casos que cuentan con partes no lineales son transformados en instancias (MILP) para asegurar su resolución [31].

El tipo de programación más evidente a emplear en muchos casos de modelado de sistemas complejos o que estudien fenómenos naturales es la programación no lineal (NLP). Sin embargo, este tipo de programación es muy compleja y los *solvers*, en el mejor de los casos, pueden encontrar soluciones locales, incluso soluciones arbitrarias, o a veces no encuentran soluciones cuando estas existen. Para casos de elevado número de variables este tipo de programación es un reto todavía en la actualidad.

El modelo de programación no lineal entera mixta (MINLP), el cual se ocupa de modelar problemas no lineales con variables continuas, discretas o binarias, convirtiéndose en una gran herramienta para la solución de problemas, aunque es un modelo más complejo que los MIP, MINLP o NLP.

### 4.2.3 Lenguaje de los diferentes programas computacionales

Para mayor entendimiento en la diferencia de códigos, se proporciona un ejemplo de los distintos programas computacionales, en la Ecuación (51), se muestra la función objetivo que busca un costo mínimo como una programación lineal y de la Ecuación (52) a la Ecuación (54) sus respectivas restricciones.

$$\blacksquare \quad \text{Minimizar } v = \sum_{i,j \in \Omega E} C_{ij} X_{ij} \quad (51)$$

*sujeto a:*

$$\sum_{i,j \in \Omega E} X_{i,j} = \sum_{i,k \in \Omega E} X_{i,k} \quad j = 2, \dots, n - 1 \quad (52)$$

$$\sum_{i,n \in \Omega E} X_{i,n} = 1 \quad (53)$$

$$0 \leq X_{ij} \leq C_{ij} \quad ; \forall ij \in \Omega E \quad (54)$$

En los cuadrados de colores se muestran la correspondencia entre el código y las ecuaciones desarrollado en los distintos programas computacionales, con el fin de ver la diferencia que existe entre líneas de programación, mostrado en la Figura 4.5, Figura 4.6 y Figura 4.7 [32].

#### AMPL

```

set edges := {(1,2),(1,3),(1,4),(2,5),(3,5),(4,5)};
param cost{edges}; param capacity{edges};
data ...; # Data is typically stored separately in AMPL;
var flow{(i,j) in edges} >= 0.0, <= capacity[i,j];
subject to unitflow: sum{(i,5) in edges} flow[i,5] == 1;
subject to flowconserve {n in 2..4}:
    sum{(i,n) in edges} flow[i,n] == sum{(n,j) in edges} flow[n,j];
minimize flowcost: sum{(i,j) in edges} cost[i,j] * flow[i,j];
    
```

**Figura 4.5** Modelado de un problema de flujo de costo mínimo en AMPL [32].

#### GAMS

```

SET nodes /n1*n5/; SET midnodes(nodes) /n2*n4/; SET lastnode(nodes) /n5/;
ALIAS(nodes,nodefrom,nodeto,n);
SET edges(nodes,nodes) / n1.n2 n1.n3 n1.n4 n2.n5 n3.n5 n4.n5 /;
PARAMETER cost(nodes,nodes) / ... /; * Data omitted
PARAMETER capacity(nodes,nodes) / ... /; * for space reasons
POSITIVE VARIABLE flow(nodefrom,nodeto); flow.UP(edges) = capacity(edges);
EQUATION unitflow;
unitflow.. sum{edges(nodefrom,lastnode), flow(nodefrom,lastnode)} =e= 1;
EQUATION flowcon(nodes);
flowcon(midnodes(n)).. sum{edges(nodefrom,n), flow(nodefrom,n)} =e=
    sum{edges(n,nodeto), flow(n,nodeto)};
FREE VARIABLE obj;
EQUATION flowcost; flowcost.. obj =e= sum{edges, cost(edges)*flow(edges)};
MODEL mincostflow /all/; SOLVE mincostflow USING lp MINIMIZING obj;
    
```

**Figura 4.6** Modelado de un problema de flujo de costo mínimo en GAMS [32].

```

                                Pyomo
edges    = [(1,2),    (1,3),    (1,4),    (2,5),    (3,5),    (4,5)]
cost     = {(1,2):1,  (1,3):2,  (1,4):3,  (2,5):2,  (3,5):2,  (4,5):2}
capacity = {(1,2):0.5, (1,3):0.4, (1,4):0.6, (2,5):0.3, (3,5):0.6, (4,5):0.5}
mcf = ConcreteModel()
■ mcf.flow = Var(edges, bounds=lambda m,i,j: (0,capacity[(i,j)]))
■ mcf.uf = Constraint(expr=sum(mcf.flow[e] for e in edges if e[1]==5) == 1)
■ def con_rule(mcf,n): return sum(mcf.flow[e] for e in edges if e[1]==n) ==
■                               sum(mcf.flow[e] for e in edges if e[0]==n)
■ mcf.flowcon = Constraint([2,3,4],rule=con_rule)
■ mcf.flowcost = Objective(expr=sum(cost[e]*mcf.flow[e] for e in edges))

```

**Figura 4.7** Modelado de un problema de flujo de costo mínimo en PYOMO [32].

Los tres lenguajes de modelado algebraico (AML) tienen similitudes tales como la declaración de variables indexadas, la especificación de la función objetivo y métodos para iterar y calcular una suma bajo ciertas condiciones. En la Figura 4.7 se aprecia que PYOMO está integrado en un lenguaje de programación, pero la sintaxis en Python es menos conveniente para establecer límites superiores y construir restricciones indexadas. Por otro lado, GAMS tiene una sintaxis detallada y única con características como el filtrado de conjuntos con el carácter \$.

Los lenguajes de programación como AMPL y GAMS son independientes, ya que han creado su propia sintaxis sin relación con ningún lenguaje de programación existente. Estos AML tienen formatos específicos para ingresar datos y utilizan analizadores personalizados para su sintaxis única. Aun así, pueden conectarse a bases de datos y hojas de cálculo [32].

#### 4.2.4 *Software* AMPL

AMPL, desarrollado por Robert Fourer, David Gay, y Brian Kernighan en los Laboratorios Bell en 1985. AMPL soporta múltiples solvers, tanto de código abierto como *software* comercial [33]. Existen múltiples maneras de describir un modelo en AMPL, pero se deja al modelador la libertad de elegir la forma que resulte más clara o conveniente para él o ella. Una opción consiste en incluir todas las declaraciones del modelo en un archivo denominado “.mod”, y especificar los datos en un archivo separado “.dat”. Al seguir este enfoque matemático, se puede encontrar y mostrar una solución utilizando únicamente unas pocas declaraciones en diferentes archivos, y ejecutarlos en un archivo denominado “.run” este último apartado teniendo dos maneras de estructura para entrega de soluciones.

Este *software* está diseñado para realizar la construcción y solución de modelos de programación matemática más sencillos para programadores y más comprensible para los

usuarios de modelos de otras disciplinas, proporciona un lenguaje de alto nivel para la representación compacta de modelos grandes y complejos lo cual le hace atractivo para una investigación, a su vez mejora sustancialmente la productividad de los modeladores y Amplia en gran medida el alcance y la utilidad de las aplicaciones de programación matemática, el tiempo disponible de ejecución del modelo para conceptualizar y poder analizar los resultados es bastante admisible [33]. En el ANEXO E, correspondiente a la Sección 8.5.1, se puede observar el procedimiento que se da en el desarrollo de modelos de optimización para el lenguaje AMPL.

#### **4.2.5 Software GAMS**

El programa GAMS es una herramienta computacional comercial Ampliamente conocida que se originó en 1985. Este *software* cuenta con su propia sintaxis y formato de entrada de datos, pero también es posible conectarlo a bases de datos y hojas de cálculo. Sin embargo, es importante tener en cuenta que, debido a su naturaleza comercial, el uso de todas las funciones y herramientas puede estar restringido o limitado. En pocas palabras GAMS es un lenguaje, soportado por un paquete informático, que permite especificar un problema de programación matemática independientemente del método de resolución asociado al mismo, los problemas a tratar han de ser de naturaleza algebraica no pudiendo especificarse problemas de optimización con ecuaciones diferenciales de forma directa [31].

Además de poder describir el problema de un propio interés GAMS puede llamar a los programas encargados de resolver el caso, siempre que estén dentro de su lista de *solvers* disponibles, teniendo en cuenta si se tiene o no una licencia completa [31], en el ANEXO E, correspondiente a la Sección 8.5.2, tenemos la estructura general de un modelo de optimización escrito en GAMS.

#### **4.2.6 Software Python (PYOMO)**

Python fue creado por Guido van Rossum, un programador holandés a finales de los 80 y principio de los 90. Python es un lenguaje de programación potente y fácil de aprender, tiene estructuras de datos de alto nivel eficientes y un simple pero efectivo sistema de programación orientado a objetos, la elegante sintaxis de Python y su tipado dinámico junto a su naturaleza interpretada lo convierten en un lenguaje ideal para scripting y desarrollo rápido de aplicaciones en muchas áreas, para la mayoría de las plataformas.

Como parte de esta investigación, se usa PYOMO, el cual es una colección de paquetes de *software* de Python para formular modelos de optimización. PYOMO fue desarrollado por William Hart y Jean-Paul Watson en el Laboratorio Nacional de Sandia y por David Woodruff en Universitarios de California, Davis. Significativas extensiones fueron desarrolladas por John Sirola en Laboratorio nacional de Sandia y por Carl Laird en la Universidad Purdue.

PYOMO admite un diseño orientado a objetos para la definición de modelos de optimización. Los pasos básicos de un proceso de modelado simple son:

- Crear modelo y declarar componentes
- Instanciar el modelo
- Aplicar solucionador
- Interrogar los resultados del solucionador

En la práctica, estos pasos se pueden aplicar repetidamente con diferentes datos o con diferentes restricciones aplicadas al modelo. Sin embargo, nos enfocamos en este proceso de modelado simple para ilustrar diferentes estrategias para modelar con PYOMO, En ANEXO E, correspondiente a la Sección 8.5.3, se puede observar el procedimiento que se da en el desarrollo de modelos de optimización para cada programa computacional en el lenguaje PYOMO.

### **4.3 SELECCIÓN DE LOS CASOS DE ESTUDIO PARA LA PET**

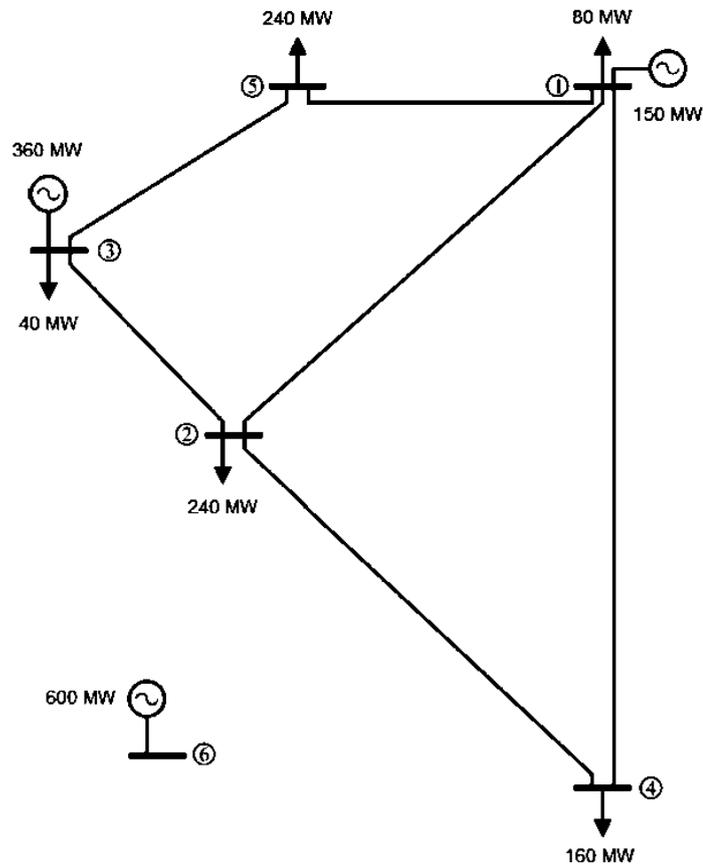
Para cada caso de estudio que se tomó en consideración para esta investigación se genera un archivo de datos en formato “.xlsx”, sin embargo, de acuerdo con el programa de optimización utilizado, este archivo se convierte en “.dat” u otro según corresponda.

#### **4.3.1 Sistema Garver (6 Barras)**

El modelo fue formulado por Garver, es la primera propuesta para el planeamiento de redes de transmisión que utiliza programación lineal y que actualmente, sirve de base para evaluar la complejidad de cualquier sistema de prueba, así como herramienta de desarrollo de nuevas propuestas para adaptarlas al problema de planeamiento, razón por la cual se utiliza Ampliamente en muchos trabajos, así como es utilizado en esta investigación.

Este sistema cuenta con seis barras, tres generadores iniciales y cinco cargas que suman una demanda inicial de 760 MW y su generación de 1.110 MW. Para realizar las pruebas del modelo

propuesto, se consideraron como candidatos de expansión todas las combinaciones posibles de corredores entre las 6 barras, en la Figura 4.8 se tiene el sistema proporcionado por [2].

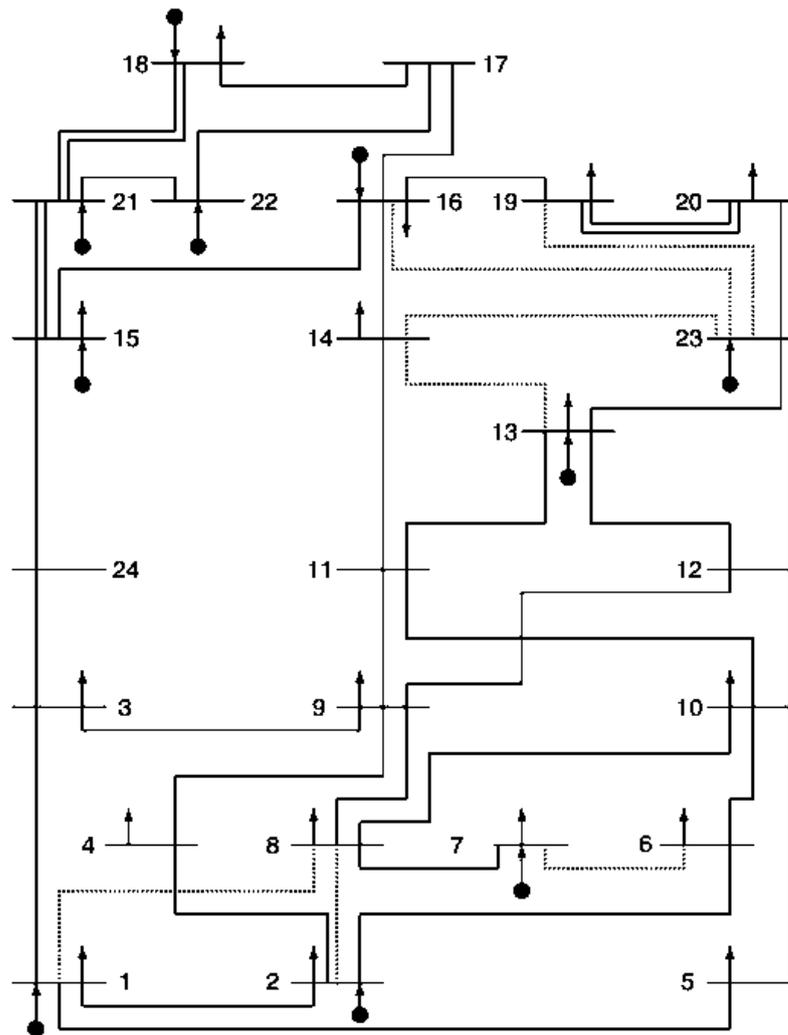


**Figura 4.8** Diagrama sistema Garver 6 Barras [2].

Los datos del sistema Garver (6 Barras) se pueden encontrar en el ANEXO B correspondiente a la Sección 8.2.1, encontrando datos de Barras, Generadores y Líneas de transmisión.

#### 4.3.2 Sistema IEEE 24 (24 Barras)

Este sistema como su nombre lo indica consiste en 24 barras, 32 unidades generadoras (termoeléctricas) distribuidas en 10 barras distintas, 34 tramos conectados y con 7 tramos con posibilidades futuras conexiones, en su totalidad contamos con 38 elementos de transmisión; por lo que en total se consideran 41 posibles inversiones. La demanda pico y la capacidad de generación del sistema IEEE – 24 nodos son de,  $P_d = 8,560$  MW y  $g = 10,215$  MW respectivamente, En la Figura 4.9 se tiene el sistema proporcionado por [34].



**Figura 4.9** Diagrama sistema IEEE 24 Barras [23].

Los datos del sistema IEEE (24 Barras) se pueden encontrar en el ANEXO B correspondiente a la Sección 8.2.2, encontrando datos de Barras, Generadores y Líneas de transmisión.

#### 4.3.3 45-Bus SNI-230 kV Ecuador System

La investigación toma como punto de inicio el sistema planteado en [26], este estudio se desarrolló en base a la red de Ecuador para el análisis de SEP, se realizó un modelado del SNI de Ecuador considerando información por parte de CELEC-TRANSLECTRIC y PME actual para obtener un modelo en base a la topología del diagrama unifilar y proceder a modelar las zonas expuestas en el PME. Para dicho análisis se utilizó el *software* PowerFactory de DigSILENT, se redujo el SNI modelado al sistema de 230 kV mediante equivalentes de red, el mismo que se tomó como referencia para la adquisición de datos para la estructura del “.dat” del modelo dinámico (multietapa). Las cuáles serán presentadas mediante tablas guardadas en

un “.xlsx”, para mejorar la comprensión, el objetivo es facilitar la comprensión y manejo de datos para los distintos programas computacionales. Esta base de datos se encuentra referenciadas en el ANEXO C.

Este sistema consta con 45 barras, 19 generadores iniciales y 25 cargas. Para realizar las pruebas del modelo propuesto, se consideraron como candidatos de expansión todas las combinaciones posibles de corredores entre las 45 barras teniendo 55 conexiones existentes y 5 posibles conexiones, todo esto tomando en cuenta la distancia niveles de voltajes entre conexión número de líneas conectadas entre otros para sus posibles conexiones para la PET.

Los datos de *45-Bus SNI-230 kV Ecuador System*, se pueden encontrar en el ANEXO B correspondiente a la Sección 8.2.3, encontrando datos de Barras, Generadores, Transformadores y Líneas de transmisión.

En la tesis [26], se realiza una reducción al SNI de Ecuador con la finalidad de simplificar y hacer manejable la cantidad de datos que este tiene, obteniendo el sistema *45-Bus SNI-230 kV Ecuador System*, donde se ha colocado generadores y cargas que simulan las zonas aguas abajo y aguas arriba, utilizando generadores cuando la potencia entra a la barra y cargas cuando esta sale. En el caso de la interconexión entre Ecuador y Colombia se utiliza un *External Grid* que permite conocer si el sistema entrega o recibe potencia del sistema colombiano.

En la Tabla 4.2 y Tabla 4.3, se describe que barras tiene generadores y cargas y su respectivo nombre, donde se tiene 20 generadores y 25 cargas distribuidas entre las 45 barras del sistema, existen barras que contienen ambos elementos, como lo son, Dos Cerritos, Esclusas, Inga, N. Prosperina, Pascuales, Quevedo y Riobamba.

**Tabla 4.2** Elementos conectados a las barras del *45-Bus SNI-230 kV Ecuador System* Parte A.

Nombre	Generador	Carga
"ALLURIQUIN 230"	-	-
"BABA 230"	-	-
"BOMBOIZA 230"	-	X
"C.H. BABA 230"	-	-
"C.H. SAN FRANCISCO 230"	X	-
"C.H. SOPLADORA 230"	X	-
"CCS 500"	X	-
"CH. MANDURIACU 230"	-	X
"CHORRILLOS 230"	X	-
"DOS CERRITOS 230"	X	X
"DURAN 230"	-	X

**Tabla 4.3** Elementos conectados a las barras del *45-Bus SNI-230 kV Ecuador System* Parte B.

Nombre	Generador	Carga
"EL INGA 230 kV"	X	-
"ESCLUSAS 230"	X	X
"ESMERALDAS 230"	-	X
"FRONTERA 230 kV"	-	-
"GIS CCS 500"	X	-
"GIS CCS 500 2"	-	-
"INGA 500"	X	X
"JAMONDINO"	X	-
"JIVINO"	-	X
"MACHALA 230"	-	X
"MAZAR 1"	X	-
"MAZAR 2"	X	-
"MILAGRO 230"	-	X
"MINAS S. FCO"	X	-
"MIRADOR 230"	-	X
"MOLINO 230"	X	-
"N. PROSPERINA 230"	X	X
"PASCUALES 230"	X	X
"PIMAMPIRO 230"	-	X
"POMASQUI 230"	-	X
"QUEVEDO 230"	X	X
"RIOBAMBA 230"	X	X
"S. GREGORIO 230"	-	X
"S. RAFAEL 500"	X	-
"SAN RAFAEL 230"	X	-
"SANTA ROSA 230 kV"	-	X
"SANTO DOMINGO 230"	-	X
"SHUSHUFINDI 230"	-	X
"SININCAY 230"	-	X
"TADAY 230"	-	-
"TOTORAS 230"	-	X
"TRINITARIA 230"	-	X
"ZHORAY 230"	-	-
"ZORRITOS-PERU"	-	X

#### 4.3.4 Líneas de transmisión proyectadas

Para la PET, se debe tener en cuenta las posibles conexiones que puede tener y cuáles son las más factibles para su correspondiente conexión, todo esto mediante la indagación mediante fuentes bibliográficas en el PME [35], estas líneas son especificadas en distancia, calibre de conductor, y cuantas líneas pueden entrar por circuito.

#### **4.3.4.1 Línea de Transmisión Milagro - Esclusas 230 kV, 2do circuito**

La línea de transmisión Milagro Esclusas es un doble circuito que abarca una distancia de 52 km y cuenta con un calibre de 2x750 ACAR. Su principal objetivo es hacer frente a la creciente demanda de energía en la zona suroriental mediante la evacuación de la concentración generada por la central Sopladora. En la actualidad, la línea cuenta con un circuito que se encuentra seccionado en el sector de Taura, para permitir el ingreso de la mencionada central, conformando los circuitos Sopladora-Milagro y Sopladora-Esclusas de 230 kV, su proyección está dispuesta a culminar el circuito doble de la L/T Milagro-Esclusas, que será seccionado en la subestación Durán 230 kV [35].

#### **4.3.4.2 Línea de Transmisión Sopladora - Taday 230 KV, 2do circuito**

Se ha previsto la construcción de un enlace de transmisión altamente confiable para la evacuación de la generación del proyecto de generación hidroeléctrica Cardenillo, que se tiene planificado para el año 2025, el cual contará con seis unidades de 116 MVA (595 MW). Los estudios eléctricos realizados en 2015 indicaron la necesidad de un enlace de transmisión adecuado para tal fin, razón por la cual se ha definido la construcción de un doble circuito en 230 kV hacia las subestaciones Sopladora y Taday. La línea de transmisión está proyectada de doble circuito y tendrá un calibre de 2x1100 ACAR.

#### **4.3.4.3 Línea de Transmisión Zhoray - Sinincay 230 kV, 2do circuito**

La Empresa Eléctrica Centro Sur se abastece de la Subestación Eléctrica de Sinincay y Cuenca, ambas de alta tensión, de 230/69 kV y 138/69 kV, respectivamente. Durante horas de alta demanda, se presenta una contingencia en la Línea de Transmisión Zhoray-Sinincay que podría generar una sobrecarga en el transformador de Cuenca. Además, la entrada de energía generada por la central hidroeléctrica del Sitanisagua, aumenta la carga del sistema de transmisión suroriental. Para abordar esta problemática, se propone la implementación de un segundo circuito a nivel de 230 kV entre las subestaciones Zhoray y Sinincay [35].

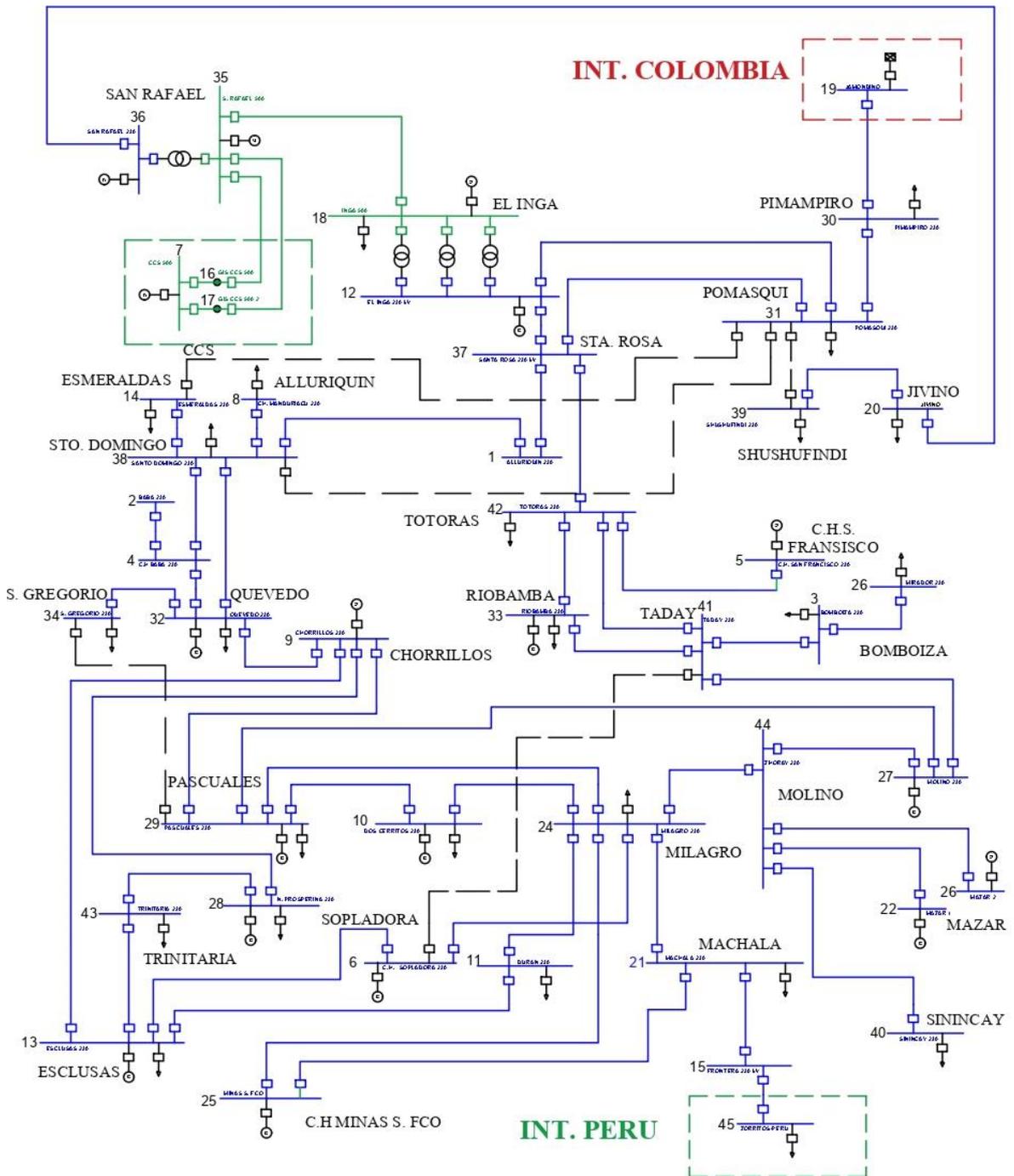


Figura 4.10 Diagrama 45-Bus SNI-230 kV Ecuador System [26].

#### 4.4 MODELACIÓN DE PROBLEMAS DE OPTIMIZACIÓN PARA LA PET.

Para resolver el problema de planeación de la expansión de sistemas de transmisión, fueron necesarios la estructuración de cuatro modelos clásicos con la utilización de tres sistemas distintos desarrollados en esta investigación, estos modelados matemáticos se divide cinco actividades las que están descritas en las siguientes secciones: Sección 4.4.1 especifica las ecuaciones del modelo de Transporte, en la Sección 4.4.2, está la el modelo matemático del modelo DC no lineal, en la Sección 4.4.3 explica el modelo Híbrido lineal, la Sección 4.4.4, explica las partes de cada ecuación del modelo Disyuntivo para finalizar con la Sección 4.4.5 donde explica el modelo Dinámico (Multietapa) su estructura.

##### 4.4.1 Modelo de Transporte

En la Tabla 4.4, se encuentra la estructura que fue apropiadamente desarrollada en el ítem 3.7.2, para la debida utilización que se dará en los distintos programas computacionales, en el ANEXO D se puede ver el código completo en los diferentes programas computacionales.

**Tabla 4.4** Estructura del modelo de transporte.

Minimizar: Los costes de inversión de las nuevas líneas agregadas	(2)
Sujeto a:	
Balance de Potencia Activa	(3)
La cargabilidad máxima de la línea	(4)
Límite de potencia generada	(5)
Límite de líneas nuevas que se pueden agregar en el ramal	(6)
Número de líneas a instalar en el ramal debe ser un número entero	(7)

##### 4.4.2 Modelo DC no lineal

En la Tabla 4.5 se encuentra la estructura que fue apropiadamente desarrollada en la Sección 3.7.3, para la debida utilización que se dará en los distintos programas computacionales, este modelo es el único de todos de en ser no lineal, con respecto a los modelos estudiados, por lo que sus resultados van a ser distintos entre programas con respecto a los a la comparación que se realiza, todo esto debido a que la solución que nos entrega es óptima, aunque posiblemente no sea la única, en el ANEXO D, se puede ver el código completo en los diferentes programas computacionales.

**Tabla 4.5** Estructura del modelo de DC.

Mínimizar: Los costes de inversión de las nuevas líneas agregadas	(8)
Sujeto a:	
Balance de Potencia Activa	(9)
Flujo de potencia a través de las líneas candidatas	(10)
Cargabilidad máxima de la línea	(11)
Límite de potencia generada	(12)
Límite de líneas nuevas que se pueden agregar en el ramal	(13)
Fija el ángulo de fase en la barra <i>Slack</i> .	(14)
Número de líneas a instalar en el ramal debe ser un número entero	(15)

#### 4.4.3 Modelo Híbrido Lineal

En la Tabla 4.6 se encuentra la estructura previamente desarrollada en la Sección 3.7.4, para la debida utilización que se dará en los distintos programas computacionales, este modelo lo que se incrementa a nivel de restricciones es la cargabilidad máxima de las líneas al hallarse las nuevas líneas que se va a agregar y las líneas existentes, en el ANEXO D, se puede ver el código completo en los diferentes programas computacionales.

**Tabla 4.6** Estructura del modelo de Híbrido Lineal.

Mínimizar: Los costes de inversión de las nuevas líneas agregadas	(16)
Sujeto a:	
Balance de Potencia Activa	(17)
Flujo de potencia a través de las líneas candidatas	(18)
Cargabilidad máxima de la línea existente	(19)
Cargabilidad máxima de la línea que se va a instalar	(20)
Límite de potencia generada	(21)
Límite de líneas nuevas que se pueden agregar en el ramal	(22)
Ángulo fijado en la barra <i>Slack</i> .	(23)
Número de líneas a instalar en el ramal debe ser un número entero	(24)

#### 4.4.4 Modelo Disyuntivo

En la Tabla 4.7, se encuentra la estructura que fue apropiadamente desarrollada en la Sección 3.7.5, para la debida utilización que se dará en los distintos programas computacionales, este modelo es el más largo, pero a su vez uno de los más utilizados debido a la entrega de una solución óptima y compleja de entender, esto por el aumento del número de restricciones, por

lo que se hace mucho más extenso, en el ANEXO D, se puede ver el código completo en los diferentes programas computacionales.

**Tabla 4.7** Estructura del modelo de Disyuntivo.

Minimizar: Los costes de inversión de las nuevas líneas agregadas	(25)
Sujeto a:	
Balance de Potencia Activa	(26)
Flujo de potencia a través de las líneas candidatas	(27)
Capacidad del flujo de potencia activa que tienen las líneas existentes y las líneas candidatas	(28)
Cargabilidad máxima de la línea existente	(29)
Cargabilidad máxima de la línea que se va a instalar	(30)
Límite de potencia generada	(31)
Límite angular	(32)
Límite de líneas nuevas que se pueden agregar en el ramal	(33)
Secuencia de entrada de líneas nuevas asociadas a la variable binaria	(34)
Ángulo fijado en la barra <i>Slack</i> .	(35)
Número de líneas a instalar en el ramal debe ser un número entero	(36)

#### 4.4.5 Modelo Dinámico (Multi etapa)

En la Tabla 4.8 se encuentra la estructura que fue apropiadamente desarrollada en la Sección 3.8.3, para la debida utilización que se dará en los distintos programas computacionales, este modelo es el más largo y complejo es una aceptación del modelo disyuntivo, pero a su vez uno de los más utilizados debido a la entrega de una solución óptima a diferencia de los distintos modelos que existe de esta clase y ya que se realiza una expansión de la demanda y no de la generación se toma como referencia este modelo que es más aceptable, y es más complejo esto por el aumento del número de restricciones, y el aumento de un nuevo conjunto por lo que se hace mucho más extenso, en el ANEXO D, se puede ver el código completo en los diferentes programas computacionales.

**Tabla 4.8** Estructura del modelo de Dinámico (Multi etapa).

Minimizar: Los costes de inversión de las nuevas líneas agregadas en un periodo de tiempo determinado	(37)
Sujeto a:	
Balance de Potencia Activa	(38)
Flujo de potencia a través de las líneas candidatas	(39)
Capacidad del flujo de potencia activa que tienen las líneas existentes y las líneas candidatas	(40)
Cargabilidad máxima de la línea existente	(41)
Cargabilidad máxima de la línea que se va a instalar	(42)
Límite de potencia generada	(43)
Límite angular	(44)
Límite de líneas nuevas que se pueden agregar en el ramal	(45)
Secuencia de entrada de líneas nuevas asociadas a la variable binaria	(46)
Modela la secuencia de entrada de líneas nuevas asociadas a la variable binaria	(47)
Número de líneas a instalar en el ramal debe ser un número entero	(48)

#### 4.5 EVALUACIÓN DE RESULTADOS PARA SU COMPARACIÓN CON LOS DISTINTOS MODELOS Y PROGRAMAS.

En esta Sección se describen los parámetros que se utilizarán para la comparación de resultados que se obtendrán en los distintos casos de estudios como lo son: el sistema Garver (6 Barras), el sistema IEEE 24 (24 Barras) para llegar así al *45-Bus SNI-230 kV Ecuador System*.

##### 4.5.1 Costos de inversión

La importancia de realizar esta comparación con los diferentes programas computacionales es ver la similitud de resultado de la función objetivo, en la Figura 4.11 se aprecia la función objetivo resultante en optimizador de lenguajes de programación Neos Server.

```

Proven optimal solution
MIP Solution:          110.000000    (30 iterations, 0 nodes)
Final Solve:          110.000000    (0 iterations)
Costo_lineas = 110
Best possible:         110.000000
Absolute gap:          0.000000
Relative gap:          0.000000
    
```

**Figura 4.11** Costo de inversión en Neos Server.

#### 4.5.2 Solvers

Saber qué tipo de solucionador se está utilizando en el modelo, es importante, ya que con esto sus resultados van a cambiar y realizar su comparación lo cual es fundamental para la compilación de resultados, en la Figura 4.12 se tiene un ejemplo del tipo de *solver* que se está utilizando al momento ejecutar el programa en el optimizador Neos Server.

```
NEOS Server Version 6.0
Job#      : 12612893
Password  : ilYjpdTI
User      :
Solver    : lp:CPLEX:AMPL
Start     : 2023-01-12 20:29:43
End       : 2023-01-12 20:29:47
Host      : prod-sub-1.neos-server.org
```

**Figura 4.12** Solver en Neos Server.

#### 4.5.3 Tiempo de ejecución

La rapidez de ejecución de un programa dependerá de las necesidades del sistema que se está construyendo, en general, el tiempo de ejecución de un programa depende de factores tales como:

- 1) Los datos de entrada.
- 2) La calidad del código generado por el compilador usado para crear el programa objeto.
- 3) La naturaleza y velocidad de las instrucciones en la máquina usada para ejecutar el programa.
- 4) La complejidad temporal del algoritmo usado en el programa.

En la Figura 4.13 se tiene un ejemplo del tiempo de ejecución dado en Neos Server con el lenguaje de programación AMPL con el utilizando el código `display _AMPL_system_time;` (para ver el tiempo parcial de ejecución del lenguaje AMPL), y la línea de código `display _total_solve_time;` (para ver el tiempo total de ejecución) [36].

```
_ampl_system_time = 0.002747
_total_resolver_tiempo = 0.024996
```

**Figura 4.13** Tiempo de ejecución en Neos Server.

#### 4.5.4 Líneas adicionales

En esta parte se puede cuantas líneas se deben añadir en cada modelo, ya que pueden ser distintas, pero a su vez puede entregar el mismo costo de inversión, en la Figura 4.14 se observa

las líneas que van a ser agregadas en la planificación y en donde van a estar instaladas dichas líneas esto al momento de ejecutar el programa en el optimizador Neos Server.

```

:          n0  n  :=
1  1  2  1  0
2  1  3  0  0
3  1  4  1  0
4  1  5  1  0
5  1  6  0  0
6  2  3  1  0
7  2  4  1  0
8  2  5  0  0
9  2  6  0  3
10 3  4  0  0
11 3  5  1  1
12 3  6  0  0
13 4  5  0  0
14 4  6  0  0
15 5  6  0  0
;
    
```

**Figura 4.14** Líneas adicionales en Neos Server.

## **5 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS**

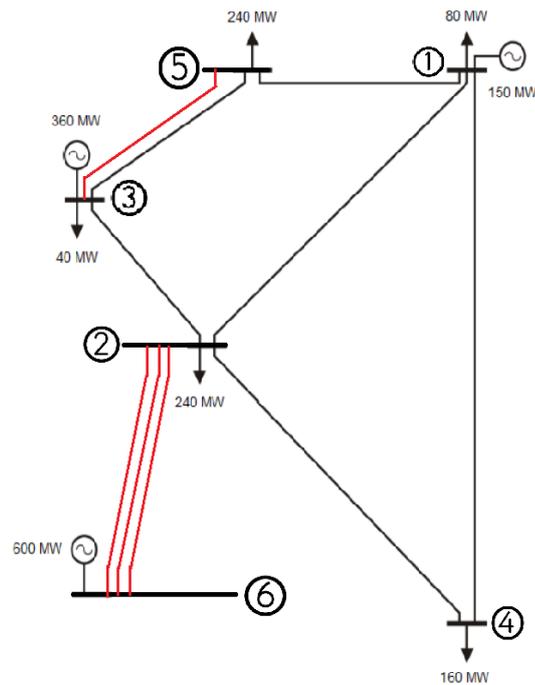
En este capítulo se explica los resultados obtenidos de los casos de estudios planteados en la Sección 4, con sus respectivos análisis obtenidos de los distintos programas computacionales. En primera instancia en la Sección 5.1 se muestran los resultados del primer caso de estudio el cual es el del sistema Garver (6 Barras). En la Sección 5.2 se muestran los resultados del segundo caso de estudio clásico el cual es el sistema IEEE 24 (24 Barras). Por último, en la Sección 5.3 se muestran los resultados del tercer sistema *45-Bus SNI-230 kV Ecuador System*.

### **5.1 RESULTADOS DE LA PLANEACIÓN ESTÁTICA UTILIZANDO EL SISTEMA GARVER (6 BARRAS)**

A continuación, se presentan los resultados obtenidos al problema de PET para el sistema de prueba Garver (6 Barras) y la comparación respectiva que se hace en tiempos de ejecución y líneas agregadas en el sistema, mediante el uso de distintos solvers, modelos y programas computacionales.

#### **5.1.1 Modelo de Transporte**

Para la construcción del modelo de Transporte se utilizan los distintos programas computacionales para poder realizar una comparación, análisis de resultado de cada uno y el tiempo de ejecución más óptimo, en la Figura 5.1 se puede observar el modelo Garver (6 Barras) el cual presenta la expansión del sistema de acuerdo con la solución de este modelo, el mismo que fue desarrollado en los *software* AMPL, GAMS y PYOMO. Mientras que, en la Tabla 5.1 se muestran los resultados pertenecientes a los distintos programas computacionales utilizados con el sistema de Garver (6 Barras) para el modelo de optimización de Transporte.



**Figura 5.1** Solución del modelo de Transporte con el sistema Garver (6 Barras) utilizando el *software* AMPL, GAMS y PYOMO.

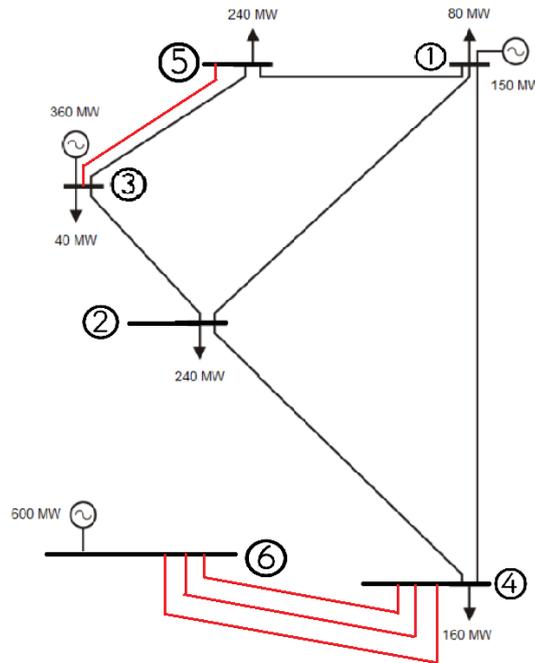
**Tabla 5.1** Tabla comparativa de los distintos programas computacionales con el Sistema Garver (6 Barras).

<b>Garver (6 Barras)</b>			
	<b>AMPL</b>	<b>GAMS</b>	<b>PYOMO</b>
<b>F.O (Costos de Inversión USD × 10<sup>6</sup>)</b>	110	110	110
<b>Solver</b>	CPLEX	CPLEX	CBC
<b>Tiempo Computacional (Milisegundos)</b>	0,003272	0,024	0,00424
<b>Líneas Adicionadas</b>	4	4	4

En la Tabla 5.1, en la tercera fila se muestran los costos de inversión, el cual indica que es necesario realizar una inversión de MUSD 110 para todos los programas. En la cuarta fila se muestran los distintos *solvers* que fueron utilizados, pero se tiene en cuenta que al ser una programación lineal existe un óptimo global, independientemente del *Solver* utilizado. En la quinta fila se muestran la diferencia en tiempo de ejecución y se puede ver que el que tiene menos tiempo es el *software* AMPL, siendo este el más atractivo a ser utilizado. En la última fila se muestra las líneas que se van a agregar, son las mismas para todos los programas, debido a que se tiene una programación lineal y las líneas que deben ser construidas son:  $n_{2-6} = 3$  y  $n_{3-5} = 1$ . En el ANEXO C, se muestran los códigos fuente de cada uno de los programas computacionales usados.

### 5.1.2 Modelo DC

En la Figura 5.2 se observar el modelo Garver (6 Barras) el cual presenta la expansión del sistema de acuerdo con la solución de este modelo, el mismo que fue desarrollado en el *software* AMPL, PYOMO y GAMS, este modelo es una programación no lineal y tiende a existir distintos resultados dependiendo el tipo de *Solver* que se utilice. Mientras que, en la Tabla 5.2 se muestran los resultados pertenecientes a los distintos programas computacionales utilizados con el sistema de Garver (6 Barras) para el modelo de optimización DC.



**Figura 5.2** Solución del modelo DC y Disyuntivo con el sistema Garver (6 Barras) utilizando el *software* AMPL, GAMS y PYOMO.

**Tabla 5.2** Tabla comparativa de los distintos programas computacionales con el Sistema Garver (6 Barras).

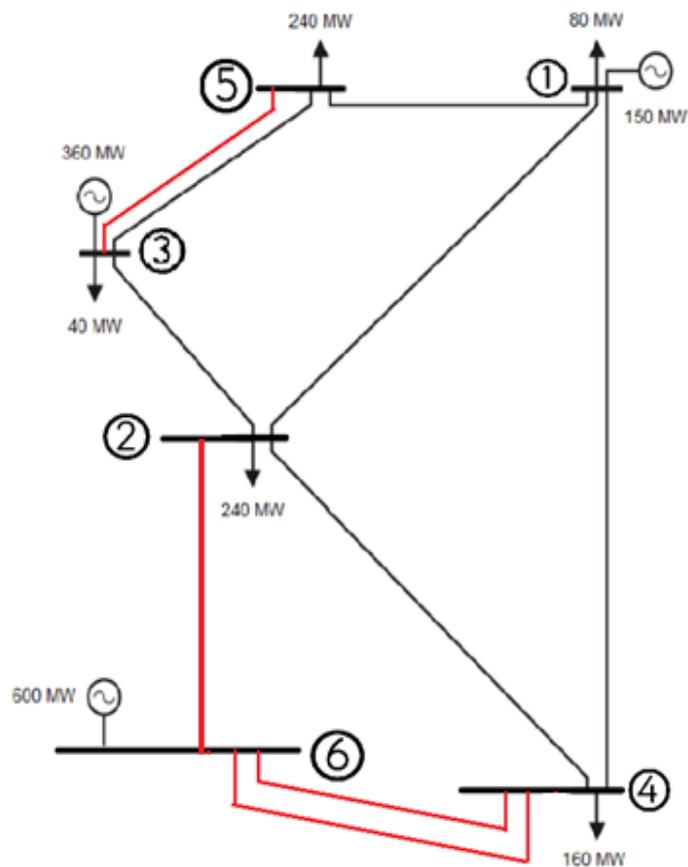
Garver (6 Barras)			
	AMPL	GAMS	PYOMO
<b>F.O (Costos de Inversión USD × 10<sup>6</sup>)</b>	110	110	110
<b>Solver</b>	BARON	KNITRO	BONMIN
<b>Tiempo Computacional (Milisegundos)</b>	0,00271	0,015	0.001
<b>Líneas Adicionadas</b>	4	4	4

En la Tabla 5.2, en la tercera fila se muestran los costos de inversión, el cual indica que es necesario realizar una inversión de MUSD 110 para todos los programas. En la cuarta fila se muestran los distintos *solvers* que fueron utilizados. En la quinta fila se muestran la diferencia en tiempo ejecución y se puede ver que el que tiene menos tiempo es el *software* AMPL, siendo

este el más atractivo a ser utilizado. En la última fila se muestra las líneas que se van a agregar, son las mismas para todos los programas, las líneas que deben ser construidas son:  $n_{4-6} = 3$  y  $n_{3-5} = 1$ . En el ANEXO D, se muestran los códigos fuente de cada uno de los programas computacionales usados.

### 5.1.3 Modelo Híbrido

En la Figura 5.3 se observa el sistema Garber (6 Barras) con sus posibles conexiones en el resultado del modelo Híbrido, se utilizan los distintos programas computacionales para poder realizar una comparación, análisis de resultado de cada uno y el tiempo de ejecución más óptimo. Mientras que, en la Tabla 5.3 se muestran los resultados pertenecientes a los distintos programas computacionales utilizados con el sistema de Garber (6 Barras) para el modelo de optimización Híbrido.



**Figura 5.3** Solución del modelo Híbrido con el sistema Garber (6 Barras) utilizando el *software* AMPL, GAMS, PYOMO.

**Tabla 5.3** Tabla comparativa de los distintos programas computacionales con el Sistema Garver (6 Barras).

<b>Garver (6 Barras)</b>			
	<b>AMPL</b>	<b>GAMS</b>	<b>PYOMO</b>
<b>F.O (Costos de Inversión USD × 10<sup>6</sup>)</b>	110	110	110
<b>Solver</b>	CPLEX	CPLEX	CBC
<b>Tiempo Computacional (Milisegundos)</b>	0,002472	0,014	0.0025
<b>Líneas Adicionadas</b>	4	4	4

En la Tabla 5.3, los resultados obtenidos son similares a los entregados por los anteriores modelos en cuanto a costos de inversión, con un costo de MUSD 110 para todos los programas computacionales, los *solvers* utilizados son iguales, la diferencia se encuentra en el tiempo de ejecución, en este caso el que menor tiempo tarda es el *software* AMPL, siendo este el más atractivo a ser utilizado, en la última fila se muestra el número líneas que deben ser construidas son las mismas, pero a diferencia que serán construidas en distintos ramales como son:  $n_{4-6} = 2$ ,  $n_{2-6} = 1$  y  $n_{3-5} = 1$ . En el ANEXO D, se muestran los códigos fuente de cada uno de los programas computacionales usados.

#### 5.1.4 Modelo Disyuntivo

Para la construcción del modelo Disyuntivo se utilizan los distintos programas computacionales para poder realizar una comparación, análisis de resultado de cada uno y el tiempo de ejecución más óptimo, en la Figura 5.2 se muestran las líneas que ingresan al sistema. Mientras que, en la Tabla 5.4 se muestran los resultados pertenecientes a los distintos programas computacionales utilizados con el sistema de Garver (6 Barras) para el modelo de optimización Disyuntivo.

**Tabla 5.4** Tabla comparativa de los distintos programas computacionales con el Sistema Garver (6 Barras)

<b>Garver (6 Barras)</b>			
	<b>AMPL</b>	<b>GAMS</b>	<b>PYOMO</b>
<b>F.O (Costos de Inversión US × 10<sup>6</sup>)</b>	110	110	110
<b>Solver</b>	CPLEX	CPLEX	CPLEX
<b>Tiempo Computacional (Milisegundos)</b>	0,0010	0,015	0.006
<b>Líneas Adicionadas</b>	4	4	4

En la Tabla 5.4, los resultados obtenidos son similares a los entregados por los anteriores modelos en cuanto a costos de inversión, con un costo de MUSD 110 para todos los programas

computacionales, los *solvers* utilizados son iguales, la diferencia se encuentra en el tiempo de ejecución, en este caso el que a menor tiempo tarda es el *software* AMPL, siendo este el más atractivo a ser utilizado, en la última fila se muestra el número líneas que deben ser construidas son las mismas, estos resultados son similares a los resultados del modelo DC como son:  $n_{4-6} = 3$  y  $n_{3-5} = 1$ . En el ANEXO D, se muestran los códigos fuente de cada uno de los programas computacionales usados.

### 5.1.5 Modelo Dinámico Disyuntivo (Multietapa)

La planeación dinámica o multietapa es una técnica que permite visualizar los cambios que deben realizarse en la topología de la red año a año, para esta investigación se toma un tiempo de estudio a largo plazo (10 años), con el fin de satisfacer el plan óptimo de expansión. El modelo utilizado es el disyuntivo (Multietapa), que es el más comúnmente utilizado en la literatura dado a que este modelo se considera lineal y es de menor complejidad que otros modelos por su simplicidad matemática.

La solución conseguida para el sistema Garver (6 Barras) con el modelo Disyuntivo Multietapa es la misma que la de su versión estática, ver Figura 5.2, podemos observar las nuevas líneas proyectadas, es preciso mencionar que los modelos se parecen en resultados, pero la creación de la nueva línea se especifican en que año ingresa al sistema y su costo será distinto al disyuntivo estático, en la Tabla 5.5 se resumen las características del modelo dinámico en su ejecución aplicados al sistema de Garver (6 Barras), se reportan costos de inversión total, a su vez, el *Solver* utilizado y el tiempo de ejecución. Realizando una comparación entre los distintos *software* de programación.

**Tabla 5.5** Tabla de resultados de la planeación dinámica a largo plazo (10 años) utilizando el programa computacional Garver (6 Barras).

<b>Garver (6 Barras)</b>			
	<b>AMPL</b>	<b>GAMS</b>	<b>PYOMO</b>
<b>F.O (Costos de Inversión USD × 10<sup>6</sup>)</b>	91,6	91,6	91,6
<b>Solver</b>	CPLEX	CBC	CPLEX
<b>Tiempo Computacional (Milisegundos)</b>	0,004	0,016	0,007
<b>Líneas Adicionadas</b>	4	4	4

En la Tabla 5.6, muestra el plan de expansión del sistema Garver con el modelo disyuntivo Multietapa, el que requiere un costo de inversión total de MUSD 91,6 y se tienen que poner en

servicio cuatro líneas de transmisión en los distintos períodos de tiempo, en la planeación estática se tiene las mismas cantidades de líneas agregadas en los tramos, pero con un costo de inversión de MUSD 110, en la primera línea que ingresa en operación es  $n_{4-6} = 1$  en el primer año con un costo de MUSD 28,85, la segunda línea que ingresa es  $n_{4-6} = 1$  en el cuarto año con un costo de MUSD 25,64, la tercera línea que ingresa es  $n_{3-5} = 1$  en el séptimo año con un costo de MUSD 15,20 y la última línea que ingresa es  $n_{4-6} = 1$  en el octavo año con un costo de MUSD 21,92, dando un costo total de MUSD 91,6.

**Tabla 5.6** Tabla de resultados de los 10 años de estudio

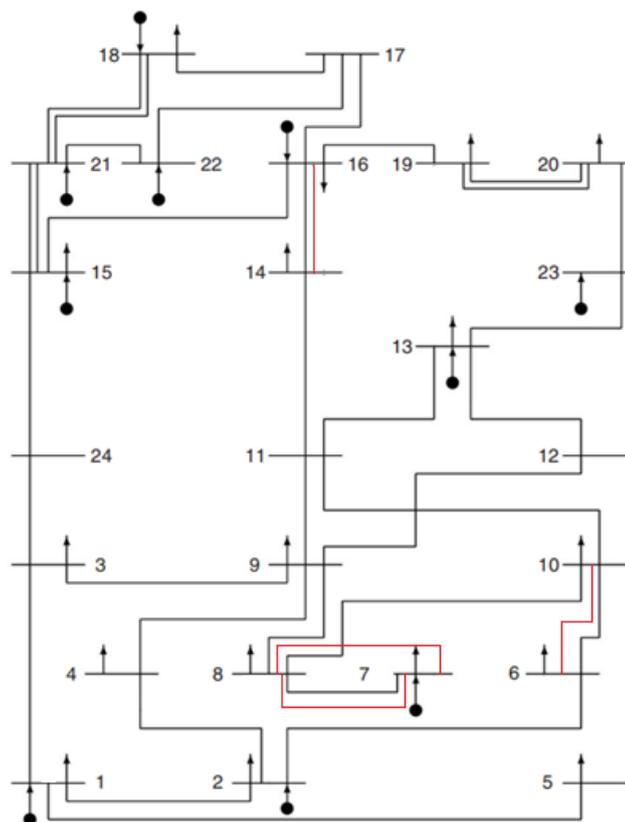
LÍNEAS		COSTOS DE LÍNEAS	PERÍODO DE TIEMPO										TOTAL, DE LÍNEAS NUEVAS	
i	j		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1	2	40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	3	38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	4	60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	5	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	6	68	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	3	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	4	40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	5	31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	6	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	4	59	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	5	20	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
3	6	48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	5	63	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	6	30	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	3
5	6	61	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TASA DE DESCUENTO			0,96	0,92	0,89	0,85	0,82	0,79	0,76	0,73	0,70	0,68	1	
VP			28,85	0	0	25,64	0	0	15,20	21,92	0	0		
TOTAL (Sistema no Coordinado)													110	
TOTAL (Sistema Coordinado)													91,609	

## 5.2 RESULTADOS DE LA PLANEACIÓN ESTÁTICA UTILIZANDO EL SISTEMA IEEE (24 BARRAS)

En la siguiente Sección, se presenta el resultado de los análisis técnicos y económicos realizados para la expansión de la red de transmisión obtenidos al problema del PET para el caso de estudio sistema IEEE 24 (24 Barras), utilizando los *software* computacionales para optimización AMPL, GAMS y PYOMO.

### 5.2.1 Modelo de Transporte

Para la construcción del modelo de Transporte, se utilizan los distintos programas computacionales para poder realizar una comparación, análisis de resultado de cada uno y el tiempo de ejecución más óptimo, en la Figura 5.4 se observan las líneas proyectadas entregadas por el modelo. Mientras que, en la Tabla 5.7 se muestran los resultados pertenecientes a los distintos programas computacionales utilizados con el sistema IEEE 24 (24 Barras) para el modelo de optimización de Transporte.



**Figura 5.4** Solución del modelo de Transporte con el sistema IEEE 24 (24 Barras) utilizando el software AMPL, GAMS y PYOMO.

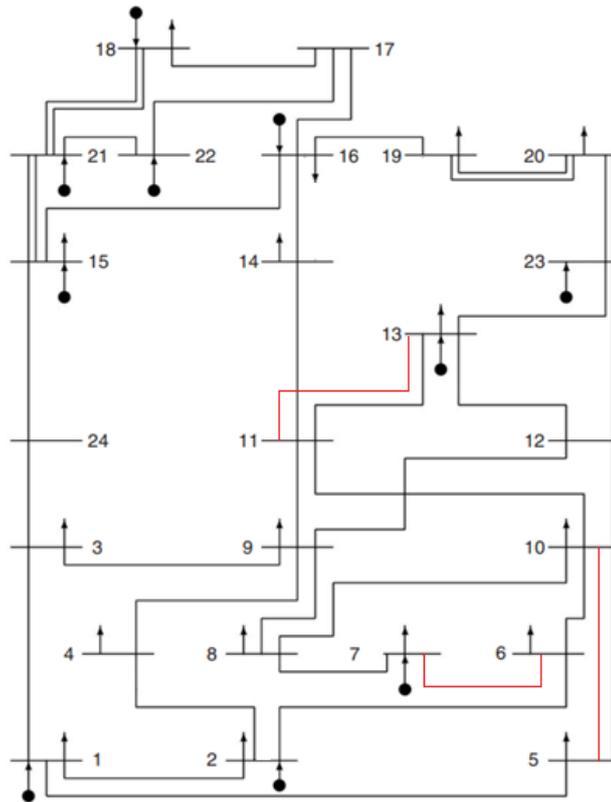
**Tabla 5.7** Tabla comparativa de los distintos programas computacionales con el Sistema IEEE 24 (24 Barras).

IEEE 24 (24 Barras)			
	AMPL	GAMS	PYOMO
F.O (Costos de Inversión $USD \times 10^6$ )	102	102	102
<i>Solver</i>	CPLEX	CPLEX	CBC
Tiempo Computacional (Segundos)	0,001054	0,001	0.0022
Líneas Adicionadas	4	4	4

En la Tabla 5.7, en la tercera fila se muestran los costos de inversión, el cual indica que es necesario realizar una inversión de MUSD 102 para todos los programas computacionales. En la cuarta fila se muestran los distintos *solvers* que fueron utilizados, pero se tiene en cuenta que al ser una programación lineal existe un óptimo global, independientemente del *Solver* utilizado, pero teniendo en cuenta que ciertos *Solver* utilizados pueden dar otros resultados con decimales y distintas líneas que deben construirse. En la quinta fila se muestra la diferencia en tiempo de ejecución y se puede ver que el que tiene menos tiempo es el *software* AMPL, siendo este el más atractivo a ser utilizado, por su pronta reacción. En la última fila se muestra que las líneas que se van a agregar son las mismas para todos los programas, debido a que se tiene una programación lineal y las líneas que deben ser construidas son:  $n_{6-10} = 1$  ,  $n_{7-8} = 2$  y  $n_{14-16} = 1$ . En el ANEXO D, se muestran los códigos fuente de cada uno de los programas computacionales usados.

### 5.2.2 Modelo Híbrido

Para la construcción del modelo Híbrido se utilizan los distintos programas computacionales para poder realizar una comparación, análisis de resultado de cada uno y el tiempo de ejecución más óptimo, en la Figura 5.5 se aprecia los resultados y las nuevas líneas proyectadas por el modelo propuesto. Mientras que, en la Tabla 5.8 se muestran los resultados pertenecientes a los distintos programas computacionales utilizados con el sistema IEEE 24 (24 Barras) para el modelo de optimización Híbrido.



**Figura 5.5** Solución del modelo Híbrido con el sistema IEEE 24 (24 Barras) utilizando el *software* AMPL, GAMS y PYOMO.

**Tabla 5.8** Tabla comparativa de los distintos programas computacionales con el Sistema IEEE 24 (24 Barras).

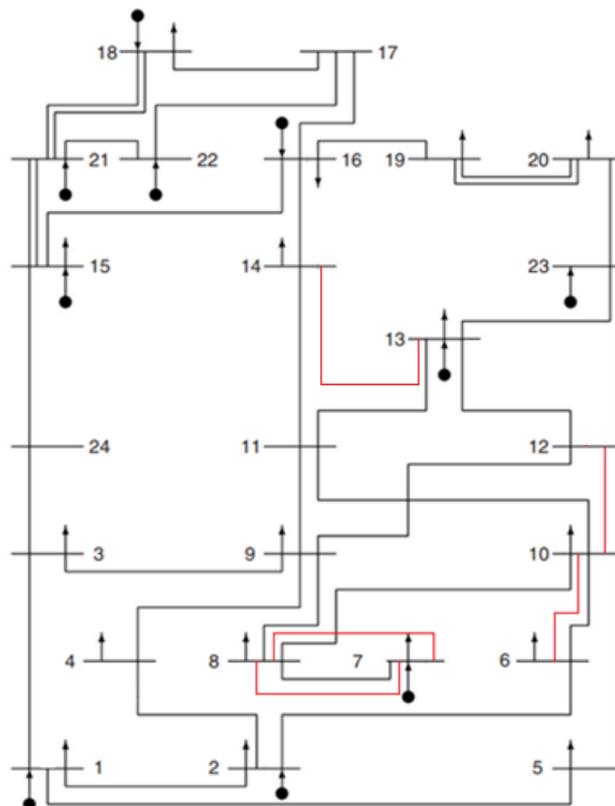
IEEE 24 (24 Barras)			
	AMPL	GAMS	PYOMO
<b>F.O (Costos de Inversión <math>US \times 10^6</math>)</b>	139	139	139
<b><i>Solver</i></b>	CPLEX	CPLEX	CBC
<b>Tiempo Computacional (Segundos)</b>	0,003435	0,004	0.0012
<b>Líneas Adicionadas</b>	3	3	3

En la Tabla 5.8, en la tercera fila se muestran los costos de inversión, el cual indica que es necesario realizar una inversión de MUSD 139 para todos los programas computacionales. En la cuarta fila se muestran los distintos *solvers* que fueron utilizados, pero se tiene en cuenta que al ser una programación lineal existe un óptimo global, independientemente del *Solver* utilizado, pero teniendo en cuenta que ciertos *Solver* utilizados pueden dar otros resultados con decimales y distintas líneas que deben construirse. En la quinta fila se muestra la diferencia en tiempo de ejecución y se puede ver que el que tiene menos tiempo es el *software* PYOMO, siendo este el más atractivo a ser utilizado, por su pronta reacción. En la última fila se muestran las líneas que se van a agregar, son las mismas para todos los programas, debido a que se tiene

una programación lineal y las líneas que deben ser construidas son:  $n_{7-6} = 1$ ,  $n_{10-5} = 2$  y  $n_{11-13} = 1$ . En el ANEXO D, en la Sección 8.4.1.2, Sección 8.4.2.3, Sección 8.4.3.3, se muestran los códigos fuente de cada uno de los programas computacionales usados.

### 5.2.3 Modelo DC

En la Figura 5.6 podemos observar el sistema IEEE 24 (24 Barras) el cual presenta la expansión del sistema de acuerdo con la solución de este modelo, el mismo que fue desarrollado en el *software* AMPL, PYOMO y GAMS, este modelo se explica de distinta forma debido al cambio en los resultados que se van dando debido a que el modelo es una programación no lineal y tiende a existir distintos resultados dependiendo el tipo de *Solver* que se utilice. Mientras que, en la Tabla 5.9 se muestran los resultados pertenecientes a los distintos programas computacionales utilizados con el sistema IEEE 24 (24 Barras) para el modelo de optimización DC.



**Figura 5.6** Solución del modelo DC y Disyuntivo con el sistema IEEE 24 (24 Barras) utilizando el *software* AMPL, GAMS y PYOMO.

**Tabla 5.9** Tabla comparativa de los distintos programas computacionales con el Sistema IEEE 24 (24 Barras).

IEEE 24 (24 Barras)			
	AMPL	GAMS	PYOMO
<b>F.O (Costos de Inversión <math>US \times 10^6</math>)</b>	160	160	160
<b>Solver</b>	BARON	KNITRO	BONMIN
<b>Tiempo Computacional (Segundos)</b>	0,003572	0,008	0.0012
<b>Líneas Adicionadas</b>	5	5	5

En la Tabla 5.9, en la tercera fila se muestran los costos de inversión, el cual indica que es necesario realizar una inversión de MUSD 160 para todos los programas computacionales. En la cuarta fila se muestran los distintos *solvers* que fueron utilizados. En la quinta fila se muestra la diferencia en tiempo de ejecución, se puede ver que el que tiene menos tiempo es el *software* PYOMO, siendo este el más atractivo a ser utilizado. En la última fila se muestra las líneas que se van a agregar, son las mismas para todos los programas y las líneas que deben ser construidas son:  $n_{13-14} = 1$ ,  $n_{12-10} = 1$ ,  $n_{10-6} = 1$  y  $n_{8-7} = 2$ . En el ANEXO D, se muestran los códigos fuente de cada uno de los programas computacionales usados.

#### 5.2.4 Modelo Disyuntivo

Para la construcción del modelo Disyuntivo se utilizan los distintos programas computacionales para poder realizar una comparación, análisis de resultado de cada uno y el tiempo de ejecución más óptimo, en la Figura 5.6 se muestran las líneas que ingresan al sistema. Mientras que, en la Tabla 5.10 se muestran los resultados pertenecientes a los distintos programas computacionales utilizados en el sistema IEEE 24 (24 Barras) para el modelo de optimización Disyuntivo, su solución coincide con el modelo DC debido a que el Disyuntivo es una linealización del DC.

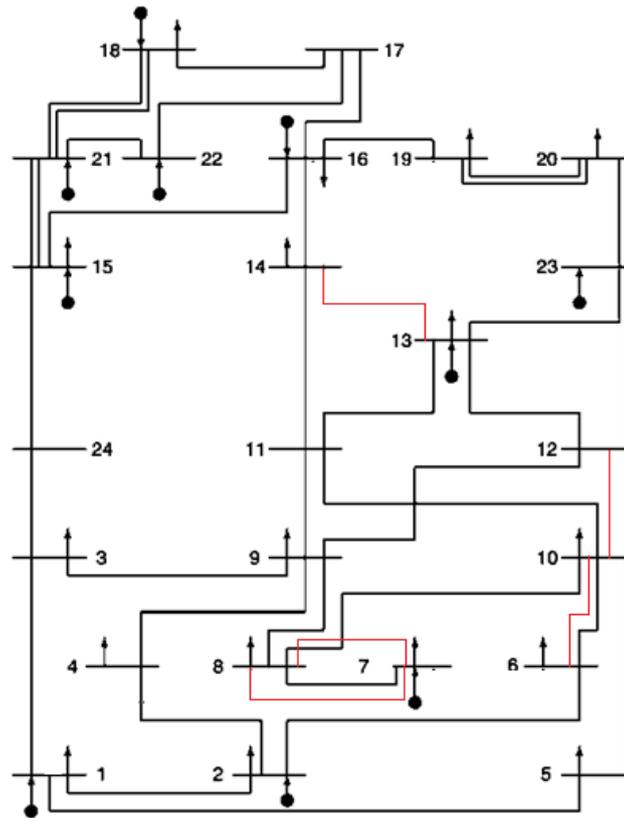
**Tabla 5.10** Tabla comparativa de los distintos programas computacionales con el Sistema IEEE (24 Barras).

IEEE 24 (24 Barras)			
	AMPL	GAMS	PYOMO
<b>F.O (Costos de Inversión <math>US \times 10^6</math>)</b>	160	160	160
<b>Solver</b>	CPLEX	CPLEX	CPLEX
<b>Tiempo Computacional (Segundos)</b>	0,006276	0,007	0.0016
<b>Líneas Adicionadas</b>	5	5	5

En la Tabla 5.10, en la tercera fila se muestran los costos de inversión, el cual indica que es necesario realizar una inversión de MUSD 160 para todos los programas computacionales. En la cuarta fila se muestran los distintos *solvers* que fueron utilizados, pero se tiene en cuenta que al ser una programación lineal existe un óptimo global, independientemente del *Solver* utilizado, pero teniendo en cuenta que ciertos *solvers* utilizados pueden dar otros resultados con decimales y distintas líneas que deben construirse. En la quinta fila se muestra la diferencia en tiempo de ejecución y entrega de resultados y se puede ver que el que tiene menos tiempo es el *software* PYOMO, siendo este el más atractivo a ser utilizado. En la cuarta casilla se ve que las líneas que se van a agregar son las mismas para todos los programas, debido a que se tiene una programación lineal y las líneas que deben ser construidas son:  $n_{13-14} = 1$ ,  $n_{12-10} = 1$ ,  $n_{10-6} = 1$  y  $n_{8-7} = 2$ . En el ANEXO D, se muestran los códigos fuente de cada uno de los programas computacionales usados.

### 5.2.5 Modelo Dinámico Disyuntivo (Multietapa)

Para construir el modelo de optimización que resuelve el problema dinámico de PET se utilizan los distintos programas computacionales aplicando el sistema de IEEE 24 (24 Barras), en la Figura 5.6 se observan las nuevas líneas proyectadas que se entrega en la planeación de un horizonte de 10 años de estudio. Mientras que, en la Tabla 5.11, se resumen las características del modelo dinámico en su ejecución aplicado al sistema de IEEE 24 (24 Barras), se reportan costos de inversión por etapas e inversión total, a su vez el *Solver* utilizado por cada uno de los programas computacionales y el tiempo de ejecución.



**Figura 5.7** Solución del modelo Dinámico (Periodo completo) con el sistema IEEE 24 Barras utilizando el *software* AMPL.

**Tabla 5.11** Tabla de resultados de los 10 años de estudio.  
**IEEE 24 (24 Barras)**

	AMPL	GAMS	PYOMO
<b>F.O (Costos de Inversión <math>US \times 10^6</math>)</b>	141,38	141,38	141,38
<b>Solver</b>	CPLEX	CBC	CBC
<b>Tiempo Computacional (Segundos)</b>	0,006276	0,007	0.0022
<b>Líneas Adicionadas</b>	5	5	5

En la Tabla 5.12 se observa los resultados dados de la planeación dinámica y la estática o coordinada, en la primera línea que ingresa en operación en el primer año es  $n_{6-10} = 1$ , en el mismo año ingresan dos líneas más en el tramo  $n_{7-8} = 2$  con un costo de MUSD 46,15, la tercera línea que ingresa es  $n_{10-12} = 1$  en el segundo año con un costo de MUSD 46,23 y la última línea que ingresa es  $n_{13-14} = 1$  en el sexto año con un costo de MUSD 49. El plan de expansión del sistema de IEEE 24 (24 Barras) con el modelo Dinámico Disyuntivo a 10 años, con la consideración que cada año se tomó como una etapa indica que se requiere un costo de inversión total de MUSD 141,38 y se tienen que poner en servicio cinco líneas de transmisión en los distintos períodos de tiempo, en la planeación coordinada o estática se tiene las mismas

líneas agregadas en los tramos, pero con un costo de inversión de MUSD 160. Para este horizonte de planeación coordinado se puede ver en la Tabla 5.12 y Tabla 5.13 que el número de líneas que se va a agregar en un periodo de tiempo de 10 años.

**Tabla 5.12** Tabla de resultados de los 10 años de estudio Parte A.

LÍNEAS		COSTOS DE LÍNEAS	PERÍODO DE TIEMPO										TOTAL, DE LÍNEAS NUEVAS
i	j		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	3	55	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	5	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	8	35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	4	33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	6	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	8	33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	9	31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	24	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	9	27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	10	23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	7	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	10	16	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
7	8	16	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
8	9	43	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	10	43	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	11	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	12	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	11	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	12	50	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
11	13	66	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	14	58	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	13	66	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	23	134	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	14	62	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
13	23	120	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	16	54	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	23	86	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	16	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	21	68	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	24	72	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	17	36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	19	32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	23	114	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	18	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	22	146	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

**Tabla 5.13** Tabla de resultados de los 10 años de estudio Parte B.

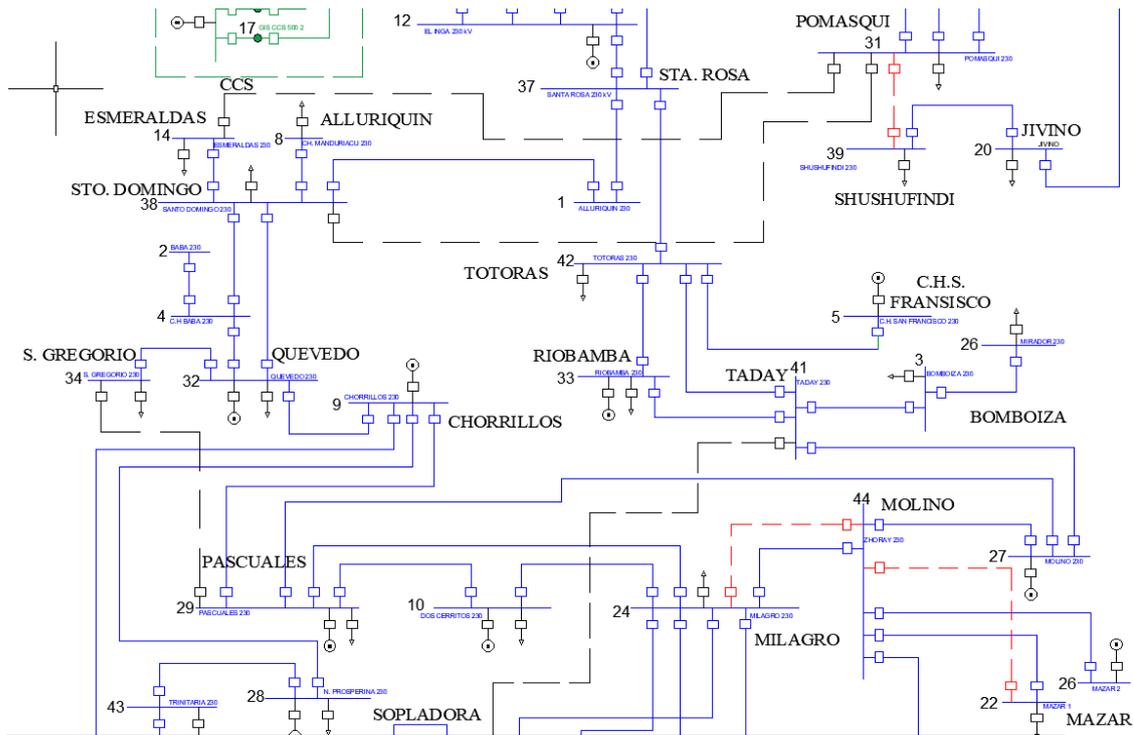
LÍNEAS		COSTOS DE LÍNEAS	PERÍODO DE TIEMPO										TOTAL, DE LÍNEAS NUEVAS
i	j		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
18	21	36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	20	55	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	23	84	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	23	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	22	94	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TASA DE DESCUENTO			0,96	0,92	0,89	0,85	0,82	0,79	0,76	0,73	0,70	0,68	1
VPN			46,15	46,23	0	0	0	49,00	0	0	0	0	
TOTAL (Sistema no Coordinado)												160	
TOTAL (Sistema Coordinado)							141,381						

### 5.3 RESULTADOS DE LA PLANEACIÓN ESTÁTICA UTILIZANDO 45-BUS SNI-230 KV ECUADOR SYSTEM

En el capítulo siguiente, se muestra el resultado de las evaluaciones técnicas y financieras llevadas a cabo para Ampliar la red de transmisión, usando el caso *45-Bus SNI-230 kV Ecuador System*, utilizando programas computacionales como AMPL, GAMS y PYOMO. El objetivo es analizar la diferencia entre ellos, en términos de tiempo de ejecución y costo de inversión.

#### 5.3.1 Modelo de Transporte

Se usa el modelo de Transporte para analizar el comportamiento inicial de los datos obtenidos del caso de estudio *45-Bus SNI-230 kV Ecuador System*, para posteriormente implementar otros modelos como el DC, Híbrido, Disyuntivo hasta llegar al Disyuntivo multietapa para realizar una proyección de dicho sistema para un determinado horizonte de tiempo, la Figura 5.8 muestra la conexión de las líneas proyectadas en el sistema, la cual está representada en rojo para facilitar su visualización. Mientras que, en la Tabla 5.14 se presentan los resultados del modelo de Transporte.



**Figura 5.8** Solución del modelo de Transporte, Híbrido, Disyuntivo con 45-Bus SNI-230 kV Ecuador System utilizando el software AMPL, PYOMO y GAMS.

**Tabla 5.14** Tabla comparativa de los distintos programas computacionales con el caso 45-Bus SNI-230 kV Ecuador System.

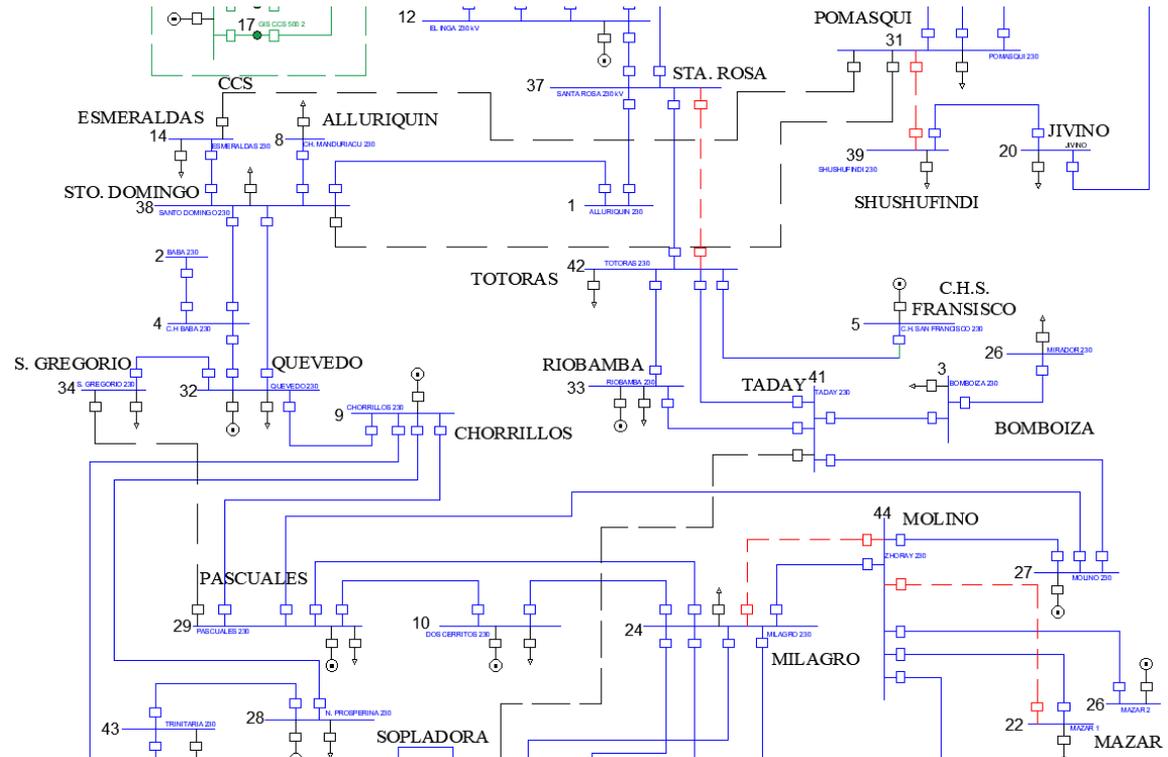
<b>45-Bus SNI-230 kV Ecuador System</b>			
	<b>AMPL</b>	<b>GAMS</b>	<b>PYOMO</b>
<b>F.O (Costos de Inversión US × 10<sup>6</sup>)</b>	74,09	74,09	74,09
<b>Solver</b>	CPLEX	CPLEX	CBC
<b>Tiempo Computacional (Segundos)</b>	0,006276	0,060	0.0014
<b>Líneas Adicionadas</b>	3	3	3

En la Tabla 5.14 se muestran los resultados obtenidos con los distintos programas computacionales, utilizando el modelo de Transporte. Esta comparación se realiza debido a que, aunque los resultados finales son similares en los programas computacionales, el tiempo de ejecución puede variar entre ellos, en la tercera fila se muestran los costos de inversión, indica que es necesario hacer una inversión MUSD 74,09. En la cuarta fila se muestran los diferentes solvers utilizados en los programas computacionales. Es importante destacar que, al ser una programación lineal, existe un óptimo global independientemente del Solver utilizado. Sin embargo, algunos solvers pueden dar resultados con pequeñas diferencias en cuanto a decimales o líneas a construir. En la quinta fila se muestra que el software PYOMO es más rápido que los demás programas computacionales en el tiempo de ejecución, esto lo hace más atractivo para

ser utilizado en futuros proyectos similares, debido a su rapidez y eficiencia. En la última fila se muestran las líneas que se agregarán como parte de la expansión de la red de transmisión. Al ser una programación lineal, las líneas a construir son las mismas para todos los programas computacionales. En este caso, se puede ver que las líneas a construir son:  $n_{22-44} = 1$  (Mazar 1 – Zhoray),  $n_{24-44} = 1$  (Milagro – Zhoray),  $n_{31-39} = 1$  (Pomasqui – Shushufindi). En el ANEXO D, se muestran los códigos fuente de cada uno de los programas computacionales usados.

### 5.3.2 Modelo DC

El modelo DC es ampliamente utilizado para resolver problemas PET, a diferencia de otros modelos, este modelo es un problema matemático de programación no lineal entera mixta, lo que lo diferencia de otros modelos y lo hace único. En la Figura 5.9 se muestran las conexiones de las líneas proyectadas en el sistema, representada en rojo para una fácil visualización. Mientras que, en la Tabla 5.15 se presentan los resultados obtenidos con los distintos programas computacionales, utilizando el modelo DC.



**Figura 5.9** Solución del modelo de DC, Híbrido, Disyuntivo con el 45-Bus SNI-230 kV Ecuador System, utilizando el software AMPL, PYOMO y GAMS.

**Tabla 5.15** Tabla comparativa de los distintos programas computacionales con el Sistema *45-Bus SNI-230 kV Ecuador System*.

<i>45-Bus SNI-230 kV Ecuador System</i>			
	<b>AMPL</b>	<b>GAMS</b>	<b>PYOMO</b>
<b>F.O (Costos de Inversión <math>US \times 10^6</math>)</b>	109,99	109,99	109,99
<b><i>Solver</i></b>	BARON	KNITRO	BONMIN
<b>Tiempo Computacional (Segundos)</b>	0,0027	0,016	0.0011
<b>Líneas Adicionadas</b>	4	4	4

En la Tabla 5.15 se muestran los resultados obtenidos con los diferentes programas computacionales que se utilizaron en el modelo DC. La primera fila muestra el costo, que indica que se requiere una inversión de MUSD 109,99. En la tercera fila muestra los solvers utilizados en los programas computacionales, teniendo en cuenta que algunos solvers pueden producir resultados con pequeñas diferencias en términos de decimales o líneas a construir, dándonos un costo distinto a los otros programas. En la cuarta fila se muestran los diferentes *solvers* utilizados en los programas computacionales. En la quinta fila muestra que el *software* PYOMO es más rápido que los demás programas computacionales en la recopilación y presentación de resultados. Esto lo hace más atractivo para ser utilizado en futuros proyectos similares debido a su rapidez y eficiencia. En la última fila se muestran las líneas que se agregarán como parte de la expansión de la red de transmisión, En este caso, se puede ver que las líneas a construir son:  $n_{22-44} = 1$  (Mazar 1 – Zhoray),  $n_{24-44} = 1$  (Milagro – Zhoray),  $n_{31-39} = 1$  (Pomasqui – Shushufindi) y  $n_{37-42} = 1$  (Santa Rosa – Totoras), resultado similar al obtenido en los modelos Híbrido y Disyuntivo, estos resultados se pueden ver la última columna de la Tabla 5.19, donde se expresan las líneas proyectadas y el costo de inversión. En el ANEXO D, se muestran los códigos fuente de cada uno de los programas computacionales usados.

### 5.3.3 Modelo Híbrido

Para la construcción del modelo Híbrido se utiliza los distintos programas computacionales para poder realizar una comparación y análisis de resultado de cada uno y el tiempo de ejecución más óptimo, en la Figura 5.9 se muestran las conexiones de las líneas proyectadas en el sistema, representada en rojo para una fácil visualización. Mientras que, en la Tabla 5.16 se presentan los resultados obtenidos con los distintos programas computacionales, utilizando el modelo Híbrido.

**Tabla 5.16** Tabla comparativa de los distintos programas computacionales con el Sistema *45-Bus SNI-230 kV Ecuador System*.

<i>45-Bus SNI-230 kV Ecuador System</i>			
	AMPL	GAMS	PYOMO
<b>F.O (Costos de Inversión <math>US \times 10^6</math>)</b>	109,99	109,99	109,99
<b>Solver</b>	CPLEX	CPLEX	CBC
<b>Tiempo Computacional (Segundos)</b>	0,0066	0,016	0.0028
<b>Líneas Adicionadas</b>	4	4	4

En la Tabla 5.16 se compararon los resultados obtenidos con los diferentes programas computacionales que utilizaron el modelo Híbrido. La tercera fila se muestran los costos de inversión, indica que se requiere una inversión de MUSD 109,99. En la cuarta fila se muestran los solvers utilizados en los programas computacionales, teniendo en cuenta que algunos *solvers* pueden producir resultados con pequeñas diferencias en términos de decimales o líneas a construir. En la quinta fila se muestra que el *software* PYOMO es más rápido que los demás programas computacionales en la recopilación y presentación de resultados. Esto lo hace más atractivo para ser utilizado en futuros proyectos similares debido a su rapidez y eficiencia. En la última fila se muestran las líneas que se agregarán como parte de la expansión de la red de transmisión, en este caso, se puede ver que las líneas a construir son:  $n_{22-44} = 1$  (Mazar 1 – Zhoray),  $n_{24-44} = 1$  (Milagro – Zhoray),  $n_{31-39} = 1$  (Pomasqui – Shushufindi) y  $n_{37-42} = 1$  (Santa Rosa – Totoras), resultado similar al obtenido en los modelos DC y Disyuntivo, estos resultados se pueden ver la última columna de la Tabla 5.19, donde se expresan las líneas proyectadas y el costo de inversión. En el ANEXO D, se muestran los códigos fuente de cada uno de los programas computacionales usados.

### 5.3.4 Modelo Disyuntivo

Para la construcción del modelo Disyuntivo se utilizan los distintos programas computacionales para poder realizar una comparación, análisis de resultado de cada uno y el tiempo de ejecución más óptimo, en la Figura 5.9 se muestran las conexiones de las líneas proyectadas en el sistema, representada en rojo para una fácil visualización. Mientras que, en la Tabla 5.17 se presentan los resultados obtenidos con los distintos programas computacionales, utilizando el modelo Disyuntivo.

**Tabla 5.17** Tabla comparativa de los distintos programas computacionales con el Sistema *45-Bus SNI-230 kV Ecuador System*.

<i>45-Bus SNI-230 kV Ecuador System</i>			
	<b>AMPL</b>	<b>GAMS</b>	<b>PYOMO</b>
<b>F.O (Costos de Inversión <math>US \times 10^6</math>)</b>	109,99	109,99	109,99
<b><i>Solver</i></b>	CPLEX	CBC	CPLEX
<b>Tiempo Computacional (Segundos)</b>	0,0046	0,0046	0.003
<b>Líneas Adicionadas</b>	4	4	4

En la Tabla 5.17 se muestran los resultados obtenidos con los diferentes programas computacionales que se utilizaron en el modelo Híbrido. En la tercera fila se muestran los costos de inversión, indica que se requiere una inversión de MUSD 109,99. En la cuarta fila se muestran los *solvers* utilizados en los programas computacionales, teniendo en cuenta que algunos solvers pueden producir resultados con pequeñas diferencias en términos de decimales o líneas a construir. En la quinta fila se muestra que el *software* PYOMO es más rápido que los demás programas computacionales en la recopilación y presentación de resultados. Esto lo hace más atractivo para ser utilizado en futuros proyectos similares debido a su rapidez y eficiencia. En la última fila se muestran las líneas que se agregarán como parte de la expansión de la red de transmisión, En este caso, se puede ver que las líneas a construir son:  $n_{22-44} = 1$  (Mazar 1 – Zhoray),  $n_{24-44} = 1$  (Milagro – Zhoray),  $n_{31-39} = 1$  (Pomasqui – Shushufindi) y  $n_{37-42} = 1$  (Santa Rosa – Totoras), resultado similar al obtenido en los modelos de Híbrido y DC, estos resultados se pueden ver en la última columna de la Tabla 5.19, donde se expresan las líneas proyectadas y el costo de inversión. En el ANEXO D, se muestran los códigos fuente de cada uno de los programas computacionales usados.

### 5.3.5 Modelo Dinámico Disyuntivo (Multietapa)

El modelo Dinámico (Multietapa) permite resolver problemas de PET considerando un horizonte de tiempo determinado (10 años en este caso), involucrando el factor de descuento o factor de actualización de costo presente, es parte de la función objetivo y permite conocer el costo actual que tendría el ingreso de las nuevas líneas en un periodo de tiempo determinado, en la Figura 5.9 se muestran las conexiones de las líneas proyectadas en el sistema, representada en rojo para una fácil visualización. Mientras que, en la Tabla 5.18 se presentan los resultados obtenidos con los distintos programas computacionales, utilizando el modelo Dinámico (multietapa).

**Tabla 5.18** Tabla comparativa de los distintos programas computacionales con el Sistema *45-Bus SNI-230 kV Ecuador System*.

<i>45-Bus SNI-230 kV Ecuador System</i>			
	AMPL	GAMS	PYOMO
<b>F.O (Costos de Inversión US × 10<sup>6</sup>)</b>	86,2	86,2	86,2
<b>Solver</b>	CPLEX	CBC	CPLEX
<b>Tiempo Computacional (Segundos)</b>	0,0067	0,017	0.0021
<b>Líneas Adicionadas</b>	4	4	4

En la Tabla 5.18 se muestra que al igual que en los modelos anteriores se tiene el ingreso de nuevas líneas en los tramos:  $n_{22-44} = 1$  (Mazar 1 – Zhoray),  $n_{24-44} = 1$  (Milagro – Zhoray),  $n_{31-39} = 1$  (Pomasqui – Shushufindi) y  $n_{37-42} = 1$  (Santa Rosa – Totoras). Donde la primera línea que entra en el sistema es en el primer año, la cual corresponde al tramo  $n_{31-39}$  (Pomasqui – Shushufindi) teniendo un costo de inversión de MUSD 32,79, la siguiente línea ingresa en el octavo año en el tramo  $n_{22-44}$  (Mazar 1 – Zhoray) teniendo un costo de inversión de MUSD 28,75, luego en el noveno año ingresa una nueva línea en el tramo  $n_{24-44}$  (Milagro – Zhoray) teniendo un costo de inversión de MUSD 0,45, por último, en el décimo año ingresa una nueva línea en el tramo  $n_{37-42}$  (Santa Rosa – Totoras) teniendo un costo de inversión de MUSD 24,25. A pesar de hacer el ingreso de las nuevas líneas en los mismos tramos, el costo total es menor debido al uso del VP, el cual depende del factor de descuento que se determina usando una tasa de descuento de 4%, el costo final obtenido en este modelo es de MUSD 86,24, en la Tabla 5.19 se muestra el comportamiento del sistema en un horizonte de tiempo de diez años.

**Tabla 5.19** Tabla de resultados de los 10 años de estudio (Parte A).

LÍNEAS		COSTOS DE LÍNEAS	PERÍODO DE TIEMPO										TOTAL, DE LÍNEAS NUEVAS
i	j		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	37	12,76	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	38	12,76	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	4	3,09	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	26	3,09	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	41	36,38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	32	14,02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	38	20,21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	42	9,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	13	55,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	24	55,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	41	55,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI – CARRERA DE ELECTRICIDAD

**Tabla 5.20** Tabla de resultados de los 10 años de estudio (Parte B).

LÍNEAS		COSTOS DE LÍNEAS	PERÍODO DE TIEMPO										TOTAL, DE LÍNEAS NUEVAS
i	j		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
7	16	1,31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	17	1,31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	38	20,88	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	13	7,81	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	28	4,44	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	29	1,56	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	32	46,75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	24	13,98	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	29	3,23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	13	0,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	24	11,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	31	10,59	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	37	8,83	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	24	35,43	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	43	2,25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	38	51,11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	31	56,59	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	45	17,93	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	21	17,93	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	35	40,39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	35	40,39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	35	40,13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	30	26,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	36	26,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	39	5,78	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	24	41,14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	25	19,69	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	44	0,65	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
23	44	0,65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	25	49,97	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	29	17,21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	44	39,35	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
27	29	61,45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	41	13,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	44	4,89	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	43	6,62	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	34	37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	31	45,21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	37	14,96	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	38	61,45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI – CARRERA DE ELECTRICIDAD

**Tabla 5.21** Tabla de resultados de los 10 años de estudio (Parte C).

LÍNEAS		COSTOS DE LÍNEAS	PERÍODO DE TIEMPO										TOTAL, DE LÍNEAS NUEVAS	
i	j		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
31	39	34,1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
32	38	34,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
32	34	37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
33	41	44,17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
33	42	13,98	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
37	42	35,89	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
40	44	16,95	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
41	42	58,16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>TASA DE DESCUENTO</b>			0,96	0,9	0,89	0,85	0,82	0,79	0,76	0,73	0,70	0,68	1	1
<b>VP</b>			32,7	0	0	0	0	0	0	28,7	0,45	24,2		
<b>TOTAL (Sistema no Coordinado)</b>												<b>109,99</b>		
<b>TOTAL (Sistema Coordinado)</b>							<b>86,244</b>							

## 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Para la finalización de este trabajo en este capítulo se presenta, en la Sección 6.1, las conclusiones y en la Sección 6.2, las recomendaciones correspondientes a la investigación.

### 6.1 CONCLUSIONES

- Después de recopilar y analizar la información, se puede establecer que, en el método determinista estático, el modelo de Transporte puede dar como resultado un costo inferior en comparación con los otros modelos. Esto se debe a que el modelo de Transporte considera únicamente la primera ley de Kirchhoff, donde es la restricción de balance de potencia la que cumple con dicha ley, mientras que, los otros modelos utilizan ambas leyes.
- En el método estático, los mejores resultados se obtuvieron con los modelos DC y Disyuntivo, ya que los resultados obtenidos en ambos modelos fueron idénticos en términos de costo total, el número de líneas nuevas y ramales en el que ingresaron, en los casos de estudio correspondientes. Se concluye que, estos dos modelos son la mejor opción para la planificación de la expansión de redes de transmisión por ser los que consideran la primera y segunda ley de Kirchhoff. Al ser el modelo Disyuntivo lineal y el modelo DC no lineal, la mejor opción será el modelo Disyuntivo porque al ser lineal encontrará un óptimo global, mientras que, el modelo DC al ser no lineal podría encontrar un óptimo, este no necesariamente podría ser un óptimo global, sino que puede ser un óptimo local. Esto podría notarse si se usan sistemas de grandes dimensiones.
- En esta investigación, se utilizó el método Dinámico Multietapa para evaluar los casos de estudio seleccionados. En comparación con los modelos del método estático, el modelo Dinámico Multietapa dio como resultado un costo de inversión menor en cada uno de los casos de estudio, donde en los casos de estudio Garver, IEEE 24 y 45-Bus SNI-230 kV Ecuador System, se obtuvo 16,7%, 11,6% y 21,6% menos, respectivamente, en comparación con los resultados obtenidos en el modelo Disyuntivo del método determinista estático. Al utilizar una tasa de descuento, el costo de las nuevas líneas se calcula en términos del valor presente y al realizarse el ingreso de las nuevas líneas en el sistema, considerando el año en que realmente se requiere, hace que el costo se reduzca.

- En el caso particular del *45-Bus SNI-230 kV Ecuador System*, se utilizó el método determinista estático para determinar si el sistema tenía la capacidad de satisfacer la demanda. Se comenzó por aplicar el modelo de Transporte, el cual arrojó un costo de inversión de MUSD 74,09 y se identificó que se necesitarían agregar tres nuevas líneas. Sin embargo, los modelos DC, Híbrido y Disyuntivo dieron una respuesta diferente con un costo total de MUSD 109,9 y cuatro nuevas líneas requeridas. Teniendo una diferencia de aproximadamente 32,5 % entre ellos, tomado como referencia el costo de inversión obtenido en los modelos DC, Híbrido y Disyuntivo.

## 6.2 RECOMENDACIONES

- Para usar métodos deterministas para la PET es fundamental la correcta selección, tanto de los casos de estudio y los modelos matemáticos. En el caso de los casos de estudios se recomienda seleccionar más de uno, para un mejor análisis del comportamiento de los modelos matemáticos. En el caso de los modelos matemáticos, se debe empezar por modelos de prueba como el modelo de Transporte o Híbrido, para determinar si el dimensionamiento del sistema es correcto y para obtener una respuesta final se usa el modelo DC o Disyuntivo, aunque se usa más el modelo disyuntivo por ser un modelo de optimización lineal.
- Antes de comenzar a planificar la expansión de la red de transmisión, es importante comprender cómo está estructurada actualmente y cuáles son sus limitaciones. Se debe revisar la capacidad y la configuración de los equipos existentes, y evaluar los puntos críticos en los que se necesita una mayor capacidad de transmisión.
- Una vez que se hayan aplicado los métodos deterministas para planificar la expansión de la red de transmisión, es importante evaluar los resultados. Compara los resultados con los objetivos y considerar la viabilidad de implementar las recomendaciones de expansión propuestas.

## 7 REFERENCIAS

- [1] Caisapanta Tapia Wladymir Hernando, “Expansión de sistemas de transmisión eléctrica usando criterios de óptima potencia ac,” UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA, QUITO, 2016.
- [2] V. H. Reséndiz Estrada, “Métodos deterministas para planear expansión de sistemas de transmisión,” Escuela superior de ingeniería mecánica y eléctrica, México, 2018. Accessed: Oct. 19, 2022. [Online]. Available: <http://tesis.ipn.mx:8080/xmlui/handle/123456789/24946>
- [3] L. L. Garver, “Reserve Planning Using Outage Probabilities and Load Uncertainties,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-98, no. 6, pp. 2047–2054, 1979, doi: 10.1109/TPAS.1979.319398.
- [4] R. M. Maliszewski and L. L. Garver y A. J. Wood, “Linear Programming as an Aid in Planning Kilovar Requirements,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 87, n<sup>o</sup> 12, pp. 1963-1968, vol. 43, no. 2, pp. 476–476, Feb. 1968, doi: 10.1109/TSMC.2013.2246032.
- [5] L. L. Garver, “Transmission Network Estimation Using Linear Programming,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-89, no. 7, pp. 1688–1697, 1970, doi: 10.1109/TPAS.1970.292825.
- [6] P. Sánchez Martín, A. Ramos, and J. F. Alonso, “Probabilistic Midterm Transmission Planning in a Liberalized Market,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, n<sup>o</sup>4, pp. 2135-2142, vol. 20, no. 4, pp. 2135–2142, Feb. 2015, doi: 10.1109/TSMC.2013.2246032.
- [7] K. G. Murty and S. N. Kabadi, “Some NP-complete problems in quadratic and nonlinear programming,” *Math Program*, vol. 39, no. 2, pp. 117–129, 1987, doi: 10.1007/BF02592948.
- [8] Z. M. Al-Hamouz, A. H. Mantawy, H. Al-Duwaish, I. El-Amin, and A. Al-Faraj, “Transmission Expansion Planning Based on Tabu Search Algorithm,” 2004.
- [9] Wladymir Hernando Caisapanta Tapia, “Expansión de sistemas de transmisión eléctrica,” BachelorThesis, Universidad Politécnica Salesiana, QUITO, 2016.
- [10] J. C. Cortez Aucapiña, “Planificación óptima multietapa de la expansión de los sistemas de transmisión usando el modelo AC,” 2018, Accessed: Oct. 22, 2022. [Online]. Available: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/31425>
- [11] Ministerio de energía y recursos naturales no renovables, “Plan Maestro de Electricidad – Ministerio de Energía y Minas,” 2020. <https://www.recursoyenergia.gob.ec/plan-maestro-de-electricidad/> (accessed Oct. 23, 2022).
- [12] J. Tejada, G. Durán, R. Jiménez, and M. Doyle, “Incrementando la eficiencia del sector eléctrico: Lecciones sobre la reducción de pérdidas eléctricas en Ecuador,” Sep. 2017, doi: 10.18235/0000822.
- [13] J. C. Muela Espinoza and J. S. Quishpe Gaibor, “La deontología aplicada a la política de costo de generación en el Ecuador,” *Observatorio de la Economía Latinoamericana*, no. septiembre, Sep. 2018.

- [14] M. X. Pacheco Hurtado and M. D. Torres, “Planificación de la expansión del sistema de transmisión (TEP) considerando reducción de escenarios mediante la aplicación de Machine Learning.,” 2021, Accessed: Nov. 14, 2022. [Online]. Available: <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/54257>
- [15] J. M. Yáñez Castro, “Planificación de la expansión en generación considerando sistemas de almacenamiento en escenarios con incertidumbre hidrológica,” Universidad de CHILE, Santiago de Chile, 2020. Accessed: Nov. 14, 2022. [Online]. Available: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/175589>
- [16] J. Palacios, “Estado del arte de la planeación de expansión de sistemas de transmisión,” *I+D Tecnológico*, vol. 16, no. 2, Jul. 2020, doi: 10.33412/IDT.V16.2.2835.
- [17] M. X. Pacheco Hurtado and M. D. Torres, “Planificación de la expansión del sistema de transmisión (TEP) considerando reducción de escenarios mediante la aplicación de Machine Learning.,” 2021, Accessed: Nov. 14, 2022. [Online]. Available: <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/54257>
- [18] A. Soroudi, *Power system optimization modeling in GAMS*. Springer International Publishing, 2017. doi: 10.1007/978-3-319-62350-4.
- [19] R. Hemmati, R. A. Hooshmand, and A. Khodabakhshian, “State-of-the-art of transmission expansion planning: Comprehensive review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 23, pp. 312–319, Jul. 2013, doi: 10.1016/J.RSER.2013.03.015.
- [20] C. Tapia and W. Hernando, “Expansión de sistemas de transmisión eléctrica usando criterios de óptima potencia AC,” 2016, Accessed: Nov. 14, 2022. [Online]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/13101>
- [21] E. N. Asada, E. Carreño, R. Romero, and A. v. García, “A branch-and-bound algorithm for the multi-stage transmission expansion planning,” *2005 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, vol. 1, pp. 171–176, 2005, doi: 10.1109/PES.2005.1489071.
- [22] P. Antonio and M. Minda, “Elaboración de un modelo de planificación dinámica para la expansión óptima de redes de transmisión de energía eléctrica en sistemas de generación hidrotérmica.,” Oct. 2018, Accessed: Nov. 19, 2022. [Online]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19779>
- [23] U. Estadual Paulista, J. de Mesquita Filho, A. Souza Resende, and P. da Expansão De Sistemas De Transmissão, “Particle swarm optimization aplicada ao planejamento da expansão de sistemas de transmissão,” *Aleph*, p. 16: Feb. 2014, doi: 10.17616/R31N39.
- [24] Pedro Pablo Cárdenas Alzate, “Planeamiento de la expansión de redes de transmisión a largo plazo usando una formulación basada en ciclos,” Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, 2020. Accessed: Feb. 06, 2023. [Online]. Available: <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/d29b9840-3ad7-4791-a2c2-04bed674a840/content>
- [25] G. Vinasco, M. J. Rider, and R. Romero, “A strategy to solve the multistage transmission expansion planning problem,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, no. 4, pp. 2574–2576, Nov. 2011, doi: 10.1109/TPWRS.2011.2126291.
- [26] R. Daniel Reinoso Acosta and I. Guamán Cuenca Wilian Patricio MsC, “Desarrollo de casos de estudio en base al sistema nacional interconectado de Ecuador para el análisis

- de sistemas eléctricos de potencia,” 2022, Accessed: Jan. 31, 2023. [Online]. Available: <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/9283>
- [27] Ricardo Alberto Hincapié-Isaza, Juan Manuel Home-Ortiz, and Ramón Alfonso Gallego-Rendón, “Nuevo modelo para la expansión de sistemas eléctricos de distribución con generación distribuida considerando un planeamiento multietapa coordinado,” *Scielo*, México, pp. 1–9, Mar. 13, 2017. Accessed: Jan. 31, 2023. [Online]. Available: [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-77432017000100043](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-77432017000100043)
- [28] Camilo Arturo Lenis Mejía and Sergio Raúl Ospina Tello, “Procedimiento para la evaluación económica de proyectos en la etapa de formulación,” *studocu*, p. 1, 2016, Accessed: Feb. 08, 2023. [Online]. Available: <https://www.studocu.com/co/document/universidad-de-san-buenaventura/metodologia-de-la-economia/procedimiento-evaluacion-economica-ospina-2016/33185616>
- [29] J. G. Castillo and D. Zhangallimbay, “La tasa social de descuento en la evaluación de proyectos de inversión: una aplicación para el Ecuador,” 2001.
- [30] Andrés Ramos, “TEPES Model (Long-Term Transmission Expansion Planning Model for an Electric System),” *Model for an Electric System*. <https://pascua.uit.comillas.edu/aramos/openmodels.htm> (accessed Jan. 24, 2023).
- [31] José Ignacio Marín Alberdi, “Introducción al lenguaje GAMS,” *Studocu*, vol. 1, pp. 1–28, 2000, Accessed: Jan. 09, 2023. [Online]. Available: <https://www.studocu.com/es/document/universidad-rey-juan-carlos/atencion-a-la-diversidad/gams-aaaaa/14569051>
- [32] I. Dunning, J. Huchette, and M. Lubin, “JuMP: A MODELING LANGUAGE FOR MATHEMATICAL OPTIMIZATION,” 2016.
- [33] Pedro Luis Luque, “Lenguaje AMPL.,” *Multi lenguaje documents*, vol. 2a, pp. 1–28, Mar. 2000.
- [34] R. Romero, C. Rocha, J. R. S. Mantovani, and I. G. Sánchez, “Constructive heuristic algorithm for the DC model in network transmission expansion planning,” *Web of Science*, vol. 152, no. 2, pp. 277–282, Mar. 2005, doi: 10.1049/IP-GTD:20041196.
- [35] Ministerio de energía y recursos naturales no renovables, “Plan Maestro de Electricidad – Ministerio de Energía y Minas,” 2018. <https://www.recursoyenergia.gob.ec/plan-maestro-de-electricidad/> (accessed Jan. 31, 2023).
- [36] R. Fourer, D. M. Gay, and B. W. Kernighan, “AMPL A Modeling Language for Mathematical Programming Second Edition,” *Canada, Australia* •, 2003.
- [37] River Glennapts, “Matriz de incidencia,” *Riverglennapts*, Apr. 20, 2020. <https://riverglennapts.com/es/matrix/576-what-is-incidence-matrix.html> (accessed Feb. 22, 2023).
- [38] Henry Martínez Sarmiento and Alejandro Nieto Ramos, “GAMS Aplicado a las Ciencias Económicas,” p. 36, 2010, Accessed: Feb. 22, 2023. [Online]. Available: <http://www.fce.unal.edu.co/unidad-de-informatica/proyectos-de-estudio/economia/gams-aplicado-a-las-ciencias-economicas>

## 8 ANEXOS

### 8.1 ANEXO A

#### INFORME ANTI PLAGIO PROYECTO DE TITULACIÓN

<b>Facultad:</b>	Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas												
<b>Carrera:</b>	Ingeniería en Electricidad												
<b>Nombre del docente evaluador que emite el informe:</b>	Ing. Guamán Cuenca Wilian Patricio MSc.												
<b>Documento Evaluado:</b>	Proyecto de Investigación presentado previo a la obtención del Título de Ingeniero en Electricidad.												
<b>Autor del documento:</b>	Sr. Lata Gualancañay Alex Dario Sr. Quintero Ross Fausto Andrés												
<b>Programa de similitud utilizado:</b>	Sistema URKUND												
<b>Porcentaje de similitud:</b>	2%												
<b>Observaciones:</b> Calificación de originalidad atendiendo a los siguientes criterios: <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>El documento cumple criterios de originalidad, sin observaciones.</b></li> <li>• El documento cumple criterios de originalidad, con observaciones.</li> <li>• El documento no cumple criterios de originalidad.</li> </ul>	X												
<b>Fecha de realización del informe:</b>	27/02/2023 2:41 PM												
<b>Captura de pantalla:</b>													
<p style="text-align: center;"><b>Document Information</b></p> <hr/> <table> <tr> <td>Analyzed document</td> <td>TESIS_QUINTERO_LATA_CORR.docx (D159603306)</td> </tr> <tr> <td>Submitted</td> <td>2/27/2023 2:41:00 PM</td> </tr> <tr> <td>Submitted by</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Submitter email</td> <td>wilian.guaman8956@utc.edu.ec</td> </tr> <tr> <td>Similarity</td> <td>2%</td> </tr> <tr> <td>Analysis address</td> <td>wilian.guaman8956.utc@analysis.arkund.com</td> </tr> </table>		Analyzed document	TESIS_QUINTERO_LATA_CORR.docx (D159603306)	Submitted	2/27/2023 2:41:00 PM	Submitted by		Submitter email	wilian.guaman8956@utc.edu.ec	Similarity	2%	Analysis address	wilian.guaman8956.utc@analysis.arkund.com
Analyzed document	TESIS_QUINTERO_LATA_CORR.docx (D159603306)												
Submitted	2/27/2023 2:41:00 PM												
Submitted by													
Submitter email	wilian.guaman8956@utc.edu.ec												
Similarity	2%												
Analysis address	wilian.guaman8956.utc@analysis.arkund.com												
 <p>Firmado electrónicamente por: WILIAN PATRICIO GUAMAN CUENCA</p> <p>.....</p> <p><b>Ing. Guamán Cuenca Wilian Patricio MSc.</b> <b>Tutor del proyecto de Investigación</b></p>													

## Document Information

Analyzed document	TESIS_QUINTERO_LATA_CORR.docx (D159603306)
Submitted	2/27/2023 2:41:00 PM
Submitted by	
Submitter email	wilian.guaman8956@utc.edu.ec
Similarity	2%
Analysis address	wilian.guaman8956.utc@analysis.arkund.com

## Sources included in the report

<b>SA</b>	<b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI / REDACCION_FINAL_PALLO_RUMIPAMBA.docx</b> Document REDACCION_FINAL_PALLO_RUMIPAMBA.docx (D143405184) Submitted by: wilian.guaman8956@utc.edu.ec Receiver: wilian.guaman8956.utc@analysis.arkund.com	 <b>4</b>
<b>SA</b>	<b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI / TESIS_LATA_QUINTERO_PRE.docx</b> Document TESIS_LATA_QUINTERO_PRE.docx (D159378180) Submitted by: wilian.guaman8956@utc.edu.ec Receiver: wilian.guaman8956.utc@analysis.arkund.com	 <b>9</b>
<b>W</b>	URL: <a href="http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/13101">http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/13101</a> Fetched: 2/27/2023 2:42:00 PM	 <b>1</b>
<b>W</b>	URL: <a href="http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/31425">http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/31425</a> Fetched: 2/27/2023 2:42:00 PM	 <b>3</b>
<b>W</b>	URL: <a href="https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/d29b9840-3ad7-4791-a2c2-04bed674a840...">https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/d29b9840-3ad7-4791-a2c2-04bed674a840...</a> Fetched: 2/27/2023 2:42:00 PM	 <b>6</b>
<b>W</b>	URL: <a href="https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&amp;pid=S1405-77432017000100043">https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&amp;pid=S1405-77432017000100043</a> Fetched: 2/27/2023 2:42:00 PM	 <b>9</b>
<b>W</b>	URL: <a href="http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/9283">http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/9283</a> Fetched: 2/27/2023 2:42:00 PM	 <b>2</b>
<b>W</b>	URL: <a href="http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/54257">http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/54257</a> Fetched: 2/27/2023 2:42:00 PM	 <b>2</b>
<b>W</b>	URL: <a href="https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/175589">https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/175589</a> Fetched: 2/27/2023 2:42:00 PM	 <b>1</b>

**8.2 ANEXO B**

**DATOS DE LOS SISTEMAS DE PRUEBA**

**8.2.1 Datos del sistema Garver (6 Barras).**

Los datos presentados en la Tabla 8.1 muestra la clasificación de Barras en (PV, PQ y Slack), así como también el ángulo inicial, la potencia demandada, como los límites máximos y mínimos de generación, en la Tabla 8.2 se encuentra los datos de líneas existentes y proyectadas en este apartado se encuentra la reactancia, los costos de líneas, número de líneas existentes, número de líneas máximas y potencia activa máxima.

**Tabla 8.1** Datos de Barra, generación y carga del sistema Garver (6 Barras).

i	Nombre	Tb	Th0	Pd	Pgmax [MW]	Pgmin [MW]
1	"Bus_0001"	3	0.000	80,000	150,000	0,000
2	"Bus_0002"	0	-1.000	240,000	0,000	0,000
3	"Bus_0003"	2	-1.100	40,000	360,000	0,000
4	"Bus_0004"	0	3.000	160,000	0,000	0,000
5	"Bus_0005"	0	-2.000	240,000	0,000	0,000
6	"Bus_0006"	2	-4.000	0,000	600,000	0,000

**Tabla 8.2** Datos de Líneas de transmisión del sistema Garver (6 Barras) (Parte A).

k	i	j	x [p.u]	Cl [MUSD]	n0	nmax	Plmax [MW]
1	1	2	0,400	40,000	1,000	3,000	100,000
2	1	3	0,380	38,000	0,000	3,000	100,000
3	1	4	0,600	60,000	1,000	3,000	80,000
4	1	5	0,200	20,000	1,000	3,000	100,000
5	1	6	0,680	68,000	0,000	3,000	70,000
6	2	3	0,200	20,000	1,000	3,000	100,000
7	2	4	0,400	40,000	1,000	3,000	100,000
8	2	5	0,310	31,000	0,000	3,000	100,000
9	2	6	0,300	30,000	0,000	3,000	100,000

**Tabla 8.3** Datos de Líneas de transmisión del sistema Garver (6 Barras) (Parte B).

k	i	j	x [p.u]	Cl [MUSD]	n0	nmax	Plmax [MW]
10	3	4	0,590	59,000	0,000	3,000	82,000
11	3	5	0,200	20,000	1,000	3,000	100,000
12	3	6	0,480	48,000	0,000	3,000	100,000
13	4	5	0,630	63,000	0,000	3,000	75,000
14	4	6	0,300	30,000	0,000	3,000	100,000
15	5	6	0,610	61,000	0,000	3,000	78,000

**8.2.2 Datos del sistema IEEE 24 (24 Barras).**

Los datos presentados en la Tabla 8.4 muestra la clasificación de Barras en (PV, PQ y Slack), así como también el ángulo inicial, la potencia demandada, como los límites máximos y mínimos de generación, en la Tabla 8.5 se encuentra los datos de líneas existentes y proyectadas en este apartado se encuentra la reactancia, los costos de líneas, número de líneas existentes, número de líneas máximas y potencia activa máxima.

**Tabla 8.4** Datos de Barra, generación y carga del sistema IEEE 24 (24 Barras).

<b>i</b>	<b>Name</b>	<b>Tb</b>	<b>th0</b>	<b>Pd</b>	<b>Pgmax [MW]</b>	<b>Pgmin [MW]</b>
1	Bus_0001	2	0,000	324,000	576,000	0,000
2	Bus_0002	2	0,000	291,000	576,000	0,000
3	Bus_0003	0	0,000	540,000	0,000	0,000
4	Bus_0004	0	0,000	222,000	0,000	0,000
5	Bus_0005	0	0,000	213,000	0,000	0,000
6	Bus_0006	0	0,000	408,000	0,000	0,000
7	Bus_0007	2	0,000	375,000	900,000	0,000
8	Bus_0008	0	0,000	513,000	0,000	0,000
9	Bus_0009	0	0,000	525,000	0,000	0,000
10	Bus_0010	0	0,000	585,000	0,000	0,000
11	Bus_0011	0	0,000	0,000	0,000	0,000
12	Bus_0012	0	0,000	0,000	0,000	0,000
13	Bus_0013	3	0,000	795,000	1773,000	0,000
14	Bus_0014	0	0,000	582,000	0,000	0,000
15	Bus_0015	2	0,000	951,000	645,000	0,000
16	Bus_0016	2	0,000	300,000	465,000	0,000
17	Bus_0017	0	0,000	0,000	0,000	0,000
18	Bus_0018	2	0,000	999,000	1200,000	0,000
19	Bus_0019	0	0,000	543,000	0,000	0,000
20	Bus_0020	0	0,000	384,000	0,000	0,000
21	Bus_0021	2	0,000	0,000	1200,000	0,000
22	Bus_0022	2	0,000	0,000	900,000	0,000
23	Bus_0023	2	0,000	0,000	1980,000	0,000
24	Bus_0024	0	0,000	0,000	0,000	0,000

**Tabla 8.5** Datos de Líneas de transmisión del sistema IEEE 24 (24 Barras).

<b>K</b>	<b>i</b>	<b>j</b>	<b>x [p.u]</b>	<b>CI [MUSD]</b>	<b>n0</b>	<b>nmax</b>	<b>Plmax [MW]</b>
1	1	2	0,014	3,000	1,000	3,000	175,000
2	1	3	0,211	55,000	1,000	3,000	175,000
3	1	5	0,085	22,000	1,000	3,000	175,000
4	2	4	0,127	33,000	1,000	3,000	175,000
5	2	6	0,192	50,000	1,000	3,000	175,000
6	3	9	0,119	31,000	1,000	3,000	175,000
7	3	24	0,084	50,000	1,000	3,000	400,000
8	4	9	0,104	27,000	1,000	3,000	175,000
9	5	10	0,088	23,000	1,000	3,000	175,000
10	6	10	0,061	16,000	1,000	3,000	175,000
11	7	8	0,061	16,000	1,000	3,000	175,000
12	8	9	0,165	43,000	1,000	3,000	175,000
13	8	10	0,165	43,000	1,000	3,000	175,000
14	9	11	0,084	50,000	1,000	3,000	400,000
15	9	12	0,084	50,000	1,000	3,000	400,000
16	10	11	0,084	50,000	1,000	3,000	400,000
17	10	12	0,084	50,000	1,000	3,000	400,000
18	11	13	0,048	66,000	1,000	3,000	500,000
19	11	14	0,042	58,000	1,000	3,000	500,000
20	12	13	0,048	66,000	1,000	3,000	500,000
21	12	23	0,097	134,000	1,000	3,000	500,000
22	13	23	0,087	120,000	1,000	3,000	500,000
23	14	16	0,059	54,000	1,000	3,000	500,000
24	15	16	0,017	24,000	1,000	3,000	500,000
25	15	21	0,049	68,000	2,000	3,000	500,000
26	15	24	0,052	72,000	1,000	3,000	500,000
27	16	17	0,026	36,000	1,000	3,000	500,000
28	16	19	0,023	32,000	1,000	3,000	500,000
29	17	18	0,014	20,000	1,000	3,000	500,000
30	17	22	0,105	146,000	1,000	3,000	500,000
31	18	21	0,026	36,000	2,000	3,000	500,000
32	19	20	0,040	55,000	2,000	3,000	500,000
33	20	23	0,022	30,000	2,000	3,000	500,000
34	21	22	0,068	94,000	1,000	3,000	500,000
35	1	8	0,134	35,000	0,000	3,000	500,000
36	2	8	0,127	33,000	0,000	3,000	500,000
37	6	7	0,192	50,000	0,000	3,000	500,000
38	13	14	0,045	62,000	0,000	3,000	500,000
39	14	23	0,062	86,000	0,000	3,000	500,000
40	16	23	0,082	114,000	0,000	3,000	500,000
41	19	23	0,061	84,000	0,000	3,000	500,000

**8.2.3 Datos del 45-Bus SNI-230 kV Ecuador System**

Los siguientes datos obtenidos de la Tabla 8.6 son una adecuación al sistema realizado por [26] para poder utilizarlos en el planteamiento en los distintos modelos de planeación, estos datos son de barras como también de líneas de transmisión.

**Tabla 8.6.** Datos de Barra, generación y carga 45-Bus SNI-230 kV Ecuador System (Parte A).

i	Name	Tb	th0	Pd	Pgmin [MVar]	Pgmax [MVar]
1	"ALLURIQUIN 230"	0	-34,600	0,000	0,000	0,000
2	"BABA 230"	0	-44,500	0,000	0,000	0,000
3	"BOMBOIZA 230"	0	-31,300	103,500	0,000	0,000
4	"C.H. BABA 230"	0	-44,500	0,000	0,000	90,000
5	"C.H. SAN FRANCISCO 230"	2	-21,800	0,000	0,000	300,000
6	"C.H. SOPLADORA 230"	0	-48,600	0,000	0,000	600,000
7	"CCS 500"	2	-17,400	0,000	0,000	1600,000
8	"CH. MANDURIACU 230"	0	-40,100	0,100	0,000	200,000
9	"CHORRILLOS 230"	2	-48,000	0,000	0,000	500,000
10	"DOS CERRITOS 230"	2	-48,300	98,400	0,000	0,000
11	"DURAN 230"	0	-49,700	217,600	0,000	0,000
12	"EL INGA 230 kV"	2	-25,900	0,000	0,000	950,000
13	"ESCLUSAS 230"	2	-49,700	60,500	0,000	300,000
14	"ESMERALDAS 230"	0	-44,400	157,700	0,000	0,000
15	"FRONTERA 230 kV"	0	-48,900	0,000	0,000	0,000
16	"GIS CCS 500"	0	-17,400	0,000	0,000	0,000
17	"GIS CCS 500 2"	0	-17,400	0,000	0,000	0,000
18	"INGA 500"	2	-23,000	402,600	0,000	200,000
19	"JAMONDINO"	3	-21,800	0,000	0,000	0,000
20	"JIVINO"	0	-19,700	83,500	0,000	0,000
21	"MACHALA 230"	0	-48,900	147,800	0,000	0,000
22	"MAZAR 1"	2	-26,700	0,000	0,000	400,000
23	"MAZAR 2"	2	-27,000	0,000	0,000	105,000
24	"MILAGRO 230"	0	-47,500	405,000	0,000	0,000
25	"MINAS S. FCO"	2	-47,300	0,000	0,000	100,000
26	"MIRADOR 230"	0	-31,900	90,000	0,000	0,000
27	"MOLINO 230"	2	-26,000	0,000	0,000	1200,000
28	"N. PROSPERINA 230"	2	-49,200	197,400	0,000	0,000
29	"PASCUALES 230"	2	-48,100	700,000	0,000	200,000

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI – CARRERA DE ELECTRICIDAD

**Tabla 8.7** Datos de Barra, generación y carga *45-Bus SNI-230 kV Ecuador System* (Parte B).

i	Name	Tb	th0	Pd	Pgmin [MVar]	Pgmax [MVar]
30	"PIMAMPIRO 230"	0	-24,400	40,500	0,000	0,000
31	"POMASQUI 230"	0	-28,100	453,700	0,000	0,000
32	"QUEVEDO 230"	2	-47,400	99,300	0,000	50,000
33	"RIOBAMBA 230"	2	-25,100	0,000	0,000	20,000
34	"S. GREGORIO 230"	0	-51,700	159,700	0,000	0,000
35	"S. RAFAEL 500"	2	-17,800	0,000	0,000	0,000
36	"SAN RAFAEL 230"	2	-18,200	0,000	0,000	40,000
37	"SANTA ROSA 230 kV"	0	-29,100	256,700	0,000	0,000
38	"SANTO DOMINGO 230"	0	-40,100	157,700	0,000	0,000
39	"SHUSHUFINDI 230"	0	-19,700	0,300	0,000	0,000
40	"SININCAY 230"	0	-28,500	79,300	0,000	0,000
41	"TADAY 230"	0	-27,000	0,000	0,000	0,000
42	"TOTORAS 230"	0	-24,500	11,400	0,000	0,000
43	"TRINITARIA 230"	0	-49,800	115,600	0,000	0,000
44	"ZHORAY 230"	0	-27,100	0,000	0,000	0,000
45	"ZORRITOS-PERU"	0	-48,900	0,000	0,000	0,000

**Tabla 8.8** Datos de líneas de transmisión y transformadores *45-Bus SNI-230 kV Ecuador System* (Parte A).

k	i	j	x [p.u]	Cl [MUSD]	n0	nmax	Plmax [MW]
1	1	37	0,038	12,76	2,000	5,000	273,44
2	1	38	0,038	12,76	1,000	5,000	273,44
3	2	4	0,014	3,09	1,000	5,000	177,33
4	3	26	0,015	3,09	1,000	5,000	237,75
5	3	41	0,109	36,38	2,000	5,000	265,47
6	4	32	0,041	14,02	1,000	5,000	265,47
7	4	38	0,060	20,21	1,000	5,000	274,08
8	5	42	0,044	9,20	2,000	5,000	225,64
9	6	13	0,129	55,60	1,000	5,000	395,18
10	6	24	0,128	55,30	1,000	5,000	395,18
11	6	41	0,041	55,30	0,000	5,000	265,47
12	7	16	0,001	1,31	1,000	5,000	1440,00
13	7	17	0,001	1,31	1,000	5,000	1440,00
14	8	38	0,048	20,88	2,000	5,000	414,31
15	9	13	0,037	7,81	1,000	5,000	237,75
16	9	28	0,013	4,44	1,000	5,000	265,47
17	9	29	0,005	1,56	1,000	5,000	265,47
18	9	32	0,135	46,75	2,000	5,000	265,47

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI – CARRERA DE ELECTRICIDAD

**Tabla 8.9** Datos de líneas de transmisión y transformadores 45-Bus SNI-230 kV Ecuador System (Parte B).

<b>k</b>	<b>i</b>	<b>j</b>	<b>x [p.u]</b>	<b>Cl [MUSD]</b>	<b>n0</b>	<b>nmax</b>	<b>Plmax [MW]</b>
19	10	24	0,042	13,98	1,000	5,000	274,08
20	10	29	0,010	3,23	1,000	5,000	274,08
21	11	13	0,001	0,30	1,000	5,000	395,18
22	11	24	0,026	11,20	1,000	5,000	395,18
23	12	31	0,026	10,59	2,000	5,000	395,18
24	12	37	0,022	8,83	2,000	5,000	395,18
25	13	24	0,111	35,43	0,000	5,000	265,47
26	13	43	0,005	2,25	1,000	5,000	395,18
27	14	38	0,148	51,11	2,000	5,000	265,47
28	14	31	0,042	56,59	0,000	5,000	273,44
29	15	45	0,052	17,93	1,000	5,000	265,47
30	15	21	0,052	17,93	1,000	5,000	265,47
31	16	35	0,017	40,39	1,000	5,000	1385,64
32	17	35	0,017	40,39	1,000	5,000	1385,64
33	18	35	0,001	40,13	2,000	5,000	1385,64
34	19	30	0,080	26,80	4,000	5,000	265,47
35	20	36	0,083	26,80	2,000	5,000	237,75
36	20	39	0,028	5,78	1,000	5,000	237,75
37	21	24	0,095	41,14	1,000	5,000	395,18
38	21	25	0,046	19,69	1,000	5,000	265,47
39	22	44	0,002	0,65	1,000	5,000	273,44
40	23	44	0,002	0,65	1,000	5,000	273,44
41	24	25	0,111	49,97	1,000	5,000	265,47
42	24	29	0,052	17,21	1,000	5,000	274,08
43	24	44	0,118	39,35	2,000	5,000	274,08
44	27	29	0,168	61,45	2,000	5,000	273,44
45	27	41	0,040	13,50	2,000	5,000	265,47
46	27	44	0,015	4,89	2,000	5,000	273,44
47	28	43	0,020	6,62	1,000	5,000	274,08
48	29	34	0,042	37,00	0,000	5,000	273,44
49	30	31	0,129	45,21	4,000	5,000	265,47
50	31	37	0,045	14,96	1,000	5,000	265,47
51	31	38	0,042	61,45	0,000	5,000	273,44
52	31	39	0,042	34,10	0,000	5,000	273,44
53	32	38	0,102	34,10	1,000	5,000	274,08
54	32	34	0,107	37,00	2,000	5,000	265,47
55	33	41	0,131	44,17	1,000	5,000	265,47
56	33	42	0,042	13,98	1,000	5,000	273,44
57	37	42	0,107	35,89	1,000	5,000	273,44
58	40	44	0,051	16,95	1,000	5,000	265,47
59	41	42	0,172	58,16	1,000	5,000	265,47

### 8.3 ANEXO C

#### MATRIZ DE INCIDENCIA DE LOS SISTEMAS

##### 8.3.1 Matriz de incidencia para sistema Garver (6 Barras).

###### 8.3.1.1 Matriz de incidencia

En el campo de las matemáticas, una matriz de incidencia se utiliza para representar las conexiones entre dos clases de objetos mediante una relación de incidencia. Si se tiene una clase X y otra Y, se crea una matriz con filas que representan los elementos de X y columnas que representan los elementos de Y. Cada entrada en la matriz indica si hay una relación (llamada incidencia) entre el elemento correspondiente de X y el de Y. Las matrices de incidencia pueden variar en su estructura y notación, según su aplicación en diferentes áreas de estudio [37].

la representación gráfica más común es la matriz de adyacencia, que codifica la relación entre pares de vértices. Por otro lado, la matriz de incidencia se utiliza para mostrar la relación entre dos clases de objetos diferentes. Esta matriz es de tipo lógico y presenta una fila para cada elemento de la primera clase y una columna para cada elemento de la segunda clase. En cada entrada de la matriz se indica si existe una relación de incidencia entre el elemento correspondiente de la primera clase y el elemento de la segunda clase. En resumen, la matriz de incidencia es una herramienta útil en la teoría de grafos para representar relaciones entre diferentes tipos de objetos [37].

###### 8.3.1.2 Gráficos dirigidos y no dirigidos

En la teoría de grafos, un grafo no dirigido tiene dos tipos de matrices de incidencia las cuales son: orientadas y no orientadas.

La matriz de incidencia no orientada (o simplemente matriz de incidencia) de un grafo no dirigido es una  $n \times m$  matriz B, donde n y m son los números de vértices y aristas respectivamente, tal que  $B_{ij} = 1$  si el vértice  $v_i$  y la arista  $e_j$  son incidentes y 0 en caso contrario.

Un ejemplo dictado para este apartado es el explicado en la Figura 8.2, la matriz de incidencia del gráfico no dirigido que se muestra a la derecha es una matriz que consta de 4 filas 4 columnas [37].

Si miramos la matriz de incidencia, vemos que la suma de cada columna es igual a 2. Esto se debe a que cada arista tiene un vértice conectado a cada extremo. La matriz de incidencia de un grafo dirigido es una  $n \times m$  matriz  $B$  donde  $n$  y  $m$  son el número de vértices y aristas respectivamente, tal que  $B_{ij} = -1$  si la arista  $e_j$  sale del vértice  $v_i$ , 1 si entran en el vértice  $v_i$ , 0 y son incidentes y 0 en caso contrario.

La matriz de incidencia orientada de un gráfico no dirigido es la matriz de incidencia, en el sentido de gráficos dirigidos, de cualquier orientación del gráfico. Es decir, en la columna de la arista  $e$ , hay un 1 en la fila correspondiente a un vértice de  $e$  y un  $-1$  en la fila correspondiente al otro vértice de  $e$ , y todas las demás filas tienen 0. La matriz de incidencia orientada es única hasta la negación de cualquiera de las columnas, ya que negar las entradas de una columna corresponde a invertir la orientación de una arista [37].

La matriz de incidencia no orientada de un grafo  $G$  está relacionada con la matriz de adyacencia de su grafo lineal  $L(G)$  por el siguiente teorema:

$$A(L(G)) = B(G)^T B(G) - 2I_m \quad (55)$$

Donde:

$A(L(G))$  es la matriz de adyacencia del gráfico lineal de  $G$ .

$B(G)$  es la matriz de incidencia.

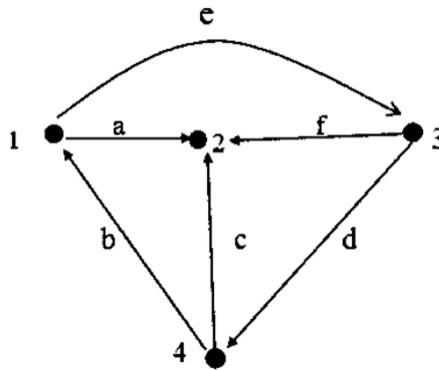
$I_m$  es la matriz identidad de dimensión  $m$ .

La matriz laplaciana discreta (o matriz de Kirchhoff) se obtiene a partir de la matriz de incidencia orientada  $B(G)$  mediante la fórmula  $B(G)^T B(G)$ .

El espacio del ciclo integral de un grafo es igual al espacio nulo de su matriz de incidencia orientada, vista como una matriz sobre los números enteros o reales o complejos. El espacio del ciclo binario es el espacio nulo de su matriz de incidencia orientada o no orientada, vista como una matriz sobre el campo de dos elementos [37].

**8.3.1.3 Pasos para construir la matriz de incidencia**

En la Figura 8.1 se encuentra modelado la red que consta de 4 nodos y 6 ramales de conexión, de la matriz de incidencia son siempre -1, 0, +1, dicha matriz es generalmente similar a KCL (Ley actual de Kirchhoff). Por lo tanto, de la KCL podemos derivar lo de la Figura 8.2 [37].



**Figura 8.1** Sistema de ejemplo nodos [37].

**Tabla 8.10** Valores en la entrada y salida para la construcción de la matriz de incidencia [37].

Tipo de rama	Valor
La rama saliente a KRF nodo	+1
La rama entrante a KRF nodo	-1
Otros	0

Entendiendo estos aspectos que se tiene que tener en cuenta que, si el nodo se encuentra una rama saliente, entonces escribiremos +1 caso contrario se tiene un nodo con rama entrante, entonces escribiremos -1, y las demás ramas se completan con 0, entonces la matriz de incidencia obtenida de la Figura 8.1 esta presentada de la siguiente manera mostrada en la Figura 8.2.

nodos \ branches	a	b	c	d	e	f
1	1	-1	0	0	1	0
2	-1	0	-1	0	0	-1
3	0	0	0	1	-1	1
4	0	1	1	-1	0	0

**Figura 8.2** Matriz de incidencia original [37].

### 8.3.1.4 Matriz de incidencia reducida

En caso de que se elimine una fila aleatoria de una matriz de incidencia dada, se obtendrá una nueva matriz que se considera reducida. Esta matriz se simboliza como. La dimensión de esta matriz reducida se considera como  $n$  y representa el número de puntos de conexión  $b$  representa el número de ramas presentes, para el sistema mostrado en la Figura 8.1 anterior, la matriz de incidencia reducida esta muestra en la siguiente Figura 8.3.

<b>nodes</b> \ <b>branches</b>	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>c</b>	<b>d</b>	<b>e</b>	<b>f</b>
1	1	-1	0	0	1	0
2	-1	0	-1	0	0	-1
3	0	0	0	1	-1	1

**Figura 8.3** Matriz de incidencia reducida [37].

La matriz de incidencia esta es una forma de representar gráficamente las conexiones entre las barras (nodos) de un sistema de líneas de transmisión. Cada fila de la tabla representa una barra del sistema, y cada columna representa una línea de transmisión. El valor en cada celda indica si la barra está conectada a la línea de transmisión.

Teniendo en cuenta todos estos aspectos tenemos en consideración la construcción de nuestras matrices de incidencia que serán útiles para la construcción de los distintos programas computacionales. En esta Tabla 4.2 especifica, se puede ver que la barra 1 (B1) está conectada a las líneas de transmisión L12, L13, L14, L15, L16. Se puede ver el valor 1 en cada celda correspondiente a estas líneas. Esto significa que la barra 1 es un extremo de cada una de estas líneas de transmisión. Por otro lado, se puede ver que la barra 1 no está conectada a ninguna de las otras líneas de transmisión (todas las celdas correspondientes a estas líneas que no está conectada tienen un valor de 0).

De manera similar, se puede ver que la barra 2 (B2) está conectada a las líneas L23, L24, L25, L26. La barra 3 (B3) está conectada a las líneas, L34, L35, L36. y así sucesivamente, esta matriz de incidencia se utiliza a menudo en problemas de optimización de planificación de la expansión de la red de transmisión para calcular los flujos de potencia en las líneas de transmisión y para asegurar el balance de potencia en el sistema.



































## 8.4 ANEXO D

### CÓDIGOS DE PROGRAMACION EN LOS DISTINTOS *SOFTWARE*

#### 8.4.1 Código AMPL

Para utilizar AMPL es necesario contar con un conjunto de datos específico, el cual debe ser incluido junto al modelo de optimización y uno o más archivos de datos en el programa. AMPL se encarga de compilar esta información de manera adecuada para que pueda ser leída por un *Solver*. Para este fin, se recomienda el uso de rutinas de solución adicionales, como CPLEX o BARON. De esta forma, se asegura la correcta resolución del problema planteado, la interacción de AMPL con el *Solver* es llevada a cabo a través de una interfaz, en este caso Notepad++.

En la Tabla 1 en la primera parte en la Sección de (.mod) se aprecia el modelo de código, del sistema en esta parte está constituido por la clasificación de conjuntos, parámetros, variables, y restricciones, en la Sección de “.dat”, se tiene la parte de lectura de datos, la cual está dividida en los 3 distintos sistemas los cuales son Garver (6-Barras), IEEE (24-Barras), y SNI de 230kV, estos datos se encuentran en el ANEXO B correspondiente a la Sección 8.2.3.

En la Sección de (.run), muestra el ejecutable, es donde vamos a imprimir los resultados que necesitamos ver ya sea mediante la interfaz Notepad++ o Neos Server el cual resuelve problemas de optimización numérica, en cualquiera de estos dos casos se usa una programación distinta para llamar a los demás programas.

8.4.1.1 Modelo de Transporte

**Tabla 8.29** Código de Programación Modelo de Transporte Archivo .mod (Parte A).

<b>Código AMPL (Archivo .mod)</b>	
<b>Descripción</b>	<b>Código</b>
Declaración de conjuntos	<pre>set OB; set OL within 1..9999 cross OB cross OB;</pre>
Parámetros	<pre>param Nombre {OB} symbolic; param Tb{OB}; param Pd{OB}; param Pgmax{OB}; param Pgmin{OB}; param x{OL}; param Cl{OL}; param n0{OL}; param nmax{OL}; param Plmax{OL};</pre>
Variables	<pre>var Pg{OB}; var Pij{OL}; var n{OL} integer;</pre>
Función Objetivo	<pre>minimize Costo_lineas:     sum{(k,i,j) in OL}(Cl[k,i,j]*n[k,i,j]);</pre>

**Tabla 8.30** Código de Programación Modelo de Transporte Archivo .mod (Parte B).

Restricciones	<pre> subject to balance_activa {i in OB}: Pg[i]-Pd[i]+sum{(k,j,i) in OL}Pij[k,j,i]-sum{(k,i,j) in OL}Pij[k,i,j]=0;  subject to Flujo_ji_linea {(k,i,j) in OL}: -(n0[k,i,j]+n[k,i,j])*Plmax[k,i,j]&lt;=Pij[k,i,j];  subject to Flujo_ij_linea {(k,i,j) in OL}: Pij[k,i,j]&lt;=(n0[k,i,j]+n[k,i,j])*Plmax[k,i,j];  subject to MaxMin_Pg {i in OB}: Pgmin[i]&lt;=Pg[i]&lt;=Pgmax[i];  subject to limite_lineas {(k,i,j) in OL}: 0&lt;=n[k,i,j]&lt;=nmax[k,i,j]; </pre>
---------------	--

**Tabla 8.31** Código de Programación Modelo de Transporte Archivo .dat.

Código AMPL (Archivo .dat)	
Inicialización de variables y normalización de datos del sistema en por unidad	<pre> for {i in OB}{     let Pd[i]:= Pd[i]/Sbase;     let Pgmax[i]:= Pgmax[i]/Sbase;     let Pgmin[i]:= Pgmin[i]/Sbase; }  for {(k,i,j) in OL}{     let Plmax[k,i,j]:=Plmax[k,i,j]/Sbase;     let Pij[k,i,j]:=0.0; } </pre>

**Tabla 8.32** Código de Programación Modelo de Transporte Archivo .run.

Código AMPL (Archivo .run)	
Solución en Notepad++	<pre> reset; model MH_6BUS.mod data MH_6BUS.dat option solver cplex; solve Costo_lineas; #Imprimir resultados display Costo_lineas,n0,n; display {i in OB}th[i]*180/3.14159; display {(k,i,j) in OL}Pij[k,i,j]*Sbase; display {(k,i,j) in OL}Pij0[k,i,j]*Sbase;                     </pre>
Solución en Neos Server	<pre> solve; #Imprimir resultados display Costo_lineas,n,n0; display {i in OB}th[i]*180/3.14159; display {(k,i,j) in OL}Pij[k,i,j]*Sbase; display {(k,i,j) in OL}Pij0[k,i,j]*Sbase;                     </pre>

8.4.1.2 Modelo de Híbrido

**Tabla 8.33** Código de Programación Modelo Híbrido Archivo .mod (Parte A).

<b>Código AMPL (Archivo .mod)</b>	
<b>Descripción</b>	<b>Código</b>
Declaración de conjuntos	<pre> set OB; set OL within 1..9999 cross OB cross OB; param Nombre {OB} symbolic; param Tb{OB}; param Pd{OB}; param Pgmax{OB}; param Pgmin{OB}; </pre>
Parámetros	<pre> param th0{OB}; param x{OL}; param Cl{OL}; param n0{OL}; param nmax{OL}; param Plmax{OL}; </pre>
Variables	<pre> var Pg{OB}; var Pij0{OL}; var Pij{OL}; var th{OB}; var n{OL} integer; </pre>
Función Objetivo	<pre> minimize Costo_lineas:     sum{(k,i,j) in OL}(Cl[k,i,j]*n[k,i,j]); </pre>

**Tabla 8.34** Código de Programación Modelo Híbrido Archivo .mod (Parte B).

	<p>subject to balance_activa {i in OB}:</p> $Pg[i]-Pd[i]+\sum\{(k,j,i) \text{ in OL}\}Pij[k,j,i]+\sum\{(k,j,i) \text{ in OL}\}Pij0[k,j,i]-\sum\{(k,i,j) \text{ in OL}\}Pij[k,i,j]-\sum\{(k,i,j) \text{ in OL}\}Pij0[k,i,j]=0;$
Restricciones	<p>subject to flujo_activa {(k,i,j) in OL}:</p> $Pij0[k,i,j]=((th[i]-th[j])/x[k,i,j])*(n0[k,i,j]);$
	<p>subject to Flujo_ji_linea_e {(k,i,j) in OL}:</p> $-(n0[k,i,j])*Plmax[k,i,j]<=Pij0[k,i,j];$
	<p>subject to Flujo_ij_linea_e {(k,i,j) in OL}:</p> $Pij0[k,i,j]<=(n0[k,i,j])*Plmax[k,i,j];$
	<p>subject to Flujo_ji_linea_n {(k,i,j) in OL}:</p> $-(n[k,i,j])*Plmax[k,i,j]<=Pij[k,i,j];$
	<p>subject to Flujo_ij_linea_n {(k,i,j) in OL}:</p> $Pij[k,i,j]<=(n[k,i,j])*Plmax[k,i,j];$
	<p>subject to MaxMin_Pg {i in OB}:</p> $Pgmin[i]<=Pg[i]<=Pgmax[i];$
	<p>subject to limite_lineas {(k,i,j) in OL}:</p> $0<=n[k,i,j]<=nmax[k,i,j];$

**Tabla 8.35** Código de Programación Modelo Híbrido Archivo .dat.

Código AMPL (Archivo .dat)	
<p>Inicialización de variables y normalización de datos del sistema en por unidad</p>	<pre> for {i in OB}{     let Pd[i]:= Pd[i]/Sbase;     let Pgmax[i]:= Pgmax[i]/Sbase;     let Pgmin[i]:= Pgmin[i]/Sbase;     let th[i]:= th0[i]*3.1416/180; }  for {(k,i,j) in OL}{     let Plmax[k,i,j]:=Plmax[k,i,j]/Sbase;     let Pij[k,i,j]:=0.0; }  fix {i in OB:Tb[i]==3}th[i]:=th0[i]*3.14159/180;                     </pre>

**Tabla 8.36** Código de Programación Modelo Híbrido Archivo .run.

Código AMPL (Archivo .run)	
<p>Solución en Notepad++</p>	<pre> reset; model MH_6BUS.mod data MH_6BUS.dat option solver cplex; solve Costo_lineas; #Imprimir resultados display Costo_lineas,n0,n; display {i in OB}th[i]*180/3.14159; display {(k,i,j) in OL}Pij[k,i,j]*Sbase; display {(k,i,j) in OL}Pij0[k,i,j]*Sbase;  solve; #Imprimir resultados display Costo_lineas,n,n0; display {i in OB}th[i]*180/3.14159; display {(k,i,j) in OL}Pij[k,i,j]*Sbase; display {(k,i,j) in OL}Pij0[k,i,j]*Sbase;                     </pre>
<p>Solución en Neos Server</p>	<pre> display {i in OB}th[i]*180/3.14159; display {(k,i,j) in OL}Pij[k,i,j]*Sbase; display {(k,i,j) in OL}Pij0[k,i,j]*Sbase;                     </pre>

8.4.1.3 Modelo DC

**Tabla 8.37** Código de Programación Modelo DC Archivo .mod (Parte A).

<b>Código AMPL (Archivo .mod)</b>	
<b>Descripción</b>	<b>Código</b>
Declaración de conjuntos	<pre> set OB; set OL within 1..9999 cross OB cross OB; param Nombre {OB} symbolic; param Tb{OB}; param Pd{OB}; param Pgmax{OB}; param Pgmin{OB}; </pre>
Parámetros	<pre> param th0{OB}; param x{OL}; param Cl{OL}; param n0{OL}; param nmax{OL}; param Plmax{OL}; </pre>
Variables	<pre> var Pg{OB}; var Pij{OL}; var th{OB}; var n{OL} integer; </pre>
Función Objetivo	<pre> minimize Costo_lineas:     sum{(k,i,j) in OL}(Cl[k,i,j]*n[k,i,j]); </pre>

**Tabla 8.38** Código de Programación Modelo DC Archivo .mod (Parte B).

Restricciones	<pre> subject to balance_activa {i in OB}: Pg[i]-Pd[i]+sum{(k,j,i) in OL}Pij[k,j,i]-sum{(k,i,j) in OL}Pij[k,i,j]=0;  subject to Flujo_DC {(k,i,j) in OL}: Pij[k,i,j]=((th[i]-th[j])/(x[k,i,j]))*(n0[k,i,j]+n[k,i,j]);  subject to Flujo_ji_linea {(k,i,j) in OL}: -(n0[k,i,j]+n[k,i,j])*(Plmax[k,i,j])&lt;=Pij[k,i,j];  subject to Flujo_ij_linea {(k,i,j) in OL}: Pij[k,i,j]&lt;=(Plmax[k,i,j])*(n0[k,i,j]+n[k,i,j]);  subject to MaxMin_Pg {i in OB}: Pgmin[i]&lt;=Pg[i]&lt;=Pgmax[i];  subject to limite_lineas {(k,i,j) in OL}: 0&lt;=n[k,i,j]&lt;=nmax[k,i,j]; </pre>
---------------	--

**Tabla 8.39** Código de Programación Modelo DC Archivo .dat.

Código AMPL (Archivo .dat)	
Inicialización de variables y normalización de datos del sistema en por unidad	<pre> for {i in OB}{     let Pd[i]:= Pd[i]/Sbase;     let Pgmax[i]:= Pgmax[i]/Sbase;     let Pgmin[i]:= Pgmin[i]/Sbase; }  for {(k,i,j) in OL}{     let Plmax[k,i,j]:=Plmax[k,i,j]/Sbase;     let Pij[k,i,j]:=-0.0; }  fix {i in OB:Tb[i]==3} th[i]:=th0[i];; </pre>

**Tabla 8.40** Código de Programación Modelo DC Archivo .run.

Código AMPL (Archivo .run)	
Solución en Notepad++	<pre> reset; model MDC-6BUS.mod data MDC-6BUS.dat option solver ipopt; solve Costo_lineas; display Costo_lineas; display n; display {(k,i,j) in OL}Pij[k,i,j]*Sbase; display th;  solve ; #Imprimir resultados display Costo_lineas,n0,w; display {i in OB}th[i]*180/3.14159; display {(k,i,j) in OL}Pij0[k,i,j]*Sbase; display {(k,i,j) in OL, y in Y}Pij[k,i,j,y]*Sbase; </pre>
Solución en Neos Server	<pre> solve ; #Imprimir resultados display Costo_lineas,n0,w; display {i in OB}th[i]*180/3.14159; display {(k,i,j) in OL}Pij0[k,i,j]*Sbase; display {(k,i,j) in OL, y in Y}Pij[k,i,j,y]*Sbase; </pre>

8.4.1.4 Modelo Disyuntivo

**Tabla 8.41** Código de Programación Modelo Disyuntivo Archivo .mod (Parte A).

<b>Código AMPL (Archivo .mod)</b>	
<b>Descripción</b>	<b>Código</b>
Declaración de conjuntos	<pre> set Y=1..3; set OB; set OL within 1..9999 cross OB cross OB; param Nombre {OB} symbolic; param Tb{OB}; param Pd{OB}; param Pgmax{OB}; param Pgmin{OB}; </pre>
Parámetros	<pre> param th0{OB}; param x{OL}; param Cl{OL}; param n0{OL}; param nmax{OL}; param Plmax{OL}; param thmax; </pre>
Variables	<pre> var Pg{OB}; var Pij{OL,Y}; var Pij0{OL}; var th{OB}; var w{OL,Y} binary; </pre>
Función Objetivo	<pre> minimize Costo_lineas:     sum{(k,i,j) in OL}(Cl[k,i,j])* sum{y in Y}(w[k,i,j,y]) </pre>

**Tabla 8.42** Código de Programación Modelo Disyuntivo Archivo .mod (Parte B).

```

subject to balance_activa {i in OB}:
subject to balance_activa {i in OB}:
Pg[i]-Pd[i]+
(sum{(k,j,i) in OL}(Pij0[k,j,i]+(sum{y in Y}Pij[k,j,i,y]))) -
(sum{(k,i,j) in OL}(Pij0[k,i,j]+(sum{y in Y}Pij[k,i,j,y])))=0;

#Flujo de potencia activa
subject to flujo_activa {(k,i,j) in OL}:
Pij0[k,i,j]=((th[i]-th[j])/x[k,i,j])*(n0[k,i,j]);

#Limite de M
subject to Limite_M_ji {(k,i,j) in OL,y in Y}:
-2*(thmax)*(1-w[k,i,j,y])<=Pij[k,i,j,y]*x[k,i,j]-(th[i]-th[j]);

subject to Limite_M_ij {(k,i,j) in OL,y in Y}:
Pij[k,i,j,y]*x[k,i,j]-(th[i]-th[j])<=2*(thmax)*(1-w[k,i,j,y]);

#La cargabilidad maxima de la linea (dividida en dos partes por
existe 2 variables a los dos lados)
subject to Flujo_ji0_linea {(k,i,j) in OL}:
-(n0[k,i,j])*Plmax[k,i,j]<=Pij0[k,i,j];

subject to Flujo_ij0_linea {(k,i,j) in OL}:
Pij0[k,i,j]<=(n0[k,i,j])*Plmax[k,i,j];

#La cargabilidad maxima de la linea de w
subject to Flujo_ji_linea {(k,i,j) in OL,y in Y}:
-(w[k,i,j,y])*Plmax[k,i,j]<=Pij[k,i,j,y];

subject to Flujo_ij_linea {(k,i,j) in OL,y in Y}:
Pij[k,i,j,y]<=(w[k,i,j,y])*Plmax[k,i,j];

#Lmites de potencia generada
subject to MaxMin_Pg {i in OB}:
Pgmin[i]<=Pg[i]<=Pgmax[i];

```

Restricciones

**Tabla 8.43** Código de Programación Modelo Disyuntivo Archivo .mod (Parte C).

	<pre> #Limite angular subject to Limite_angular {i in OB}: -(thmax)&lt;=th[i]&lt;=(thmax);  #Límite de lineas nuevas del ramal subject to limite_lineas {(k,i,j) in OL}: sum{y in Y}w[k,i,j,y]&lt;=nmax[k,i,j];  #Secuencia de entrada de lineas nuevas asociadas a la variable binaria subject to Secuencia_w {(k,i,j) in OL,y in Y:y&gt;1}: w[k,i,j,y]&lt;=w[k,i,j,y-1];  subject to Limite_Max3 {(k,i,j) in OL,y in Y}: (n0[k,i,j]+w[k,i,j,y])&lt;=3; </pre>
--	---

**Tabla 8.44** Código de Programación Modelo Disyuntivo Archivo .dat.

Código AMPL (Archivo .dat)	
	<pre> for {i in OB}{     let Pd[i]:= Pd[i]/Sbase;     let Pgmax[i]:= Pgmax[i]/Sbase;     let Pgmin[i]:= Pgmin[i]/Sbase;     let th[i]:= th0[i]*3.1416/180; } </pre>
<p>Inicialización de variables y normalización de datos del sistema en por unidad</p>	<pre> for {(k,i,j) in OL}{     let Plmax[k,i,j]:=Plmax[k,i,j]/Sbase;     let Pij0[k,i,j]:=0.0; }  for {(k,i,j) in OL,y in Y}{     let Pij[k,i,j,y]:=0.0; }  #Fijar el angulo de fase en la referencia fix{i in OB:Tb[i]==3}th[i]:=th0[i]*3.14159/180; </pre>

**Tabla 8.45** Código de Programación Modelo Disyuntivo Archivo .run.

Código AMPL (Archivo .run)	
Solución en Notepad++	<pre> reset; model MD-6BUS.mod data MD-6BUS.dat option solver cplex; solve Costo_lineas; display Costo_lineas,n0,w; display {i in OB}th[i]*180/3.14159; display {(k,i,j) in OL}Pij0[k,i,j]*Sbase; display {(k,i,j) in OL, y in Y}Pij[k,i,j,y]*Sbase;  solve ;                     </pre>
Solución en Neos Server	<pre> #Imprimir resultados display Costo_lineas,n0,w; display {i in OB}th[i]*180/3.14159; display {(k,i,j) in OL}Pij0[k,i,j]*Sbase; display {(k,i,j) in OL, y in Y}Pij[k,i,j,y]*Sbase;                     </pre>

8.4.1.5 Modelo Disyuntivo Dinámico (Multietapa)

**Tabla 8.46** Código de Programación Modelo Disyuntivo Dinámico (Multietapa) Archivo .mod (Parte A).

<b>Código AMPL (Archivo .mod)</b>	
<b>Descripción</b>	<b>Código</b>
Declaración de conjuntos	<pre> set OB; set OL within 1..9999 cross OB cross OB; set Y=1..3; set T; param Nombre {OB} symbolic; param Sbase; param Tb{OB}; param Pd{OB}; param Pgmax{OB}; param Pgmin{OB}; </pre>
Parámetros	<pre> param th0{OB}; param x{OL}; param CI{OL}; param n0{OL}; param nmax{OL}; param Plmax{OL}; param thmax; </pre>
Variables	<pre> var Pg{OB}; var Pij{OL,Y}; var Pij0{OL}; var th{OB}; var n{OL} integer; var w{OL,Y} binary; </pre>
Función Objetivo	<pre> minimize Costo_lineas: alpha[t] * sum{(k,i,j) in OL} (CI[k,i,j] * sum{y in Y} (w[k,i,j,y,1])) +sum{t in T : t &gt; 1} (alpha[t] * sum{(k,i,j) in OL} (CI[k,i,j] * sum{y in Y} (w[k,i,j,y,t] -w[k,i,j,y,t-1]))); </pre>

**Tabla 8.47** Código de Programación Modelo Disyuntivo Dinámico (Multietapa) Archivo .mod (Parte B).

<p>subject to balance_potencia_activa {i in OB, t in T}:</p> $Pg[i,t] - Pd[i,t] + \sum\{(k,j,i) \text{ in OL}\} \sum\{y \text{ in Y}\} (Pij[k,j,i,y,t]) - \sum\{(k,i,j) \text{ in OL}\} \sum\{y \text{ in Y}\} (Pij[k,i,j,y,t]) + \sum\{(k,j,i) \text{ in OL}\} (Pij0[k,j,i,t]) - \sum\{(k,i,j) \text{ in OL}\} (Pij0[k,i,j,t]) = 0;$ <p>subject to flujo_potencia_activa_existente {(k,i,j) in OL, t in T}:</p> $Pij0[k,i,j,t] = n0[k,i,j] * (th[i,t] - th[j,t]) / x[k,i,j];$ <p>subject to limite_flujo_potencia_activa_existente {(k,i,j) in OL, t in T}:</p> $- n0[k,i,j] * Plmax[k,i,j] <= Pij0[k,i,j,t] <= n0[k,i,j] * Plmax[k,i,j];$ <p>subject to flujo_potencia_activa_candidata_a {(k,i,j) in OL, y in Y, t in T}:</p> $Pij[k,i,j,y,t]*x[k,i,j] - (th[i,t] - th[j,t]) <= 2*thmax*(1-w[k,i,j,y,t]);$ <p>subject to flujo_potencia_activa_candidata_b {(k,i,j) in OL, y in Y, t in T}:</p> $- 2*thmax*(1-w[k,i,j,y,t]) <= Pij[k,i,j,y,t]*x[k,i,j] - (th[i,t] - th[j,t]);$ <p>subject to limite_flujo_potencia_activa_a {(k,i,j) in OL,y in Y, t in T}:</p> $Pij[k,i,j,y,t] <= w[k,i,j,y,t] * Plmax[k,i,j];$ <p>subject to limite_flujo_potencia_activa_b {(k,i,j) in OL,y in Y, t in T}:</p> $- w[k,i,j,y,t] * Plmax[k,i,j] <= Pij[k,i,j,y,t];$	<p>Restricciones</p>
---	----------------------

**Tabla 8.48** Código de Programación Modelo Disyuntivo Dinámico (Multietapa) Archivo .mod (Parte C).

	<pre> subject to limite_generacion_activa {i in OB, t in T}:     0 &lt;= Pg[i,t] &lt;= Pgmax[i,t];  subject to limite_angulo_fase {i in OB, t in T}:     -thmax &lt;= th[i,t] &lt;= thmax;  subject to limite_n {(k,i,j) in OL}:     sum{y in Y} (w[k,i,j,y,card(T)]) &lt;= nmax[k,i,j];  subject to restriccion_w {(k,i,j) in OL, y in Y, t in T : y &gt; 1}:     w[k,i,j,y,t] &lt;= w[k,i,j,y-1,t];  subject to restriccion_t {(k,i,j) in OL, y in Y, t in T : t &gt; 1}:     w[k,i,j,y,t-1] &lt;= w[k,i,j,y,t];  subject to angulo_referencia {i in OB, t in T : Tb[i] == 3}:     th[i,t] = 0;  subject to LINEAS_NUEVAS {(k,i,j) in OL, t in T}:     n[k,i,j] = sum{y in Y}w[k,i,j,y,t];                 </pre>
--	---

**Tabla 8.49** Código de Programación Modelo Disyuntivo Dinámico (Multietapa) Archivo .dat.

Código AMPL (Archivo .dat)	
	<pre> for {i in OB}{     let Pd[i]:= Pd[i]/Sbase;     let Pgmax[i]:= Pgmax[i]/Sbase;     let Pgmin[i]:= Pgmin[i]/Sbase;     let th[i]:= th0[i]*3.1416/180; }  Inicialización de variables y normalización de datos del sistema en por unidad for {(k,i,j) in OL}{     let Plmax[k,i,j]:=Plmax[k,i,j]/Sbase;     let Pij0[k,i,j]:=0.0; }  for {(k,i,j) in OL,y in Y}{     let Pij[k,i,j,y]:=0.0; }  #Fijar el angulo de fase en la referencia fix {i in OB:Tb[i]==3}th[i]:=th0[i]*3.14159/180;                 </pre>

**Tabla 8.50** Código de Programación Modelo Disyuntivo Dinámico (Multietapa) Archivo .run.

Código AMPL (Archivo .run)	
Solución en Notepad++	<pre> reset; model MD-6BUS.mod data MD-6BUS.dat option solver cplex; solve Costo_lineas; display Costo_lineas,n0,w; display {i in OB}th[i]*180/3.14159; display {(k,i,j) in OL}Pij0[k,i,j]*Sbase; display {(k,i,j) in OL, y in Y}Pij[k,i,j,y]*Sbase;  solve ;  #Imprimir resultados display Costo_lineas,n0,w; display {i in OB}th[i]*180/3.14159; display {(k,i,j) in OL}Pij0[k,i,j]*Sbase; display {(k,i,j) in OL, y in Y}Pij[k,i,j,y]*Sbase;                     </pre>
Solución en Neos Server	<pre> display {i in OB}th[i]*180/3.14159; display {(k,i,j) in OL}Pij0[k,i,j]*Sbase; display {(k,i,j) in OL, y in Y}Pij[k,i,j,y]*Sbase;                     </pre>

### 8.4.2 Código GAMS

Es un sistema de modelado de programación matemática que permite resolver problemas lineales, no lineales y de optimización. GAMS usa un lenguaje de modelización, en donde el usuario puede escribir en un editor la formulación del modelo matemático, y luego aplica un *Solver* para resolver completamente el modelo, brindándole así un claro conocimiento de las condiciones de su modelo y de las consecuencias que tiene sobre él un cambio en el valor de cualquier variable.

El lenguaje GAMS a diferencia del AMPL se tiene un solo programa conocido como “.gms” este archivo contiene el modelo la base de data y su ejecución esto puede ser resultado en su propio programa y a su vez enviado a Neos Server para su correspondiente comparación de resultados.

En la Sección de datos es la única parte que va a cambiar en los distintos programas, está dividida en los 3 distintos sistemas los cuales son Garver (6-Barras), IEEE (24-Barras), y SNI de 230kV, estos datos se encuentran en el ANEXO B correspondiente a la Sección 8.2.1, Sección 8.2.2 y Sección 8.2.3.

#### 8.4.2.1 Modelo de Transporte

**Tabla 8.51** Código de Programación Modelo de Transporte GAMS (Parte A).

Código GAMS	
Descripción	Código
Declaración de conjuntos	Sets
	OB BARRA /B1*B6/
	OL RAMAS
	/L12,L13,L14,L15,L16,L23,L24,L25,L26,L34,L35,L36,L45,L46,L56/;
Parámetros (datos del sistema)	TABLE Barras(OB,*)
	TABLE LINEAS(OL,*)
Matriz de incidencia	TABLE S(OB,OL)

**Tabla 8.52** Código de Programación Modelo de Transporte GAMS (Parte B).

	VARIABLES	
	v	
	Pij(OL)	
	Cst_Lin	
Variables	POSITIVE VARIABLE	
	Pg (OB)	
	INTEGER VARIABLE	
	n(OL)	
	Costo_Lineas	FUNCION OBJETIVO
	Balance_activa(OB)	Balance de Potencia Activa
Declaración de Ecuaciones	Flujo_ij(OB,OL)	La cargabilidad máxima de la línea ij
	Flujo_ji(OB,OL)	La cargabilidad máxima de la línea ji
	MaxMin_Pg(OB)	Limites de potencia generada
	Limite_lineas(OL)	Limite de líneas nuevas del ramal;
Función Objetivo	Costo_Lineas..	
	Cst_Lin=E=SUM(OL,LINEAS(OL,'Cl')*n(OL));	
	Balance_activa(OB)..	
	SUM(OL,(S(OB,OL)*Pij(OL))+Pg(OB)=E=BARRAS(OB,'Pd');	
	Flujo_ij(OB,OL)..	
	S(OB,OL)*Pij(OL)=L=LINEAS(OL,'Plmax') *(n(OL)+	
	LINEAS(OL,'n0') );	
	Flujo_ji(OB,OL)..	
Restricciones	-(S(OB,OL)*Pij(OL))=L=LINEAS(OL,'Plmax')*(n(OL)+	
	LINEAS(OL,'n0'));	
	MaxMin_Pg(OB)..	
	Pg(OB)=I=BARRAS(OB,'Pgmax');	
	Limite_lineas(OL)..	
	n(OL)=L=LINEAS(OL,'nmax');	
Ejecución del programa	MODEL MODELO_TRANSPORTE /ALL/;	
	OPTION LIMROW = 0;	
	OPTION LIMCOL = 0;	
	option optCr = 0;	
	SOLVE MODELO_TRANSPORTE USING MIP MIN Cst_Lin	

8.4.2.2 Modelo DC

Código de Programación Modelo DC en GAMS (Parte A).

Código GAMS	
Descripción	Código
Declaración de conjuntos	Sets OB BARRA /B1*B6/ OL RAMAS /L12,L13,L14,L15,L16,L23,L24,L25,L26,L34,L35,L36,L45,L46,L56/;
	Parámetros (datos del sistema) TABLE Barras(OB,*) TABLE LINEAS(OL,*)
Matriz de incidencia	TABLE S(OB,OL)
Variables	VARIABLES Pij(OL) Cst_Lin th(OB)
	POSITIVE VARIABLE Pg (OB)
Declaración de Ecuaciones	INTEGER VARIABLE n(OL) th.fx['B1']=0;
	EQUATIONS
	Costo_Lineas      FUNCION OBJETIVO
	Balance_activa(OB)      Balance de Potencia Activa
	SegundaL(OL,OB)      restricción de segunda ley de kirchoff
	Flujo_ij(OL)      La cargabilidad maxima de la linea ij
Flujo_ji(OL)      La cargabilidad maxima de la linea ji	
MaxMin_Pg(OB)      Limites de potencia generada	
Limite_lineas(OL)      Limite de lineas nuevas del ramal;	

**Tabla 8.53** Código de Programación Modelo DC en GAMS (Parte B).

Función Objetivo	<p>Costo_Lineas..</p> <p>Cst_Lin=E=SUM(OL,LINEAS(OL,'Cl')*n(OL));</p> <p>Balance_activa(OB)..</p> <p>SUM(OL,(S(OB,OL)*Pij(OL)))+Pg(OB)=E=Barras(OB,'Pd');</p> <p>SegundaL(OL,OB)..</p> <p>Pij(OL)=e=LINEAS(OL,'Th')/LINEAS(OL,'x')*(n(OL)+LINEAS(OL,'n0'));</p>
Restricciones	<p>Flujo_ij(OL)..</p> <p>Pij(OL)=L=LINEAS(OL,'Plmax') *(n(OL)+LINEAS(OL,'n0') );</p> <p>Flujo_ji(OL).. -</p> <p>Pij(OL)=L=LINEAS(OL,'Plmax')*(n(OL)+LINEAS(OL,'n0'));</p> <p>MaxMin_Pg(OB)..</p> <p>Pg(OB)=l=BARRAS(OB,'Pgmax');</p> <p>Limite_lineas(OL)..</p> <p>n(OL)=L=LINEAS(OL,'nmax');</p>
Ejecución del programa	<p>MODEL MODELO_DC /ALL/;</p> <p>OPTION LIMROW = 100;</p> <p>OPTION LIMCOL = 100;</p> <p>option optCr = 0;</p> <p>SOLVE MODELO_DC USING MIP MIN Cst_Lin;</p>

8.4.2.3 Modelo Híbrido Linealizado.

**Tabla 8.54** Código de Programación Modelo Híbrido en GAMS (Parte A).

Código GAMS	
Descripción	Código
	Sets
Declaración de conjuntos	OB BARRA /B1*B6/
	OL RAMAS
	/L12,L13,L14,L15,L16,L23,L24,L25,L26,L34,L35,L36,L45,L46,L56/;
Parámetros (datos del sistema)	TABLE Barras(OB,*)
	TABLE LINEAS(OL,*)
Matriz de incidencia (Instaladas y a instalar)	TABLE S(OB,OL)
	TABLE S0(OB,OL)
	VARIABLES
Variables	Pij(OL) Flujo por rama
	Pij0(OL) Flujos de las nuevas líneas por rama
	Cost Costo de la inversion
	Pg(OB) Potencia generada
	n(OL) Nuevas lieneas agregadas;
	POSITIVE VARIABLE
	Pg;
	INTEGER VARIABLE
	n;
	EQUATIONS
Declaración de Ecuaciones	COSTO Función objetivo
	EQ(OB) Balance de flujo de potencia
	FMAXIJ(OL) Flujo máximo por las líneas de envío
	FMAXJI(OL) Flujo máximo líneas recepción
	FMAXINIJ(OL) Flujo máximo por las líneas de envío nuevas
	FMAXINJI(OL) Flujo máximo líneas recepción nuevas
	GEN(OB) Generación máxima en las barras
	Limite_lineas(OL) Limite de líneas nuevas del ramal
	EQ1(OL) Segunda ley de kircchhof
;	

**Tabla 8.55** Código de Programación Modelo Híbrido en GAMS (Parte B).

	<p>COSTO..</p>
Función Objetivo	<p>Cost=E=SUM(OL,LINEAS(OL,'Cl')*n(OL));</p>
	<p>* RESTRICCIONES*</p>
	<p>EQ(OB)..</p>
	<p>Pg(OB)+SUM(OL,(S(OB,OL)*Pij(OL)))</p>
	<p>+SUM(OL,S0(OB,OL)*Pij0(OL))=E=Barras(OB,'Pd');</p>
	<p>EQ1(OL)..</p>
	<p>Pij0(OL) =e=LINEAS(OL,'Th')/LINEAS(OL,'x')</p>
Restricciones	<p>*(n(OL)+LINEAS(OL,'n0'));</p>
	<p>FMAXIJ(OL)..</p>
	<p>Pij(OL)=L=LINEAS(OL,'Plmax')*LINEAS(OL,'n0');</p>
	<p>FMAXJI(OL)..</p>
	<p>-Pij(OL)=L=LINEAS(OL,'Plmax')*LINEAS(OL,'n0');</p>
	<p>FMAXINIJ(OL)..</p>
	<p>Pij0(OL)=L=LINEAS(OL,'Plmax')*LINEAS(OL,'n0');</p>
	<p>FMAXINJI(OL)..</p>
	<p>-Pij0(OL)=L=LINEAS(OL,'Plmax')*LINEAS(OL,'n0');</p>
	<p>GEN(OB)..           Pg(OB)=L=Barras(OB,'Pgmax');</p>
	<p>Limite_lineas(OL)..   n(OL)=l=LINEAS(OL,'nmax');</p>
Ejecución del programa	<p>*EJECUCION</p> <p>MODEL HÍBRIDO /ALL/;</p> <p>OPTION LIMROW = 100;</p> <p>OPTION LIMCOL = 100;</p> <p>option optCr = 0;</p> <p>SOLVE HÍBRIDO USING MIP MIN Cost</p>

8.4.2.4 Modelo Disyuntivo

**Tabla 8.56** Código de Programación Modelo Disyuntivo en GAMS (Parte A).

<b>Código GAMS</b>	
<b>Descripción</b>	<b>Código</b>
	Sets
	I BARRA /B1,B2,B3,B4,B5,B6/
Declaración de conjuntos	J RAMAS /I12,I13,I14,I15,I16,I23,I24,I25,I26,I34,I35,I36,I45,I46,I56/ Y VAR /1,2,3/;
	Scalar
	THMAX ANGULO MAXIMO /0.6/;
	Parameters
	C(J) Coste de las líneas
	X(J) Reactancia de las líneas
Parámetros (datos del sistema)	G(I) Generacion maxima en las barras
	ANG(I) Angulos en las barras
	T(J) Diferencia de angulos en las barras
	D(I) Demanda en las barras
	MAXF(J) Flujo maximo permitido
	NMAX(J) Capacidad maxima de las líneas
	N0(J) Líneas existentes
Matriz de incidencia (Instaladas y a instalar)	TABLE S0(I,J) TABLE S(I,J)
	VARIABLES
	GENERADOR (I)
	FLUJOS(J)
	FLUJOSIN(J)
	V
	POSITIVE VARIABLE GENERADOR;
Variables	BINARY VARIABLES
	W(J,Y)
	EQUATIONS
	COSTO
	EQ(I)
	EQ1(J)

**Tabla 8.57** Código de Programación Modelo Disyuntivo en GAMS (Parte B).

EQUATIONS	
	COSTO FUNCION OBJETIVO COSYTO LINEAS
	EQ(I) BALANCE DE FLUJO DE POTENCIA
	EQ1(J) FLUJO DE POTENCIA ACTIVA
	EQ2(J,Y) LIMITE M PARTE 1
	EQ3(J,Y) LIMITE M PARTE 2
Declaración de Ecuaciones	EQ4(J) CARGABILIDADADA PARTE 1
	EQ5(J) CARGABILIDADADA PARTE 2
	EQ6(J,Y) CARGABILIDADADA LINEA W PARTE 1
	EQ7(J,Y) CARGABILIDADADA LINEA W PARTE 2
	EQ8(I) GENERACION MAXIMA EN LAS BARRAS
	EQ9(I) LIMITE DE ANGULO 1
	EQ10(I) LIMITE DE ANGULO 2
	EQ11(J) LIMITE DE INGRESO DE LINEAS NUEVAS;
Función Objetivo	COSTO.. $V=E=\text{SUM}(J,(((C(J)*\text{SUM}(Y,W(J,Y))))));$
	EQ(I).. $\text{SUM}(J,(S(I,J)*\text{FLUJOS}(J))*\text{SUM}(Y,W(J,Y)))$ $+\text{SUM}(J,(S(I,J)*\text{FLUJOSIN}(J))*\text{SUM}(Y,W(J,Y))) +$ $\text{GENERADOR}(I)=E=D(I);$
	EQ1(J).. $\text{FLUJOSIN}(J)=E=(T(J)/X(J))*N0(J);$
Restricciones	EQ2(J,Y).. $-(2*\text{THMAX})*(1-W(J,Y))=L=(((\text{FLUJOS}(J))*X(J))-T(J));$
	EQ3(J,Y).. $(((\text{FLUJOS}(J))*X(J))-T(J))=L=(2*\text{THMAX})*(1-W(J,Y));$
	EQ4(J).. $-(N0(J)*\text{MAXF}(J))=L=\text{FLUJOSIN}(J);$
	EQ5(J).. $\text{FLUJOSIN}(J)=L=(N0(J)*\text{MAXF}(J));$
	EQ6(J,Y).. $-W(J,Y)*\text{MAXF}(J)=L=\text{FLUJOS}(J);$
	EQ7(J,Y).. $\text{FLUJOS}(J)=L=W(J,Y)*\text{MAXF}(J);$

**Tabla 8.58** Código de Programación Modelo Disyuntivo en GAMS (Parte C).

Restricciones	<pre>EQ8(I).. GENERADOR(I)=L=G(I); EQ9(I).. (-THMAX)=L=ANG(I); EQ10(I).. ANG(I)=L=THMAX; EQ11(J).. SUM(Y,W(J,Y))=L=NMAX(J);</pre>
Ejecución del programa	<pre>MODEL disyuntivo /ALL/; OPTION LIMROW = 100; OPTION LIMCOL = 100; option optCr = 0; SOLVE disyuntivo USING mip MIN V</pre>

#### 8.4.2.5 Modelo Disyuntivo Dinámico (Multietapa)

**Tabla 8.59** Código de Programación Modelo Disyuntivo Dinámico (Multietapa) en GAMS (Parte A).

Código GAMS	
Descripción	Código
	Sets
	OB BARRA /B1,B2,B3,B4,B5,B6/
Declaración de conjuntos	OL RAMAS /I12,I13,I14,I15,I16,I23,I24,I25,I26,I34,I35,I36,I45,I46,I56/
	Y VAR /1,2,3/
	T TIEMPO /T1*T10/;
	Scalar
	THMAX ANGULO MAXIMO /0.6/;
	Parameters
	C(J) Coste de las lineas
	X(J) Reactancia de las lineas
Parámetros (datos del sistema)	G(I) Generacion maxima en las barras
	ANG(I) Angulos en las barras
	T(J) Diferencia de angulos en las barras
	D(I) Demanda en las barras
	MAXF(J) Flujo maximo permitido
	NMAX(J) Capacidad maxima de las lineas
	N0(J,T) Lineas existentes

**Tabla 8.60** Código de Programación Modelo Disyuntivo Dinámico (Multietapa) en GAMS (Parte B).

	TABLE S0(I,J)
Matriz de incidencia (Instaladas y a instalar)	TABLE S(I,J)
	VARIABLES
	GENERADOR (I)
	FLUJOS(J)
	FLUJOSIN(J)
	V
Variables	POSITIVE VARIABLE GENERADOR; BINARY VARIABLES
	W(J,Y)
	EQUATIONS
	COSTO
	EQ(I)            EQ1(J)

**Tabla 8.61** Código de Programación Modelo Disyuntivo en GAMS (Parte C).

	EQUATIONS
	COSTO    FUNCION OBJETIVO COSYTO LINEAS
	EQ(I)    BALANCE DE FLUJO DE POTENCIA
	EQ1(J)    FLUJO DE POTENCIA ACTIVA
	EQ2(J,Y) LIMITE M PARTE 1
	EQ3(J,Y) LIMITE M PARTE 2
Declaración de Ecuaciones	EQ4(J)    CARGABILIDADADA PARTE 1
	EQ5(J)    CARGABILIDADADA PARTE 2
	EQ6(J,Y) CARGABILIDADADA LINEA W PARTE 1
	EQ7(J,Y) CARGABILIDADADA LINEA W PARTE 2
	EQ8(I)    GENERACION MAXIMA EN LAS BARRAS
	EQ9(I)    LIMITE DE ANGULO 1
	EQ10(I)   LIMITE DE ANGULO 2
	EQ11(J)   LIMITE DE INGRESO DE LINEAS NUEVAS;
	COSTO..
Función Objetivo	$V=E= \alpha[t] * \text{SUM}\{(k,i,j) \text{ in OL}\} (CI[k,i,j] * \text{sum}\{y \text{ in Y}\} (w[k,i,j,y,1]))$ $+ \text{sum}\{t \text{ in T} : t > 1\} (\alpha[t] * \text{sum}\{(k,i,j) \text{ in OL}\} (CI[k,i,j]$ $* \text{sum}\{y \text{ in Y}\} (w[k,i,j,y,t] - w[k,i,j,y,t-1])));$

**Tabla 8.62** Código de Programación Modelo Disyuntivo Dinámico (Multietapa) en GAMS (Parte D).

	<p>EQ(I)..  <math>SUM(J,(S(I,J)*FLUJOS(J))*SUM(Y,W(J,Y)))</math>  <math>+SUM(J,(S(I,J)*FLUJOSIN(J))*SUM(Y,W(J,Y))) +</math>                  GENERADOR(I)=E=D(I);</p> <p>EQ1(J)..  <math>FLUJOSIN(J)=E=(T(J)/X(J))*N0(J);</math></p> <p>Restricciones EQ2(J,Y)..  <math>-(2*THMAX)*(1-W(J,Y))=L=(((FLUJOS(J))*X(J))-T(J));</math></p> <p>EQ3(J,Y)..  <math>(((FLUJOS(J))*X(J))-T(J))=L=(2*THMAX)*(1-W(J,Y));</math></p> <p>EQ4(J)..  <math>-(N0(J)*MAXF(J))=L=FLUJOSIN(J);</math></p> <p>EQ5(J)..  <math>FLUJOSIN(J)=L=(N0(J)*MAXF(J));</math></p> <p>EQ6(J,Y)..  <math>-W(J,Y)*MAXF(J)=L=FLUJOS(J);</math></p> <p>EQ7(J,Y)..  <math>FLUJOS(J)=L=W(J,Y)*MAXF(J);</math></p>
--	---

**Tabla 8.63** Código de Programación Modelo Disyuntivo Dinámico (Multietapa) en GAMS (Parte E).

Restricciones	<p>EQ8(I)..                  GENERADOR(I)=L=G(I);</p> <p>EQ9(I)..  <math>(-THMAX)=L=ANG(I);</math></p> <p>EQ10(I)..  <math>ANG(I)=L=THMAX;</math></p> <p>EQ11(J)..  <math>SUM(Y,W(J,Y))=L=NMAX(J);</math></p>
Ejecución del programa	<p>MODEL disyuntivo /ALL/;                  OPTION LIMROW = 100;                  OPTION LIMCOL = 100;                  option optCr = 0;                  SOLVE disyuntivo USING mip MIN V</p>

### 8.4.3 Código PYOMO

#### 8.4.3.1 Modelo de Transporte

**Tabla 8.64** Código de Programación Modelo Transporte en PYOMO (Parte A).

<b>Código PYOMO (lenguaje Python)</b>	
<b>Descripción</b>	<b>Código</b>
Importación de librerías de Python	<pre>import time from PYOMO.environ import * import os</pre>
Ingreso de correo de usuario de NEOS	<pre>os.environ['NEOS_EMAIL']='CORREO DE USUARIO NEOS '</pre>
Inicio del conteo de tiempo de ejecución	<pre>start = time.perf_counter()</pre>
Creación del modelo	<pre>model = AbstractModel()</pre>
Conjuntos	<pre>model.OB = Set() model.OL = Set(within=model.OB*model.OB)</pre>
Acceder a los elementos del conjunto “OB” para la restricción de balance de potencia	<pre>def NodesOut_init(m, OB):     for i, j in m.OL:         if i == OB:             yield j model.OBOut = Set(model.OB, initialize=NodesOut_init)  def NodesIn_init(m, OB):     for i, j in m.OL:         if j == OB:             yield i model.OBIn = Set(model.OB, initialize=NodesIn_init)</pre>

**Tabla 8.65** Código de Programación Modelo Transporte en PYOMO (Parte B).

	<pre> model.Tb = Param(model.OB) model.Pd = Param(model.OB) model.Pgmax = Param(model.OB) model.Pgmin = Param(model.OB) model.th0 = Param(model.OB) </pre>
Parámetros	<pre> #Parametros de las lineas y transformadores model.x = Param(model.OL) model.Cl = Param(model.OL) model.n0 = Param(model.OL) model.nmax= Param(model.OL) model.Plmax = Param(model.OL) </pre>
Variables	<pre> def b_Pg(model,B):     return (model.Pgmin[B],model.Pgmax[B]) model.Pg = Var(model.OB, domain=Reals, bounds= b_Pg) def b_n(model,i,j):     return (0,model.nmax[i,j]) model.n = Var(model.OL, domain=Integers, bounds =b_n)  model.Pij = Var(model.OL, domain=Reals) </pre>
Función Objetivo	<pre> def CostoLineas(model,OB):     return summation(model.Cl,model.n) model.costelineas = Objective(rule = CostoLineas, sense=minimize) </pre>

**Tabla 8.66** Código de Programación Modelo Transporte en PYOMO (Parte C).

Restricciones	<pre> def Balance_activa(model,B):     return model.Pg[B] - model.Pd[B] \         - sum(model.Pij[i,B] for i in model.OBIn[B])\         + sum(model.Pij[B,j] for j in model.OBOut[B]) == 0 model.Balance = Constraint(model.OB,rule = Balance_activa)  def Flujo_ji_lineas(model,i,j):     return -(model.n0[i,j] + model.n[i,j])*model.Plmax[i,j] &lt;= model.Pij[i,j] model.Flujo_ji = Constraint(model.OL,rule = Flujo_ji_lineas)  def Flujo_ij_lineas(model,i,j):     return model.Pij[i,j] &lt;= (model.n0[i,j] + model.n[i,j])*model.Plmax[i,j] model.Flujo_ij = Constraint(model.OL,rule = Flujo_ij_lineas)  def Min_Pg(model,B):     return model.Pgmin[B] &lt;= model.Pg[B] model.Pgen1 = Constraint(model.OB,rule = Min_Pg)  def Max_Pg(model,B):     return model.Pg[B] &lt;= model.Pgmax[B] model.Pgen = Constraint(model.OB,rule = Max_Pg)  def Limite_lineas(model,i,j):     return model.n[i,j] &lt;= model.nmax[i,j] model.Limite_nuevas_lineas = Constraint(model.OL,rule = Limite_lineas)  Fin del conteo de tiempo de ejecución end = time.perf_counter() </pre>
---------------	---

**Tabla 8.67** Código de Programación Modelo Transporte en PYOMO (Parte D).

Ejecución del código usando solvers locales instalados en el computador	<pre> opt = SolverFactory('solver ') data = DataPortal() data.load(filename='DATOS.dat', model=model) instance = model.create_instance('DATOS.dat') results = opt.solve(instance,tee=False) instance.display() print('Modelo de Transporte') print('Función Obj = ', instance.costelineas()) print("Tiempo de ejecución: ", end - start) </pre>
Ejecución del código usando solvers pertenecientes a NEOS	<pre> data = DataPortal() data.load(filename='DATOS.dat', model=model) instance = model.create_instance('DATOS.dat') opt = SolverFactory("solver ") solver_manager = SolverManagerFactory('neos') results = solver_manager.solve(instance, opt=opt) #results.write() instance.display() print('Modelo de Transporte') print('Función Obj = ', format(round(instance.costelineas(),5))) print("Tiempo de ejecución: ", end - start) </pre>

8.4.3.2 Modelo DC

**Tabla 8.68** Código de Programación Modelo DC en PYOMO (Parte A).

<b>Código PYOMO (lenguaje Python)</b>	
<b>Descripción</b>	<b>Código</b>
Importación de librerías de Python	<pre>import time from PYOMO.environ import * import os</pre>
Ingreso de correo de usuario de NEOS	<pre>os.environ['NEOS_EMAIL']='CORREO DE USUARIO NEOS '</pre>
Inicio del conteo de tiempo de ejecución	<pre>start = time.perf_counter()</pre>
Creación del modelo	<pre>model = AbstractModel()</pre>
Conjuntos	<pre>model.OB = Set() model.OL = Set(within=model.OB*model.OB)</pre>
Acceder a los elementos del conjunto “OB” para la restricción de balance de potencia	<pre>def NodesOut_init(m, OB):     for i, j in m.OL:         if i == OB:             yield j model.OBOut = Set(model.OB, initialize=NodesOut_init)  def NodesIn_init(m, OB):     for i, j in m.OL:         if j == OB:             yield i model.OBIn = Set(model.OB, initialize=NodesIn_init)</pre>

**Tabla 8.69** Código de Programación Modelo DC en PYOMO (Parte B).

Parámetros	<pre>#Parametros de las barras model.Tb = Param(model.OB) model.Pd = Param(model.OB) model.Pgmax = Param(model.OB) model.Pgmin = Param(model.OB) model.th0 = Param(model.OB)</pre>
	<pre>#Parametros de las lineas y transformadores model.x = Param(model.OL) model.Cl = Param(model.OL) model.n0 = Param(model.OL) model.nmax= Param(model.OL) model.Plmax = Param(model.OL)</pre>
Variables	<pre>def b_Pg(model,i):     return (model.Pgmin[i],model.Pgmax[i]) model.Pg = Var(model.OB, domain=Reals, bounds = b_Pg) def b_n(model,i,j):     return (0,model.nmax[i,j]) model.n = Var(model.OL, domain=Integers, initialize=model.n0, bounds = b_n) model.th = Var(model.OB) model.Pij = Var(model.OL)</pre>
Función Objetivo	<pre>def costelineas(model):     return sum(model.Cl[i,j]*model.n[i,j] for i,j in model.OL) model.costo_lineas = Objective(rule=costelineas,sense=minimize)</pre>

**Tabla 8.70** Código de Programación Modelo DC en PYOMO (Parte C).

Restricciones	<pre> def Balance_activa(model,B):     return model.Pg[B] - model.Pd[B] \         - sum(model.Pij[i,B] for i in model.OBIn[B])\         + sum(model.Pij[B,j] for j in model.OBOut[B])\         - sum(model.P0[i,B] for i in model.OBIn[B])\         + sum(model.P0[B,j] for j in model.OBOut[B]) == 0 model.Balance = Constraint(model.OB,rule = Balance_activa) def Flujo_en_P0(model,i,j):     return model.P0[i,j] == (model.n0[i,j])*\         ((model.th[i]-model.th[j])/model.x[i,j]) model.Flujo_P0 = Constraint(model.OL,rule = Flujo_en_P0) def Flujo_ji_lineas(model,i,j):     return - model.n[i,j]*model.Plmax[i,j] &lt;= model.Pij[i,j] model.Flujo_ji = Constraint(model.OL,rule = Flujo_ji_lineas) def Flujo_ij_lineas(model,i,j):     return model.Pij[i,j] &lt;= model.n[i,j]*model.Plmax[i,j] model.Flujo_ij = Constraint(model.OL,rule = Flujo_ij_lineas) def Flujo_P0_lineas1(model,i,j):     return -model.n0[i,j]*model.Plmax[i,j] &lt;= model.P0[i,j] model.Flujo_P0_min = Constraint(model.OL,rule = Flujo_P0_lineas1) def Flujo_P0_lineas2(model,i,j):     return model.P0[i,j] &lt;= model.n0[i,j]*model.Plmax[i,j] model.Flujo_P0_max = Constraint(model.OL,rule = Flujo_P0_lineas2)  def Min_Pg(model,i):     return model.Pgmin[i] &lt;= model.Pg[i] model.Pgen1 = Constraint(model.OB,rule = Min_Pg) def Max_Pg(model,i):     return model.Pg[i] &lt;= model.Pgmax[i] model.Pgen = Constraint(model.OB,rule = Max_Pg) def Limite_lineas(model,i,j):     return model.n[i,j] &lt;= model.nmax[i,j] model.Limite_nuevas_lineas = Constraint(model.OL,rule = Limite_lineas) </pre>
---------------	---

**Tabla 8.71** Código de Programación Modelo DC en PYOMO (Parte D).

Fin del conteo de tiempo de ejecución	<pre>end = time.perf_counter()</pre>
Ejecución del código usando Solvers locales instalados en el computador	<pre>opt = SolverFactory('solver') data = DataPortal() data.load(filename='DATOS.dat', model=model) instance = model.create_instance('DATOS.dat') results = opt.solve(instance,tee=False) instance.display() print('Modelo de Transporte') print('Función Obj = ', instance.costelineas()) print("Tiempo de ejecución: ", end - start)</pre>
Ejecución del código usando Solvers pertenecientes a NEOS	<pre>data = DataPortal() data.load(filename='DATOS.dat', model=model) instance = model.create_instance('DATOS.dat') opt = SolverFactory("solver ") solver_manager = SolverManagerFactory('neos') results = solver_manager.solve(instance, opt=opt) results.write() instance.display() print('Modelo de Transporte') print('Función Obj = ', format(round(instance.costelineas(),5))) print("Tiempo de ejecución: ", end - start)</pre>

8.4.3.3 Modelo Híbrido

**Tabla 8.72** Código de Programación Modelo Híbrido en PYOMO (Parte A).

<b>Código PYOMO (lenguaje Python)</b>	
<b>Descripción</b>	<b>Código</b>
Importación de librerías de Python	<pre>import time from PYOMO.environ import * import os</pre>
Ingreso de correo de usuario de NEOS	<pre>os.environ['NEOS_EMAIL']='CORREO DE USUARIO NEOS '</pre>
Inicio del conteo de tiempo de ejecución	<pre>start = time.perf_counter()</pre>
Creación del modelo	<pre>model = AbstractModel()</pre>
Conjuntos	<pre>model.OB = Set() model.OL = Set(within=model.OB*model.OB) model.Y = RangeSet(1,5)</pre>
Acceder a los elementos del conjunto “OB” para la restricción de balance de potencia	<pre>def NodesOut_init(m, OB):     for i, j in m.OL:         if i == OB:             yield j model.OBOut = Set(model.OB, initialize=NodesOut_init)  def NodesIn_init(m, OB):     for i, j in m.OL:         if j == OB:             yield i model.OBIn = Set(model.OB, initialize=NodesIn_init)</pre>

**Tabla 8.73** Código de Programación Modelo Híbrido en PYOMO (Parte B).

	<pre> #Parametros de las barras model.Tb = Param(model.OB) model.Pd = Param(model.OB) model.Pgmax = Param(model.OB) model.Pgmin = Param(model.OB) model.th0 = Param(model.OB) </pre>
Parámetros	<pre> #Parametros de las lineas y transformadores model.x = Param(model.OL) model.Cl = Param(model.OL) model.n0 = Param(model.OL) model.nmax= Param(model.OL) model.Plmax = Param(model.OL) M = 1.57  def b_Pg(model,i):     return (model.Pgmin[i],model.Pgmax[i]) model.Pg = Var(model.OB, domain=Reals, bounds = b_Pg) def b_n(model,i,j):     return (0,model.nmax[i,j]) </pre>
Variables	<pre> model.n = Var(model.OL, domain=Integers, initialize=model.n0, bounds = b_n) model.th = Var(model.OB) model.Pijy = Var(model.OL, model.Y) model.P0 = Var(model.OL) model.w = Var(model.OL, model.Y, within=Binary) </pre>
Función Objetivo	<pre> def CostoLineas(model,OB):     return summation(model.Cl,model.n) model.costelineas = Objective(rule = CostoLineas, sense=minimize) </pre>

**Tabla 8.74** Código de Programación Modelo Híbrido en PYOMO (Parte C).

Restricciones	<pre>def Balance_activa(model,B):     return model.Pg[B] - model.Pd[B] \         - sum(model.Pij[i,B] for i in model.OBIn[B])\         + sum(model.Pij[B,j] for j in model.OBOut[B]) == 0 model.Balance = Constraint(model.OB,rule = Balance_activa)</pre>
	<pre>def Flujo_ji_lineas(model,i,j):     return -(model.n0[i,j] + model.n[i,j])*model.Plmax[i,j] &lt;= model.Pij[i,j] model.Flujo_ji = Constraint(model.OL,rule = Flujo_ji_lineas)</pre>
	<pre>def Flujo_ij_lineas(model,i,j):     return model.Pij[i,j] &lt;= (model.n0[i,j] + model.n[i,j])*model.Plmax[i,j] model.Flujo_ij = Constraint(model.OL,rule = Flujo_ij_lineas)</pre>
	<pre>def Min_Pg(model,B):     return model.Pgmin[B] &lt;= model.Pg[B] model.Pgen1 = Constraint(model.OB,rule = Min_Pg)</pre>
	<pre>def Max_Pg(model,B):     return model.Pg[B] &lt;= model.Pgmax[B] model.Pgen = Constraint(model.OB,rule = Max_Pg)</pre>
	<pre>def Limite_lineas(model,i,j):     return model.n[i,j] &lt;= model.nmax[i,j] model.Limite_nuevas_lineas = Constraint(model.OL,rule = Limite_lineas)</pre>
	<pre>Fin del conteo de tiempo de ejecución</pre>

**Tabla 8.75** Código de Programación Modelo Híbrido en PYOMO (Parte D).

Ejecución del código usando  
Solvers locales instalados en el  
computador

```
opt = SolverFactory('cplex')
data = DataPortal()
data.load(filename='DATOS.dat', model=model)
instance = model.create_instance('DATOS.dat')
results = opt.solve(instance,tee=False)
instance.display()
print('Modelo de Transporte')
print('Función Obj = ', instance.costlineas())
print("Tiempo de ejecución: ", end - start)
```

Ejecución del código usando  
Solvers pertenecientes a NEOS

```
data = DataPortal()
data.load(filename='DATOS.dat', model=model)
instance = model.create_instance('DATOS.dat')
opt = SolverFactory("cbc")
solver_manager = SolverManagerFactory('neos')
results = solver_manager.solve(instance, opt=opt)
#results.write()
instance.display()
print('Modelo de Transporte')
print('Función Obj = ', format(round(instance.costlineas(),5)))
print("Tiempo de ejecución: ", end - start)
```

8.4.3.4 Modelo Disyuntivo

**Tabla 8.76** Código de Programación Modelo Disyuntivo en PYOMO (Parte A).

<b>Código PYOMO (lenguaje Python)</b>	
<b>Descripción</b>	<b>Código</b>
Importación de librerías de Python	<pre>import time from PYOMO.environ import * import os</pre>
Ingreso de correo de usuario de NEOS	<pre>os.environ['NEOS_EMAIL']='CORREO DE USUARIO NEOS '</pre>
Inicio del conteo de tiempo de ejecución	<pre>start = time.perf_counter()</pre>
Creación del modelo	<pre>model = AbstractModel()</pre>
Conjuntos	<pre>model.OB = Set() model.OL = Set(dimen=2)</pre>
Acceder a los elementos del conjunto “OB” para la restricción de balance de potencia	<pre>def NodesOut_init(m, OB):     for i, j in m.OL:         if i == OB:             yield j model.OBOut = Set(model.OB, initialize=NodesOut_init)  def NodesIn_init(m, OB):     for i, j in m.OL:         if j == OB:             yield i model.OBIn = Set(model.OB, initialize=NodesIn_init)</pre>

**Tabla 8.77** Código de Programación Modelo Disyuntivo en PYOMO (Parte B).

Parámetros	<pre>#Parametros de las barras model.Tb = Param(model.OB) model.Pd = Param(model.OB) model.Pgmax = Param(model.OB) model.Pgmin = Param(model.OB) model.th0 = Param(model.OB)</pre>
	<pre>#Parametros de las lineas y transformadores model.x = Param(model.OL) model.Cl = Param(model.OL) model.n0 = Param(model.OL) model.nmax= Param(model.OL) model.Plmax = Param(model.OL)</pre>
Variables	<pre>def b_Pg(model,B):     return (model.Pgmin[B],model.Pgmax[B]) model.Pg = Var(model.OB, domain=Reals, bounds= b_Pg) def b_n(model,i,j):     return (0,model.nmax[i,j]) model.n = Var(model.OL, domain=Integers, bounds =b_n)  model.Pij = Var(model.OL, domain=Reals)</pre>
Función Objetivo	<pre>def CostoLineas(model,OB):     return summation(model.Cl,model.n) model.costelineas = Objective(rule = CostoLineas, sense=minimize)</pre>

**Tabla 8.78** Código de Programación Modelo Disyuntivo en PYOMO (Parte C).

	<pre> def balance_activa_rule(model, B):     return model.Pg[B] - model.Pd[B]\         + (sum(model.P0[B,j] for j in model.OBOut[B]) + sum(model.Pijy[B,j,y] for j,y in model.OBOut[B]*model.Y))\         - (sum(model.P0[i,B] for i in model.OBIn[B]) + sum(model.Pijy[i,B,y] for i,y in model.OBIn[B]*model.Y)) == 0 model.balance_activa = Constraint(model.OB, rule=balance_activa_rule)  def flujo_pot(model, i,j):     return model.P0[i,j] == (model.n0[i,j])*((model.th[i]- model.th[j])/model.x[i,j]) model.FLUJO_POT = Constraint(model.OL, rule=flujo_pot)  def flujo_P0_min(model, i,j):     return - (model.n0[i,j]*model.Plmax[i,j]) &lt;= model.P0[i,j] model.Flujo_P0_MIN = Constraint(model.OL, rule=flujo_P0_min)  def flujo_P0_max(model, i,j):     return model.P0[i,j] &lt;= (model.n0[i,j]*model.Plmax[i,j]) model.Flujo_P0_MAX = Constraint(model.OL, rule=flujo_P0_max)  def flujo_ji_p(model, i,j,y):     return -(model.w[i,j,y])*model.Plmax[i,j] &lt;= model.Pijy[i,j,y] model.Flujo_linea_ji = Constraint(model.OL, model.Y, rule=flujo_ji_p)  def flujo_ij_p(model, i,j,y):     return model.Pijy[i,j,y] &lt;= (model.w[i,j,y])*model.Plmax[i,j] model.Flujo_linea_ij = Constraint(model.OL, model.Y, rule=flujo_ij_p) </pre>
Restricciones	

**Tabla 8.79** Código de Programación Modelo Disyuntivo en PYOMO (Parte D).

Restricciones	<pre> def limite_lineas(model, i,j):     return sum(model.w[i,j,y] for y in model.Y) &lt;= model.nmax[i,j] model.LIMITE_LINEAS = Constraint(model.OL, rule=limite_lineas) def s_lineas(model, i,j,y):     return model.w[i,j,y] &lt;= model.w[i,j,y-1] if y &gt; 1 else Constraint.Skip model.SEC_LINEAS = Constraint(model.OL, model.Y, rule=s_lineas) def flujo_ji(model, i,j,y):     return -M*(1 - model.w[i,j,y]) &lt;= model.Pijy[i,j,y]*model.x[i,j] - (model.th[i]-model.th[j]) model.Flujo_ji_linea = Constraint(model.OL, model.Y, rule=flujo_ji) def flujo_ij(model, i,j,y):     return model.Pijy[i,j,y]*model.x[i,j] - (model.th[i]-model.th[j]) &lt;= M*(1 - model.w[i,j,y]) model.Flujo_ij_linea = Constraint(model.OL, model.Y, rule=flujo_ij) def lineas_nuevas(model, i,j):     return model.n[i,j] == sum(model.w[i,j,y] for y in model.Y) model.LINEAS_NUEVAS = Constraint(model.OL, rule=lineas_nuevas) def MinPg(model, i):     return model.Pgmin[i]&lt;=model.Pg[i] model.Min_Pg = Constraint(model.OB, rule=MinPg) def MaxPg(model, i):     return model.Pg[i]&lt;=model.Pgmax[i] model.Max_Pg = Constraint(model.OB, rule=MaxPg)  def Limite_lineas(model,i,j):     return model.n[i,j] &lt;= model.nmax[i,j] model.Limite_nuevas_lineas = Constraint(model.OL,rule = Limite_lineas)  Fin del conteo de tiempo de ejecución end = time.perf_counter() </pre>
---------------	--

**Tabla 8.80** Código de Programación Modelo Disyuntivo en PYOMO (Parte E).

<p>Ejecución del código usando Solvers locales instalados en el computador</p>	<pre> opt = SolverFactory('cplex') data = DataPortal() data.load(filename='DATOS.dat', model=model) instance = model.create_instance('DATOS.dat') results = opt.solve(instance,tee=False) instance.display() print('Modelo de Transporte') print('Función Obj = ', instance.costlineas()) print("Tiempo de ejecución: ", end - start) </pre>
<p>Ejecución del código usando Solvers pertenecientes a NEOS</p>	<pre> data = DataPortal() data.load(filename='DATOS.dat', model=model) instance = model.create_instance('DATOS.dat') opt = SolverFactory("cbc") solver_manager = SolverManagerFactory('neos') results = solver_manager.solve(instance, opt=opt) #results.write() instance.display() print('Modelo de Transporte') print('Función Obj = ', format(round(instance.costlineas(),5))) print("Tiempo de ejecución: ", end - start) </pre>

**8.4.3.5 Modelo Dinámico Disyuntivo (Multietapa)**

**Tabla 8.81** Código de Programación Modelo Disyuntivo Dinámico (Multietapa) en PYOMO (Parte A).

<b>Código PYOMO (lenguaje Python)</b>	
<b>Descripción</b>	<b>Código</b>
Importación de librerías de Python	<pre>import time from PYOMO.environ import * import os</pre>
Ingreso de correo de usuario de NEOS	<pre>os.environ['NEOS_EMAIL']='CORREO DE USUARIO NEOS '</pre>
Inicio del conteo de tiempo de ejecución	<pre>start = time.perf_counter()</pre>
Creación del modelo	<pre>model = AbstractModel()</pre>
Conjuntos	<pre>model.OB = Set() model.OL = Set(dimen=2)</pre>
Acceder a los elementos del conjunto “OB” para la restricción de balance de potencia	<pre>def NodesOut_init(m, OB):     for i, j in m.OL:         if i == OB:             yield j model.OBOut = Set(model.OB, initialize=NodesOut_init)  def NodesIn_init(m, OB):     for i, j in m.OL:         if j == OB:             yield i model.OBIn = Set(model.OB, initialize=NodesIn_init)</pre>

**Tabla 8.82** Código de Programación Modelo Disyuntivo Dinámico (Multietapa) en PYOMO (Parte B).

Parámetros	<pre># Declarar parametros de las barras model.Tb = Param(model.OB) model.alpha = Param(model.T) model.th0 = Param(model.OB) model.Pd = Param(model.OB,model.T) model.Pgmax = Param(model.OB,model.T) model.Pgmin = Param(model.OB,model.T)</pre>
Variables	<pre># Declarar parametros de lineas y transformadores model.x = Param(model.OL) model.Cl = Param(model.OL) model.n0 = Param(model.OL) model.nmax = Param(model.OL) model.Plmax = Param(model.OL) M = 1.2  model.Pg = Var(model.OB,model.T, domain=Reals) model.th = Var(model.OB,model.T) model.Pijy = Var(model.OL, model.Y,model.T) model.P0 = Var(model.OL,model.T)</pre>
Función Objetivo	<pre>def costo_lineas(model):      return model.alpha[1]*sum(model.Cl[i,j]*sum(model.w[i,j,y,1] for y in model.Y) for (i,j) in model.OL) + sum(model.alpha[t]*sum(model.Cl[i,j]*(sum(model.w[i,j,y,t] for y in model.Y)-sum(model.w[i,j,y,t-1] for y in model.Y)) for (i,j) in model.OL) for t in model.T if t &gt; 1)  model.costolineas = Objective(rule=costo_lineas,sense=minimize)</pre>

**Tabla 8.83** Código de Programación Modelo Disyuntivo Dinámico (Multietapa) en PYOMO (Parte C).

```
def balance_activa_rule(model, B, t):

    return model.Pg[B,t] - model.Pd[B,t] +
    sum(sum(model.Pijy[B,j,y,t] for y in model.Y) for j in
    model.OBOut[B]) - sum(sum(model.Pijy[i,B,y,t] for y in model.Y)
    for i in model.OBIn[B]) + sum(model.P0[B,j,t] for j in
    model.OBOut[B]) - sum(model.P0[i,B,t] for i in model.OBIn[B])
    == 0
```

```
model.balance_activa = Constraint(model.OB,
model.T,rule=balance_activa_rule)
```

```
def flujo_pot(model, i,j,t):
```

```
    return model.P0[i,j,t] == (model.n0[i,j])*((model.th[i,t]-
    model.th[j,t])/model.x[i,j])
```

Restricciones

```
model.FLUJO_POT = Constraint(model.OL,
model.T,rule=flujo_pot)
```

```
def flujo_P0_min(model, i,j,t):
```

```
    return - (model.n0[i,j]*model.Plmax[i,j]) <= model.P0[i,j,t]
```

```
model.Flujo_P0_MIN = Constraint(model.OL,
model.T,rule=flujo_P0_min)
```

```
def flujo_P0_max(model, i,j,t):
```

```
    return model.P0[i,j,t] <= (model.n0[i,j]*model.Plmax[i,j])
```

```
model.Flujo_P0_MAX = Constraint(model.OL,model.T,
rule=flujo_P0_max)
```

**Tabla 8.84** Código de Programación Modelo Disyuntivo Dinámico (Multietapa) en PYOMO (Parte D).

Restricciones	<pre> def flujo_ji(model, i,j,y,t):      return -M*(1 - model.w[i,j,y,t]) &lt;= model.Pijy[i,j,y,t]*model.x[i,j] - (model.th[i,t]-model.th[j,t])  model.Flujo_ji_linea = Constraint(model.OL, model.Y, model.T, rule=flujo_ji)  def flujo_ij(model, i,j,y,t):      return model.Pijy[i,j,y,t]*model.x[i,j] - (model.th[i,t]- model.th[j,t]) &lt;= M*(1 - model.w[i,j,y,t])  model.Flujo_ij_linea = Constraint(model.OL, model.Y, model.T, rule=flujo_ij)  def flujo_ji_p(model, i,j,y,t):      return -(model.w[i,j,y,t])*model.Plmax[i,j] &lt;= model.Pijy[i,j,y,t]  model.Flujo_linea_ji = Constraint(model.OL, model.Y, model.T, rule=flujo_ji_p)  def flujo_ij_p(model, i,j,y,t):      return model.Pijy[i,j,y,t] &lt;= (model.w[i,j,y,t])*model.Plmax[i,j]  model.Flujo_linea_ij = Constraint(model.OL, model.Y, model.T, rule=flujo_ij_p)  def s_lineas1(model, i,j,y,t):      return model.w[i,j,y,t] &lt;= model.w[i,j,y-1,t] if y &gt; 1 else Constraint.Skip  model.SEC_LINEAS1 = Constraint(model.OL, model.Y, model.T, rule=s_lineas1) </pre>
---------------	---

**Tabla 8.85** Código de Programación Modelo Disyuntivo Dinámico (Multietapa) en PYOMO (Parte E).

```
def s_lineas(model, i,j,y,t):  
  
    return model.w[i,j,y,t-1] <= model.w[i,j,y,t] if t > 1 else  
Constraint.Skip  
  
model.SEC_LINEAS = Constraint(model.OL, model.Y, model.T,  
rule=s_lineas)  
  
def MinPg(model, i,t):  
  
    return model.Pgmin[i,t]<=model.Pg[i,t]  
  
model.Min_Pg = Constraint(model.OB, model.T, rule=MinPg)  
  
def MaxPg(model, i,t):  
  
    return model.Pg[i,t]<=model.Pgmax[i,t]  
  
model.Max_Pg = Constraint(model.OB, model.T, rule=MaxPg)  
  
def limite_lineas(model, i,j,t):  
  
    return sum(model.w[i,j,y,t] for y in model.Y) <= model.nmax[i,j]  
  
model.LIMITE_LINEAS = Constraint(model.OL, model.T,  
rule=limite_lineas)
```

**Tabla 8.86** Código de Programación Modelo Disyuntivo Dinámico (Multietapa) en PYOMO (Parte F).

Fin del conteo de tiempo de ejecución	<pre>end = time.perf_counter()</pre>
Ejecución del código usando Solvers locales instalados en el computador	<pre>opt = SolverFactory('cplex') data = DataPortal() data.load(filename='DATOS.dat', model=model) instance = model.create_instance('DATOS.dat') results = opt.solve(instance,tee=False) instance.display() print('Modelo de Transporte') print('Función Obj = ', instance.costlineas()) print("Tiempo de ejecución: ", end - start)</pre>
Ejecución del código usando Solvers pertenecientes a NEOS	<pre>data = DataPortal() data.load(filename='DATOS.dat', model=model) instance = model.create_instance('DATOS.dat') opt = SolverFactory("cbc") solver_manager = SolverManagerFactory('neos') results = solver_manager.solve(instance, opt=opt) #results.write() instance.display() print('Modelo de Transporte') print('Función Obj = ', format(round(instance.costlineas(),5))) print("Tiempo de ejecución: ", end - start)</pre>

8.5 ANEXO E

DIAGRAMAS DE FLUJO DE LOS PROGRAMAS COMPUTACIONALES

8.5.1 Diagrama de flujo software AMPL

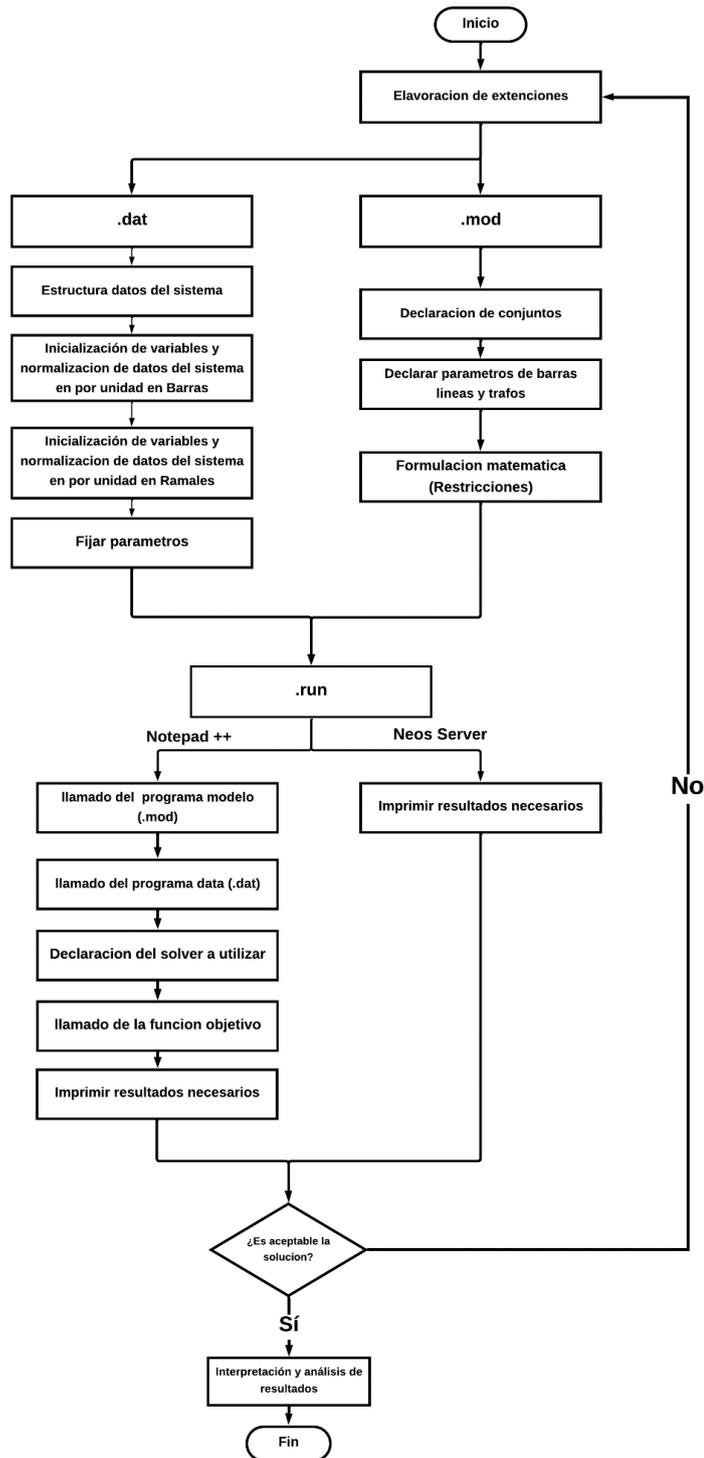


Figura 8.4 Diagrama de flujo de la programación AMPL.

### 8.5.2 Diagrama de flujo software GAMS

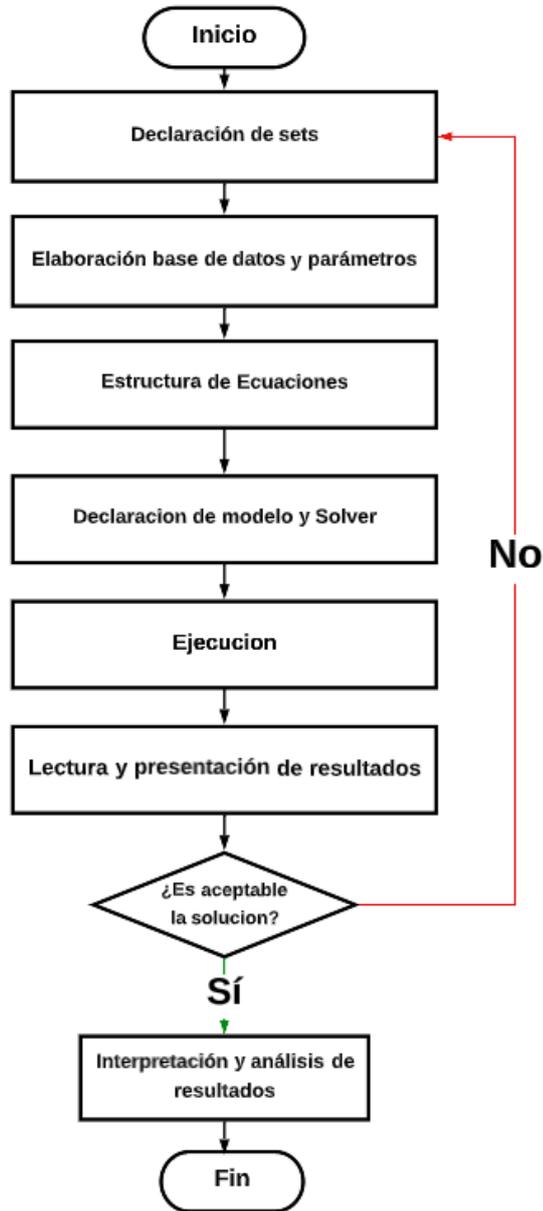


Figura 8.5 Diagrama de flujo de la programación GAMS.

8.5.3 Diagrama de flujo software Python (PYOMO)

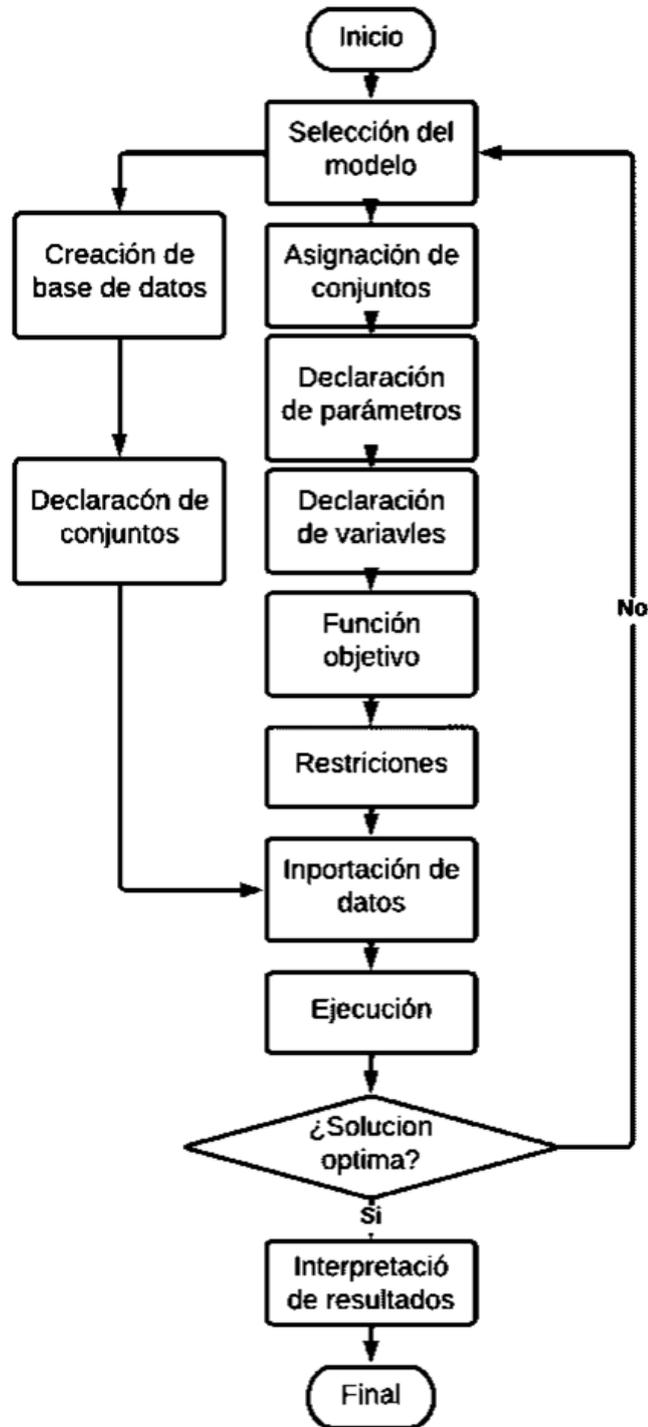


Figura 8.6 Diagrama de flujo de la programación PYOMO.

## 8.6 ANEXO F

### MANUAL DE USO DE LOS DIFERENTES PROGRAMAS COMPUTACIONALES

#### 8.6.1 Manual software AMPL

Esta guía es desarrollada con el fin de uso con fines académicos sobre el programa de simulación y modelación matemática en el lenguaje AMPL esto centrado al ámbito de energía eléctrica y problemas de optimización, el manual explica todo el proceso de instalación del editor de texto y de código fuente Notepad++ del cual es útil para el lenguaje AMPL y la estructura de su lenguaje continuando con la presentación de la estructura de programación.

##### 8.6.1.1 Instalación AMPL

**PASO 1:** Entrar en la dirección (<https://portal.AMPL.com/account/AMPL/signup>), una vez ingresado nos despliega la siguiente ventana como se aprecia en la Figura 8.7 donde ingresamos los datos personales para iniciar sesión.

Foro AMPL Recursos AMPL



- ✔ **Paso 1: Descargue AMPL y Solvers**  
 Obtenga los binarios más recientes para su máquina y para la nube.
- ✔ **Paso 2: active su licencia**  
 Active su Community Edition u otra licencia.
- ✔ **Paso 3: Administre sus licencias**  
 Inicie pruebas comerciales de solver. Mover licencias entre máquinas.

#### Crea tu cuenta AMPL

G Regístrate con Google

G Regístrate con GitHub

Correo electrónico:

Contraseña:

Nombre de pila:

Apellido:

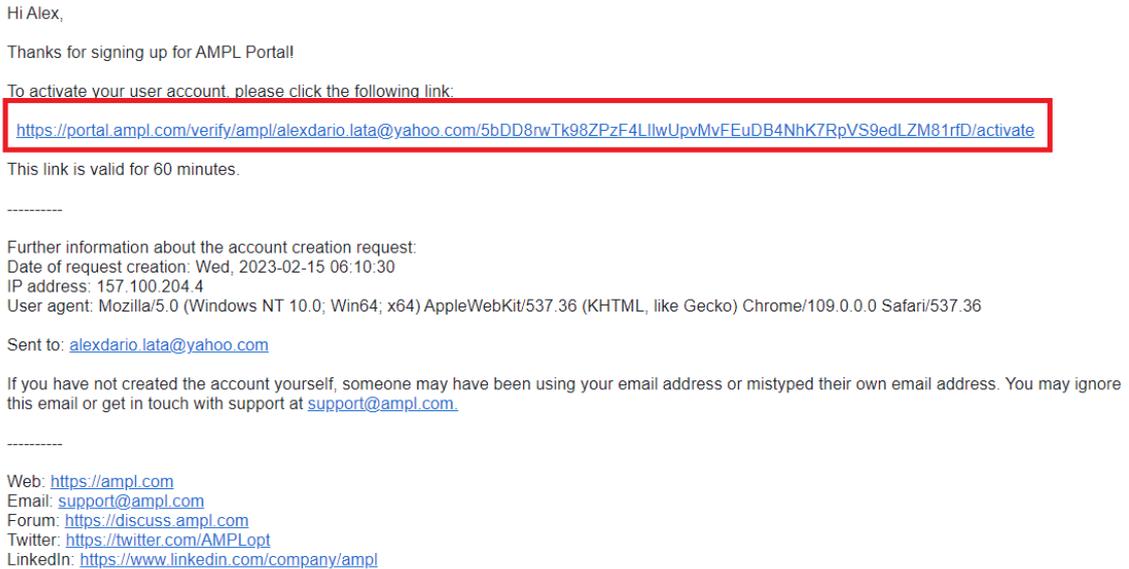
✔ No soy un robot
 reCAPTCHA  
Privacidad - Términos

Continuar

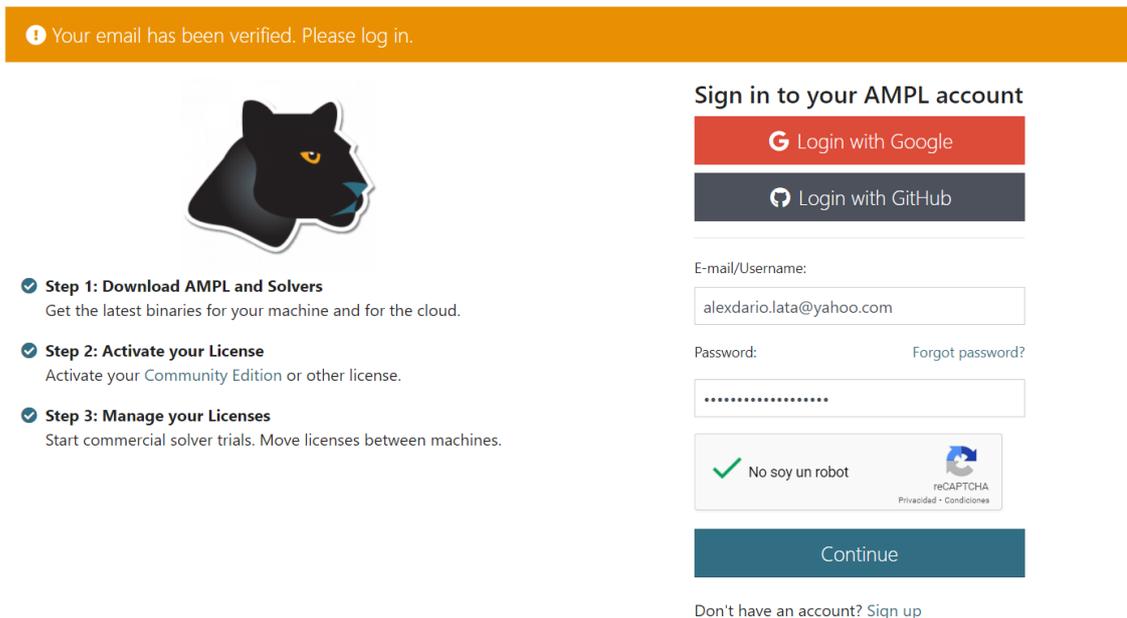
**Figura 8.7** Plataforma APMPL (iniciar sesión)

Verificamos el correo electrónico en nuestra bandeja de correos recibidos que nos llega un link de confirmación de correo electrónico verídico como se parecía en la Figura 8.8, damos clic

izquierdo y nos despliega una ventana donde podemos iniciar sección para abrir la plataforma como se aprecia en la Figura 8.8.



**Figura 8.8** Link de confirmación de correo electrónico.



**Figura 8.9** Iniciar sección con su correo electrónico asociado.

**PASO 2:** Entramos en la plataforma de AMPL en este apartado se procede a descargar en su edición gratuita para Windows como se aprecia en la Figura 8.10.

Las cadenas de herramientas de optimización más rápidas ejecutan AMPL

Descargue su edición gratuita de la comunidad AMPL | Precios Comerciales

AMPL ahora es gratuito para uso permanente con solucionadores de código abierto como CBC, HiGHS, Couenne AMPL Community Edition.

**Ecosistema AMPL**

**Integración:** Python, R, Gurobi, CPLEX, Xpress, COPT, AMPL

**Conectores de datos:** CSV, Excel, SQL Server, MySQL, PostgreSQL

**Interfaces:** JupyterLab, CO, VS Code

**Solucionadores comerciales:**

- Lineal: Gurobi, CPLEX, Xpress, COPT
- No lineal: Artley's Knitro, CONOPT, LOQO, MINOS, SNOPT
- Global: BARÓN, LGO, LINDO Global, OCTERACT

**Solucionadores de código abierto:** HiGHS, CBC, Couenne, Ipopt, Bonmin

**Solucionadores de NEOS:** Solucionadores NEOS (incluidos los solucionadores comerciales), directamente en AMPL a través de la interfaz Kestrel

**¿Qué otra cosa?**

- Colaboratorio Modelo AMPL ¡nuevo! impulsado por nuestra API de

AMPL is not Google Colab

Find ideas, join the community and even self-promote your work!

colab.ampl.com

Figura 8.10 Descargar AMPL en su edición gratuita para Windows.

**PASO 3:** Luego de descargar AMPL copiamos la licencia DEMO que nos entrega y pegamos en un block de notas de nuestra computadora como se aprecia en la Figura 8.11.

Paso 1: Descarga AMPL y solucionadores

Windows | Linux | Mac OS | Colaboración de Google | Python

Descargar AMPL & Solvers para Windows | Instrucciones de instalación para Windows

Paso 2: Activa tu licencia

Su UUID de licencia único es: **a2a6950a-e3c6-4400-98c7-c362eb4cd0b2** (¡No comparta esto públicamente!)

Ejecute este comando en AMPL para activar su licencia (copiar al portapapeles)

```
AMPL: shell "AMPLkey activar --uuid a2a6950a-e3c6-4400-98c7-c362eb4cd0b2";
# nota: debe reiniciar AMPL para comenzar a usar la nueva licencia
```

Esta es una licencia de nube dinámica que se renueva cada 5 minutos a través de Internet. ¡Actívalo en cualquier lugar en tantas más como necesite! También puedes usar esta licencia en Google Colab o con Docker Containers. La licencia es personal y no debe ser co

Paso 3: Administre sus pruebas de Solver

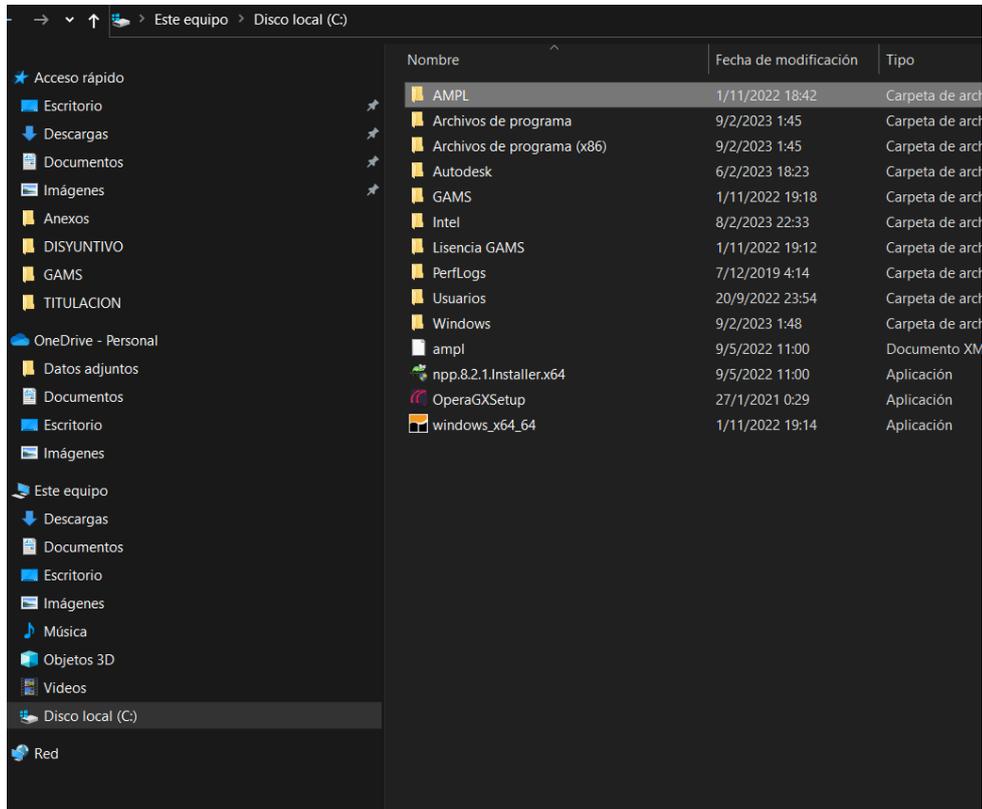
Primero, asegúrese de que su perfil esté actualizado:

Nombre de pila:  Apellido:

Empresa/Universidad:  Su uso previsto:

Figura 8.11 Copiamos la licencia DEMO que nos entrega AMPL.

**PASO 4:** Una vez que se extrae el programa se da clic derecho en el zip y se lo extrae, esta carpeta es un portable, se debe cambiarle el nombre de “AMPL.mswin###” a “AMPL”, carpeta que se cortará del directorio de descargas y se ubicará en el disco local C una vez que se le haya cambiado el nombre, en la ubicación que muestra la Figura 8.12. Ejecutamos el programa “AMPL” para pegar el apartado que se copió previamente y se guardó en un “.txt”, como se aprecia en la Figura 8.13.



**Figura 8.12** Dirección a pegar la carpeta extraída del zip descargado desde el sitio oficial de AMPL.

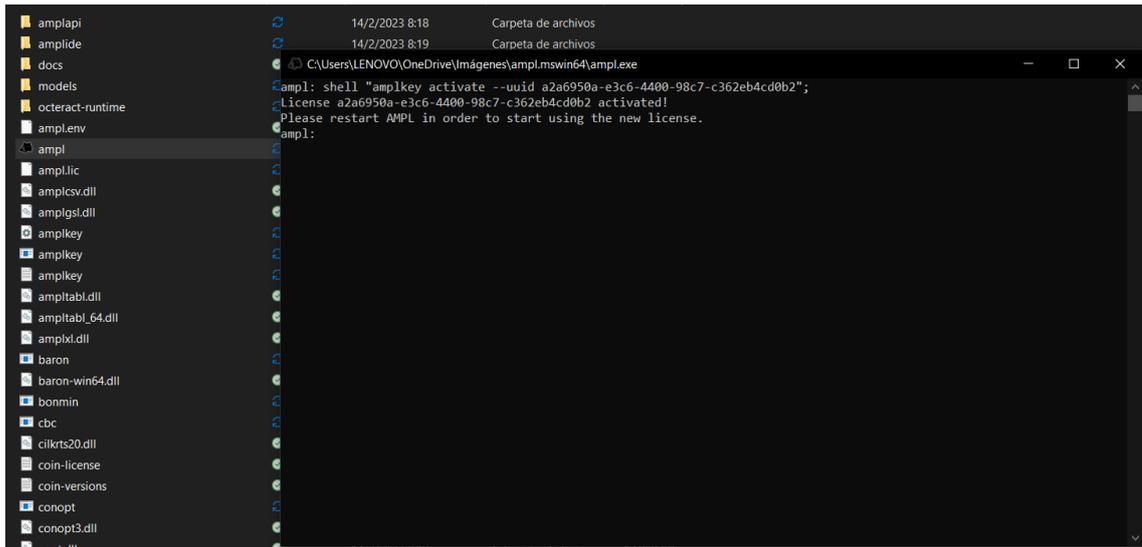


Figura 8.13 Aplicación de licencia DEMO para AMPL.

**PASO 5:** Se añade la una variable nueva al sistema, para esto se debe tener en cuenta la dirección en la que se colocó la carpeta de AMPL, según el paso 4 la dirección es C:\AMPL. Una vez identificada la dirección se va la dirección Equipo y se da clic derecho en propiedades como se muestra en la Figura 8.14.

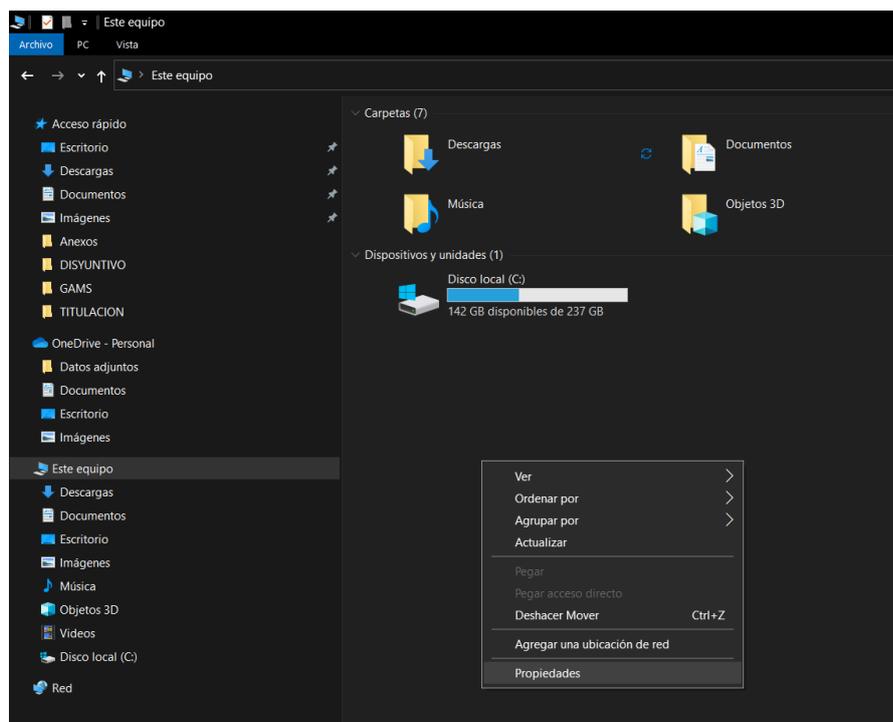
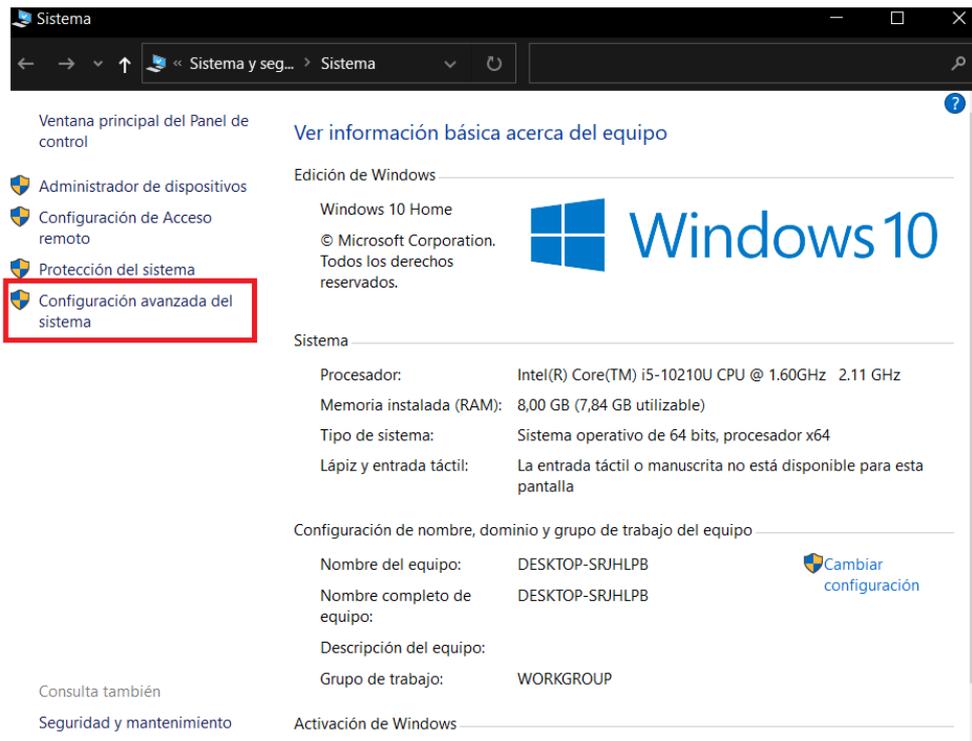


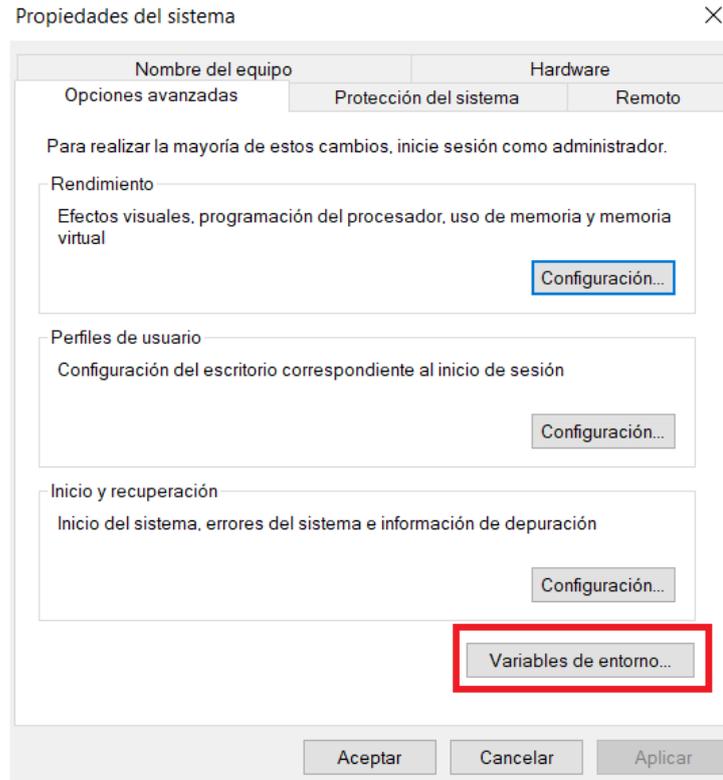
Figura 8.14 Acceder a las propiedades del equipo, primera parte para añadir una variable al sistema.

Una vez que se ingresa a las propiedades del equipo, en la parte superior izquierda de la ventana, se elige la opción, **Configuración avanzada del sistema**. En la ventana que surge se debe dar

clic sobre la opción previamente mencionada se debe seleccionar la sección Variables de entorno, todo esto mostrado en Figura 8.15 y Figura 8.16.

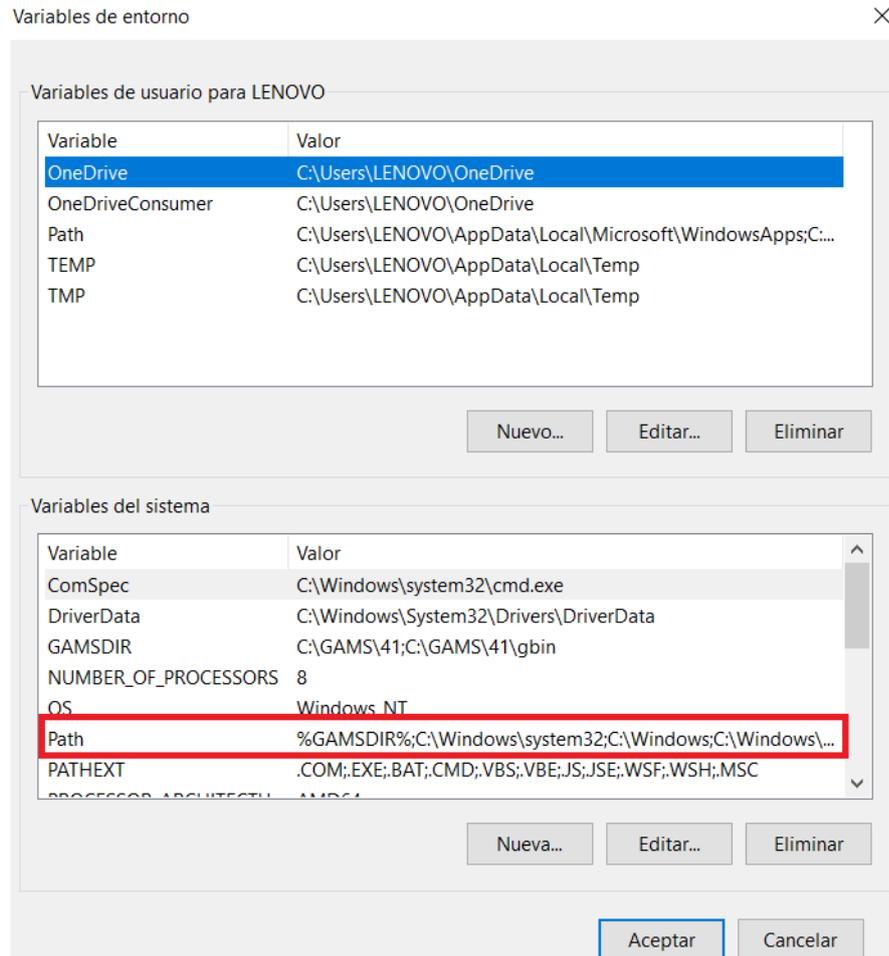


**Figura 8.15** Acceder a la configuración avanzada del sistema, segunda parte para añadir una variable al sistema.

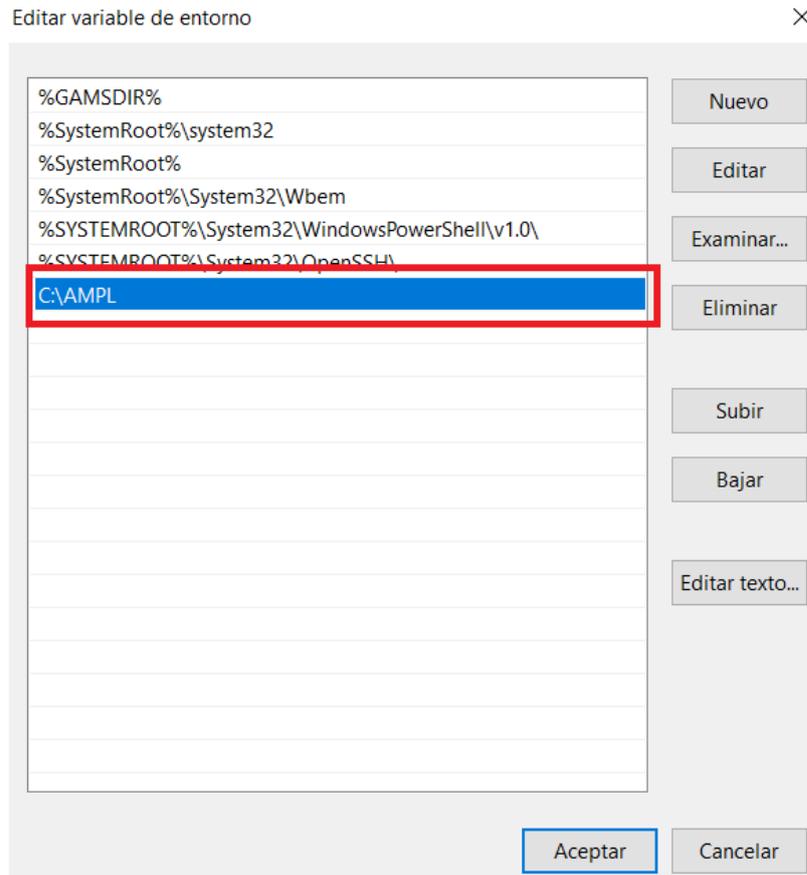


**Figura 8.16** Definir una variable en el entorno de Windows, tercera parte para añadir una variable al sistema.

De manera final, en la ventana que surge se busca la opción “Path”, en la ventana inferior denominada Variables del sistema, se da clic en Editar y en la ventana que aparece se da clic en Nuevo, la cual a su vez hará que se cree una nueva línea en la cual escribir la variable del sistema, en donde se pondrá la dirección de AMPL (véase en la Figura 8.17 y Figura 8.18).



**Figura 8.17** Definir una variable del sistema en Path, cuarta parte para añadir una variable al sistema.



**Figura 8.18** Definir como variable del sistema a AMPL mediante su ubicación en el disco.

### 8.6.1.2 Instalación NOTEPAD ++

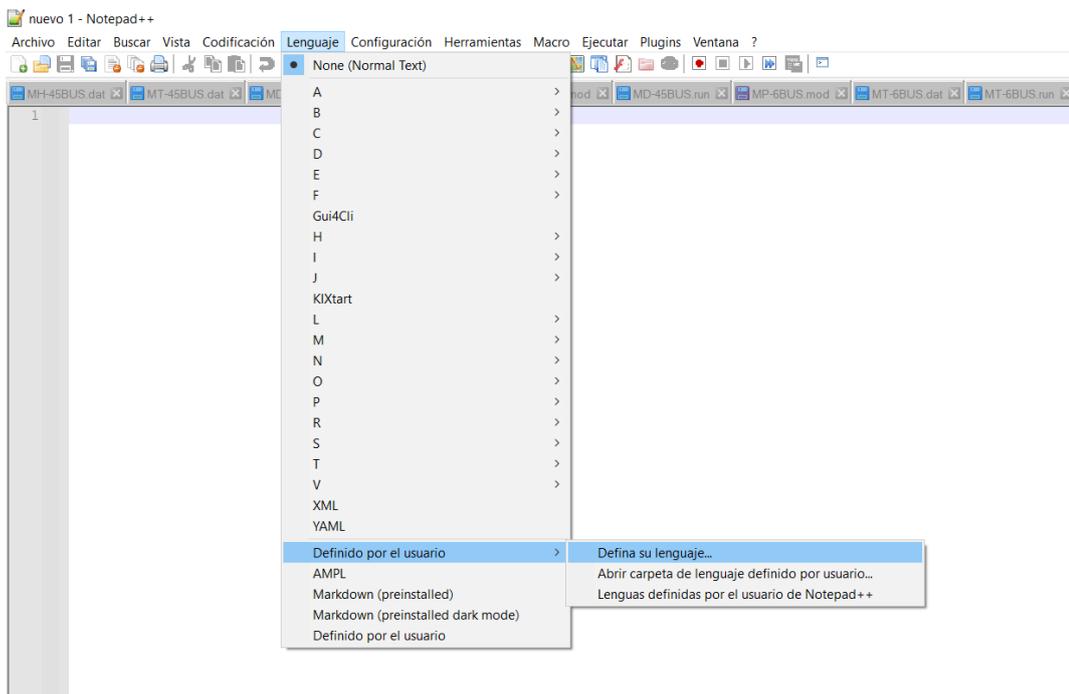
**PASO 1:** Entrar en la dirección (<https://notepad-plus-plus.org/downloads/>) y descargar la versión que el usuario desee, como recomendación se anima a descargar la versión más reciente según los bits de su máquina (32 o 64 bits), mostrado en la Figura 8.19.



**Figura 8.19** Instalador de Notepad++ desde su página oficial.

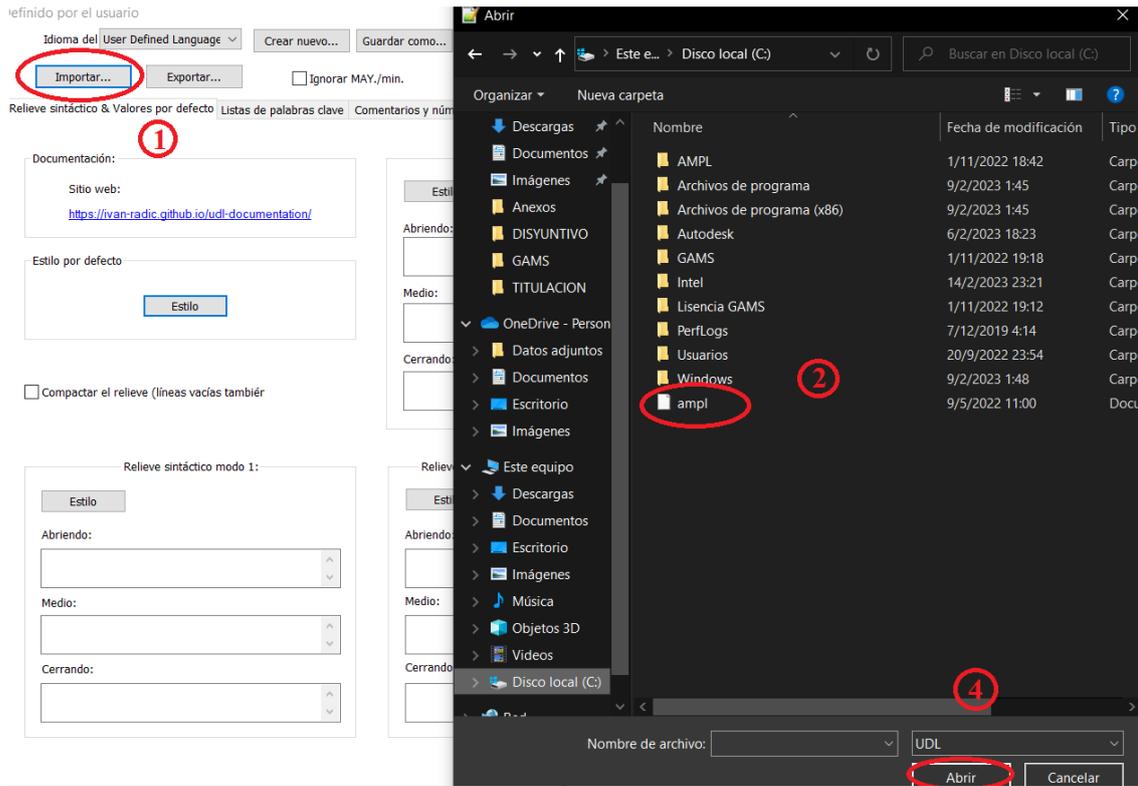
**PASO 2:** Descargar el archivo de vínculo de AMPL desde el siguiente link: (<https://www.dropbox.com/s/sfdlgajcfcgahl0d/AMPL.xml?dl=1>).

**PASO 3:** Ingresar el lenguaje de AMPL a Notepad++, para esto una vez instalado el Notepad++ se lo abre y en la cinta de opciones (segunda fila) se busca la opción “Lenguaje” o su equivalente en inglés, dependiendo del idioma en el que se haya instalado el programa, luego se selecciona Lenguaje Definido por el usuario > Defina su lenguaje, tal como se muestra en la figura 10. Después, se da clic en la parte superior izquierda de la ventana que surge en Importar, una vez dado clic sobre esta opción se buscará el archivo que se descargó en el paso 2, el cual estará en la carpeta de descargas del computador o en la dirección que el usuario la haya guardado mostrado en Figura 8.20 y Figura 8.21.



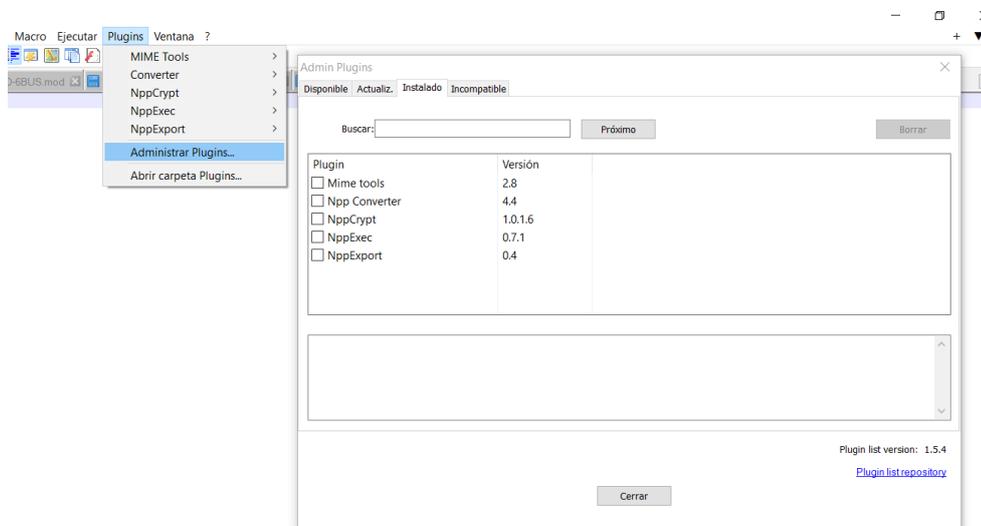
**Figura 8.20** Definir lenguaje de AMPL en Notepad++. Figura obtenida del *software*.

**PASO 4:** Verificar que en el Notepad++ aparezca el lenguaje de AMPL en la opción Lenguaje de la cinta de opciones, tal como se muestra en la Figura 8.20 debajo de la sección “Definido por el usuario”. En caso de que no aparezca, una vez que se haya realizado el paso 3 se debe cerrar el programa y volverlo abrir, al hacer esto el lenguaje AMPL debería aparecer tal como se muestra en la Figura 8.20.



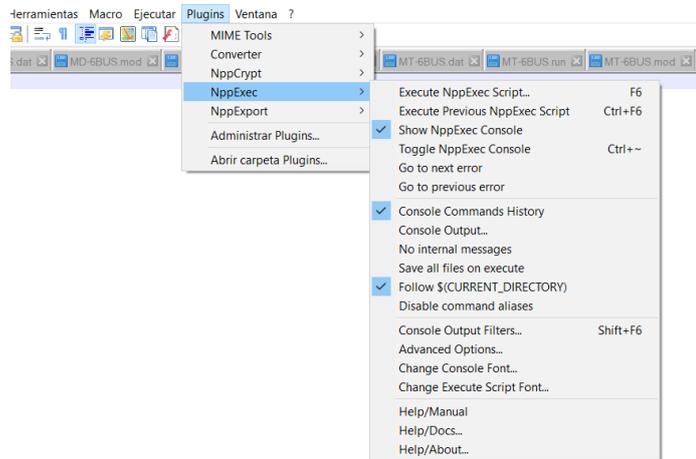
**Figura 8.21** Importar archivo del lenguaje de AMPL a Notepad ++ en la dirección determinada por el usuario (diferente a la carpeta de descargas). Figura obtenida de Notepad++

**PASO 5:** Instalar los *plugins*, para hacerlo dirigirse a la opción que muestra la Figura 8.22, en la sección Disponible buscar los *plugins* mostrados en la Figura 8.22, e instalarlos en caso de no contar con ellos en el programa.



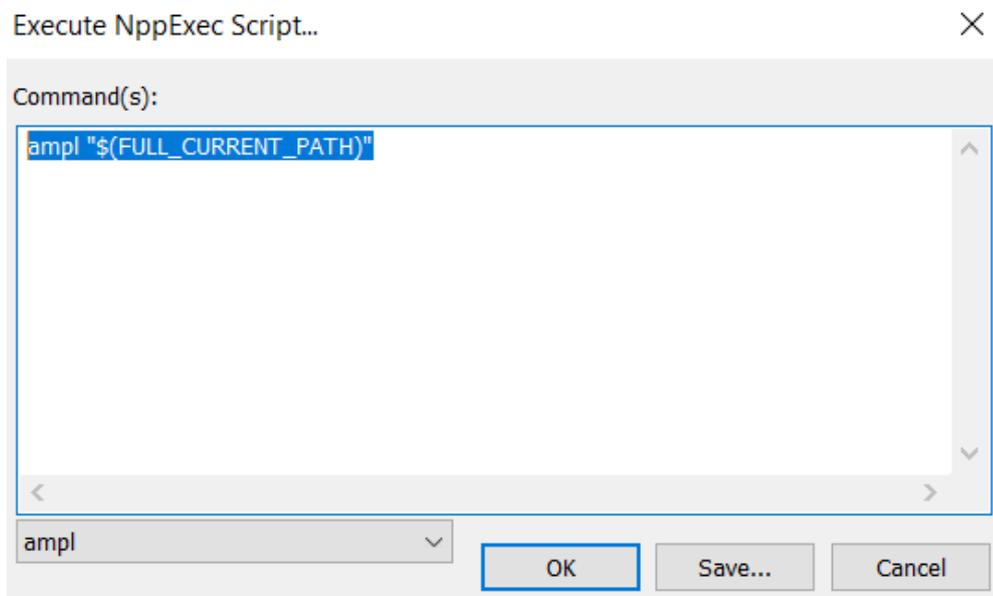
**Figura 8.22** Administrador de *Plugins* de Notepad++ . Figura obtenida del *software* Notepad++.

**PASO 5:** Una vez instalado los *plugins* en la dirección *Plugins > NppExec* activar la opción **Follow \$(CURRENT\_DIRECTORY)**, tal como se muestra en la Figura 8.23.



**Figura 8.23** Activar opción Follow del plugin NppExec. Figura obtenida de Notepad++

**PASO 5:** Apretar la tecla F6 (computadoras de escritorio) o la combinación de teclas Fn+F6 (laptops), para que abra la opción del comando de Notepad++ y en el escribir lo siguiente: `AMPL "$$(FULL_CURRENT_PATH)"`, no omita las comillas de `$(FULL_CURRENT_PATCH)`, luego de esto se da clic en guardar con el nombre de AMPL, como se muestra en la Figura 8.24.



**Figura 8.24** Programación final para vincular AMPL con Notepad++.

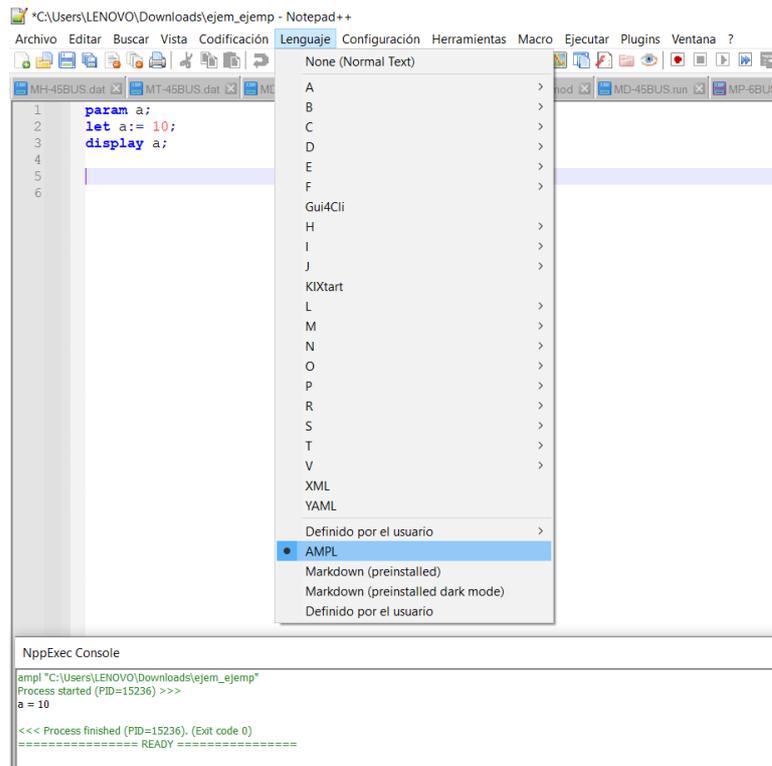
**PASO 5:** Probar el programa con las siguientes líneas de código:

param a;

let a:= 10;

display a;

Deberá mostrarse el número 10 en la Ventana de comando de AMPL, tal como muestra la



**Figura 8.25** Verificación de vínculo con el *software*. Figura obtenida mediante el *software* Notepad++.

Cada vez que cree un archivo nuevo mediante Notepad++, verifique que el lenguaje que se está usando es AMPL, tal como lo indica la Figura 8.25. Sabrá que está utilizando el lenguaje de AMPL en Notepad++ debido a que las palabras claves del sistema se encontrarán marcadas con azul, las letras con negro y los números con rojo, de esta forma la interfaz para programar es más amigable ya que se previenen errores.

### 8.6.1.3 Programación y estructura del código

AMPL es un lenguaje de modelado algebraico para programación matemática un lenguaje capaz de expresaren notación algebraica problemas de optimización tales como los problemas de programación lineal [33].

Los modelos AMPL en vuelven variables, restricciones, y objetivos, expresados con la ayuda de conjuntos y parámetros. A todos se les llama elementos del modelo. Cada elemento del modelo tiene un nombre alfanumérico (una cadena de uno o más letras, dígitos, y caracteres de subrayado).

- Las letras mayúsculas son distintas de las letras minúsculas en AMPL. Existen dos tipos de constantes:
- Cada línea de instrucciones debe ir finalizada con un punto y coma (;). Los comentarios comienzan con # y se extienden hasta el final de la línea, o se pueden delimitar entre /\* y \*/, en cuyo caso pueden extenderse más de una línea.

#### Estructura del Modelo

Se escribe el modelo en un archivo de texto y se guarda como “\_\_\_\_\_ .mod”, para este apartado de divide en la siguiente estructura mostrada en la Tabla 8.87.

**Tabla 8.87** Estructura del modelo y descripción [33].

Bloque	Nombre del Bloque
Conjuntos	Set
Parámetros	Param
Variables	Var
Función Objetivo	minimize o maximize
Restricciones	subject to

#### Declaración de conjuntos

La declaración de un conjunto del modelo tiene el siguiente formato general:

$$\mathit{set} \text{ nombre} [\mathit{alias}] [\mathit{exp. idexada}] [\mathit{atributos}]; \quad (56)$$

Un ejemplo de cómo se declara los conjuntos en la línea de código en el lenguaje AMPL se puede apreciar en la Figura 8.26, donde es una declaración de conjuntos para el modelo de transporte usando el sistema Garver (6 Barras) código completo en el ANEXO D.

```
set OB;
set OL within 1..9999 cross OB cross OB;
```

**Figura 8.26** Declaración de conjuntos en AMPL.

En la Tabla 8.88, muestra una lista de atributos opcionalmente separada por comas. Los cuales pueden ser (**sexpr** indica una expresión de conjuntos):

**Tabla 8.88** Lista de atributos opcionalmente [33].

Atributo	Descripción
<i>dimen n</i>	Dimensión “n”
<i>within sexpr</i>	Dentro de “expresión del conjunto”
<i>:= sexpr</i>	Idéntico “expresión del conjunto”
<i>default sexpr</i>	Por defecto “expresión del conjunto”

La frase *:=* especifica un valor para el conjunto; esto implica que el conjunto no será definido posteriormente en una línea de instrucciones específica para datos (*:= y default* son mutuamente exclusivas) [33]. El conjunto vacío se indica con: {}. Existe la función *card(S)* la cual da el número de elementos del conjunto S, también se pueden realizar operaciones entre conjuntos, como se aprecia en la Tabla 8.89:

**Tabla 8.89** Declaración de conjuntos.

Operación	Descripción
<i>set A := 1..n;</i>	De a hasta “n”
<i>set B := 1..i by k;</i>	i por k
<i>set A := A diff B;</i>	A diferente que B
<i>set A := A union B;</i>	A unido a B
<i>set A := A inter B;</i>	A interno a B

Se pueden definir conjuntos con infinitos elementos (**Nota:** no se puede iterar sobre conjuntos infinitos), los clásicos intervalos cerrados, abiertos o semicerrados, bien de números reales (*interval [a, b]*) o bien de números enteros (*integer [a, b]*). **Nota:** la palabra *interval* puede omitirse.

### Declaración de parámetros

La declaración de un conjunto del modelo tiene el siguiente formato general:

$$param\ nombre\ [alias]\ [exp.\ idexada]\ [atributos]; \quad (57)$$

Un ejemplo de cómo se declara los parámetros en el lenguaje AMPL se puede apreciar en la Figura 8.27, todo esto para el modelo de transporte con el sistema Garver (6 Barras) código completo en el ANEXO D.

```
#Declarar parametros
param Sbase;
#Declarar parametros de las barras
param Nombre{OB}symbolic;
param Tb{OB};
param Pd{OB};
param Pgmax{OB};
param Pgmin{OB};
param th0{OB};
#Declarar parametros de lineas
#y transformadores
param x{OL};
param Cl{OL};
param n0{OL};
param nmax{OL};
param Plmax{OL};
```

Figura 8.27 Declaración de parámetros en el lenguaje AMPL.

En la Tabla 8.90 muestra una lista de atributos opcionalmente separada por comas. Los cuales pueden ser (*sexpr* indica una expresión de conjuntos):

**Tabla 8.90** Lista de atributos opcionales [33].

Atributos	Descripción
<i>binary</i>	Binario
<i>integer</i>	Entero
<i>symbolic</i>	Simbología
<i>in sexpr</i>	El atributo in especifica un chequeo para ver que el parámetro se encuentra en el conjunto dado
<i>oprel expr</i>	donde “oprel” puede ser: < <= = == != <> > >=
<i>:= expr</i>	Igual “expresión de conjuntos”
<i>default expr</i>	Por defecto “expresión de conjuntos”

### Declaración de variables

La declaración de un conjunto del modelo tiene el siguiente formato general:

$$\text{var nombre [alias] [exp.indexada] [atributos];} \quad (58)$$

Un ejemplo de cómo se declara las variables en el lenguaje AMPL se puede apreciar en la Figura 8.28, donde se encuentra la declaración de variables, para el modelo de transporte usando el sistema Garver (6 Barras) código completo en el ANEXO D.

```
#Declarar variables
var Pg{OB};
var Pij{OL};
var n{OL} integer;
```

**Figura 8.28** Declaración de variables.

En la Tabla 8.91, encontramos una lista de atributos opcionalmente separada por comas. Los cuales pueden ser (*vexpr* indica una expresión de variables):

**Tabla 8.91** Lista de atributos opcionalmente [33].

Operadores	Función
<b>binary</b>	Variable Binaria
<b>integer</b>	Variable Entera
<b>&gt;= <i>expr</i></b>	Para decir que es mayor o igual que
<b>&lt;= <i>expr</i></b>	Para señalar que es menor o igual que
<b>:= <i>expr</i></b>	Indica un valor inicial
<b>= <i>expr</i></b>	Para decir que es exactamente igual (=)
<b><i>default expr</i></b>	Indica los valores iniciales por defecto
<b><i>coeff</i> [exp.indexada]restriccion <i>vexpr</i></b>	Las frases <i>coeff</i> y <i>obj</i> se utilizan para la generación de coeficientes por columnas; estas especifican los coeficientes que serán colocados en la restricción indicada u objetivo indicado, el cual debe ser previamente referenciado usando to come. Una frase <i>cover</i> es equivalente a la frase <i>coeff</i> pero con <i>vexpr</i> igual a 1.
<b><i>cover</i> [exp.indexada]restriccion</b>	
<b><i>obj</i>[exp.indexada] objetivo <i>vexpr</i></b>	

### Declaración de restricciones.

La declaración de una restricción del modelo tiene el siguiente formato general:

$$\begin{aligned} &[subject\ to] nombre [alias] [exp.indexada] [:=\ dual - -inic] \\ &[default\ dual - -inic] [: expr\ restriccion]; \end{aligned} \quad (59)$$

La frase opcional  $:= dual - -inicial$  especifica un valor inicial para la variable dual (multiplicador de Lagrange) asociado con la restricción. La expresión de restricción debe estar en uno de los siguientes formatos mostrados en la Tabla 8.92:

**Tabla 8.92** Formatos de restricción [33].

Operadores
$vexpr \leq vexpr$
$vexpr = vexpr$
$vexpr \geq vexpr$
$expr \leq vexpr \leq expr$
$expr \geq vexpr \geq expr$

Un ejemplo de cómo se declara las restricciones en líneas de código en el lenguaje AMPL se puede apreciar en la Figura 8.29, donde está la estructura, para el modelo de transporte usando el sistema Garver (6 Barras) código completo en el ANEXO D.

```
#Restricciones
#Balance de Potencia Activa
subject to balance_activa{i in OB}:
Pg[i]-Pd[i]+sum{(k,j,i) in OL}Pij[k,j,i]-sum{(k,i,j) in OL}Pij[k,i,j]=0;
#La cargabilidad maxima de la linea
#(dividida en dos partes por existe 2 variables a los dos lados)
#Parte 1
subject to Flujo_ji_linea {(k,i,j) in OL}:
-(n0[k,i,j]+n[k,i,j])*Plmax[k,i,j]<=Pij[k,i,j];
#Parte 2
subject to Flujo_ij_linea {(k,i,j) in OL}:
Pij[k,i,j]<=(n0[k,i,j]+n[k,i,j])*Plmax[k,i,j];
#Limites de potencia generada
subject to MaxMin_Pg {i in OB}:
Pgmin[i]<=Pg[i]<=Pgmax[i];
#Limite de lineas nuevas del ramal
subject to limite_lineas {(k,i,j) in OL}:
0<=n[k,i,j]<=nmax[k,i,j];
```

**Figura 8.29** Declaración de restricciones en líneas de código en el lenguaje AMPL.

### Expresiones Aritméticas, lógicas y de conjuntos

Las expresiones aritméticas son construidas con los operadores aritméticos usuales, con funciones de AMPL, y con operadores de reducción aritméticos existen ciertas expresiones que incorporadas como se observa en la Figura 8.30 y por incorporar mostrada en la Tabla 8.93 que se debe tener en cuenta al momento de la programación en este lenguaje Las funciones aritméticas incorporadas en AMPL se muestran en las figuras

**Tabla 8.93** Operadores aritméticos (A), lógicos (L) y de conjuntos (S) [33].

Nombre	Tipo	Notas
<i>if ... then ... else</i>	A	A: si no hay <b>else</b> , se supone <b>else 0</b>
	S	S: es obligatorio <b>else</b> sexpr
<i>or,   </i>	L	o lógico
<i>Exists, forall</i>	L	operadores de reducción lógica
<i>and, &amp;&amp;</i>	L	y lógico
<, <=, =, ==, <>, =!, >=, >	L	operadores relacionados
<i>In, not, within</i>	L	Pertenencia a un conjunto
<i>within, not within</i>	L	S within T significa $S \subseteq T$
<i>not, !</i>	L	negativa lógica
<i>unión, diff, symdiff</i>	S	<b>symdiff</b> es la diferencia simétrica
<i>inter</i>	S	intersección
<i>cross</i>	S	producto cartesiano
<i>setof .. by</i>	S	constructor de conjuntos
<i>+, -, less</i>	A	a <b>less</b> $b = \max(a - b, 0)$
<i>Sum, prod, min, max</i>	A	operadores de reducción aritmética
<i>*, /, div, mod</i>	A	<b>div</b> consciente entero
<i>+, -</i>	A	más y menos unario
<i>^, **</i>	A	exponenciación

En el entorno AMPL existen ciertas expresiones que incorporadas y por incorporar que se debe tener en cuenta al momento de la programación en este lenguaje Las funciones aritméticas incorporadas en AMPL se muestran en las Figura 8.31.

Sintaxis	Significado
Beta(a,b)	$x^{a-1}(1-x)^{b-1}/(\Gamma(a)\Gamma(b)/\Gamma(a+b)), x \in [0, 1]$
Cauchy()	$1/(\pi(1+x^2))$
Exponential()	$e^{-x}, x > 0$
Gamma(a)	$x^{a-1}e^{-x}/\Gamma(a), x \geq 0, a > 0$
Irand224()	Uniforme entera en $[0, 2^{24})$
Normal( $\mu, \sigma$ )	$N(\mu, \sigma)$ varianza
Normal01()	$N(0, 1)$
Poisson( $\mu$ )	$e^{-\mu}\mu^k/k!, k = 0, 1, \dots$
Uniform(m,n)	Uniforme[m, n)
Uniform01()	Uniforme[0, 1)

**Figura 8.30** Funciones de generación de var. aleatorias en AMPL [33].

<b>Sintaxis</b>	<b>Significado</b>
<code>abs(x)</code>	valor absoluto
<code>acos(x)</code>	$\cos^{-1}(x)$
<code>acosh(x)</code>	$\cosh^{-1}(x)$
<code>asin(x)</code>	$\sin^{-1}(x)$
<code>asinh(x)</code>	$\sinh^{-1}(x)$
<code>atan(x)</code>	$\tan^{-1}(x)$
<code>atan2(y,x)</code>	$\tan^{-1}(y/x)$
<code>atanh(x)</code>	$\tanh^{-1}(x)$
<code>ceil(x)</code>	entero mayor más cercano
<code>cos(x)</code>	coseno
<code>exp(x)</code>	exponencial
<code>floor(x)</code>	menor entero más cercano
<code>log(x)</code>	$\log_e(x)$
<code>log10(x)</code>	$\log_{10}(x)$
<code>max(x,y,...)</code>	máximo
<code>min(x,y,...)</code>	mínimo
<code>sin(x)</code>	seno
<code>sinh(x)</code>	seno hiperbólico
<code>sqrt(x)</code>	raíz cuadrada
<code>tan(x)</code>	tangente
<code>tanh(x)</code>	tangente hiperbólica
<code>precision(x,n)</code>	x redondeada a n cifras significativas
<code>round(x,n)</code>	x redondeado a n dígitos después del punto decimal
<code>round(x)</code>	x redondeado al entero más cercano
<code>trunc(x,n)</code>	x truncado a n dígitos después del punto decimal
<code>trunc(x)</code>	x truncado a un entero

Figura 8.31 Funciones aritméticas en AMPL [33].

### Declaración de función objetivo

La declaración de un objetivo del modelo tiene el siguiente formato general, en la Ecuación (60) muestra la función objetivo que nos ayuda a maximizar nuestro problema de optimización y caso contrario la Ecuación (61) nos ayuda a minimizar nuestro problema de optimización:

$$\textit{maximize nombre [alias] [exp.indexada] [: expresion] ;} \quad (60)$$

$$\textit{minimize nombre [alias] [exp.indexada] [: expresion] ;} \quad (61)$$

Un ejemplo de cómo se declara la función objetivo en líneas de código en el lenguaje AMPL y puede especificarse una expresión de la siguiente forma mostrada en la Figura 8.32, donde está

la estructura en este caso quiere optimizar en minimizar la función objetivo, para el modelo de transporte usando el sistema Garver (6 Barras) código completo en el ANEXO D:

```
#Funcion Objetivo
minimize Costo_lineas:
    sum{(k,i,j) in OL} (Cl[k,i,j]*n[k,i,j]);
```

Figura 8.32 Función Objetivo en AMPL

### Estructura del Data

Se escriben los datos en un archivo de texto y se guarda como “\_\_\_\_\_ .dat”. Para especificar la estructura del archivo de datos se tiene que clasificar que tipo de conjunto es el estamos manejando ya sea un unidimensional bidimensional o conjunto multidimensional, en este caso especificaremos un conjunto unidimensional y bidimensional utilizado en los distintos modelos como se aprecia en la Figura 8.33.

```
set OB := 1 2 3 4 5 6;
set OL:= 1.2 1.3 1.4 1.5 1.6 2.3 2.4 2.5 2.6 3.4 3.5 3.6 4.5 4.6 5.6;
```

Figura 8.33 Declaración de conjuntos a utilizar en el archivo “.dat”.

**Datos de parámetros:** Para la clasificación de los parámetros estos al igual que los conjuntos se dividen en tres que son los parámetros unidimensionales bidimensional o a su vez multidimensional. La forma más simple para dar datos para un parámetro indexado es por medio de una lista, a menudo necesitamos datos para varios parámetros que están indexados sobre el mismo conjunto, los dos puntos (:) después de la palabra clave param es obligatoria (indica que damos valores para varios parámetros), y se sigue con el nombre del conjunto “OB” y otros dos puntos (:) en esta situación puede escribirse como se aprecia en la Figura 8.34.

```
param Sbase := 100; # potencia base en MVA
# lectura de los datos de barra
param: OB: Nombre Tb Pd Pgmax Pgmin:=
# [MW] [MW] [MW]
1 "Bus_0001" 3 80.000 150.000 0.000
2 "Bus_0002" 0 240.000 0.000 0.000
3 "Bus_0003" 2 40.000 360.000 0.000
4 "Bus_0004" 0 160.000 0.000 0.000
5 "Bus_0005" 0 240.000 0.000 0.000
6 "Bus_0006" 2 0.000 600.000 0.000
;
```

Figura 8.34 Declaración de parámetros en el “.dat” una dimensión,

Cuando un parámetro esta indexado sobre un subconjunto poco denso de pares, una lista puede ser más compacta y legible que la representación tabular, la cual estaría formada mayoritariamente por puntos. El formato de lista es también más fácil de programar para generarla con programas externos.

Otra ventaja del formato lista es que, como en el caso unidimensional, los datos para varias componentes pueden darse juntos, esta tabla da simultáneamente la conexión entre Barras  $i,j$  enumerando en orden por un índice  $k$  esto expresado en el siguiente formato de la Figura 8.35.

```
# lectura de los datos de líneas y trafos
param: OL:
#      k      i      j      x      Cl      n0      nmax      Plmax :=
      [pu]    [MUSD]
1      1      2      0.400  40.000  1.000  3.000  100.000
2      1      3      0.380  38.000  0.000  3.000  100.000
3      1      4      0.600  60.000  1.000  3.000   80.000
4      1      5      0.200  20.000  1.000  3.000  100.000
5      1      6      0.680  68.000  0.000  3.000   70.000
6      2      3      0.200  20.000  1.000  3.000  100.000
7      2      4      0.400  40.000  1.000  3.000  100.000
8      2      5      0.310  31.000  0.000  3.000  100.000
9      2      6      0.300  30.000  0.000  3.000  100.000
10     3      4      0.590  59.000  0.000  3.000   82.000
11     3      5      0.200  20.000  1.000  3.000  100.000
12     3      6      0.480  48.000  0.000  3.000  100.000
13     4      5      0.630  63.000  0.000  3.000   75.000
14     4      6      0.300  30.000  0.000  3.000  100.000
15     5      6      0.610  61.000  0.000  3.000   78.000
;
```

**Figura 8.35** Declaración de parámetros en el “.dat” dos dimensiones.

En el último punto tenemos las inicializaciones de variables y normalización de las mismas, donde los valores que se encuentran en valores reales se les trasforma en (p.u.) como se aprecia en la Figura 8.36, tanto para el conjunto de ramales como para el conjunto de Barras estop para la utilización en el .mod con las respectivas restricciones.

```

#Inicialización de variables y normalizacion
#de datos del sistema en por unidad en el conjunto barras
for {i in OB}{
    let Pd[i]:= Pd[i]/Sbase;
    let Pgmax[i]:= Pgmax[i]/Sbase;
    let Pgmin[i]:= Pgmin[i]/Sbase;
}

#Inicialización de variables y normalizacion
#de datos del sistema en por unidad en el conjunto de ramales
for {(k,i,j) in OL}{
    let Plmax[k,i,j]:=Plmax[k,i,j]/Sbase;
    let Pij[k,i,j]:=0.0;
}

```

**Figura 8.36** Inicialización de variables y normalización “.dat”.

### Comandos de lenguaje

La llamada a AMPL normalmente causa la entrada en un entorno de comandos, donde los comandos pueden ser introducidos interactivamente. Las declaraciones del modelo y las instrucciones de introducción de datos son también aceptadas como comandos.

El entorno de comandos de AMPL reconoce dos modos. En modo **modelo**, reconoce las declaraciones del modelo y todos los comandos que se describirán a continuación. El otro modo es el modo **datos**, en el cual solo se reconocen instrucciones referentes a la introducción de datos estos clasificados en la siguiente Figura 8.37.

Comandos	Significado
break	termina un bucle for o while
close	cierra un fichero
continue	salta al final del cuerpo del bucle
data	cambia a modo datos; opcionalmente incluye un fichero
display	imprime elementos del modelo y expresiones
delete	elimina un componente previamente declarado
drop	elimina una restricción u objetivo
end	finaliza la entrada del fichero de entrada actual
expand	muestra explícitamente el modelo
fix	fija una variable a su valor actual
for {indx}{ cp }	bucle for
if lexpr then { }	comprueba una condición
include	incluye ficheros
let	cambia los valores de los datos (:=)
match(cad,mod)	posición de mod en cad
model	cambia al modo modelo; opcionalmente incluye un fichero
objective	selecciona un objetivo a optimizar
option	define o muestra valores opcionales
print	imprime elementos del modelo sin formatear
printf	imprime elementos del modelo formateados (\n,%7.1f)
<b>problem</b> nb: def.	define un problema
purge	elimina un componente y los dependientes de él
quit	termina AMPL
read	lee datos de un fichero o de la consola (-)
redeclare	redefine un componente ya definido
repeat while lexpr { cp }	repite un bloque de comandos mientras V.
repeat until lexpr { cp }	repite un bloque de comandos hasta F.
repeat { cp } while lexpr	repite un bloque de comandos mientras V.
repeat { cp } until lexpr	repite un bloque de comandos hasta F.
reset	resetea elementos específicos a su estado inicial
restore	deshace un comando drop
shell	temporalmente sale al sistema operativo
show	muestra componentes del modelo
solution	importa valores de variables de un solver
solve	envía elementos actuales a un solver y devuelve la solución
step n	avanza n pasos en la ejecución de ficheros por lotes
update	permite actualizar datos
unfix	deshace un comando fix
write	escribe en un fichero partes de un problema
xref	muestra dependencias del modelo

Figura 8.37 Comandos del entorno AMPL [33].

### Estructura del Run

Se escriben los comandos en un archivo de texto y se guarda como “\_\_\_\_.run”, debemos considerar que antes de ingresar los comandos al archivo “.run” el modelo y los datos deben estar en el mismo directorio. Se debe escribir en el archivo **model** \_\_\_\_.**mod**; y a su vez el archivo **data** \_\_\_\_.**dat**; esto para la ejecución en el mismo programa computacional como se puede ver en la Figura 8.38.

```

#Solucion en Notepad++
reset;

model MT-6BUS.mod
data MT-6BUS.dat

option solver cplex;
solve Costo_lineas;

display Costo_lineas;
display n0,n;
display {(k,i,j) in OL}Pij[k,i,j]*Sbase;

#display _solve_time;
display _ampl_system_time;
display _total_solve_time;

```

Figura 8.38 Estructura del “.run” en Notepad++.

Escribir a continuación en el archivo .run: **option solver cplex;** y después **solve “nombre de la función objetivo”;** luego en el mismo archivo escribir **display “nombre\_variable”;** para obtener los valores de las variables, por ultimo ingresamos la línea de código para poder obtener en la impresión de resultados el tiempo de ejecución del lenguaje AMPL como el tiempo de ejecución total con la línea de código **display \_AMPL\_system\_time;** y **display \_total\_solve\_time;** todo esta estructura mostrada en la Figura 8.38.

Para la ejecución del modelo al tener un límite de una licencia DEMO para AMPL está limitada a 500 variables y 500 restricciones y objetivos (después de la resolución previa) para problemas lineales, al no contar con una licencia completa de AMPL se busca otro método de ejecución para el modelo y donde es necesario ocupar el servidor NEOS es cual es una aplicación cliente-servidor basada en Internet que brinda acceso gratuito a una biblioteca de solucionadores (*solvers*) de optimización en el siguiente link nos desplaza la plataforma (<https://neos-server.org/neos/solvers/index.html>), en el apartado escogemos el tipo de lenguaje y *solver* que necesitamos utilizar independientemente del caso el cual sea necesario como se muestra en la Figura 8.39, donde ingresamos nuestros “.mod”, “.dat” y “.run” y finalizando nuestro correo electrónico donde nos llegara los resultados pertenecientes del modelo.

The screenshot shows the Neos Server interface with the following sections:

- Model File:** "Enter the location of the AMPL model file (local file)" with a file selector for "MT-6BUS.mod".
- Data File:** "Enter the location of the AMPL data file (local file)" with a file selector for "MT-6BUS.dat".
- Commands File:** "Enter the location of the AMPL commands file (local file)" with a file selector for "MT-6BUS\_NEOS".
- Comments:** A large empty text area.
- Additional Settings:**
  - Dry run: generate job XML instead of submitting it to NEOS
  - Short Priority: submit to higher priority queue with maximum CPU time of 5 minutes
  - E-Mail address:

On the right side, the solution output is displayed:

```
Costo_lineas = 110
:      n0  n   :=
1  1  2  1  0
2  1  3  0  0
3  1  4  1  0
4  1  5  1  0
5  1  6  0  0
6  2  3  1  0
7  2  4  1  0
8  2  5  0  0
9  2  6  0  3
10 3  4  0  0
11 3  5  1  1
12 3  6  0  0
13 4  5  0  0
14 4  6  0  0
15 5  6  0  0
;

Pij[k,i,j]*Sbase :=
1  1  2  -30
2  1  3   0
3  1  4   60
4  1  5   40
5  1  6   0
6  2  3  -70
7  2  4  100
8  2  5   0
9  2  6 -300
10 3  4   0
11 3  5  200
12 3  6   0
13 4  5   0
14 4  6   0
15 5  6   0
;

_ampl_system_time = 0.006808
_total_solve_time = 0.045051
```

At the bottom, a "Submit to NEOS" button is highlighted with a red box, and a warning message reads: "Please do not click the 'Submit to NEOS' button if you are not ready to submit the job."

Figura 8.39 Archivos subidos a Neos Server y solución entregada,

### Optimizadores generalmente incluidos en AMPL.

AMPL clasifica los optimizadores en diferentes tipos atendiendo al tipo de problema que resuelven y los métodos que usan, estos son:

- **Lineal (simplex):** objetivo y restricciones lineales, resueltos con alguna versión del método del simplex.
- **Lineal (interior):** objetivo y restricciones lineales, resueltos con alguna versión de métodos de punto interior (o barrera).
- **Redes:** objetivo lineal y restricciones de flujo en redes, resuelto por alguna versión del método simplex para redes.
- **Cuadrático:** objetivos cuadráticos convexos o cóncavos y restricciones lineales, resuelto por un método tipo simplex o método tipo punto interior.
- **Convexo:** objetivo convexo o cóncavo, pero no todos lineales, y restricciones lineales, resuelto por un método de punto interior.

- **No lineal:** continuo, pero no todos los objetivos y restricciones lineales, resuelto por cualquiera de los métodos siguientes: gradiente reducido, cuasi-newton, lagrangiano aumentado y punto interior
- **Complementariedad:** Lineal o no lineal como antes, pero con condiciones de complementariedad adicional.
- **Lineal entero:** objetivo y restricciones lineales y alguna o todas las variables enteras, resuelto por alguna aproximación de ramificación y acotación que aplica un algoritmo lineal para resolver los subproblemas sucesivos.
- **Entero no lineal:** objetivos y restricciones continuos, pero no todos lineales y alguna o todas las variables enteras, resuelto por la aproximación de ramificación y acotación que aplica un algoritmo no lineal para resolver los subproblemas sucesivos [33].

La siguiente Tabla 8.94, recoge los optimizadores conocidos por la versión estudiante de AMPL:

**Tabla 8.94** Optimizadores conocidos por la versión estudiante de AMPL[33].

Optimizador	Algoritmos
<b>CPLEX</b>	Lineal (simplex)
	Lineal (interior)
	Redes
	Cuadrático
	Entero lineal
<b>XLSOL</b>	Lineal (simplex)
	Cuadrático
	Entero lineal
<b>MINOS</b>	Lineal (simplex)
	No lineal
<b>GRG2</b>	No lineal
	Entero no lineal
<b>LOQO</b>	Lineal (interior)
	Cuadrático
	No lineal
<b>LP:SOLVE</b>	Lineal (simplex)
	Entero lineal
<b>DONLP2</b>	No lineal
<b>IPOPT</b>	No lineal
	Entero no lineal
<b>KNITRO</b>	No lineal
	Entero mixto no lineal

## 8.6.2 Manual software GAMS

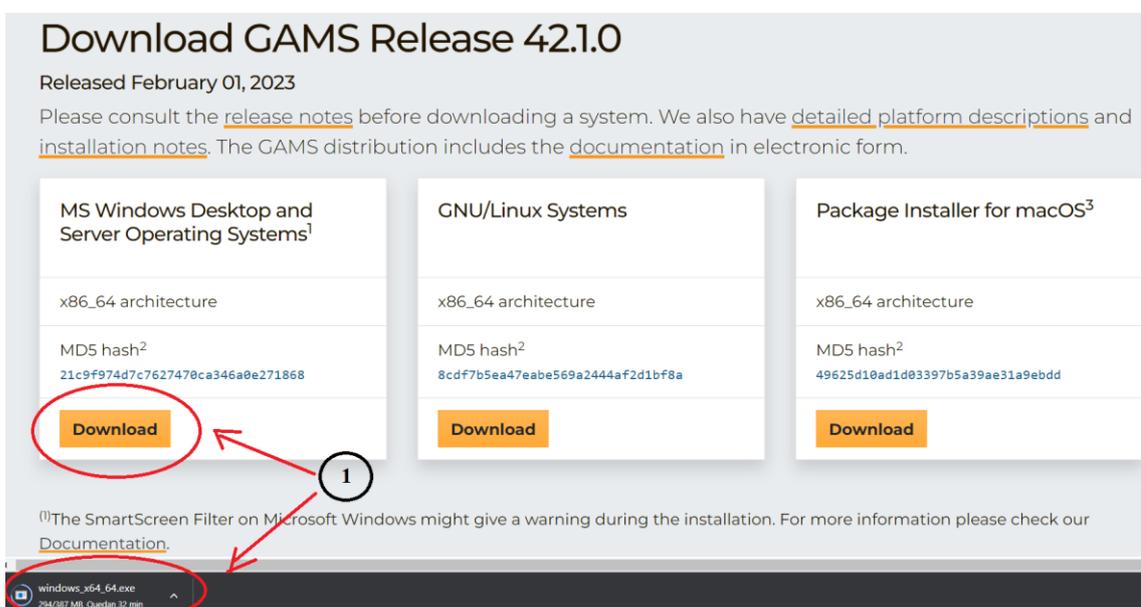
Este párrafo describe un manual elaborado como guía práctica para el programa de simulación y modelación matemática GAMS, todos estos aspectos enfocados en aplicaciones para las ciencias de la ingeniería y, específicamente, en el equilibrio general computable. El manual comienza con una sección sobre el proceso de instalación del programa computacional, seguida de una introducción a las características generales de GAMS y a la estructura de su lenguaje de programación, la guía está diseñada para proporcionar información detallada y práctica a los usuarios de GAMS que buscan aplicar la simulación y modelación matemática en su trabajo.

### 8.6.2.1 Instalación GAMS

GAMS es un *software* de carácter propietario por lo que es necesario adquirir una licencia para hacer un uso total de este. Sin embargo, los programadores de GAMS han dispuesto una distribución de demostración, al no tener una licencia válida de GAMS, el sistema funcionará como un sistema de demostración gratuito con estas limitaciones:

GAMS viene para muchas plataformas, Windows, Linux, Solaris, Mac, ..., 32 y 64 bits. A continuación, se muestra el proceso de instalación de GAMS en Windows para 32 y 64 bits.

**PASO 1:** entrar en la siguiente dirección (<http://www.GAMS.com/download/>), se nos despliega la siguiente ventana mostrada en Figura 8.40, a qui nos dirigimos donde dice Sistemas operativos Windows y damos clic izquierdo en *Download*, para iniciar la descarga [38].



**Figura 8.40** Pagina de descarga oficial de GAMS.

**PASO 2:** Entramos en la dirección ([https://www.gams.com/try\\_gams/](https://www.gams.com/try_gams/)) donde llenamos nuestra información personal para obtener una licencia DEMO por un determinado tiempo, luego clic derecho en Entregar como se observa en la Figura 8.41.

**GAMS** FREE DEMO SEARCH

Products ▾ Documentation ▾ Download ▾ Support Sales ▾ Community ▾ About Us ▾

### DEMO LICENSE

For commercial, academic, and non-profit users

Our demo licenses are valid for 12 months, and are ideal for those who want to get a first impression of GAMS.

**All language features are enabled**, and the restrictions listed below are quite generous. You will be able to run your first experiments before hitting the limits too soon.

- You can generate and solve linear models (LP, RMIP, and MIP) that do not exceed 2000 variables and 2000 constraints
- For all other model types the model cannot be larger than 1000 variables and 1000 constraints
- Some solvers might enforce additional limits for the demo license. Read the [licensing chapter](#) of the GAMS online documentation for more information.
- GAMS will terminate with a licensing error if you hit one of the above limits:
  - \*\*\* Status: Terminated due to a licensing error \*\*\* Inspect listing file for more information
- MIRO connector allows up to 10 indexed input and output symbols
- Limited to 12 months

Request a Free Demo License

First Name*	Last Name*	Email*
Dario	Lata	alex.lata8453@utc.edu.ec
Institute/Organisation*		Country
UTC		Ecuador

**Figura 8.41** Solicitud para adquirir licencia DEMO.

### Límites de licencia:

- Número de restricciones y variables: 300
- Número de elementos distintos de cero: 2000 (de los cuales 1000 no lineales)
- Número de variables discretas: 50 (incluidas semicontinuas, semi enteras)
- Límites del solucionador global:
- Número de restricciones y variables: 10 [38].

El registro de GAMS indicará que su sistema se ejecuta en modo de demostración a continuación un ejemplo de licencia DEMO:

```
GAMS_Demo_license_for_ALEX_LATA_____G221102/0002CO-GEN
U.T.C,_Ecuador_____
1090412500_**GAMS_Demo_license_restricted_to_non-commercial_use**
170442050C_____
DL078042_____C_DEMO_____
alex.lata8453@utc.edu.ec,_ALEX_LATA_____
```

Licensed platform: Generic platforms

The installed license is valid.

Evaluation expiration date (GAMS base module): Oct 28, 2023

**PASO 3:** verificamos un nuestro correo electrónico donde nos llega un correo donde nos indica la confirmación de la licencia solicitada y esta deberá ser dentro de los 7 días abriendo el enlace mostrado en la Figura 8.42, después nos despliega una pestaña de confirmación de licencia activada, con se muestra en la Figura 8.43.

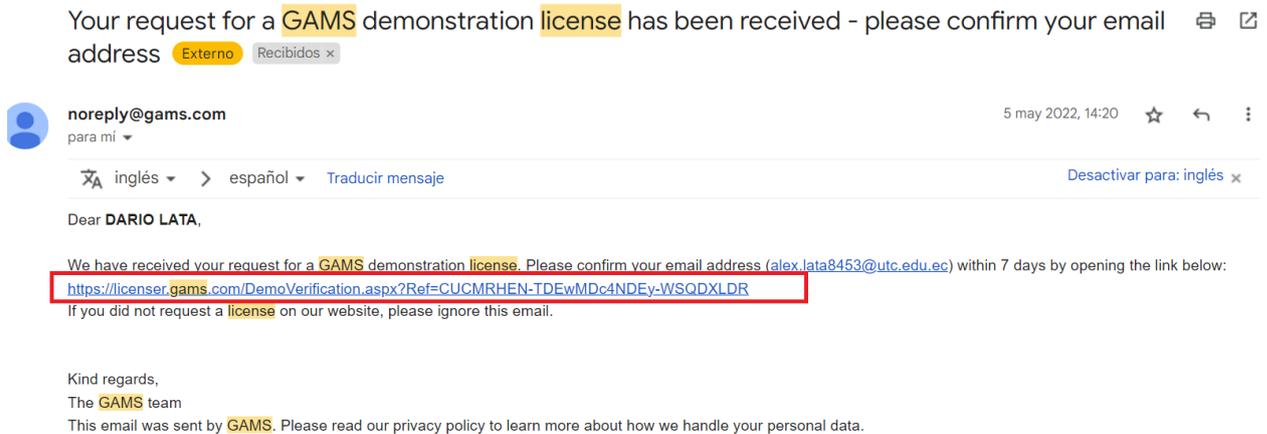
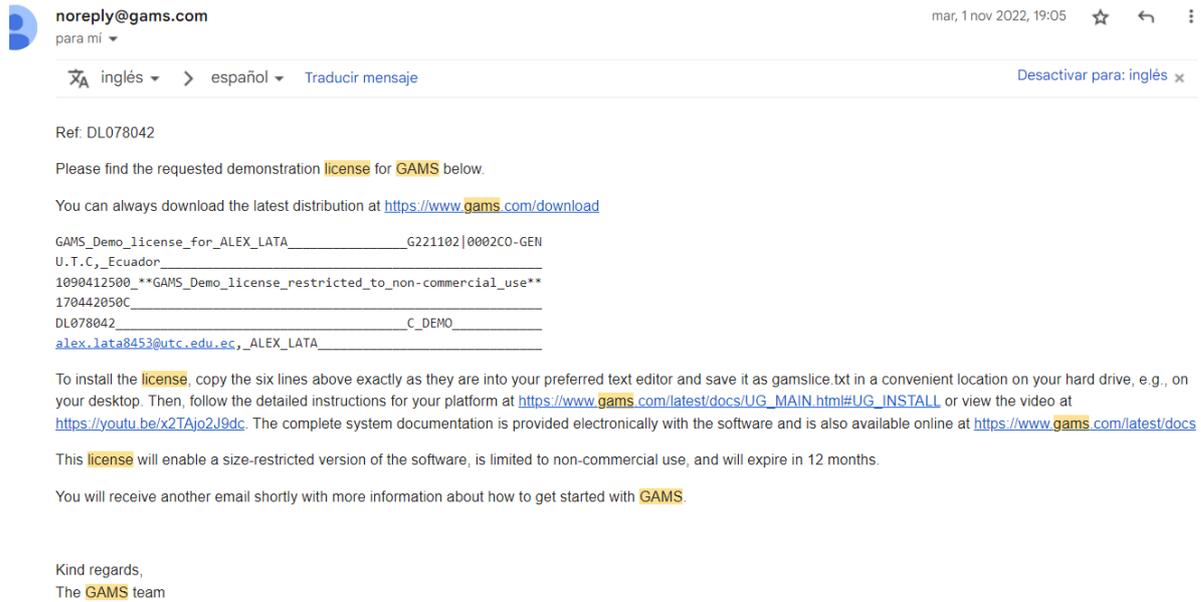


Figura 8.42 Verificación de correo electrónico.



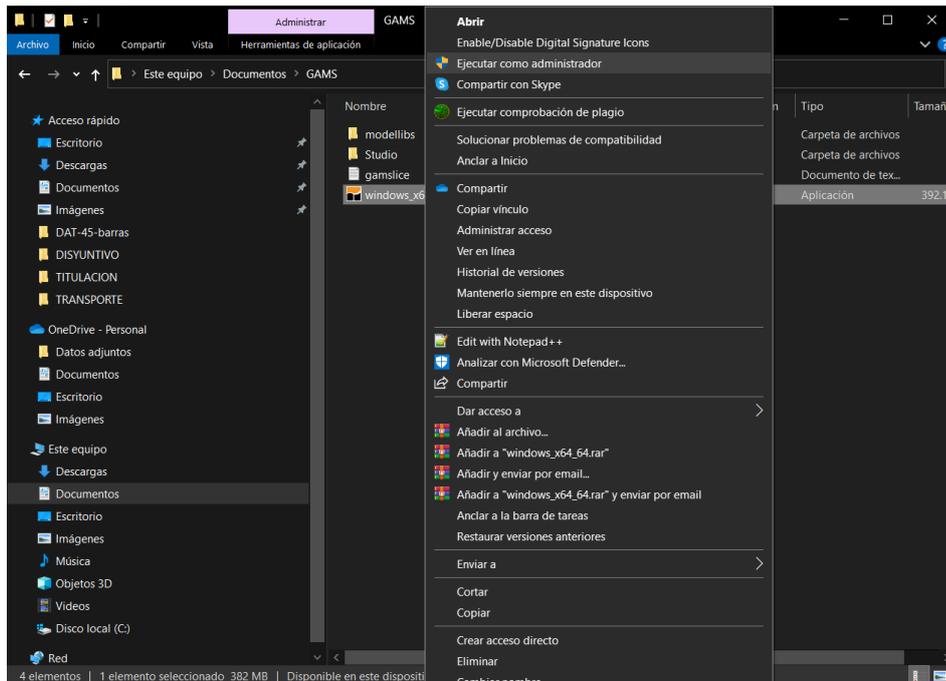
Figura 8.43 Licencia DEMO activada para GAMS.

**PASO 4:** Verificamos la llegada de un nuevo correo electrónico confirmando nuestra licencia DEMO mostrada en la Figura 8.44. Después copiamos esto y pegamos en un archivo con el nombre de gamslice.txt en nuestro ordenador, tenemos que tener en consideración que esta licencia DEMO tiene una duración por 1 año de validez [38].



**Figura 8.44** Verificación de licencia en el correo electrónico para GAMS.

**PASO 5:** A continuación, buscamos el sitio donde está guardado el programa descargado y damos clic derecho y buscamos opción ejecutar como administrador, como se aprecia en la Figura 8.45.



**Figura 8.45** Instalación del programa GAMS.

Aquí es donde comienza la instalación como la instalación de la mayoría de programas damos en *Next* para continuar visto en la Figura 8.46.

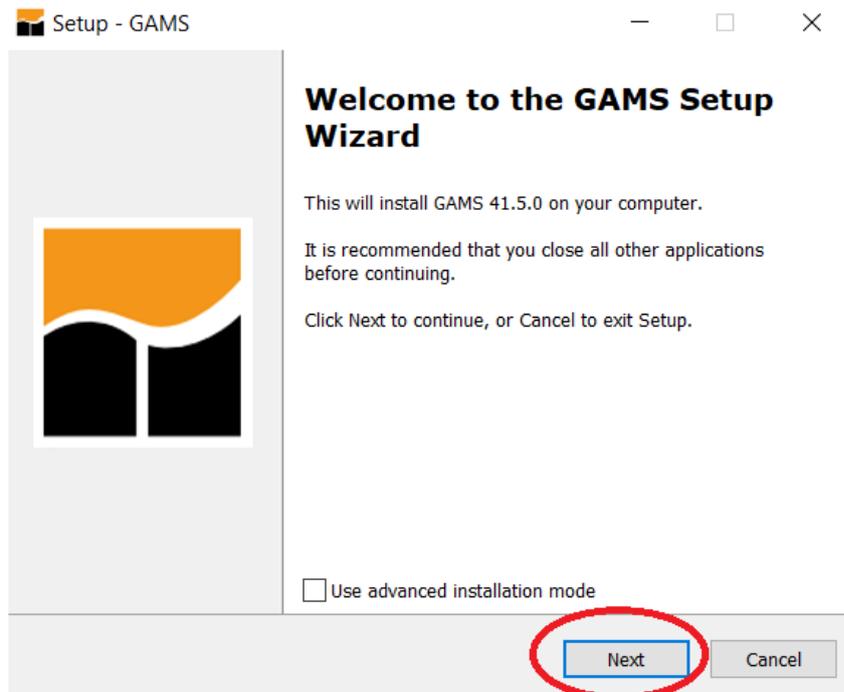


Figura 8.46 Instalación de programa GAMS.

**PASO 6:** Escogemos el sitio donde vamos a guardar nuestro programa GAMS damos clic izquierdo en *Browse* donde se nos abre una pestaña del disco local aquí elegimos la carpeta donde deseamos guardar el programa luego ponemos OK y posteriormente ponemos *Next*, como se muestra en la Figura 8.47 [38].

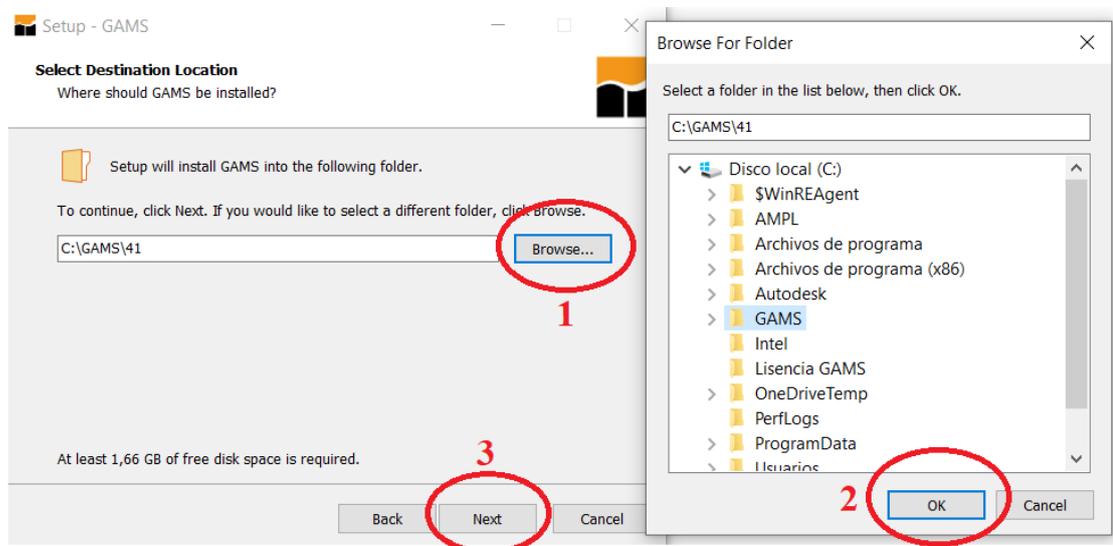
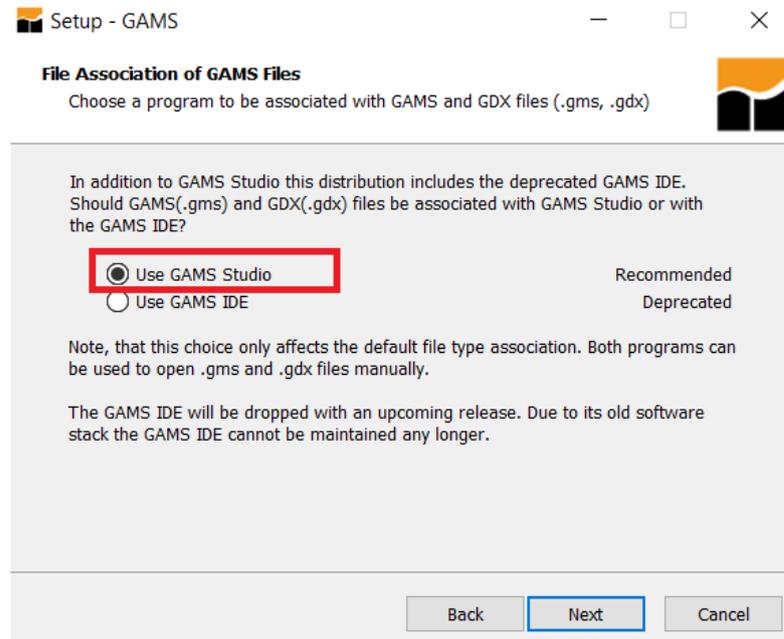


Figura 8.47 Ubicación de la instalación del programa GAMS.

**PASO 7:** En la pestaña escogemos *Use GAMS Studio* como se aprecia en la Figura 8.48, donde el mismo programa nos indica como recomendado que el *Use GAMS IDE* que es el tradicional donde la diferencia que existe entre ambos es:

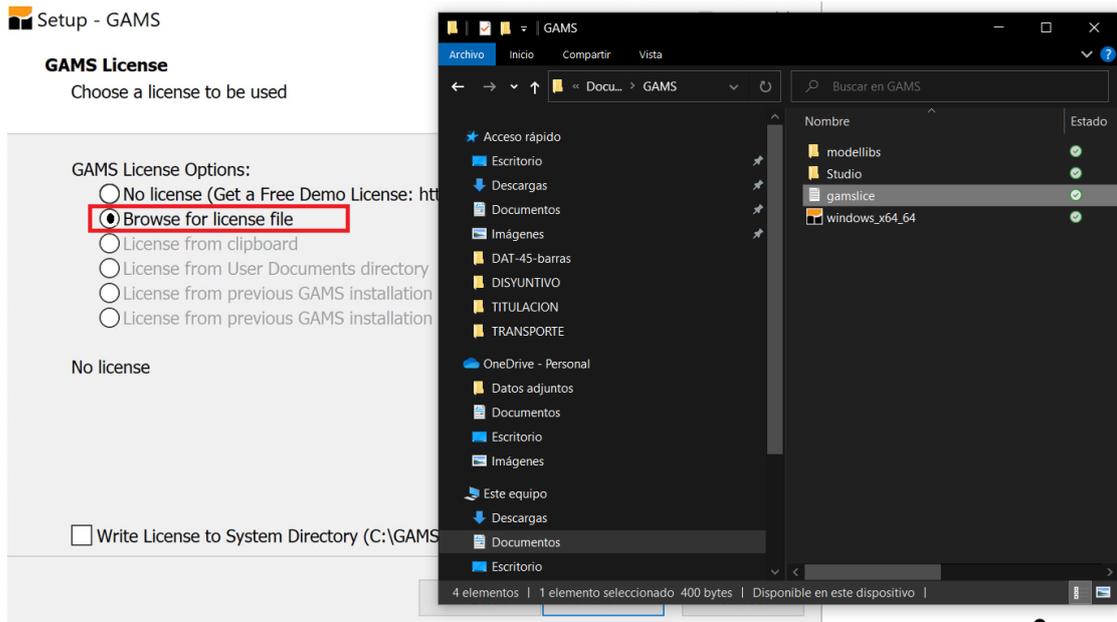
GAMS STUDIO: es un entorno de desarrollo integrado completamente nuevo para GAMS, disponible para Windows, Mac OS X y Linux.

GAMS IDE: sistema clásico que se mantuvo durante los últimos 20 años y sigue siendo el caballo de batalla para muchos programadores de GAMS debido al desarrollo y utilización del mismo durante años. Sin embargo, no proporciona todas las características que vemos en los entornos de desarrollo modernos [38].

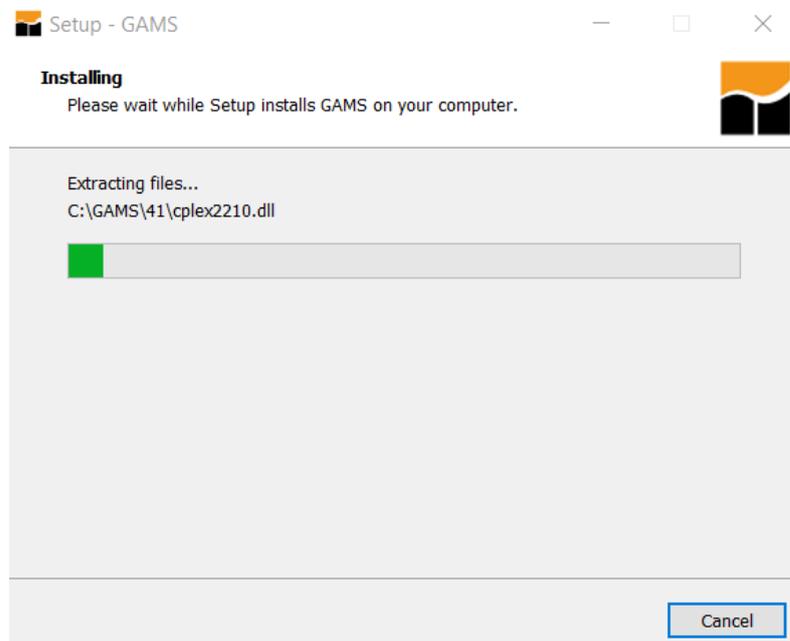


**Figura 8.48** Instalación de programa GAMS Studio o IDE.

**PASO 8:** La siguiente pestaña es la más importante donde seleccionamos la licencia que se emitió en los pasos anteriores damos clic izquierdo en *Browse for license file* y elegimos el “.txt” que guardamos con nuestra licencia DEMO, puede verse en la Figura 8.49. Por último, damos Next y el programa se instala correctamente con su licencia DEMO como se aprecia en la Figura 8.50.



**Figura 8.49** Validación de licencia DEMO.



**Figura 8.50** Final de instalación del programa GAMS.

**PASO 9:** Abrimos el programa y verificamos el funcionamiento con las siguientes líneas de código que se puede copiar y pegar en el programa directamente, si el programa esta correctamente instalado deberá mostrarse un resultado de 472 como función objetivo como se puede ver en la Figura 8.51.

\$ONTEXT

Problema de OL.

Estos son renglones de comentarios.

```

$OFFTEXT
VARIABLES Sillas, escrit, z;
EQUATIONS
obj, madera, m_obra;
obj..      z =e= sillAs + 1.4*escrit;
madera..   sillAs + escrit =l= 400;
m_obra..   sillAs + 2*escrit =l= 580;
sillas.UP = 300;
MODEL ejemplo /ALL/;
SOLVE ejemplo USING LP MAXIMIZING z
    
```

The screenshot shows the GAMS Studio interface. The left pane contains the GAMS code, and the right pane shows the Process Log. The Process Log indicates that the model was solved successfully, with the optimal solution found and the objective value of 472.000000.

```

GAMS Studio
File Edit GAMS MIRO Tools View Help
Welcome | modelo_ejem_ejem.gms | ejem_ejemem.gms
1 $OFFTEXT
2 Problema de OL.
3 Estos son renglones de comentarios.
4 $OFFTEXT
5 VARIABLES Sillas, escrit, z;
6 EQUATIONS
7 obj, madera, m_obra;
8 obj..      z =e= sillAs + 1.4*escrit;
9 madera..   sillAs + escrit =l= 400;
10 m_obra..   sillAs + 2*escrit =l= 580;
11
12 sillAs.UP = 300;
13 MODEL ejemplo /ALL/;
14 SOLVE ejemplo USING LP MAXIMIZING z
15
16
17
Process Log
Version identifier: 22.1.0.0 | 2022-03-09 | 1a383f8ce
CPXPARAM_Advance 0
CPXPARAM_Simplex_Display 2
CPXPARAM_Threads 1
CPXPARAM_MIP_Display 4
CPXPARAM_MIP_Pool_Capacity 0
CPXPARAM_MIP_Tolerances_AbsMIPGap 0
Tried aggregator 1 time.
LP Presolve eliminated 1 rows and 2 columns.
Aggregator did 1 substitutions.
All rows and columns eliminated.
Presolve time = 0.00 sec. (0.00 ticks)
--- LP status (1): optimal.
--- Cplex Time: 0.00sec (det. 0.00 ticks)
Optimal solution found
Objective: 472.000000
--- Reading solution for model ejemplo
*** Status: Normal completion
--- Job modelo_ejem_ejem.gms Stop 02/13/23 16:02:12 e
    
```

Figura 8.51 Resultados del ejemplo para el funcionamiento en GAMS.

### 8.6.2.2 Programación y estructura del código

Antes de comenzar a programar en GAMS, es importante tener en cuenta una serie de consideraciones para ingresar valores en el programa. Estas pautas incluyen:

- Creado en 1987 en EEUU
- En GAMS es indiferente el uso de mayúsculas y minúsculas.
- Todos los comandos deben ser culminados con un punto y coma (;).

- GAMS reserva un conjunto de palabras para la caracterización de sus valores, en consecuencia, los identificadores únicos que el programador designe deben ser diferentes a dichas palabras reservadas.
- Los identificadores únicos que el programador utiliza para especificar su modelo (nombres de variables, parámetros, modelos...) deben comenzar por una letra y puede contener hasta 10 símbolos alfanuméricos en total, no está permitido el uso de caracteres especiales como la letra ñ, tildes o acentos.
- Los espacios en blanco consecutivos son comprendidos por GAMS como un único espacio, por lo cual estos pueden ser utilizados a preferencia del usuario para dar qué orden que requiera.
- La única condición de orden para la inserción de bloques y parámetros es la previa declaración de valores y datos.
- Líneas con \* en la primera columna son de comentarios
- No se aceptan tildes ni siquiera en comentarios
- El paréntesis () se utiliza para separar expresiones algebraicas y para concretar argumentos
- En GAMSIDE las palabras reservadas del lenguaje aparecen resaltadas [38].

### **Estructura general de un modelo GAMS.**

- Declaración de conjuntos. Asignación de valores.
- Inclusión y manipulación de datos de entrada y parámetros auxiliares.
- Variables
- Ecuaciones
- Modelo
- Acotamiento e inicialización de variables
- Resolución del problema de optimización
- Presentación de resultados

### **Bloques de un modelo en GAMS**

Los bloques obligatorios básicos que se utiliza en el programa GAMS, son los presentados en la Tabla 8.95, y algunos de los bloques opcionales más utilizados son los mostrados en la Tabla 8.96.

**Tabla 8.95** Los bloques obligatorios básicos [38].

Bloque	Nombre del bloque
Variables	VARIABLE(S)
Ecuaciones	EQUATION(S)
Modelo	MODEL
Solución	SOLVE

**Tabla 8.96** Los bloques opcionales [38].

Bloque	Nombre del Bloque
Sobrenombre	ALIAS
Conjuntos	SET(S)
Datos	DATA
Visualización	DISPLAY
Parámetros	PARAMETERS
Tablas	TABLE

Adicional a estos bloques, es posible agregar un comentario o una descripción del modelo, estas líneas nos permiten incluir información adicional sin interferir en el código, lo que puede ser útil para explicar el propósito del modelo. Hay dos formas de incluir un comentario:

- Empezar la línea con un asterisco (\*), aunque se debe tener en cuenta que no se pueden escribir tildes ni ñ.
- Si el usuario necesita escribir más de una línea de comentarios, se vuelve tedioso escribir varias veces asterisco, en contraste se puede utilizar el comando *\$ontext* para abrir un párrafo de comentarios, y *\$offtext* para cerrarlo, allí podemos incluir la cantidad de líneas que requiramos sin importar su extensión [38].

### Declaración del Conjunto

Uno de los bloques opcionales a considerar en la solución de problemas extensos [38], es la designación de *sets* aquí es donde declaramos nuestros conjuntos que puede ser de distinta forma como el programador lo considere pertinente, como se puede apreciar en la Figura 8.52.

```
Sets
OB BARRA /B1*B6/
OL RAMAS /L12, L13, L14, L15, L16, L23, L24, L25, L26, L34, L35, L36, L45, L46, L56/;
```

**Figura 8.52** Declaración de los conjuntos en GAMS.

La separación puede ser por un “\*” o por una “,” según sea necesario ya que el uno especifica el inicio y el final del conjunto y el otro especifica cada uno de los conjuntos a detalle.

### Declaración de Tablas

Otro bloque que está entre los opcionales es el de las tablas donde estructuramos los parámetros en forma ordenada, en la Figura 8.53 se muestra un ejemplo de tabla para dos dimensiones.

```

TABLE Barras(OB,*) datos de barra
      Pgmax    Pd    Pgmin
B1    1.5     0.8    0
B2    0.0     2.4    0
B3    3.6     0.4    0
B4    0.0     1.6    0
B5    0.0     2.4    0
B6    6.0     0.0    0;
    
```

**Figura 8.53** Tabla para dos dimensiones en GAMS.

En la Figura 8.54 muestra el caso donde existe más de dos dimensiones teniendo tres conjuntos y esta a su vez un particular en las tablas.

```

SETS i / MAD, BCN /
        j / A1, A2, A3, A4, A5, A6 /
        k / A, B, C /
TABLE CAPACIDAD(i,j,k) capacidad máxima
      A  B  C
MAD.A1  1  0  3
MAD.A2  2  1  2
BCN.A1  4  3  3
BCN.A2  0  2  2
    
```

← 2 alternativas ↓

```

TABLE CAPACIDAD(i,j,k) capacidad máxima
      A1.A  A1.B  A1.C  A2.A  A2.B  A2.C
MAD      1    0    3    2    1    2
BCN      4    3    3    0    2    2
    
```

**Figura 8.54** Tabla para más de dos dimensiones en GAMS

### Declaración de variables

Estas son las variables que va a calcular GAMS con base en los parámetros y las ecuaciones especificadas más adelante [38]. El bloque debe comenzar con la palabra VARIABLE, y se define solo el nombre de las variables, separadas por coma (,) o espacio y al final se pone punto y coma (;) estas se definen con la instrucción de Tipo de variables como se aprecia en la Tabla 8.97, y como se muestra en la Figura 8.55.

```

VARIABLES
v
Pij (OL)           Flujo de potencia activa
Cst_Lin           Minizar el costo de las lineas;

POSITIVE VARIABLE
Pg (OB)           Pg en la barra i           ;

INTEGER VARIABLE
n (OL)           Numero de lineas a intalar en el ramal ij           ;
    
```

**Figura 8.55** Declaración de variables.

GAMS es compatible con una Amplia gama de tipos de variables, las cuales pueden ser especificadas de diferentes maneras. Algunos de los tipos de variables permitidos son:

**Tabla 8.97** Tipo de variables para GAMS [38]

Tipo de variable	Intervalo	Intervalo por defecto
Binary	{0 a 1}	{0 a 1}
Free (default)	{ $-\infty$ a $\infty$ }	{ $-\infty$ a $\infty$ }
Integer	{0 ... .. n}	{0 ... .. 100}
Negative	{ $-\infty$ a 0}	{ $-\infty$ a 0}
Positive	{0 a $\infty$ }	{0 a $\infty$ }

Asimismo, es posible establecer restricciones sobre las variables en cualquier parte del código, simplemente agregando un sufijo después de su identificador, esto mostrado en la Tabla 8.98.

**Tabla 8.98** Restricciones sobre las variables [38]

Extensión	Función
<b>.LO (.lo)</b>	Establece un valor mínimo para la variable
<b>.L (.l)</b>	Hace referencia al nivel óptimo o real de la variable
<b>.UP (.up)</b>	Establece el nivel máximo que puede tomar la variable
<b>.M (.m)</b>	Hace referencia el valor de cambio marginal de la variable según las condiciones del modelo

En la Figura 8.56, se observa un ejemplo, si se tienen dos variables definidas como Pgmin (Potencia generada mínima) y Pgmax (Potencia generada máxima), de tal forma que se requieran restricciones como la existencia de cantidades y un precio máximo, escribiríamos en GAMS como parámetro complementario:

```

MODEL MODELO_TRANSPORTE /ALL/;
OPTION LIMROW = 0;
OPTION LIMCOL = 0;
option optCr = 0;
Pg.lo ( OB )=BARRAS (OB, 'Pgmin');
Pg.up ( OB ) =BARRAS (OB, 'Pgmax');

SOLVE MODELO_TRANSPORTE USING MIP MIN Cst_Lin
    
```

Figura 8.56 Variables definidas.

### Declaración de ecuaciones

Se coloca el nombre de la ecuación seguido de dos puntos (.), luego procedemos a colocar la ecuación, utilizando convenciones propias del lenguaje de programación para hacer las desigualdades o la igualdad, estas mostradas en la Tabla 8.99.

Tabla 8.99 Declaración de ecuaciones (distintos tipos) [38].

Operadores	Función
= E =	Para decir que es exactamente igual (=)
= L =	Para señalar que es menor o igual que ( $\leq$ )
= G =	Para decir que es mayor o igual que ( $\geq$ )
= IT =	Para expresar que es menor que (<)
+	Suma
-	Resta
*	Multiplicación
/	División
**	Exponenciación
<b>ABS</b> (X)	Valor Absoluto de X
<b>EXP</b> (X)	Exponente base e, $e^x$
<b>LOG</b> (X)	Logaritmo Natural, $\ln x$
<b>LOG10</b> (X)	Logaritmo base 10 de X, $\log x$
<b>MAX</b> (x, y, ..., z)	Máximo de un conjunto no especificado
<b>MIN</b> (x, y, ..., z)	Mínimo de un conjunto no especificado
<b>NORMAL</b> (x, y)	Distribución normal de media X y desviación estándar Y
<b>POWER</b> (x, y)	Potencia de base X y exponente Y, siendo Y entero
<b>SQR</b> (x)	Cuadrado de X, $X^2$
<b>SQRT</b> (x)	Raíz Cuadrada de X

En la Figura 8.57, se observa que para definir este bloque escribimos la palabra EQUATIONS, escribimos las ecuaciones y finalizamos cada una con un punto y coma (;).

```

EQUATIONS
Costo_Lineas                FUNCION OBJETIVO
Balance_activa(OB)         Balance de Potencia Activa
Flujo_ij(OB,OL)            La cargabilidad maxima de la linea ij
Flujo_ji(OB,OL)           La cargabilidad maxima de la linea ji
*MaxMin_Pg(OB)            Limites de potencia generada
Limite_lineas(OL)         Limite de lineas nuevas del ramal;

Costo_Lineas..             Cst_Lin=E-SUM(OL,LINEAS(OL,'Cl')*n(OL));
Balance_activa(OB)..      SUM(OL,(S(OB,OL)*Pij(OL))+Pg(OB)=E=BARRAS(OB,'Pd');
Flujo_ij(OB,OL)..        S(OB,OL)*Pij(OL)=L=LINEAS(OL,'Plmax')*(n(OL)+LINEAS(OL,'n0'));
Flujo_ji(OB,OL)..        -(S(OB,OL)*Pij(OL))=L=LINEAS(OL,'Plmax')*(n(OL)+LINEAS(OL,'n0'));
*MaxMin_Pg(OB)..         Pg(OB)=l=BARRAS(OB,'Pgmax');
Limite_lineas(OL)..      n(OL)=L=LINEAS(OL,'nmax');
    
```

Figura 8.57 Descripción de las ecuaciones en el programa GAMS.

### Declaración del modelo

En este bloque se establecen las ecuaciones y su nombre para su reconocimiento en GAMS. Se utiliza la palabra "MODEL" seguida del nombre del modelo y, entre barras diagonales (/), se nombran las ecuaciones. Si se desea incluir todas las ecuaciones declaradas, se usa "/ALL/". Finalmente, todos los bloques deben cerrarse con un punto y coma (;), como se muestra en la Figura 8.58, se toma o bien sea "ALL" o sea especificando que restricción queremos que se muestre su resultado, pero solo uno a la vez.

```

MODEL MODELO_TRANSPORTE /ALL/;
MODEL MODELO_TRANSPORTE /Costo_Lineas,Balance_activa/;
    
```

Figura 8.58 Declaración del modelo en GAMS.

### Declaración del solucionador

En este fragmento se elige el Solver adecuado para resolver el modelo en GAMS. Hay varios tipos de solvers disponibles, algunos vienen incluidos en la versión estándar de GAMS y otros se pueden adquirir como complementos de pago en la página web de GAMS. En una sección posterior se describen los más importantes [38]. El proceso comienza con la palabra "SOLVE", seguida del nombre del modelo que se utilizará, que se especifica en el bloque modelo. Luego se indica el Solver a utilizar con su función ya sea Minimizar "MIN" o Maximizar "MAX" según sea el caso para finalizar el nombre de la función objetivo, mostrado en la Figura 8.59.

```

SOLVE MODELO_TRANSPORTE USING MIP MIN Cst_Lin
    
```

Figura 8.59 Especificación del tipo de solucionador a utilizar.

**Tipos de problemas y optimizadores**

Este apartado presenta una selección de los solvers más importantes de GAMS y sus capacidades, organizados según el tipo de problema que pueden resolver. A continuación, se muestran en la Tabla 8.100.

**Tabla 8.100** Tipos de problemas y optimizadores [38].

Opción	Tipo de problema
<b>lp</b>	Programación lineal
<b>nlp</b>	Programación no lineal
<b>dnlp</b>	Programación no lineal con derivadas discontinuas
<b>mip</b>	Programación lineal entera-mixta
<b>rmip</b>	Programación lineal relajada entera-mixta
<b>minlp</b>	Programación no lineal entera mixta
<b>rminlp</b>	Programación no lineal relajada entera mixta
<b>mcp</b>	Problemas complementarios mixtos
<b>mpec</b>	Problemas matemáticos con restricciones de equilibrio
<b>cns</b>	Sistemas no lineales acotados

En la Figura 8.60, se aprecia algunos *solvers* que tiene GAMS para su ejecución, todas ellas con sus respectivas siglas para el lenguaje de programación.

Solver/Model type availability - 23.3 November 1, 2009												
	LP	MIP	NLP	MCP	MPEC	CNS	DNLP	MINLP	QCP	MIQCP	Stoch.	Global
ALPHAECP												
BARON 9.0	✓	✓	✓				✓	✓	✓	✓		✓
BDMLP	✓	✓										
COIN	✓	✓										
CONOPT 3	✓		✓			✓	✓		✓			
CPLEX 12.1	✓	✓							✓	✓		
DECIS	✓										✓	
DICOPT								✓		✓		
GUROBI 2.0	✓	✓										
KNITRO 6.0	✓		✓				✓	✓	✓	✓		
LINDOGLOBAL 6.0	✓	✓	✓				✓	✓	✓	✓		✓
LGO	✓		✓				✓		✓			✓
MILES				✓								
MINOS	✓		✓				✓		✓			
MOSEK 6	✓	✓	✓				✓		✓	✓		
MPSGE												
MSNLP			✓				✓		✓			✓
NLPEC				✓	✓							
OQNLP			✓				✓	✓	✓	✓		✓
OSL V3	✓	✓										
OSLSE	✓										✓	
PATH				✓		✓						
SBB								✓		✓		
SNOPT	✓		✓				✓		✓			
XA	✓	✓										
XPRESS 20.00	✓	✓							✓			
<b>Contributed Plug&amp;Play solvers</b>												
AMPLwrap	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DEA	✓	✓										
Kestrel	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

**Figura 8.60** Distintos solvers que típicamente contiene GAMS [38].