



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

“UBICACIÓN ÓPTIMA DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN REDES DE DISTRIBUCIÓN USANDO PROGRAMACIÓN NO LINEAL ENTERA MIXTA”

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
MAGÍSTER EN EFICIENCIA ENERGÉTICA

ING. ANDRÉS FRANCISCO CARVAJAL PROAÑO
andrescarvajalp@gmail.com

DIRECTOR: FIS. MARCO VINICIO YÁNEZ SALCEDO, M.Sc.
marco.yanez@epn.edu.ec

CO-DIRECTOR: ING. SANTIAGO RAÚL ESPINOSA GUALOTUÑA, M.Sc.
santifox13@gmail.com

Quito, diciembre 2019

Certificación

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por CARVAJAL PROAÑO ANDRÉS FRANCISCO, bajo mi supervisión.

FIS. MARCO YÁNEZ, M.Sc.

DIRECTOR DE PROYECTO

ING. SANTIAGO ESPINOSA, M.Sc.

CO-DIRECTOR DE PROYECTO

Declaración

Yo, ANDRÉS FRANCISCO CARVAJAL PROAÑO, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

CARVAJAL PROAÑO ANDRÉS FRANCISCO

Dedicatoria

A mis queridos padres por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad, me formaron con reglas y con algunas libertades, pero al final me motivaron constantemente para alcanzar mis anhelos.

A mi amada esposa Ibraila, a mis hijas Valentina e Isabella, son la inspiración y la fortaleza de seguir siempre adelante.

A mis hermanos David, Viviana y demás familia en general por el apoyo que siempre me brindaron día a día.

A mis compañeros y amigos presentes y pasados, quienes sin esperar nada a cambio compartieron su conocimiento, alegrías y tristezas y todas aquellas personas que durante este tiempo estuvieron a mi lado apoyándome y lograron que esta meta se haga realidad.

Agradecimiento

Agradezco a Dios por darme la sabiduría y oportunidad de concluir esta meta,
A mis padres quienes siempre están brindándome su apoyo, su sabiduría para alcanzar
mis metas.

Agradezco a mi director y codirector, quienes siempre mostraron su apoyo y generosidad
al compartir su conocimiento.

A las autoridades del Instituto Superior Yavirac, quienes me dieron su apoyo y aliento
para culminar este proyecto de Titulación.

Finalmente, a mi querida familia, quienes compartieron este trayecto de aprendizaje,
dándome la fortaleza para seguir adelante.

Índice

Certificación	ii
Declaración	iii
Dedicatoria	iv
Agradecimiento	v
Índice	vi
Índice de Figuras	ix
Índice de tablas	x
Resumen	xi
Abstract	xii
Introducción	1
Objetivo general	3
Objetivos específicos	3
1. MARCO TEÓRICO	4
1.1. Situación del Sector Energético en el Ecuador	4
1.2. Políticas de Eficiencia Energética en el Ecuador.....	6
1.3. Plan Nacional de Eficiencia Energética 2016 -2035 (PLANEE).....	7
1.4. Situación actual del sector Eléctrico	8
1.5. Situación del sector eléctrico ecuatoriano al 2017	9
1.6. Producción de la electricidad	9
1.6.1. Generación.....	10
1.6.2. Transmisión.....	14
1.6.3. Distribución.....	15
1.7. Microgeneración fotovoltaica para autoabastecimiento de consumidores finales de energía eléctrica.	17
1.8. Generación Distribuida - GD	18
1.9. Efectos de la GD en sistemas de energía eléctrica.....	19
1.9.1. Operación y Control.....	19
1.9.2. Cambio de la capacidad de Corto Circuito	20
1.9.3. Estabilidad.....	20
1.9.4. Nivel de Voltaje, integración e interconexión.....	20
1.9.5. Desviación de la forma de onda de voltaje: armónicos	21
1.9.6. Calidad de potencia	21
1.9.7. Requisitos del sistema de protección.	22

1.10.	Tipos de Generación distribuida	22
1.10.1.	Microturbina	23
1.10.2.	Motores Reciprocantes	24
1.10.3.	Celdas de combustible	26
1.10.4.	Solar Fotovoltaica	27
1.10.5.	Tipos de Células Solares	28
1.10.6.	Solar térmica	31
1.10.7.	Sistema Eólico	34
1.11.	Métodos cuantitativos de tratamiento de problemas de optimización.....	35
1.11.1.	Métodos Exactos.....	36
1.11.2.	Métodos no exactos.....	39
1.12.	Programación Matemática.....	41
1.12.1.	Programación lineal	41
1.12.2.	Programación Lineal Entera Mixta (MIP)	46
1.12.3.	Programación no Lineal (NLP).....	48
1.12.4.	Programación no lineal entera mixta (MINLP)	50
2.	FORMULACIÓN MATEMÁTICA PARA FLUJOS DE POTENCIA.....	52
2.1.	Modelo de optimización	55
2.2.	Función objetivo	56
2.3.	Restricciones	56
2.3.1.	Restricción de balance de potencia	56
2.3.2.	Restricción de niveles de voltaje	57
2.3.3.	Restricción binaria.....	57
2.3.4.	Restricción de potencia máxima del generador distribuido.....	57
2.3.5.	Restricción de unidades de generación	58
2.4.	Procedimiento de resolución	59
2.5.	Caso de estudio.....	60
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	64
3.1.	Ubicación de generación distribuida	64
3.2.	Casos de implementación de la GD.....	66
3.3.	Perfiles de voltaje	70
3.4.	Pérdidas de Potencia	71
3.5.	Balance de Potencia.....	71
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	74
4.1.	Conclusiones	74
4.2.	Recomendaciones	75

Referencias Bibliográficas.....	76
Anexos.....	78
Anexo I: Modelo matemático en Gams.....	79
Anexo II: Valores característicos de un sistema IEEE de 33 barras.....	82
Anexo III: Resultados de gráficas de Vpu en Gams.....	85
Anexo IV: Resultados del solucionador gams para los cuatro casos de estudio..	88
Anexo V: ecuaciones gams.....	89
Anexo VI: tipos de modelo Gams.....	91
Anexo VII: tipos de modelo Gams.....	93

Índice de Figuras

Figura 1.1. Evolución del consumo de energía por sectores	4
Figura 1.2. Estructura del consumo de energía por sectores	5
Figura 1.3. Estructura del consumo de energía por energético	5
Figura 1.4. Energía total evitada por la implementación del PLANEE	8
Figura 1.5. Cadena de la Energía eléctrica	10
Figura 1.6. Potencia de centrales de generación con fuentes de energía renovable.....	12
Figura 1.7. Potencia de centrales de generación con fuentes de energía no renovable..	14
Figura 1.8. Sistema Nacional de Transmisión del Ecuador	15
Figura 1.9. Aumento de debido al flujo de potencia debido a la GD	21
Figura 1.10. Microturbina	24
Figura 1.11. Motor de ignición por chispa	25
Figura 1.12. Motor de ignición por compresión	25
Figura 1.13. Ciclo otto, motores reciprocantes	26
Figura 1.14. Celda de Combustible.....	27
Figura 1.15. Celda de Combustible esquema de funcionamiento	27
Figura 1.16. Paneles solares en vivienda.....	28
Figura 1.17. Celda Solar Monocristalina	29
Figura 1.18. Esquema de la estructura de una célula PERL	30
Figura 1.19. Celda Solar Policristalina	31
Figura 1.20. Colectores Cilindro Parabólicos	32
Figura 1.21. Torre solar	33
Figura 1.22: Torre solar	34
Figura 1.23. Esquema de turbina eólica.....	35
Figura 1.24. Diagrama de un grafo con 6 vértices y 7 aristas.....	37
Figura 1.25. Método gráfico	45
Figura 1.26. Función convexa y función cóncava.....	50
Figura 3.1:Comparativa de Vpu de ETAP , GAMS en un sistema de 33 Buses	64
Figura 3.2. Simulación del sistema sin GD en 4 barras.....	68
Figura 3.3. Límites que se considera en el software Etap	69
Figura 3.4.Simulación del sistema con GD en 4 barras.....	69
Figura 3.5:Perfil de voltaje en cada barra.....	70
Figura 3.6.Pérdidas de Potencia Activa y Reactiva.....	71
Figura 3.7.Balance potencia activa	72
Figura 3.8.Balance potencia reactiva	72

Índice de tablas

Tabla 1.1. Potencia nominal y efectiva a nivel nacional (MW).....	9
Tabla 1.2: Potencia de centrales de generación con ERNC (MW)	11
Tabla 1.3: Potencia de centrales de generación con ERNC (MW)	13
Tabla 1.4: Longitud de líneas de transmisión (km).....	14
Tabla 1.5: Áreas de prestación del Servicio	16
Tabla 1.6 Tecnologías de Fuentes Distribuidas de Energía	22
Tabla 1.7 Problemas y técnicas de los métodos cuantitativos.....	41
Tabla 2.1: Elementos asociados al balance de potencias.	55
Tabla 2.2: Descripción de los elementos asociados a la función objetivo	56
Tabla 2.3: Descripción de los elementos asociados al balance de potencias.....	57
Tabla 2.4: Descripción de elementos asociados a la potencia activa y reactiva de GD.....	58
Tabla 2.5: <i>Características eléctricas de las líneas.</i>	62
Tabla 2.6. Características eléctricas de las cargas.	63
Tabla 3.1. Valores de Voltajes por unidad de ETAP y GAMS	65
Tabla 3.2 : Tabla de variables binarias utilizando GAMS	66
Tabla 3.3 : Balance de Potencia valores por unidad	72

Resumen

El objetivo principal de esta investigación es determinar la ubicación óptima de generación distribuida en un sistema eléctrico de distribución a nivel de alimentadores principales a través de la resolución de un modelo de programación no lineal entero mixto, el cual es resuelto mediante la herramienta computacional GAMS. El modelo matemático de programación no lineal entero mixto será aplicado a un sistema de distribución de 33 barras IEEE, el cual determinará la ubicación óptima de GD, para el efecto se considera las características inherentes a la operación de los sistemas eléctricos. Bajo este escenario, se realizará un análisis comparativo con un software comercial para la simulación de sistemas eléctricos – ETAP, el cual permitirá simular el sistema IEEE y evaluar los resultados del modelo matemático propuesto. Una vez evaluado el modelo matemático, se genera cuatro casos de estudio, en las que se va integrando diferentes cantidades de GD, en estos casos se evaluará variables técnicas tales como el nivel de voltaje, pérdidas, entre otros aspectos de relevancia, las cuales permitirán concluir que el modelo de programación no lineal entero mixto permite encontrar la ubicación óptima de varias unidades de GD en la red asegurando las condiciones técnicas de la red, cumpliendo con el objetivo de minimización de pérdidas.

Palabras clave:

Distribución, GAMS, optimización, programación no lineal entera mixta, sistema IEEE 33 buses, Generación Distribuida

Abstract

The main objective of this investigation is to determine the finest location of distributed generation in an electrical distribution system at a main feeders' level through the resolution of a mixed integer non-linear programming model, which is resolved by means of the GAMS computational tool. The mixed integer nonlinear mathematical programming model will be applied to a 33-bar IEEE distribution system, which will determine the optimal location of the GD. In order to do this, the inherent characteristics to perform the operation of electrical systems will be considered into play. In this scenario, a comparative analysis will be performed with a commercial software for the simulation of electrical systems – ETAP. This system will allow simulating the IEEE system and calculate the results of the proposed mathematical model. Once the mathematical model is evaluated, four study cases will be generated, in which different amounts of GD are integrated. In these cases, technical variables are calculated, such as voltage level, losses, among other significant aspects. These will allow us to conclude that the mixed integer non-linear programming model makes it possible to find the optimal location of several GD units in the network, guaranteeing the technical conditions of the network and fulfilling the objective of minimizing losses in the system.

Keywords:

Distribution, GAMS, optimization, mixed integer nonlinear programming, IEEE 33 buses system, Distributed Generation

“UBICACIÓN ÓPTIMA DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN REDES DE DISTRIBUCIÓN USANDO PROGRAMACIÓN NO LINEAL ENTERA MIXTA”

Introducción

La Generación Distribuida (GD) es la expresión comúnmente usada para nombrar la generación de energía eléctrica cercana a los consumidores [1]. En este contexto, la implementación de la GD ha impulsado crecientes avances técnicos y tecnológicos y su masificación en el mundo, en consecuencia, resulta de suma importancia poseer una noción exacta del impacto que un generador provoca sobre las redes de distribución, a fin de determinar las acciones pertinentes para conservar la calidad del servicio de los clientes y la seguridad en el abastecimiento de la demanda [2].

La importancia de la GD comenzó a resaltar en los últimos años cuando muchos países liberaron sus mercados eléctricos y comenzaron a incentivar la evolución de nuevas tecnologías de generación. Otro de los factores que ha generado un creciente interés en la GD es la reducción del impacto ambiental ya que esta se asocia comúnmente con la producción de energías limpias. [1]

Para la producción de electricidad, la GD puede utilizar fuentes de energía renovable promoviendo la generación eólica, solar o biodiesel, así mismo puede usarse energía no renovable produciendo generación con microturbinas, motores de combustión, entre otros.

Dada su colocación cerca de la demanda, la GD brinda grandes beneficios repercutiendo en la eficiencia energética, contribuyendo a la disminución de pérdidas activas y al mejoramiento del perfil de voltajes. De la misma manera, estudios recientes han mostrado que la GD puede aportar otros beneficios como el aplazamiento de inversiones en la red, la mejora de confiabilidad y la pérdida de congestión. No obstante, los beneficios de la GD dependen en gran medida de su ubicación y su dimensionamiento. [2] [3]

El beneficio de la GD depende de gran medida de su ubicación y dimensionamiento, se ha demostrado asimismo que una inadecuada planeación de la GD puede acarrear efectos negativos al sistema como el acrecentamiento de pérdidas y sobrevoltajes en la red. Por esta razón, es importante contar con metodologías que permitan determinar la ubicación

apropiada de la GD para lograr sus máximos beneficios y al mismo tiempo respetar las restricciones operativas de la red. [3]

Por otra parte, se ha mostrado igualmente que una inadecuada planificación de la GD puede conducir efectos negativos al sistema como el aumento de pérdidas y sobrevoltajes en la red. Razón por la cual es de vital importancia contar con metodologías que permitan determinar la ubicación apropiada de GD para lograr sus máximos beneficios y al mismo tiempo respetar las restricciones operativas de la red. [3]

Un factor importante a considerar es la inserción de las fuentes de generación en base a energías renovables no convencionales, ERNC, dados los beneficios medioambientales que estas significan, además de su independencia de materia prima con un costo atribuible. [2]

Para mostrar la efectividad del modelo se realiza un análisis en un sistema de distribución tipo, permitiendo así verificar que la GD, ubicada de manera óptima, contribuye al mejoramiento del perfil de voltajes y a la reducción de pérdidas siendo eficientes en el uso de la energía.

Por lo expuesto, el modelo a ser resuelto corresponde a un problema de optimización de programación no lineal entero mixto, el cual permite encontrar la ubicación óptima de diferentes unidades de GD en la red, asegurando el abastecimiento de la demanda, cumpliendo con los aspectos de calidad de la red, de modo que ayuden a cumplir el objetivo de minimización de pérdidas.

El estudio pretende evaluar las mejoras a nivel técnico que un sistema de distribución tipo de 33 barras IEEE puede alcanzar mediante la ubicación óptima de generación distribuida, usando para el efecto un modelo matemático de programación no lineal entero mixto que considerará las características inherentes a la operación de los sistemas eléctricos. En este contexto, el sistema eléctrico tipo de 33 Barras IEEE será modificado a fin de que éste contemple las características eléctricas de los sistemas de distribución del Ecuador. Bajo este escenario, se realizará los análisis comparativos correspondientes a fin de determinar las bondades de la implementación de generación distribuida en los sistemas de distribución, enfocándose principalmente en la minimización de pérdidas. El modelo

matemático de optimización a ser propuesto será resuelto usando la herramienta computacional GAMS.

Con la ubicación óptima de GD se mejorará el desempeño de los sistemas distribución de energía eléctrica, lo cual implícitamente disminuirá el costo de la energía al consumidor final ya que se minimizan las pérdidas, se mejora el nivel de voltaje y el nivel de confiabilidad en la red.

Objetivo general

Determinar la ubicación óptima de generación distribuida en un sistema eléctrico de distribución a través de la resolución de un modelo de programación no lineal entero mixto el cual será resuelto mediante la herramienta computacional GAMS.

Objetivos específicos

- Evaluar las condiciones técnicas necesarias de la distribuidora para poder interconectar una central de generación distribuida.
- Elaborar un modelo de programación no lineal entero mixto que permita determinar la ubicación óptima de fuentes de GD en sistemas de distribución.
- Realizar un análisis comparativo de la operación del sistema de distribución, a fin de determinar las ventajas de ámbito técnico que brinda la incorporación de GD en los sistemas de distribución.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Situación del Sector Energético en el Ecuador

Según el Balance Energético Nacional 2015 (BEN) (año base 2014) el consumo final de energía alcanzó 101 Mbep, lo que representó un incremento de 11% respecto al año anterior. [4]

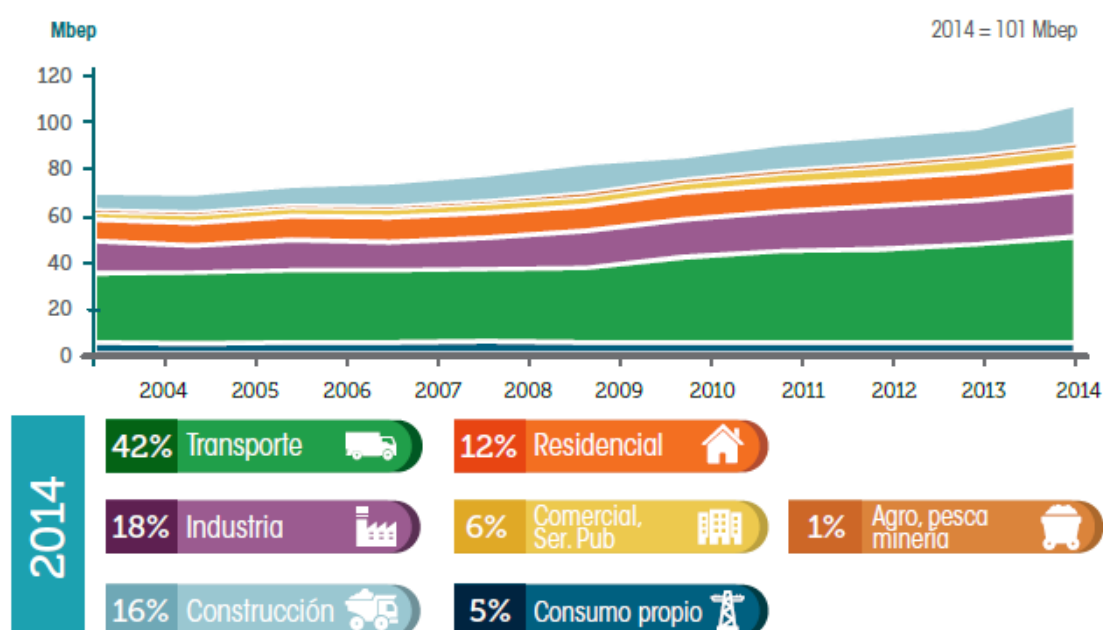


Figura 1.1. Evolución del consumo de energía por sectores
(Fuente: BEN (2015))

En la Figura 1.1 se muestra la evolución del consumo de energía por sectores, lo cual muestra como un sector principal al Transporte con una correspondencia del 42% del total del consumo energético nacional, el sector Industrial con un (18%), el sector Residencial (12%), el sector Comercial (5,68%), la Agropesca y Minería (0,94%), la Construcción y otros (16,47%), finalmente se tiene el autoconsumo (consumo propio) del sector energético con una representatividad del 5%.

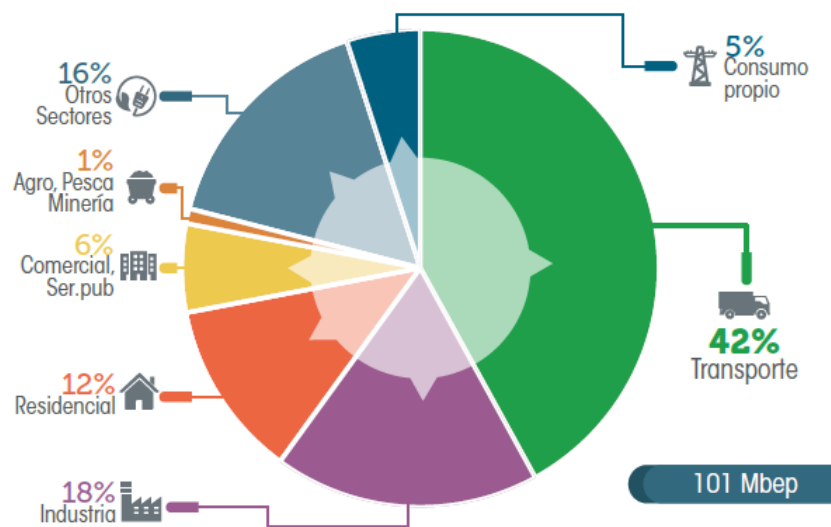
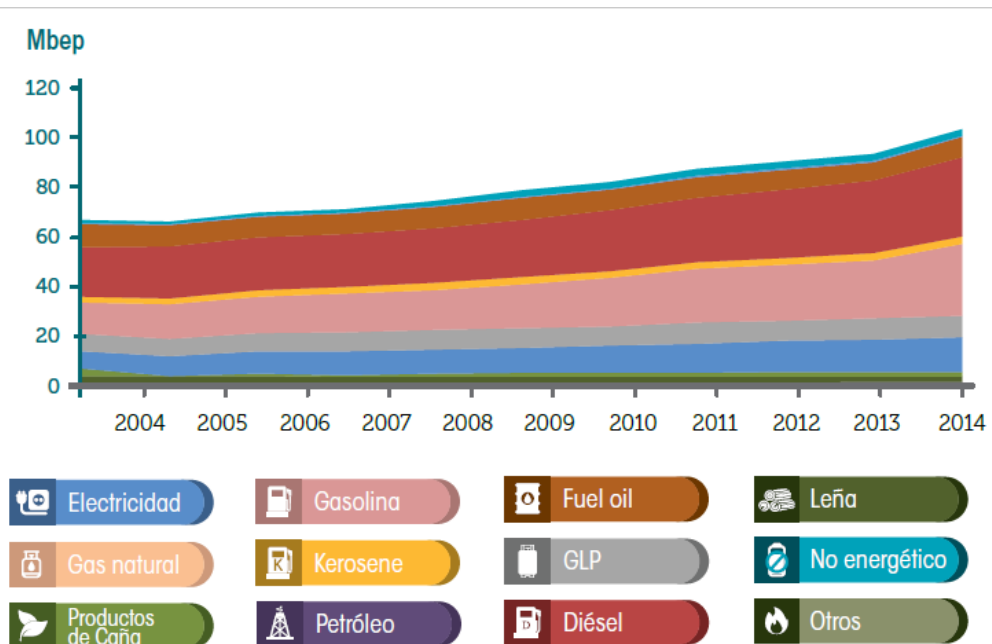


Figura 1.2. Estructura del consumo de energía por sectores
(Fuente: BEN (2015))

Por otro lado de acuerdo Plan Nacional de eficiencia energética 2016 -2035 los principales energéticos consumidos en los diferentes sectores identificados fueron: diésel (31%), gasolinas y naftas (28%), electricidad (13,5%), gas licuado de petróleo (GLP) (8,5%) y fuel oil (8,1%). [4]



Fuente: BEN (2015)

Figura 1.3. Estructura del consumo de energía por energético
(Fuente: BEN (2015))

1.2. Políticas de Eficiencia Energética en el Ecuador

La eficiencia energética juega un rol significativo en la competitividad y los aspectos sociales, en tanto es una de las formas más efectivas de abordar el cambio climático, así como en la seguridad del suministro energético. Sin embargo, presenta importantes barreras que no permiten alcanzar el potencial existente. [4]

En nuestro país, estas barreras consisten principalmente en inversiones iniciales elevadas, bajo involucramiento de actores claves, falta de información, acceso limitado a tecnologías eficientes, limitación de cuantificar y calcular los beneficios asociados a la eficiencia energética. [4]

Por tal razón es prioritario para el Gobierno incorporar la eficiencia energética como una política pública. A la fecha, varias acciones y medidas han sido desarrollados, entre ellas: limitaciones a la comercialización de equipamiento ineficiente, planes de recambio de equipamiento a nivel residencial, medidas arancelarias y tributarias para promover la eficiencia energética, tarifas preferenciales para promover el uso eficiente de la energía, reglamentos técnicos de cumplimiento obligatorio, entre otras.

El Ecuador ha experimentado un crecimiento económico que se traduce en el mejoramiento de la calidad de vida de la población y, por tanto, en un incremento de la demanda interna de energía [4]. Este incremento de las necesidades energéticas puede estar controlado gracias al uso de programas de eficiencia energética que, en términos sencillos, consisten en lograr que el Ecuador disminuya la cantidad de energía para generar una misma unidad de producto o servicio.

Desde la óptica socioeconómica, la eficiencia energética es un instrumento para la generación de empleo de alta especialización en la aplicación de programas y proyectos de gran impacto, lo cual permite un desarrollo descentralizado y promueve la investigación y la generación de conocimiento local.

En cuanto a la gestión ambiental, la producción y el consumo de energía son las principales causas de las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero (GEI), las cuales representaron 44,49%, en el año 2010. [4]

A nivel internacional, la eficiencia energética ha sido incorporada como una política pública con enfoque energético y ambiental que busca ser una herramienta de planificación sectorial. A nivel regional, se puede citar a Brasil, Chile y México como casos exitosos, en los que se incorporaron instituciones dedicadas a este tema en la estructura gubernamental y, por tanto, se lograron importantes resultados, como la optimización de recursos energéticos, el incremento de la competitividad de los sectores estratégicos, el acceso a fuentes de financiamiento internacional y el impulso al desarrollo de nuevas capacidades locales y actividades de alto valor agregado [4].

1.3. Plan Nacional de Eficiencia Energética 2016 -2035 (PLANEE)

En el Plan Nacional de Eficiencia Energética 2016 -2035 se espera que hasta el año 2035 se sustituya los combustibles y fuentes de energía que generan alto impacto ambiental por otras fuentes con bajo contenido o sin carbono, incluyendo fuentes de energía renovable. En este PLANEE, se muestra el compromiso que tiene nuestro país con el planeta, al promover acciones concretas para garantizar, a la población y a las futuras generaciones, un desarrollo económico sostenible basado en el acceso a una energía moderna, limpia y económica, por medio de una utilización de los recursos de los que se disponen, más inteligente, eficiente y responsable con el entorno [4].

PLANEE tiene como objetivo general el ampliar el uso eficiente de los recursos energéticos mediante la ejecución de programas y proyectos de eficiencia energética en los sectores relacionados con la oferta y demanda de energía, a fin de reducir la importación de derivados del petróleo, contribuir a la mitigación del cambio climático y crear una cultura de eficiencia energética respaldada por una sólida base jurídica e institucional. [4]

Se propone como meta que en el periodo 2016-2035, el umbral mínimo de energía evitada en los sectores de análisis del PLANEE, sea de alrededor 543 Mbep. Este ahorro representará aproximadamente USD 84 131 millones², con una reducción estimada de emisiones de GEI de 65 MtCO_{2e}. [4]

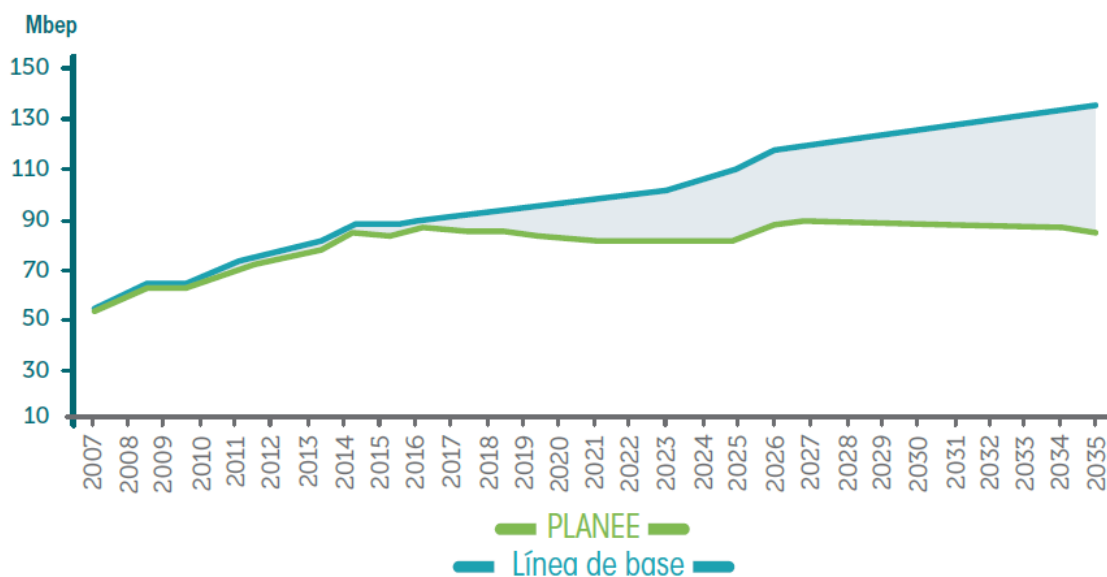


Figura 1.4. Energía total evitada por la implementación del PLANEE
(Fuente: MEER, (2017))

En la Figura 1.4 se muestra la Energía total evitada que se puede lograr con la implementación del PLANEE, razón por la cual se plantea como objetivo sectorial el de garantizar la estabilidad y permanencia de las políticas, planes y proyectos de eficiencia energética en el largo plazo, mediante el fortalecimiento de los marcos jurídico e institucional existentes cuya meta es el contar para el 2020 con un marco jurídico fortalecido y una institucionalidad sólida orientada a la promoción de la eficiencia energética.

1.4. Situación actual del sector Eléctrico

De acuerdo al documento denominado “El sector Eléctrico ecuatoriano 2007-2016”, publicado por el MEER, establece que la capacidad instalada de generación eléctrica ha evolucionado en la última década, este incremento en la oferta de generación de electricidad ha sido posible gracias a la inversión en nuevas centrales hidroeléctricas, las cuales se incorporaron al Sistema Nacional Interconectado (SNI). Las centrales Coca Codo Sinclair (1 500 MW), Sopladora (487 MW), Manduriacu (65 MW), Minas San Francisco (275 MW) y Mazar (160 MW), entre otras, permitieron incrementar la generación hidroeléctrica, reducir la generación térmica y ampliar la cobertura de electricidad de 92,89% a 97,18%, lo que se tradujo en que más de 900 000 familias accedieran al servicio de energía eléctrica, entre 2007 y 2015. [7]

En este mismo periodo, se ejecutó el Programa de Reducción de Pérdidas, gracias al cual se redujeron las pérdidas de energía eléctrica de distribución, de 22,25% a 12,11%, lo que representó un ahorro económico acumulado de más de USD 1 200 millones. El porcentaje de pérdidas no técnicas varió de 56% a 33%, como consecuencia de la mejora de las acciones administrativas. [7]

En cuanto al parque termoeléctrico, de acuerdo con el Plan Maestro de Electrificación 2013- 2022, existen 43 centrales que generan una energía neta total de 6 944,68 GWh/año. Dichas centrales cuentan con generadores de combustión interna, unidades de vapor y a gas. [7]

1.5. Situación del sector eléctrico ecuatoriano al 2017

Al 2017, la capacidad de generación a nivel nacional se registró en 8.036,34 MW de potencia efectiva como se muestra en la Tabla 1-1, en esta se incluyen las empresas generadoras, autogeneradoras y distribuidoras con generación.

Tabla 1.1.Potencia nominal y efectiva a nivel nacional (MW)

Tipo de Fuente	Tipo de Central	Tipo de Unidad	Potencia nominal (MW)	Potencia Efectiva (MW)
Renovable	Hidráulica	Hidráulica	4.515,96	4.486,41
	Eólica	Eólica	144,30	136,40
	Fotovoltaica	Fotovoltaica	26,48	25,59
	Biomasa	Biomasa	21,15	21,15
	Biogas	Biogas	7,26	6,50
Total Renovable			4.715,15	4.676,05
No Renovable	Térmica	MCI	1.937,48	1.551,47
		Turbogás	921,85	775,55
		Turbovapor	461,86	431,74
Total No Renovable			3.321,19	2.758,76
Total Potencia Nominal			8.036,34	7.434,81

(Fuente: Atlas del Sector Eléctrico Ecuatoriano 2017)

1.6. Producción de la electricidad

El proceso de producción de la energía eléctrica se encuentra constituida por la generación, transmisión, distribución y comercialización, en esta última llegando al usuario final para lo cual la empresa de distribución y comercialización garantiza niveles óptimos de voltaje, confiabilidad y seguridad. En la Figura 1.5, se puede observar el esquema de la cadena de producción.

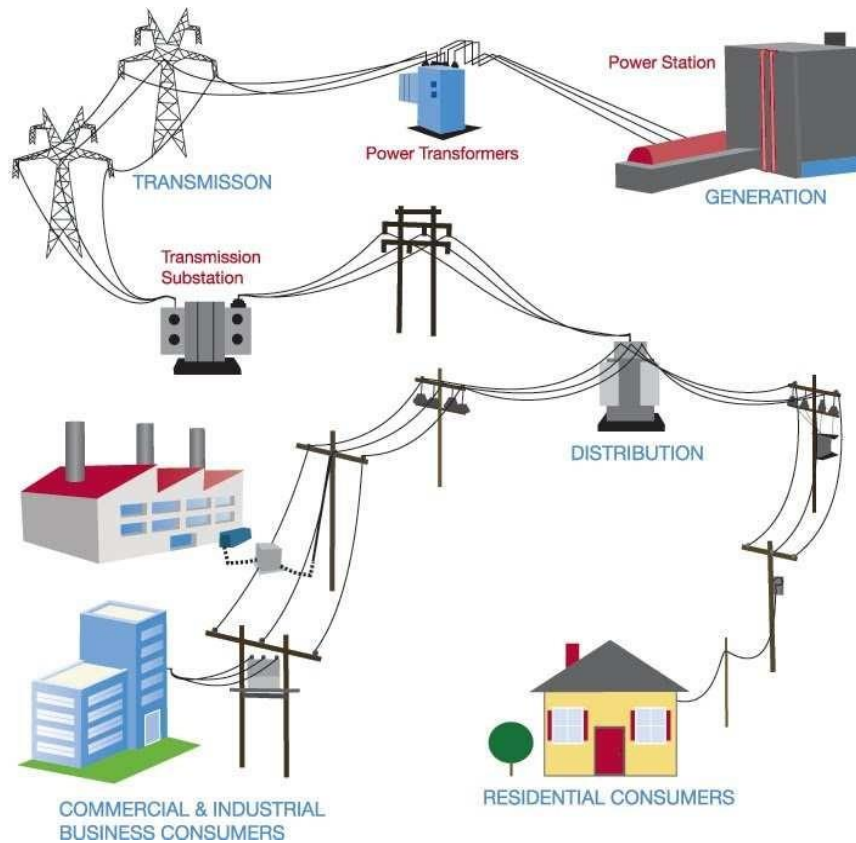


Figura 1.5. Cadena de la Energía eléctrica
(Fuente: Goikoetxea, 2011)

1.6.1. Generación

La generación de energía eléctrica corresponde a una fuente de energía secundaria, la cual es obtenida de fuentes de energía primaria como fuentes químicas, mecánicas, potenciales, cinéticas, térmicas, solares, etc.,

En el Ecuador en 2017, la potencia nominal de Generación a nivel nacional fue 8.036,34 MW; de los cuales, 4.715,15 MW (58,67 %) corresponden a centrales con fuentes de energía renovable y 3.321,19 MW (41,33 %) a centrales con fuentes de energía no renovable.

Centrales de generación con fuentes de energía Renovable

Las fuentes de energía renovable que aprovechó el país para la generación de electricidad en 2017 fueron: hidráulica, biomasa, fotovoltaica, eólica y biogás. La capacidad instalada

de las centrales hidroeléctricas destaca mayoritariamente (95,78 %) entre las de tipo renovable. [7]

Estas centrales se encuentran instaladas en tres regiones del Ecuador: costa (2 provincias), sierra (9 provincias) y amazonía (4 provincias). En la Tabla 1.2, se detalla la potencia nominal y efectiva de centrales de generación con fuentes de energía renovable por provincia. Azuay presenta la mayor concentración de potencia nominal, conformada principalmente por los 1.075 MW de la central hidroeléctrica Paute de CELEC EP Unidad de Negocio Hidropaute. En segundo lugar se encuentra Napo, con el aporte de 1.500 MW de la central Coca Codo Sanclair de CELEC EP Unidad de Negocio Coca Codo Sinclair. [7]

Tabla 1.2: Potencia de centrales de generación con ERNC (MW)

Tipo de Central	Provincia	Potencia nominal (MW)	Potencia Efectiva (MW)
Hidráulica	Azuay	1.772,49	1.797,48
	Bolívar	8,00	8,00
	Cañar	32,33	32,33
	Carchi	4,82	4,15
	Chimborazo	16,33	15,65
	Cotopaxi	47,39	45,27
	Guayas	213,00	213,00
	Imbabura	74,56	75,72
	Los Ríos	57,57	56,20
	Morona Santiago	88,43	87,94
	Napo	1.519,25	1.494,40
	Pichincha	134,38	133,20
	Sucumbíos	49,71	49,71
	Tungurahua	495,30	470,96
	Zamora Chinchipe	2,40	2,40
Total Hidráulica		4.515,96	4.486,41
Eólica	Galápagos	4,65	4,65
	Loja	16,50	16,50
Total Eólica		21,15	21,15
Fotovoltaica	Cotopaxi	2,00	2,00
	El Oro	5,99	5,99
	Galápagos	1,64	1,64
	Guayas	3,98	3,98
	Imbabura	4,00	3,99
	Loja	5,99	5,12
	Manabí	1,50	1,49
	Morona Santiago	0,37	0,37
	Pichincha	1,00	1,00
Total Fotovoltaica		26,48	25,59
Biomasa	Cañar	29,80	27,60

	Guayas	114,50	108,80
Total Biomasa		144,30	136,40
Biogás	Azuay	1,06	1,00
	Pichincha	6,20	5,50
Total Biogás		7,26	6,50
Total General		4.715,15	4.676,05

(Fuente: Atlas del Sector Eléctrico Ecuatoriano 2017)

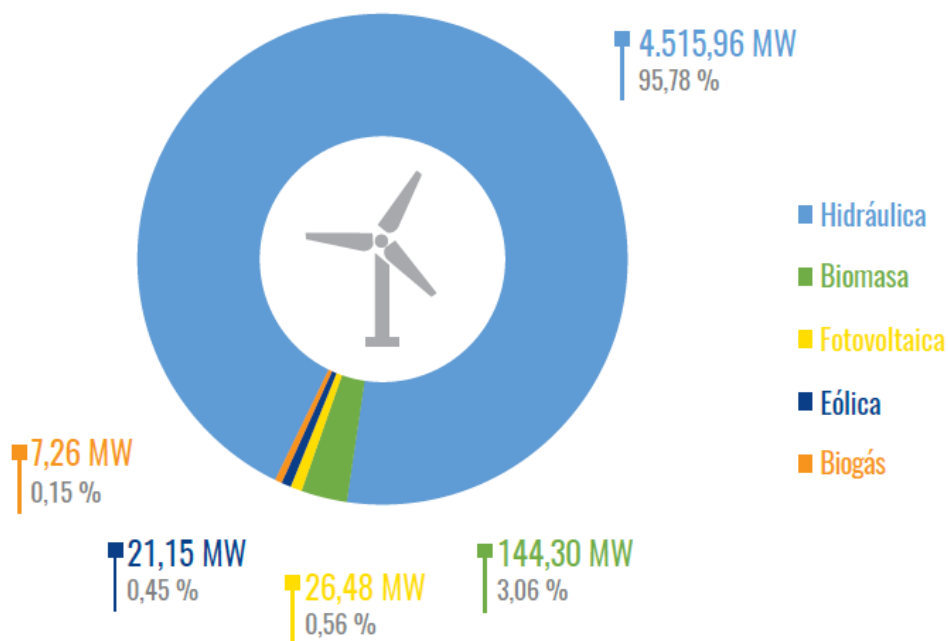


Figura 1.6. Potencia de centrales de generación con fuentes de energía renovable
(Fuente: Atlas del Sector Eléctrico Ecuatoriano 2017)

Centrales de generación con fuentes de energía no renovable

Estas centrales utilizan combustibles fósiles (derivados de petróleo y gas natural) como fuente energética para generar electricidad; al 2017, se registraron 3.321,19 MW de potencia nominal a nivel nacional [7]. Las centrales de generación con fuentes de energía no renovable se encuentran instaladas en las cuatro regiones del Ecuador: costa (6 provincias), sierra (6 provincias), Amazonía (5 provincias) e insular. Al 2017, las regiones con mayor capacidad instalada fueron: costa con 1.768,24 MW; y, Amazonía con 1.268,47 MW [7].

En Guayas se encuentran varias centrales térmicas cuya potencia nominal suman 805,76 MW. Así mismo, en Orellana se dispone de generación térmica con 642,80 MW de potencia; que corresponde a empresas autogeneradoras dedicadas a actividades

petroleras [7]. Las centrales térmicas que utilizan motores de combustión interna (MCI) tuvieron una potencia nominal de 1.937,48 MW para el 2017; seguidas de centrales de turbogás con 921,85 MW y centrales turbovapor con 461,87 MW. [7]

Tabla 1.3: Potencia de centrales de generación con ERNC (MW)

Tipo Unidad	Provincia	Potencia nominal (MW)	Potencia Efectiva (MW)
MCI	Orellana	553,80	413,45
	Sucumbíos	462,16	357,96
	Manabí	192,40	170,42
	Santa Elena	131,80	105,03
	Esmeraldas	112,42	94,22
	Pichincha	110,94	102,72
	Los Ríos	95,20	81,00
	Napo	77,63	54,44
	Pastaza	56,90	47,77
	Guayas	40,92	36,92
	Imbabura	29,28	24,30
	Galápagos	25,61	21,27
	Loja	19,74	17,17
	Azuay	19,20	17,20
	Tungurahua	5,00	3,60
Morona Santiago	4,50	4,00	
Total MCI		1.937,48	1551,47
Turbogás	Guayas	451,34	379,00
	El Oro	275,36	249,60
	Orellana	77,00	57,20
	Pichincha	71,10	51,00
	Sucumbíos	24,25	19,75
	Manabí	22,80	19,00
Total Turbogás		921,85	775,55
Turbovapor	Guayas	313,50	293,00
	Esmeraldas	132,50	125,00
	Orellana	12,00	11,00
	Cañar	3,63	2,50
	Morona Santiago	0,24	0,24
Total Turbovapor		461,87	431,74
Total General		3.321,19	2.758,76

(Fuente: Atlas del Sector Eléctrico Ecuatoriano 2017)

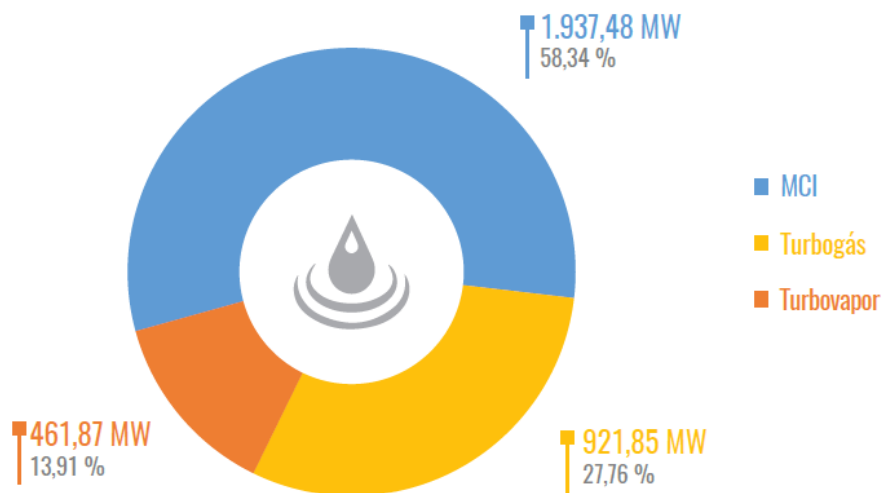


Figura 1.7. Potencia de centrales de generación con fuentes de energía no renovable
(Fuente: Atlas del Sector Eléctrico Ecuatoriano 2017)

1.6.2. Transmisión

El Sistema Nacional de Transmisión (SNT) está conformado por subestaciones y líneas que operan a voltajes de 500 kV, 230 kV y 138 kV. Esta infraestructura pertenece a la CELEC EP - Unidad de Negocio Transelectric y a centros de generación que se interconectan directamente con el sistema de transmisión [7].

La operación del sistema de transmisión a 500 kV inició en el 2016, este, en una primera etapa, interconecta las subestaciones Coca Codo Sinclair, San Rafael y El Inga mediante líneas de transmisión que tienen una longitud de 263,80 km; lo cual representa 8,16 % del total nacional de líneas a circuito simple [7].

La siguiente Tabla 1.4 muestra las longitudes de líneas de transmisión del SNT, se incluyen las líneas para interconexión con Perú (doble circuito a 230 kV, 103,19 km) y Colombia (dos líneas de doble circuito a 230 kV, cada una de 214 km y una de simple circuito a 138 kV de 15,5 km) de CELEC EP - Unidad de Negocio Transelectric [7].

Tabla 1.4: Longitud de líneas de transmisión (km)

Empresa	Tipo de Circuito	500 (kV)	230 (kV)	138 (kV)
CELEC Transelectric	Simple	263,80	1.255,02	1.715,35
	Doble	-	1.747,21	502,47
Total General		263,80	3.002,23	2.217,83

(Fuente: Atlas del Sector Eléctrico Ecuatoriano 2017)

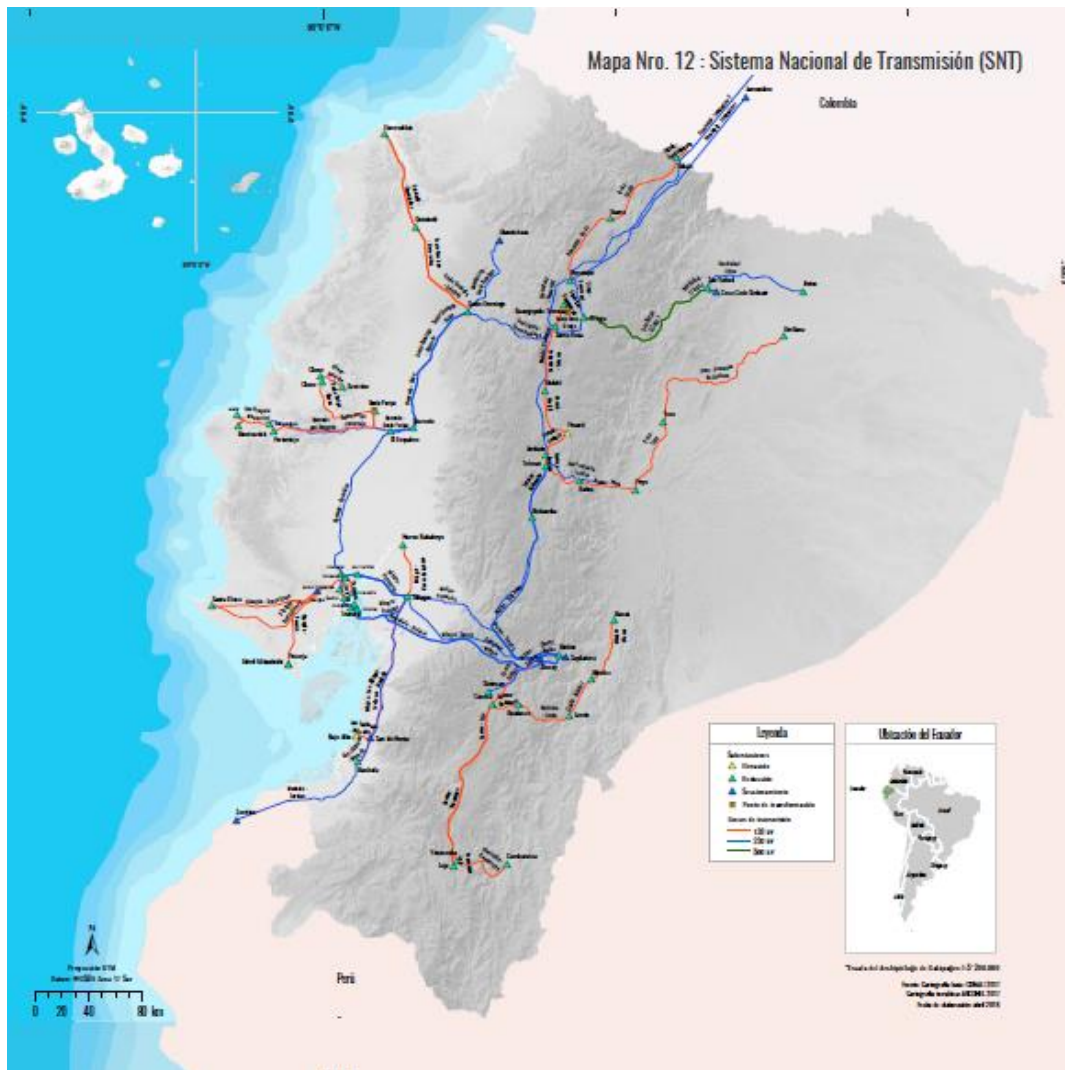


Figura 1.8. Sistema Nacional de Transmisión del Ecuador
(Fuente: Atlas del Sector Eléctrico Ecuatoriano 2017)

1.6.3. Distribución

Los 257.215,30 km² de superficie territorial del Ecuador están divididos en 20 áreas de prestación del servicio público de energía eléctrica. De las cuales 11 áreas están asignadas a las Unidades de Negocio de la Empresa Eléctrica Pública Estratégica Corporación Nacional de Electricidad (CNEL EP); y, 9 a las empresas eléctricas [7].

Como se detalla en la Tabla Nro. 9, la CNEL EP tiene un área total de 115.877,98 km², correspondiente al 45,05 % de la superficie del país; y, del 54,95 % restante son responsables de la prestación del servicio las empresas eléctricas.

Las áreas de prestación del servicio se generaron con base a la existencia de la red de suministro del servicio eléctrico de cada empresa, cuyos límites no corresponden a la organización territorial del Estado. Sin embargo, se considera los siguientes criterios con relación al cambio administrativo de algunas zonas territoriales:

- El sistema eléctrico de La Troncal de la CNEL EP UN Milagro, se incluyó en el área de prestación del servicio de la E.E. Centro Sur.
- El sistema eléctrico La Maná de CNEL EP UN Guayas Los Ríos, es administrada por la E.E. Cotopaxi.
- El sistema eléctrico de la Zona Norte de CNEL EP UN Manabí, es administrada por la CNEL EP UN Santo Domingo.
- El sistema eléctrico de El Salto del Tigre de la E.E. Norte, es administrada por la E.E. Quito.

Tabla 1.5: Áreas de prestación del Servicio

Empresa	Área (km ²)	Participación %
CNEL- Sucumbíos	38.517,82	14,97
CNEL- Esmeraldas	15.526,49	6,04
CNEL- Sto. Domingo	12.894,11	5,01
CNEL- Manabí	10.909,04	4,24
CNEL- Guayas los Ríos	10.354,14	4,03
CNEL- El Oro	6.731,86	2,62
CNEL- Sta.Elena	6.487,26	2,52
CNEL- Milagro	5.025,53	1,95
CNEL- Bolívar	4.038,86	1,57
CNEL- Los Ríos	4.009,97	1,56
CNEL- Guayaquil	1.382,89	0,54
Total CNEL EP	115.877,98	45,05
E.E. Ambato	41.787,30	16,25
E.E. Centro Sur	30.273,40	11,77
E.E. Sur	22.787,55	8,86
E.E. Quito	13.399,10	5,21
E.E. Norte	11.862,10	4,61
E.E. Galápagos	8.233,11	3,20
E.E. Riobamba	5.964,41	2,32
E.E. Cotopaxi	5.880,14	2,29
E.E. Azogues	1.150,21	0,45
Total Empresas Eléctricas	141.337,32	54,95
Total general	257.215,30	100,00

(Fuente: Atlas del Sector Eléctrico Ecuatoriano 2017)

1.7. Microgeneración fotovoltaica para autoabastecimiento de consumidores finales de energía eléctrica.

La Regulación Nro. ARCONEL -003/18 denominada ***“Microgeneración fotovoltaica para autoabastecimiento de consumidores finales de energía eléctrica”***., establece las condiciones para el desarrollo, implementación y participación de consumidores que cuenten con sistemas de microgeneración fotovoltaica – uSFV ubicados en techos, superficies de viviendas o en edificaciones para las categorías residencial y general determinados en el pliego tarifario en bajo o medio voltaje [5].

La normativa es aplicable a las empresas distribuidoras y para aquellos usuarios regulados, que decidan, previo al acatamiento de requisitos, establecer un sistema de microgeneración fotovoltaica uSFV con una capacidad nominal instalada de hasta 100 kW en medio y/o bajo voltaje, que operen en sincronismo con la red, cuya productividad sea autoconsumida en sus propias infraestructuras y aporten eventuales excedentes a la red de distribución, en caso de que existan [5].

En esta regulación se determinan las condiciones técnicas y comerciales para la instalación de sistemas fotovoltaicos hasta 100 kW de capacidad nominal instalada, los requisitos y procedimiento para la conexión a las redes de la empresa distribuidora y la autorización de instalación y operación del uSFV, las condiciones para la medición, la operación en sincronismo con la red de distribución y finalmente el tratamiento comercial de la energía producida, de la energía consumida y eventuales excedentes de generación entregados al sistema de distribución. [5]

El 16 de enero de 2019 mediante resolución Nro. ARCONEL -057/18 se reformó la Regulación Nro. ARCONEL -003/18 denominada ***“Microgeneración fotovoltaica para autoabastecimiento de consumidores finales de energía eléctrica”***, en la que se establece que hasta que se emita la regulación sobre generación distribuida, las condiciones establecidas para el desarrollo, implementación y participación de consumidores que cuenten con sistemas fotovoltaicos de hasta 100 kW de capacidad nominal, serán aplicables para consumidores residenciales que tengan interés en instalar sistemas fotovoltaicos de hasta 300 kW de capacidad nominal instalada; y de hasta menos de 1000 kW, para consumidores comerciales o industriales y se reforma el nombre de la Regulación Nro. ARCONEL-003/18, Microgeneración fotovoltaica para autoabastecimiento

de consumidores finales de energía eléctrica, a “Generación fotovoltaica para autoabastecimiento de consumidores finales de energía eléctrica” [6].

1.8. Generación Distribuida - GD

La GD es un nuevo enfoque en la producción eléctrica, en la literatura, se utiliza un gran número de términos y definiciones en relación con la generación distribuida, por ejemplo, los países angloamericanos a menudo se utiliza el término "generación incorporada", países de América del Norte el término "generación dispersa", y en Europa y partes de Asia, el término 'generación descentralizada' es aplicado para el mismo tipo de generación.

En lo que respecta a la calificación de las unidades de potencia de generación, actualmente se utilizan diferentes definiciones como las siguientes [8]:

1. El Instituto de Investigación de Energía Eléctrica, con sede en Estados Unidos define la generación distribuida como la generación de "unos pocos kilovatios hasta 50 MW" [9] .
2. Según el Instituto de Investigación del Gas, organización estadounidense de investigación y desarrollo sin fines de lucro, indica que la GD se encuentra típicamente entre 25 y 25 MW' [10] .
3. Preston y Rastler definen el tamaño como "que va desde unos pocos kilovatios a más de 100 MW ' [11];
4. Cardell define generación distribuida como generación. «Entre 500 kW y 1 MW» [11]
5. La Conferencia Internacional de Gran Voltaje Alto. Electric Systems (CIGRE´) define a DG como 'pequeña de 50–100 MW ' [12];
6. El DPCA (Distribution Power Coalition of América) defina a la Generación Distribuida como, cualquier tecnología de generación a pequeña escala que proporciona electricidad en puntos más cercanos al consumidor que la generación centralizada y que se puede conectar directamente al consumidor o a la red de transporte o distribución. [13]
7. La Agencia Internacional de la Energía (IEA, International Energy Agency) considera como GD, únicamente, la que se conecta a la red de distribución en bajo voltaje y la asocia a tecnologías como los motores, mini – y microturbinas, pilas de combustible y energía solar fotovoltaica [13]

Acorde a la terminología antes descrita, se puede indicar que en forma general la GD se puede definir como generación de energía eléctrica dentro de las redes de distribución en el lado de la red del cliente. Esta definición de GD no define los valores de las fuentes de Generación, sin embargo, es útil introducir categorías a los valores de GD, siendo los siguientes [8]:

Micro GD	1 Watt < 5kW
Pequeña GD	5kW < 5MW
Mediana GD	5MW < 50 MW
Gran GD	50 MW < 300 MW

1.9. Efectos de la GD en sistemas de energía eléctrica

Existen varios efectos a considerar de la GD en sistemas de energía eléctrica, entre los más relevantes se describen a continuación.

1.9.1. Operación y Control

La GD varía su salida en relación a la carga local. Esta salida de potencia de GD se puede regular independientemente de la carga local del área. Este modo de control se implementa si la operación de la GD sigue la señal, que podría corresponder o no a las variaciones de carga local, o si la GD sigue la disponibilidad de recursos naturales, o los diferentes tipos de GD como la energía solar o eólica, etc. En este caso, GD podría afectar negativamente la funcionalidad de control de voltaje de la red al aumentar las variaciones entre el nivel de voltaje máximo y mínimo, en comparación con una situación en la que GD no está disponible. Dado que el nivel mínimo de voltaje podría permanecer (generalmente en una carga alta, sin situación de GD), el nivel máximo de voltaje podría aumentar, por ejemplo, en situaciones de baja carga con GD operando a máxima potencia y con un factor de potencia de unidad. En términos generales, la GD puede proporcionar algunos desafíos al control tradicional de voltaje, frecuencia y potencia [14] [15].

Debido a la gran penetración de la GD, existe un riesgo de problemas de control y estabilidad. Si un disyuntor del sistema se abre, podría resultar en una formación de islas de una unidad de GD, si la unidad GD no detecta la pérdida de la red, por ejemplo, debido a una corriente de falla, la unidad de GD continuará funcionando, en tal caso si la unidad de GD puede hacer coincidir la potencia activa y reactiva de la carga en el sistema en isla de manera precisa, entonces el sistema en isla podría continuar funcionando sin ningún

problema. Sin embargo, es muy poco realista que la GD coincida exactamente con la carga en el sistema durante el tiempo en que se abre el interruptor, por lo que se producirán grandes variaciones de frecuencia o voltaje cuando la unidad GD intente suministrar carga. Por lo tanto, la mayoría de las reglas de interconexión requieren un sistema de detección de pérdida de la red principal que desconecta automáticamente la unidad de GD en caso de una pérdida de la red principal y la unidad permanece desconectada hasta que se restaura la red [15] [14].

1.9.2. Cambio de la capacidad de Corto Circuito

La instalación de nuevos generadores distribuidos en las redes de distribución aumenta potencialmente el nivel de capacidad de cortocircuito (SCC). Aunque a veces, es deseable tener un alto SCC, por ejemplo, en el punto de conexión del inversor de una estación de HDVC conmutada por línea o en presencia de grandes cargas con demandas que varían rápidamente, en general el aumento del SCC indica potencialmente un problema [15] [14].

1.9.3. Estabilidad

Tradicionalmente, el diseño de la red de distribución no tenía que considerar los problemas de estabilidad, ya que la red era pasiva y radial, y permanecía estable en la mayoría de los casos, siempre que la red de transmisión fuera estable. Pero esto cambiará a medida que aumente la penetración de estos esquemas y aumente su contribución a la seguridad de la red. Las áreas que deben considerarse incluyen transitorias, así como estabilidad dinámica a largo plazo y variación de voltaje [14] .

1.9.4. Nivel de Voltaje, integración e interconexión.

Debido al diseño unidireccional de la red de distribución tradicional, el voltaje se reduce con la distancia del generador o transformador. Estas caídas de voltaje son predecibles y se tienen en cuenta en el diseño de la red para que el voltaje esté dentro de la tolerancia en todas las condiciones normales. Cuando se conecta una unidad GD, los flujos de corriente cambian o incluso se invierten, y el voltaje generalmente aumentará de una manera que no es fácil de predecir. El requisito de cumplir con los límites legales de voltaje restringe la capacidad de GD que se puede conectar al sistema, particularmente en el nivel de bajo voltaje.

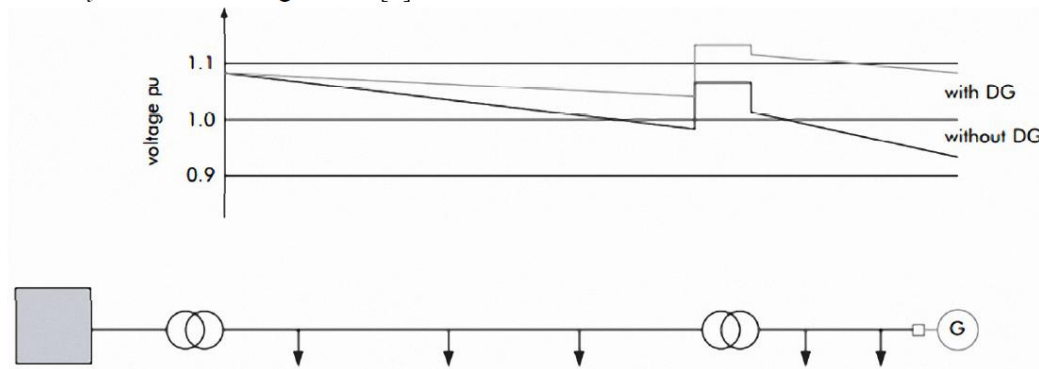


Figura 1.9. Aumento de debido al flujo de potencia debido a la GD
(Fuente: Loan, Abrudean, & Dorin, 2014)

1.9.5. Desviación de la forma de onda de voltaje: armónicos

La conexión de una unidad GD a la red puede influir en el nivel de distorsión armónica de voltaje dependiendo si se trata de un convertidor electrónico o de una máquina rotativa. Las interfaces de la electrónica de potencia ofrecen posibilidades avanzadas de soporte del sistema, pero inyectarán corrientes armónicas en el sistema. Dependiendo de la topología del sistema y la impedancia en el punto de conexión, pueden ocurrir niveles de voltaje armónico excesivo localmente o en cualquier otro lugar de la red. Los generadores rotativos también pueden inyectar armónicos debido al diseño del devanado y las no linealidades del núcleo. La relevancia de este aspecto depende del diseño de la red y los detalles específicos de GD [16] [14].

1.9.6. Calidad de potencia

Las distintas fuentes de GD poseen diferentes características y por lo tanto, crean diferentes inconvenientes en la calidad de energía. El efecto de aumentar el nivel de falla de la red agregando generación a menudo conduce a una mejor calidad de la energía. Una excepción notable es que una sola GD grande en una red débil, puede ocasionar problemas de calidad de energía, especialmente durante el arranque y la parada. El uso excesivo de dispositivos de electrónica de potencia y controles modernos introduce problemas de calidad de energía y estos dispositivos están muy inclinados a problemas de calidad de energía [15].

1.9.7. Requisitos del sistema de protección.

Dependiendo de las características de la GD (su potencia nominal, modo de operación, tecnología utilizada), la ubicación y la configuración de la red, el impacto de la GD en la protección contra sobrecorriente puede variar, por lo que la GD tendrá un impacto en el esquema de protección de la distribución. Si el sistema de protección de las unidades GD puede detectar la falla y desconectarse rápidamente de la red, la GD no interferirá con el funcionamiento normal del sistema de protección. La unidad GD deberá desconectarse si ocurre una falla [15].

Existe la necesidad de soluciones totalmente nuevas, pero obviamente algunas soluciones pueden adoptarse de los sistemas de alto voltaje (HV). Un tema interesante es la protección de las redes de bajo voltaje (LV), que tradicionalmente se basa en fusibles. En este contexto, vale suponer que una unidad de GD de baja potencia está suministrando energía a una rama de bajo voltaje, también suministrada por un transformador ΔY . Si una falla se desarrolla lejos de la unidad de GD, la corriente de falla del transformador hará que la protección del transformador funcione, dejando a la unidad de GD suministrando una corriente de falla que, debido a la impedancia relativamente alta del sistema, puede ser insuficiente para activar a la protección de la GD [16].

1.10. Tipos de Generación distribuida

Algunas fuentes de GD son novedosas y aún se mantienen en desarrollo, mientras que otras son tecnologías ya maduras y muy afianzadas en el mercado. Algunas son reconocidas por diferentes nombres como generadores de respaldo (back -up generators), o generación en sitio (on -site power). Las fuentes de GD pueden ser agrupadas en función de varios puntos de vista. Un criterio es en función de su agresividad al medio ambiente: fuentes tradicionales y, fuentes alternativas. Aunque un criterio muy común agrupa las tecnologías en: generación; y, almacenamiento [17].

Tabla 1.6 Tecnologías de Fuentes Distribuidas de Energía

Tecnologías GD	Comercialmente Disponible	Tecnología Emergente
Microturbina	X	
Motor Reciprocante	X	
Motor Stirling		X

Celda de Combustible	X	
Almacenamiento de Energía	X	
Sistemas Fotovoltaicos	X	
Sistemas Eólicos	X	
Sistemas Híbridos		X

(Fuente: Gonzalez-Longatt, 2017)

1.10.1. Microturbina

Las microturbinas son pequeños generadores de electricidad que queman combustible (gaseoso o líquido) para crear una rotación de alta velocidad en un generador de electricidad. Evolucionaron de los turbos cargadores de automóviles y camiones, unidades de potencia auxiliar de aviones, y motores de pequeños aeroplanos.

Las microturbinas son constituidas por un compresor, combustor, turbina, alternador, recuperador (intercambiador de calor interno) y generador. Las máquinas generalmente rotan sobre los 40000 rpm, empleando rodamientos en aceite o aire. Las microturbinas pueden ser clasificadas según el arreglo físico de sus partes componentes. Según el número de ejes: eje sencillo y eje partido; según el ciclo de calor empleado: Ciclo sencillo o recuperado. Las máquinas de un solo eje es el diseño más común debido a que es simple y menos costoso de construir, mientras que el diseño de eje partido no requiere un inversor para cambiar la frecuencia de la potencia AC.

Por su parte, la micro turbina de ciclo simple tienen un costo inferior, la confiabilidad es más alta, y más calor está disponible para aplicaciones de cogeneración que en las unidades recuperadas, pero estas últimas poseen un ahorro del 30-40% de combustible de precalentamiento. Las microturbinas ofrecen un número de ventajas potenciales: pequeño de partes móviles, tamaño compacto, peso ligero, gran eficiencia, electricidad de bajo costo, y oportunidad de emplear combustibles de desecho [17].

La eficiencia de la microturbina es función de varios factores, pero una microturbina típica, ronda el 30%, con una expectativa de vida útil de 60000 horas. La temperatura de los gases de escape las hace excelente candidatas a la recuperación de calor, con lo que se puede elevar la eficiencia global del sistema 80% y más. [17]

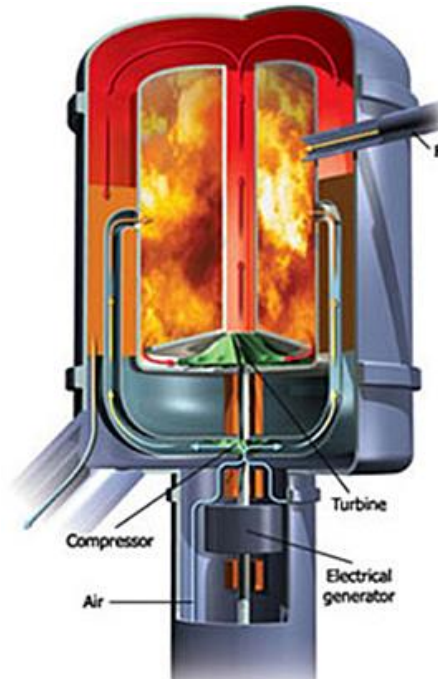


Figura 1.10. Microturbina

(Fuente: <https://www.wbdg.org/resources/microturbines>)

1.10.2. Motores Reciprocantes

Los motores reciprocantes, o a pistón, es la más común y técnicamente madura de la tecnología de GD. También son llamados de combustión interna, los motores reciprocantes requieren combustible, aire, compresión y una fuente de combustión para trabajar. Dependiendo de la fuente de ignición ellos se agrupan en dos categorías:

- 1 Motores de ignición por chispa (SI: spark-ignited), típicamente emplean la gasolina o el gas natural como combustible, o
- 2 Motores de ignición por compresión (CI: compression ignition), típicamente trabajan con combustible diésel.

Los motores reciprocantes comercialmente disponibles están en un rango de potencias de 0.5 kW a 6.5 MW. Ofrecen un bajo costo de capital, fácil instalación, proveen confiabilidad, una muy buena característica de seguimiento de la carga y la posibilidad de recuperación de calor. Las posibilidades de aplicación de los motores reciprocantes incluye: generación primaria o continua, peak shaving, respaldo, Premium power, generación remota, generación en stand-by. Los motores pueden operar con combustible generado por tratamiento de desechos (metano) y otros bio-combustibles (biofuel) [17].

Los motores recíprocos pueden operar con un amplio espectro de combustibles incluyendo el gas natural, diésel, gas de desecho, biogás, etc. Los motores de tamaño grandes pueden durar de 20 a 30 años mientras motores más pequeños (<1MW) tienden a tener vidas útiles cortas. Los motores recíprocos poseen eficiencias en un rango entre 25 a 45%. En general los motores diésel son más eficientes que los motores a gas natural, debido a que ellos operan a mayor relación de compresión. [17]

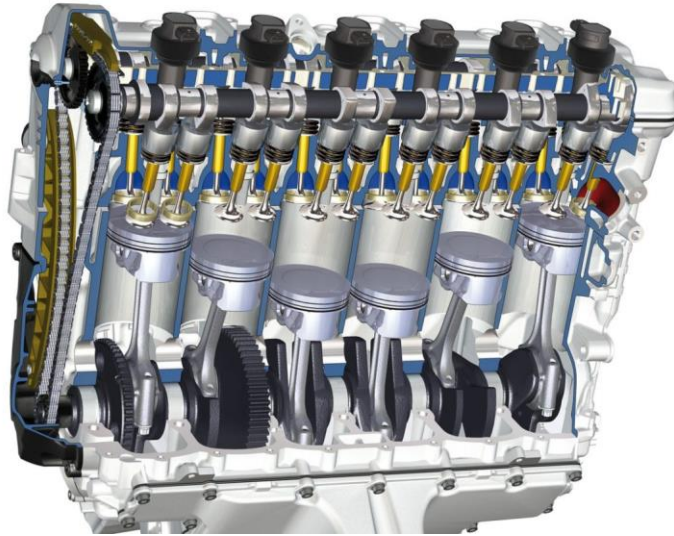


Figura 1.11. Motor de ignición por chispa

(Fuente: <https://www.highmotor.com/como-funciona-motor-gasolina.html>)



Figura 1.12. Motor de ignición por compresión

(Fuente: <https://www.bardahl.com.mx/funcionamiento-motor-diesel/>)

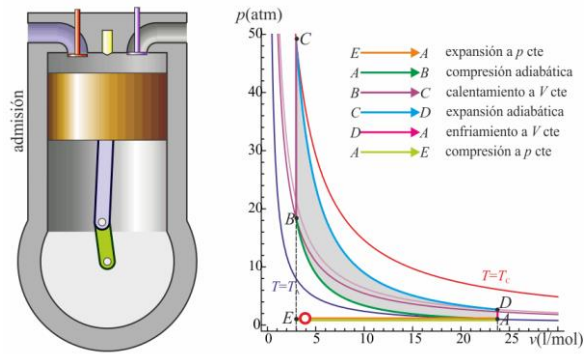


Figura 1.13. Ciclo otto, motores reciprocantes

(Fuente: http://laplace.us.es/wiki/index.php/Ciclo_Otto)

1.10.3. Celdas de combustible

Una celda de combustible es un equipo de conversión electroquímico que convierte el hidrógeno y el oxígeno en electricidad y calor. Esta es muy semejante a una batería que puede ser recargada mientras se entrega potencia de ella. En vez de recargarse usando electricidad, una celda de combustible usa el hidrógeno y el oxígeno. Constructivamente consta de dos electrodos: un ánodo y un cátodo, separado por un electrolito. La primera celda de combustible operativa fue producida por Sir William Grove en 1842. La tecnología avanzó poco a poco por los años, pero tomó un salto gigantesco en 1960, cuando General Electric produjo la primera aplicación práctica de la celda de combustible, cuando esta previó de energía eléctrica a las cápsulas espaciales Gemini y Apollo. La diferencia principal entre la mayoría de celdas de combustible es el tipo de electrolito. Algunos tipos de electrolito empleados en celdas de combustible son: ácido fosfórico, carbonato fundido, el óxido sólido, y la membrana de intercambio.

Las celdas de combustible prometen entregar una eficiencia de conversión eléctrica en el rango de 40% a 60%. Una eficiencia de conversión total de energía (aproximándose al 90%), son posibles cuando son usadas aplicaciones de cogeneración, donde tanto el calor como la electricidad de la reacción son utilizadas. Otra característica promisoria es la muy baja emisión contaminante de las celdas de combustible. Debido a que ellas producen electricidad sin combustión, los productos usuales de la combustión no están presentes.

Las celdas de combustible están siendo desarrolladas en un rango de tamaños entre unos pocos kW hasta unos pocos MW. Sin embargo, las unidades más grandes (hasta 20MW) y más pequeñas micro celdas de combustible (para equipos portátiles electrónicos) están siendo investigadas. [17]



Figura 1.14. Celda de Combustible

(Fuente: <https://www.eadic.com/asi-funcionan-las-celdas-de-combustible/>)

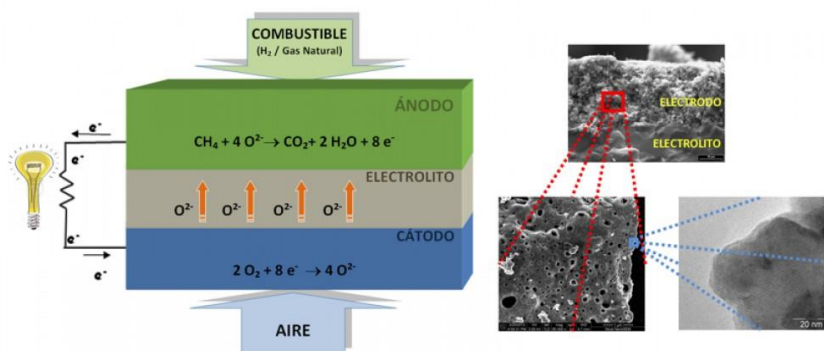


Figura 1.15. Celda de Combustible esquema de funcionamiento

(Fuente: <http://www.cab.cnea.gov.ar/inn/index.php/noticias/novedades/item/214-cm-inn>)

1.10.4. Solar Fotovoltaica

Los sistemas solares convierten la energía solar en electricidad, el rendimiento energético alcanzado en la actualidad es del 25 % [18]. Los sistemas de generación fotovoltaicos se pueden dividir en tres segmentos:

- Funcionamiento aislado se usa en localizaciones que no tienen acceso a la red de distribución y necesita del uso de baterías y de un regulador de carga.
- El funcionamiento híbrido supone que las placas fotovoltaicas se conectan en paralelo con otra fuente de generación, como un motor diésel o un generador eólico.
- Conectados en paralelo con la red, el consumo se alimenta o de los paneles fotovoltaicos o de la red, conmutando mediante un inversor. Esta solución presenta la ventaja de no necesitar batería ni un regulador de la carga, con lo que se reducen las pérdidas, y la inversión necesaria.

El costo de la energía producida por un sistema fotovoltaico en el Ecuador, según estudio realizado por Muñoz, J & Rojas, M (2017) es de USD/kWh 0,1342 [19], siendo una de las ventajas que no requieren mantenimiento y que permiten alimentar consumos alejados de redes de distribución [18].



Figura 1.16. Paneles solares en vivienda

(Fuente: <https://soyempreendedor.co/ventajas-paneles-solares-casa/4525/>)

1.10.5. Tipos de Células Solares

Dentro de la energía solar fotovoltaica generalmente se acepta como método de clasificación de las diferentes tecnologías que se utilizan el de los materiales que en la célula solar realizan la conversión energía solar/energía eléctrica. La tecnología más extendida es la del silicio monocristalino, x-Si (o sc-Si, o m- Si), seguida por la del silicio policristalino, p Si, el silicio amorfo, a Si, las células de alto rendimiento, generalmente Ga As o compuestos relacionados InP, InAs, TeCd, CIS, etc. Finalmente se presentan las células multiunión, las células bifaciales y las células de TiO₂ y orgánicas. [19]

a. Células solares de silicio monocristalino

Las células de silicio monocristalino son las células a las que habitualmente se refieren como células de silicio. Como su nombre indica, todo el volumen de la célula es un único cristal de silicio. El proceso de fabricación de la oblea, toda ella, un único cristal de silicio, que constituirá la célula, comienza extrayendo el silicio de la arena. En este primer proceso de extracción, el silicio contiene todavía un gran número de impurezas no deseadas y normalmente se refiere a él como silicio de grado metalúrgico.

El proceso de refinado posterior pasa primero por fabricar con SiHCl_3 (triclorosilano) que en una primera fase todavía contendrá un gran número de elementos indeseados. Esto se hace porque el SiHCl_3 es un compuesto líquido, siendo los líquidos más fáciles de purificar que los sólidos. Después de este proceso de purificación se obtiene SiHCl_3 de alta pureza. A continuación, es necesario recuperar la forma sólida del silicio, mezclando el SiHCl_3 con H_2 y calentándolo se obtiene polisilicio (sólido) y HCl .

La obtención final del monocristal se puede realizar mediante el proceso conocido con el nombre de Czochralski. El resultado final es una barra circular de silicio (ingot, lingote), que puede medir varios metros y tener un diámetro de varias pulgadas. Esta barra, mediante un proceso de corte, es de la que finalmente se extraen las obleas con las que se fabrican las células solares de silicio monocristalino. Durante los procesos de corte del silicio se desperdicia una gran cantidad de material (40 – 50%) [19].



Figura 1.17. Celda Solar Monocristalina

(Fuente: <http://www.directindustry.es/fabricante-industrial/celda-solar-monocristalina-85057.html>)

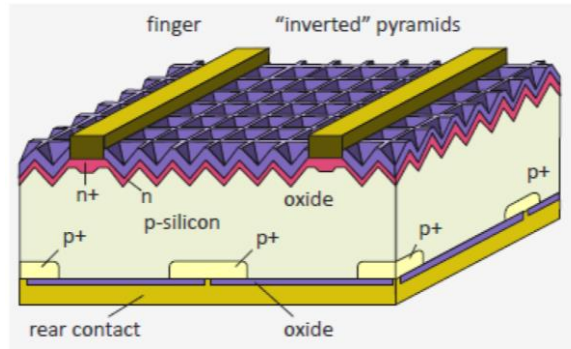


Figura 1.18. Esquema de la estructura de una célula PERL
(Fuente: Energías Renovables - Sistemas Fovoltaicos)

En la Figura 1-18 muestra la estructura básica de la célula solar de silicio con la que se han conseguido las mayores eficiencias a un sol (24,7%). Ha sido fabricada por la Universidad de Nueva Gales del Sur y se denomina PERL (Passivated Emitter Rear Locally Diffused).

En dicha figura se observa la estructura de pirámides invertidas de la cara frontal creándose mediante la utilización de técnicas de fotolitografía y sirve para disminuir las pérdidas por reflexión y para atrapar la luz que entra en la célula. Los dedos de metalización están depositados sobre una superficie plana, y no quebrada, como resultaría si se hubiese depositado directamente sobre las pirámides. De esta forma, su longitud efectiva resulta ser menor y, por lo tanto, también el valor de la resistencia serie que introduce en la célula [19].

b. Células solares de silicio policristalino

La utilización de células de silicio policristalino constituye una estrategia de abaratamiento de costos mediante la reducción del costo de las obleas de partida con las que se fabrican las células. El silicio policristalino no es más que silicio constituido por granos de silicio cristalino. En principio sobre este material se pueden utilizar las mismas técnicas de fabricación que las utilizadas para la fabricación de células de silicio monocristalino aunque es necesario realizar las siguientes observaciones [19].

La frontera entre granos del silicio policristalino constituye una fuente adicional de recombinación por lo que es de esperar que la eficiencia de estas células sea inferior que las de sus homólogas monocristalinas. La pérdida es debida al voltaje en circuito abierto

ya que se ha demostrado que, con las células de silicio policristalino se puede obtener prácticamente la misma corriente de cortocircuito que con las células de material monocristalino. En el laboratorio se han conseguido eficiencias del 16,8% con células de gran área. Al nivel de producción industrial, las eficiencias límite de este tipo de células se sitúan en torno al 17% [19].



Figura 1.19. Celda Solar Policristalina

(Fuente: <https://www.amvarworld.com/es/paneles-solares/1506-panel-solar-qxpv-policristalino-100w.html>)

1.10.6. Solar térmica

Esta tecnología todavía está en desarrollo, pero constituye una alternativa interesante. El concepto básico de esta tecnología es que el calor conseguido por la concentración de radiación solar es usado para calentar un fluido y luego producir vapor apto para su empleo en una turbina de vapor convencional. Generalmente, los fluidos que se emplean son sales fundidas ya que permiten una mayor temperatura de operación. Existen principalmente tres esquemas de generación de electricidad con la tecnología solar térmica [18]:

a. Colectores cilindro-parabólicos

En este esquema se emplean espejos cilindro-parabólicos para concentrar la radiación solar en un tubo localizado a lo largo del foco del colector. El tubo contiene el fluido a calentar y puede llegar a alcanzar temperaturas cercanas a los 400°C. El fluido que se calienta es llevado a los intercambiadores de calor para producir vapor y operar una turbina.

A estos sistemas se les provee de un mecanismo de movimiento que permite el seguimiento del sol para mejorar la eficiencia. Este movimiento puede ser en un sólo eje (vertical u horizontal) o en ambos. [18]

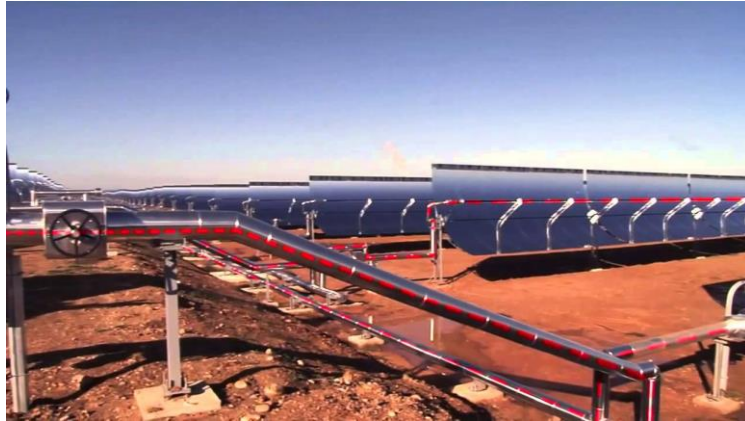


Figura 1.20. Colectores Cilindro Parabólicos

(Fuente: <https://www.laenergiasolar.org/energia-termica-solar/colector-cilindro-parabolico/>)

b. Torre central o helióstatos

En este esquema se emplea una gran cantidad de espejos planos, conocidos como helióstatos, para concentrar la radiación solar en un receptor central localizado en la parte superior de una torre, este calor genera vapor para accionar una turbina convencional generando electricidad. El número de espejos que se emplean suelen ser cientos o incluso miles. El tamaño de los espejos tiende a ser grande para minimizar el número de mecanismos de direccionamiento y seguimiento de la radiación solar.

Los actuales diseños permiten un almacenamiento entre unas 3 a 13 horas, alcanzando una disponibilidad anual de hasta un 65% [18]. En la siguiente figura se muestra un esquema del proceso de una central solar con torre central y helióstatos:

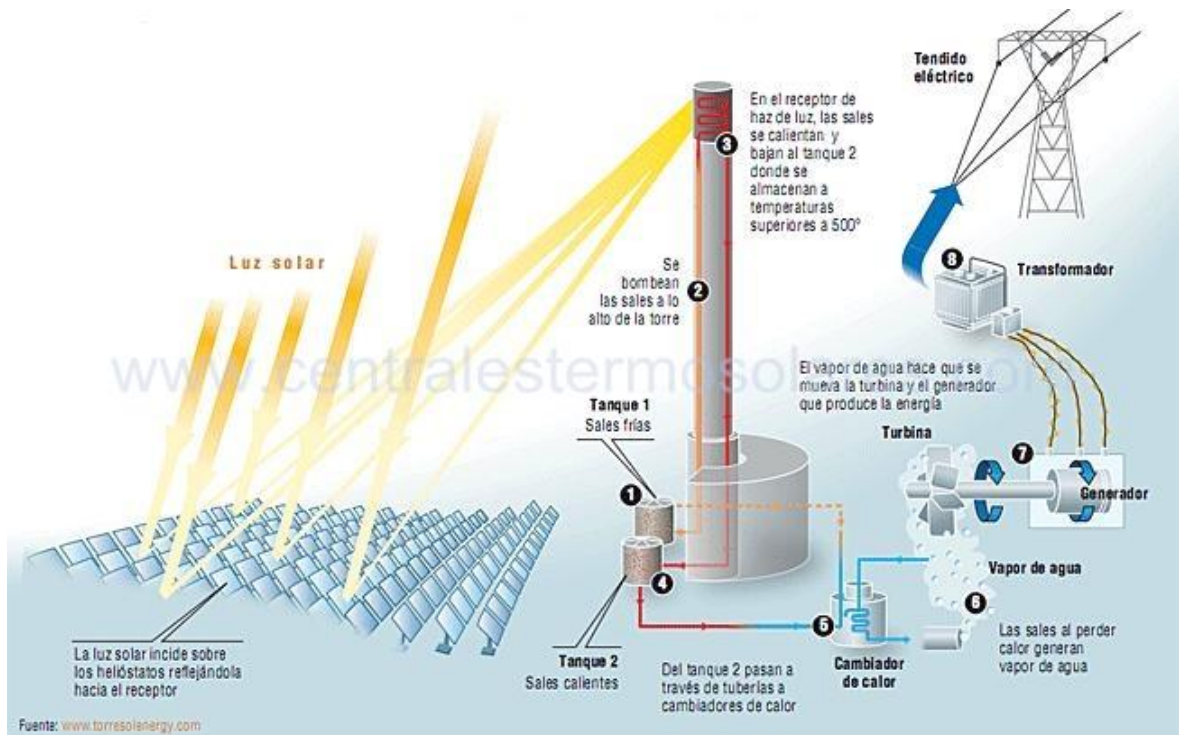


Figura 1.21. Torre solar

(Fuente: <http://gmdsol.com/energia-termosolar-iii-torre-solar/>)

c. Discos parabólicos

En este esquema se emplean espejos de forma de discos parabólicos para concentrar la radiación solar en un receptor colocado en el foco del espejo. El fluido en el receptor se calienta a unos 750°C y se puede emplear para producir vapor o, si se trata de un gas, se puede utilizar directamente en un motor tipo Stirling localizado en el receptor.

El motor tipo Stirling es similar en su funcionamiento a un motor de combustión interna de dos tiempos pero la diferencia fundamental es que la fuente de calor es externa. El sistema de discos parabólicos es el que mayor concentración de radiación solar alcanza debido a su sección parabólica en dos dimensiones. Esto permite alcanzar mayores temperaturas de operación y por lo tanto mayor eficiencia [18].



Figura 1.22: Torre solar

(Fuente:<https://es.dreamstime.com/foto-de-archivo-libre-de-regal%C3%ADas-colectores-solares-del-plato-parab%C3%B3lico-image16712515>)

1.10.7. Sistema Eólico

La fuente primaria de energía es el viento, aire en movimiento originado por la diferencia de presión provocada por el calentamiento desigual de la superficie terrestre por efecto del sol [13]. La energía eólica es una de las fuentes de energías renovables para la que se dispone de una energía madura, por lo que su explotación es técnica y económicamente viable, las principales ventajas de la energía eólica son [20]:

- No hay emisión de gases contaminantes, ni de efluentes líquidos y gaseosos ni de residuos gaseosos ni residuos sólidos.
- Es una fuente de energía renovable, sin requerir procesos de extracción subterráneos o a cielo abierto como ocurre en minería o geotermia
- Su uso y posibles incidentes en su explotación no implican riesgos ambientales de gran impacto (derrames, explosiones, incendios, etc)
- Ahorra combustibles fósiles y diversifica el suministro energético.

Los principales problemas asociados con a la energía eólica son [20]:

- El viento es disperso y de gran variabilidad y fluctuación (tanto en velocidad como en dirección), por lo que no todos los lugares son adecuados para una explotación técnica y económicamente viable de la energía eólica.

- Aumento del nivel de ruido: un aerogenerador puede producir un ruido que podría llegar a ser molesto si está situado en un lugar cercano a un núcleo habitado
- Impacto sobre la fauna, en particular sobre las aves

Como GD puede considerarse, únicamente, las pequeñas instalaciones de aerogeneradores instaladas cerca del consumo que pueden servir para llevar suministro eléctrico a lugares aislados, alejados de la red eléctrica, y utilizadas comúnmente para el bombeo de agua, etc. [13].

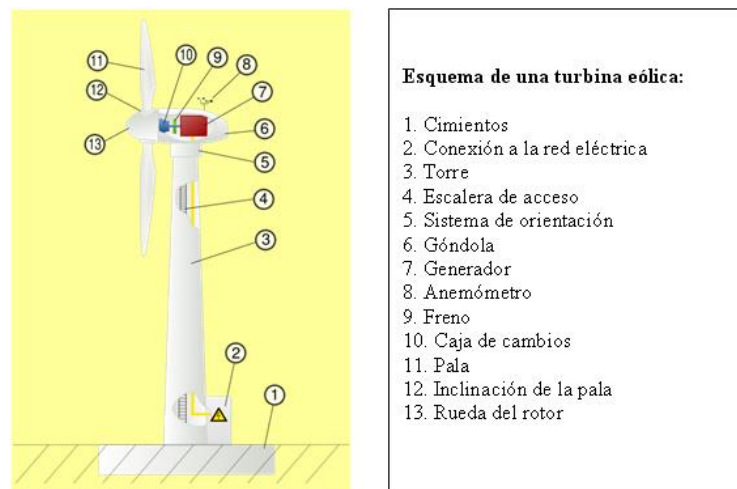


Figura 1.23. Esquema de turbina eólica

(Fuente: http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/1000/1088/html/21_componentes_de_un_aerogenerador.html)

1.11. Métodos cuantitativos de tratamiento de problemas de optimización

Los métodos disponibles para resolver pueden clasificarse en dos grandes categorías:

- Métodos exactos.** Se caracterizan por que aseguran encontrar la solución óptima, si existe. En ocasiones, hallar esta solución óptima puede suponer elevados costos, en términos de tiempo de cálculo [22].
- Métodos no exactos.** Tienen en común que no aseguran la solución óptima, sino una solución razonablemente buena en un tiempo razonable. Existe alguna probabilidad de encontrar efectivamente el óptimo, pero no se podrá asegurar si la solución obtenida es óptima [22].

1.11.1. Métodos Exactos

Optimización clásica (análisis matemático)

Engloba diversos procedimientos analíticos que tienen en común la idea de encontrar la función derivada e igualarla a cero para obtener los puntos extremos. Suele requerirse que la función que se desea optimizar sea continua y derivable. Algunos desarrollos matemáticos, como los multiplicadores de Lagrange, permiten resolver de esta manera problemas en que las variables de decisión están sometidas a determinadas restricciones [22].

Programación matemática

Los programas matemáticos son formulaciones del tipo:

$$[OPT] \quad z = f(x), \quad \text{Ec. (1.1)}$$

$$\text{donde } x \in E \subset R^n$$

en que $f(x)$, es la función objetivo y E es la región factible , subconjunto de R^n de soluciones posibles del problema.

El programa matemático será más o menos difícil de resolver según las características de la función objetivo y de la región factible. En este sentido, existen algunos casos especialmente relevantes:

- a) **Programación lineal.** La función objetivo es lineal y la región factible está determinada por un conjunto de restricciones lineales.
- b) **Programación lineal entera, binaria o mixta.** Se trata de programación lineal en que los componentes son variables enteras (programación lineal entera) o binarias (programación lineal binaria), o bien algunas variables son enteras o binarias y otras reales (programación lineal mixta).
- c) **Programación no lineal.** Programa matemático que no cumple las condiciones de la programación lineal, tal como se acaba de definir. Los modelos de programación lineal

pueden ser muy difíciles de resolver. aunque los dos casos que se indican a continuación son especialmente interesantes para la organización industrial:

- Programación cuadrática: la función objetivo es un polinomio de segundo grado y las restricciones, lineales o de segundo grado.
- Programación semilineal: la función objetivo es un polinomio de grado n y las restricciones son lineales.

La programación lineal es una de las técnicas más utilizadas para resolver los problemas propios de los métodos cuantitativos en el contexto de la organización [22].

Teoría de grafos

En matemáticas y en ciencias de la computación, la teoría de grafos (también llamada teoría de las gráficas) estudia las propiedades de los grafos (también llamadas gráficas). Un grafo es un conjunto, no vacío, de objetos llamados vértices (o nodos) y una selección de pares de vértices, llamados aristas (edges en inglés) que pueden ser orientados o no. Típicamente, un grafo se representa mediante una serie de puntos (los vértices) conectados por líneas (las aristas).

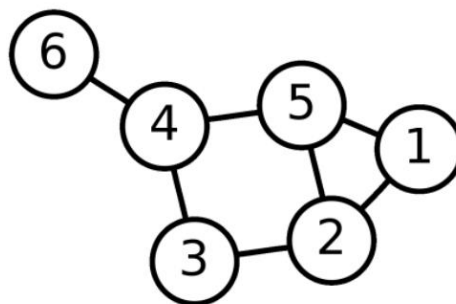


Diagrama de un grafo con 6 vértices y 7 aristas.

Figura 1.24. Diagrama de un grafo con 6 vértices y 7 aristas

(Fuente: http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portallG/home_23/recursos/general/11072012/grafico3.pdf)

Programación dinámica.

La programación dinámica es una metodología para encontrar políticas óptimas en procesos polietápicos de decisión. Se trata de sistemas que evolucionan en varias etapas, en cada una de las cuales hay que tomar una decisión que hará que el sistema evolucione a un estado determinado, de manera determinista o siguiendo una distribución de probabilidad [22].

El objetivo es determinar qué política se debe seguir (decisión a tomar si se encuentra en un estado determinado, es decir, en una etapa determinada) para optimizar la función objetivo. Dicha función se caracteriza por ser recursiva (eso es, depende de la decisión actual y del estado al cual el sistema puede evolucionar en la etapa siguiente) [22].

Cadenas de Markov

Una cadena de Markov es un sistema que evoluciona a lo largo del tiempo dentro de un conjunto de estados. Se caracteriza por que la probabilidad que el sistema evolucione a un determinado estado depende exclusivamente del estado en que se encuentra en el momento presente [22].

Teoría de colas

Se trata de modelos desarrollados específicamente para analizar problemas de colas. Consiste, fundamentalmente, en un conjunto de modelos descriptivos de diversas situaciones, relativas a las leyes de llegada y servicio, y a otras características propias de estos sistemas. Son de especial interés, por su (relativa) sencillez conceptual, los modelos de cola en que las tasas de llegada y de servicio siguen una ley de Poisson [22].

La teoría de colas es una disciplina de investigación operativa que se encarga de proponer modelos para el manejo eficiente de líneas de espera.

Teoría de decisión

Se trata de procedimientos que permiten valorar las diferentes alternativas y los posibles modelos de experimentos que pueden realizarse para tomar decisiones en situaciones que pueden describirse mediante un modelo matemático [22].

Teoría de juegos

Se trata de modelos que estudian, de forma específica, problemas de competencia. Se diferencia de la teoría de la decisión por la existencia de varios actores y por la interdependencia entre las acciones de cada uno de ellos [22].

Procedimiento de separación y acotación

Es un procedimiento para obtener la resolución de problemas en que el conjunto de soluciones es finito. La táctica adoptada consiste, en primer lugar, en dividir el conjunto en dos partes, siguiendo una regla de separación. A continuación, se acota el valor de la función objetivo en cada una de las partes, mediante una regla de acotamiento. Así, se explora un conjunto de soluciones cada vez menor hasta encontrar el óptimo [22].

1.11.2. Métodos no exactos

Métodos heurísticos

Un método heurístico genera soluciones de un determinado problema mediante un método del cual se sabe, bien por experiencia o por razonamiento teórico, que genera buenas soluciones con una alta probabilidad. Suele clasificarse en tres grupos:

- a) **Algoritmos de un solo paso.** Son métodos que generan una única solución en cada etapa, tomando decisiones sucesivas que ya no son reconsideradas. Cada vez hay menos alternativas y estas están más condicionadas, de forma que las últimas decisiones pueden ser muy malas [22].
- b) **Métodos iterativos.** Son métodos que generan una solución en cada etapa, de manera que las soluciones obtenidas puedan reconsiderarse en etapas anteriores.
- c) **Métodos de mejora.** Son métodos que, partiendo de una solución determinada, van mejorándola en etapas sucesivas.

Simulación

Proceso en que se representa el estado del sistema mediante unas variables relacionadas por unas reglas determinadas. Una vez establecidas, se observa su evolución a lo largo del tiempo según unas hipótesis y unas reglas de gestión predeterminadas. Permite conocer la solución de problemas difícilmente resolubles mediante los métodos exactos [22].

Modelos descriptivos

Modelos que describen o que reproducen , de una manera más o menos simplificada , la realidad a estudiar, con lo cual permiten experimentar y analizar sus reacciones ante determinadas decisiones, incidencias o políticas [22].

Algoritmos genéticos

Se trata de procedimientos basados en la selección natural, en que una generación de individuos (conjunto de soluciones) da lugar, mediante el entrecruzamiento entre ellas, a una nueva generación de soluciones que, por término medio , es mejor desde el punto de vista de la calidad del resultado obtenido [22].

Redes neuronales

Sistemas basados en la simulación de las conexiones neuronales de los seres vivos, capaces de aprender de la experiencia y proporcionar soluciones cada vez mejores a problemas similares. Existen varias relaciones entre las diversas técnicas. Por ejemplo, la programación lineal entera utiliza procedimientos de separación y acotación; determinados problemas de programación dinámica utilizan propiedades de las cadenas de Markov, y la teoría de decisión utiliza técnicas de programación lineal, de la teoría de grafos y de simulación, etc [22].

Relación entre problemas y técnicas

No existe una relación directa entre los tipos de problemas y las técnicas utilizadas para resolverlos. Además, la mayoría de los problemas no pueden clasificarse de manera unívoca y las técnicas se pueden combinar. La Tabla 1.7 es una aproximación para hallar relaciones entre los problemas (columnas) y las técnicas (filas). Se ha utilizado la notación siguiente:

P: Técnica principal para resolver el problema

S: Técnicas empleadas de forma secundaria

A: Técnicas auxiliares o utilizadas en casos especiales

Tabla 1.7 Problemas y técnicas de los métodos cuantitativos

	Inventarios	Reparto	Colas	Secuencias	Renovación	Caminos	Competencia	Búsqueda
Opt. Clásica	P		A		P		S	S
Prog. Lineal	S	P		A	A	S	P	A
Prog. No lineal	S	S						
P. Dinámica	P	S		S	S	S		P
T. Grafos			A	P	S	P	A	A
T. Colas			P	S				
P. separ y acot		A		P		P		A
T. decisión	S		A		P		P	P
T. juegos					S		P	
Cad. Markov	S	A	S					S
M. heurísticos	S	S		S		S	A	A
Simulación	A	S	P	S	S		S	S
M. descript.	A			S	P		P	A
Alg. Genéticos		A		S		P		P
R. Neuronales				S	S	P	P	S

(Fuente: Suñé, Fonollosa, Fernández, & Sallán, 2016)

1.12. Programación Matemática

1.12.1. Programación lineal

En las organizaciones, se puede encontrar numerosos problemas que se ajustan a un esquema común: hallar el valor de un conjunto de variables (variables de decisión) tal que

otra variable, que a su vez es función de las variables de decisión (función objetivo), alcance su valor óptimo (máximo o mínimo) [22].

En muchas ocasiones, los valores que pueden tomar las variables de decisión vendrán limitados por un conjunto de restricciones, las cuales deberán cumplirse de manera simultánea. A modo de ejemplo, una restricción muy frecuente es que las variables de decisión sean no negativas.

Este tipo de problemas son susceptibles de ser resueltos mediante un programa matemático. Se trata de un modelo, en el sentido definido anteriormente, que representa la situación a resolver mediante un conjunto de expresiones matemáticas de la forma:

$$[OPT] z = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad \text{Ec. (1.2)}$$

Sujeto a:

$$g_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad \text{Ec. (1.3)}$$

$$g_2(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad \text{Ec. (1.4)}$$

$$g_n(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad \text{Ec. (1.5)}$$

Mediante esta notación, se indica que se ha de determinar el valor óptimo de z (que puede ser tanto el máximo [MAX], como el mínimo [MIN]), que es función de las variables de decisión x_1, x_2, \dots, x_n . Los valores de estas variables han de ser tales que cumplan el conjunto de ecuaciones g_i (o inecuaciones , pues cualquier inecuación pue de transformarse en ecuación , como se verá más adelante) que constituyen las restricciones del programa matemático [22]. .

Un modelo de programación lineal es un caso particular, especialmente sencillo, de programación matemática, que tienen las características siguientes:

- a) Las variables de decisión son no negativas.
- b) Las restricciones g_i son una función afín de dichas variables.
- c) La función objetivo es una función afín de las mismas variables.

Cuando las características del modelo exigen que todas las variables de decisión sean enteras, se tiene un modelo de programación (lineal) entera. Si sólo una parte de las variables han de ser enteras, se trata de un modelo de programación (lineal) mixta.

Un modelo de programación lineal este compuesto por tres elementos: variables, función y restricciones.

a) Variables

Las variables pueden ser de dos tipos:

- Variables de decisión, que miden la magnitud que se desea optimizar o bien las magnitudes sobre las cuales se puede actuar o decidir.
- Variables auxiliares, que miden las magnitudes que tienen sentido en el problema y que dependen de las variables de decisión. Usualmente, se puede crear el modelo sin estas variables, pero su definición suele aportar información sobre el resultado final a costa de crear un modelo más complicado.

Para cada variable, hay que definir su significado (es decir, la magnitud que mide), su unidad de medida (por ejemplo, euros, metros o personas) y su naturaleza matemática (real, entera, binaria, no negativa, acotada, etc.) .

b) La función objetivo

La función objetivo es la expresión lineal que relaciona las n variables definidas con el valor a optimizar z. A cada variable, se le asocia un coeficiente c, que es la proporción en que varía el valor a optimizar z por cada unidad de incremento de la variable correspondiente.

$$[OPT] z = c_1x_1 + c_1x_1 + \dots + c_ix_i + \dots + c_nx_n \quad \text{Ec. (1.6)}$$

Se encuentra tanto con problemas en que se busque maximizar la función objetivo (problemas de máximo [MAX]) como con problemas en que se persiga minimizar dicha función (problemas de mínimo [MIN]) [22]. .

c) Las restricciones

Las restricciones son expresiones lineales que definen las limitaciones de recursos, las condiciones del problema, o que relacionan las variables entre sí. Las restricciones determinan el conjunto de valores posibles para las variables de decisión, también denominado región factible. La solución óptima del modelo deberá encontrarse necesariamente dentro de esa región factible. En programación matemática, esta región se representa por un conjunto de restricciones. Los elementos de la región factible han de cumplir, necesariamente, todas las

restricciones. Las restricciones pueden ser tanto ecuaciones como inecuaciones. Así, se puede encontrar con una restricción i de menor o igual:

$$a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{in}x_n \leq b_i \quad \text{Ec. (1.6)}$$

Una restricción de j de mayor o igual:

$$a_{j1}x_1 + a_{j2}x_2 + \dots + a_{jn}x_n \geq b_j \quad \text{Ec. (1.7)}$$

O una restricción de k de igualdad:

$$a_{k1}x_1 + a_{k2}x_2 + \dots + a_{kn}x_n = b_k \quad \text{Ec. (1.8)}$$

Formas estándar y canónica de un modelo lineal

Un modelo lineal puede adoptar varias formas: la función objetivo puede ser de máximo o de mínimo, y las restricciones pueden ser de mayor o igual, de menor o igual o de igualdad estricta. Algunos modelos pueden incluso tener restricciones de varios tipos.

La resolución y el análisis de un modelo de programación lineal deberán formularse siguiendo una forma determinada. Se trata de definir ciertas formulaciones prototipo del programa lineal y de contar con herramientas para poder expresar un programa lineal cualquiera en esta forma prototipo. En particular, existen dos formulaciones del modelo de programación lineal que resultan particularmente útiles:

- a) **Forma estándar** es aquella en que las restricciones están expresadas en forma de igualdad. Es la forma de partida para resolver el modelo de programación lineal mediante el algoritmo símplex. El hecho de que el conjunto de restricciones constituya, por lo general, un sistema de ecuaciones compatible indeterminado permite aplicar el álgebra matricial a la resolución del programa lineal.

$$\begin{aligned} [OPT] \quad z &= \sum c_j x_j \\ \text{Sujeto a: } \sum a_{ij} x_j &= b_i \\ x_{ij} &\geq 0 \\ i &= 1, \dots, n \text{ restricciones} \\ j &= 1, \dots, m \text{ variables} \end{aligned}$$

- b) **La forma canónica** es aquella en que las restricciones están expresadas como inecuaciones de menor o igual si el modelo es de máximo, y de mayor o igual si es

de mínimo. Es una forma particularmente útil para encontrar el modelo dual de un modelo lineal.

$$\begin{aligned}
 & [MIN] z = \sum c_j x_j \\
 & \text{Sujeto a: } \sum a_{ij} x_j \geq b_i \\
 & x_{ij} \geq 0 \\
 & i = 1, \dots, n \text{ restricciones} \\
 & j = 1, \dots, m \text{ variables}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & [MAX] z = \sum c_j x_j \\
 & \text{Sujeto a: } \sum a_{ij} x_j \leq b_i \\
 & x_{ij} \geq 0 \\
 & i = 1, \dots, n \text{ restricciones} \\
 & j = 1, \dots, m \text{ variables}
 \end{aligned}$$

Resolución de programas lineales

Existen varias formas de encontrar dicha solución:

a) Método Gráfico

En el caso (poco frecuente) de que se haya representado el modelo con dos variables de decisión, puede resolverse gráficamente. No obstante, la solución gráfica de un modelo lineal tiene un interés fundamentalmente pedagógico, dado que permite introducir diversos conceptos asociados a los modelos lineales de forma gráfica e intuitiva [22].

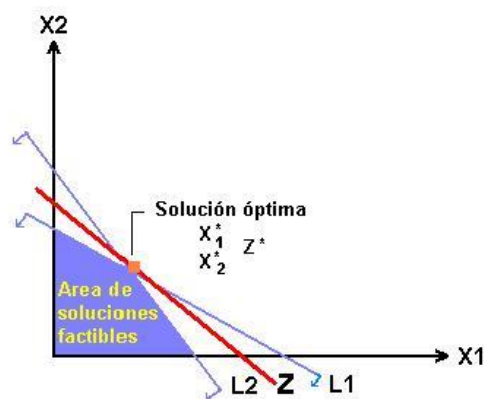


Figura 1.25. Método gráfico

Fuente: <https://inveoperaciones.wordpress.com/metodo-grafico/>

b) Método Analítico o algoritmo simplex

Para modelos pequeños o medianos (hasta decenas de miles de variables y restricciones), resulta adecuado el algoritmo simplex, que consiste en explorar,

de forma inteligente, el conjunto de soluciones posibles, de modo que se alcance la solución óptima explorando un subconjunto pequeño de estas. Existen en el mercado programas informáticos que utilizan el método símplex para resolver modelos lineales. En la mayoría de las ocasiones, se puede acceder a una versión gratuita (freeware) de dichos programas. La única diferencia con los programas bajo licencia es que tienen limitado el número de variables y restricciones, de manera que la utilidad de muchos de ellos es meramente didáctica. La explotación comercial suele obligar a adquirir versiones de pago de estos programas, que tienen mayor capacidad de tratamiento de las variables y las restricciones [22]. .

c) Método del punto interior

Para modelos de gran tamaño, se suele seguir el procedimiento del punto interior, que es una técnica utilizada en la programación no lineal, que permite obtener una aproximación excelente a la solución, generalmente de forma más rápida que el algoritmo simplex [22]. .

1.12.2. Programación Lineal Entera Mixta (MIP)

Según la clasificación siguiente, los problemas lineales se pueden resolver al tener variables enteras y de forma binaria como casos particulares.

- PIP (pure integer programming) todas enteras
- BIP (binary integer programming) todas binarias
- MIP (mixed integer programming) algunas enteras o binarias

Para poder comprender de mejor manera la clasificación, se describe una representación binaria de variables enteras.

Donde:

- x variable entera
- y_i variable binaria (0/1)

$$x = \sum_{i=0}^N 2^i * y_i$$

Ec. (1.9)

Condiciones

$$0 \leq x \leq u$$
$$2^N \leq u \leq 2^{N+1}$$

Se considera el ejemplo del problema de mochila para poder explicar cómo funciona el método con un ejemplo simple y concreto el cual minimice la utilización de fórmulas y permita el entendimiento de la estructura del método [22].

Este problema se basa en la utilización de condiciones binarias

- $X = 1$; la situación tiene lugar
- $X = 0$; la situación no tiene lugar o se da en otro caso.

Un excursionista que debe preparar su mochila, considera asimismo que hay una serie de objetos de utilidad para el excursionista, pero que el excursionista solo puede llevar un número limitado de objetos.

El problema consiste en elegir un subconjunto de objetos de tal forma que se maximice la utilidad que el excursionista obtiene, pero sin rebasar su capacidad de llevar objetos.

a. Los datos que obtienen de este ejemplo son:

- n : número de objetos
- a_j : peso de cada objeto j
- c_j : utilidad de cada objeto j

- b : la capacidad máxima de la mochila (del excursionista)

b. Variables

- $x_j = 1$ si el objeto j se mete en la mochila
- $x_j = 0$ si no se mete

c. Restricciones.

La capacidad máxima de la mochila no ha de excederse:

$$\sum_{j=1}^n a_j x_j \leq b \quad \text{Ec. (1.10)}$$

d. Función a maximizar.

El objetivo de este problema es maximizar la utilidad, que se puede expresar como:

$$Z = \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad \text{Ec. (1.11)}$$

Mediante este ejemplo se puede concluir que se necesitan datos, variables, restricciones y conocer si la función es maximizar o minimizar el problema.

Las decisiones radican en la problemática de toda optimización, el saber si es o no es la correcta decisión, por lo cual se obtiene herramientas de optimización que ayudan a decidir en función de variables y restricciones para así dar un resultado en parámetros establecidos por el sistema [22].

1.12.3. Programación no Lineal (NLP)

La programación lineal y la programación no lineal, tiene como característica principal obtener los resultados óptimos para una función objetivo

Se denomina a la programación no lineal con el nombre de ecuación cuadrática en referencia a que la mayor cantidad de los problemas contienen ecuaciones cuadráticas o de segundo grado [23].

En la mayoría de los casos se presentan soluciones en las que se debe maximizar una función no lineal cuando estas presentan restricciones lineales, esto es posible al resolverlo cuando se admite la hipótesis de que la utilidad marginal no es constante, con esta hipótesis la restricción lineal deja de serlo.

Matemáticamente hace referencia a :

$$\text{Minimizar o maximizar } f(x)$$

Restricciones

$$\begin{aligned} g(x) &\leq 0 \\ L &\leq x \leq U \end{aligned}$$

Donde

- X : Es un vector de variables , que son números reales continuos
- $f(x)$: Es la función objetivo
- $g(x) \leq 0$: Representa el conjunto de restricciones
- L y U : Son vectores de límites inferior y superior en las variables.

Dentro de las ventajas más importantes se mencionan dos:

- a. En ciertas ocasiones la distribución óptima de un presupuesto excluye a cualquiera de los bienes considerador en el presupuesto general (Se muestra en las restricciones del sistema).
- b. La programación no lineal proporciona mayor información que la contenida en el análisis marginal. A comparación de solo definir el objetivo, también define el objetivo, pero señala la orientación para lograrlo.

En la programación no lineal la función objetivo, puede ser cóncavo o convexo.

- Cóncavo cuando se trata de maximizar
- Convexo cuando trata de minimizar

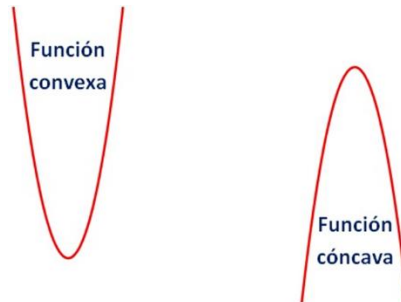


Figura 1.26. Función convexa y función cóncava

(Fuente: <http://www.matematicasdigitales.com/concavo-convexo-la-eterna-polemica/>)

1.12.4. Programación no lineal entera mixta (MINLP)

La programación no lineal entera mixta (MINLP) se refiere a la programación matemática con variables continuas, discretas y no linealidades en la función objetivo y las restricciones. El uso de MINLP es un enfoque natural, formulando problemas donde es necesario optimizar simultáneamente la estructura del sistema (discreto) y los parámetros (continuo). [24]

Los MINLP se han utilizado en diversas aplicaciones, incluida la industria de procesos, la investigación financiera, de ingeniería, de gestión y de operaciones, incluye problemas de flujo de procesos, selección de cartera, lote, procesamiento en ingeniería química (que consiste en mezclar, reaccionar y centrifugar separación) y diseño óptimo de redes de transmisión de electricidad, gas o agua. [24]

Otras de las áreas de interés incluyen las de fabricación de automóviles, aviones, se puede encontrar una impresionante colección de aplicaciones MINLP. Las necesidades en áreas tan diversas han motivado la investigación y el desarrollo en

la tecnología de resolución MINLP, particularmente en algoritmos para el manejo a gran escala, problemas altamente combinatorios y altamente no lineales. [24]

La forma general de un MINLP es

$$\text{Minimizar } f(x, y)$$

Restricciones

$$g(x, y) \leq 0$$

$$x \in X$$

$$y \in Y$$

La función $f(x, y)$ es una función objetivo no lineal y $g(x, y)$ una función no lineal de restricción. Las variables x, y son variables de decisión, donde y se requiere tener un valor entero. X e Y son restricciones de tipo bounding-box-type restricciones sobre las variables. [24]

2. FORMULACIÓN MATEMÁTICA PARA FLUJOS DE POTENCIA

Al modelar un flujo de potencia existen variables las cuales permiten establecer un correcto análisis si se evalúan de una forma coherente. Para poder iniciar con todo el proceso de modelación y análisis de datos se debe conocer las variables, su relación entre si y los conceptos básicos las cuales la abordan. Las variables que se consideran relevantes para este análisis son:

- Potencia activa [W] representado por la letra P
- Potencia reactiva [VAR] representado por la letra Q
- Potencia aparente [VA] representado por la letra S

Dónde: R es la parte resistiva o real de la impedancia
 X es la parte reactiva o imaginaria de la impedancia

Conociendo las variables a utilizar se puede dar cuenta que cada relación parte desde la Ley de Ohm como concepto fundamental y básico para este análisis. Para una correcta aplicación de los métodos a utilizar se describen algunos de los pasos más importantes a fin de entender la relación y utilización de cada variable, consecuentemente se utiliza matrices en la operación matemática para minimizar pasos en cada proceso hacia el resultado.

En las siguientes ecuaciones se muestra el cálculo para determinar la admitancia B_{ij} y la Conductancia C_{ij} , partiendo de la de ecuación Y de bus o también llamada matriz de impedancias.

$$Y_{ij} = |Y_{ij}| \cos \phi_{ij} + j|Y_{ij}| \sin \phi_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} \quad \text{Ec. (2.1)}$$

$$G_{ij} = \frac{R}{R^2_{ij} + X^2_{ij}} \quad \text{Ec. (2.2)}$$

$$B_{ij} = \frac{X}{R^2_{ij} + X^2_{ij}} \quad \text{Ec. (2.3)}$$

Se divide la matriz de admitancia en la admitancia propia y matriz de admitancia mutua. La matriz de admitancia mutua se halla a través de la Ec. (2-4) y esta queda definida como se muestra en la Ec. (2-5).

$$Y_{in} = -Y_{in} \angle \phi_{in} \quad \text{Ec. (2.4)}$$

$$Y_{in} = \begin{bmatrix} 0 & -Y_{in} & \dots & -Y_{in} \\ -Y_{in} & 0 & -Y_{in} & \vdots \\ \vdots & -Y_{in} & 0 & -Y_{in} \\ -Y_{in} & \dots & -Y_{in} & 0 \end{bmatrix} \quad \text{Ec. (2.5)}$$

La matriz de admitancia propia queda definida por la Ec. (2-6), quedando de la siguiente forma.

$$Y_{ii} = - \sum_{j=1}^N -Y_{in} \angle \phi_{in} \quad \text{Ec. (2.6)}$$

La matriz de admitancia queda definida por la Ec. (2-7) y expresada de forma matricial en la Ec. (2-8) de la siguiente forma [21].

$$[Y_{ij}] = [Y_{in}] + [Y_{ii}] \quad \text{Ec. (2.7)}$$

$$Y_{ij} = \begin{bmatrix} Y_{ii} & -Y_{in} & \dots & -Y_{in} \\ -Y_{in} & Y_{ii} & -Y_{in} & \vdots \\ \vdots & -Y_{in} & \ddots & -Y_{in} \\ -Y_{in} & \dots & -Y_{in} & Y_{ii} \end{bmatrix} \quad \text{Ec. (2.8)}$$

De forma análoga el voltaje en cada uno de los buses queda definido de acuerdo a la Ec. (2-9) de la siguiente forma:

$$V_i = |V_i| \angle \delta_i = |V_i| \cos \delta_i + j |V_i| \sin \delta_i \quad \text{Ec. (2.9)}$$

Para obtener los flujos de potencia activa y reactiva del sistema se debe calcular la inyección de corriente en cada bus, esta inyección de corriente es determinada con la interacción entre la Y de bus o matriz de admitancias y los voltajes de cada uno de los buses, esta interacción se puede apreciar en las siguientes ecuaciones Ec. (2.10) y Ec. (2.111) [21].

$$\begin{bmatrix} I_{ij} & \dots & I_{ij} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ I_{ij} & \dots & I_{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_i Y_{ii} & -V_n Y_{in} & \dots & -V_n Y_{in} \\ -V_n Y_{in} & V_i Y_{ii} & -V_n Y_{in} & \vdots \\ \vdots & -V_n Y_{in} & \ddots & -V_n Y_{in} \\ -V_n Y_{in} & \dots & -V_n Y_{in} & V_i Y_{ii} \end{bmatrix} \quad \text{Ec. (2.10)}$$

$$I_i = Y_{11}V_1 + \dots + Y_{in}V_n = Y_{ii}V_i + \sum_{n=1}^N Y_{in}V_n, i \in N \quad \text{Ec. (2.11)}$$

Las Ec. (2.12) y Ec. (2.13) se utilizan en el cálculo de los flujos de potencia, estas muestran de manera general el flujo de potencia activa y reactiva que circula de un bus a otro, estas ecuaciones son la base fundamental que permite determinar los balances de potencia en cada bus [21].

$$P_i - jQ_i = Y_{ii}V_i^2 + V_i * \sum_{n=1}^N Y_{in}V_n, i \in N \quad \text{Ec. (2.12)}$$

$$P_i - jQ_i = |Y_{ii}V_i^2| \angle(\phi_{ii}) + \sum_{n=1}^N |V_i Y_{in} V_n| \angle(\phi_{in} + \delta_n - \delta_i), i \in N \quad \text{Ec. (2.13)}$$

Al realizar el análisis y tratamiento matemático respectivo igualando los componentes reales e imaginarios de la Ec. (2-13), se deducen las ecuaciones Ec. (2.14) y Ec. (2.155) subsiguientes las cuales permiten obtener de manera individual las potencias activas y reactivas que circulan del bus i hacia los buses próximos [21].

$$P_i(V, \delta) = \sum_{k=1}^n |V_i| * |V_k| * (g_{ik} \cos \delta_{ik} + b_{ik} \sin \delta_{ik}) \quad \text{Ec. (2.14)}$$

$$Q_i(V, \delta) = \sum_{k=1}^n |V_i| * |V_k| * (g_{ik} \sin \delta_{ik} - b_{ik} \cos \delta_{ik}) \quad \text{Ec. (2.15)}$$

Para determinar las ecuaciones de balance de potencia activa y reactiva en cada uno de los buses se usan las ecuaciones siguientes.

$$\sum P g_i - \sum P d_i = P_i(V, \delta) \quad \text{Ec. (2.16)}$$

$$\sum Qg_i - \sum Qd_i = Q_i(V, \delta) \quad \text{Ec. (2.17)}$$

Tabla 2.1: Elementos asociados al balance de potencias.

Nombre	Descripción
Y_{ii}	Admitancia del bus i.
P_i	Potencia activa de entrada al bus i
Q_i	Potencia reactiva de entrada del bus i
V	Voltaje del Bus i.
$ V_i $	Voltaje en el bus i
$ V_k $	Voltaje en el bus k
ϕ_{in}	Angulo entre la admitancia i y la admitancia k
g_{ik}	Ik-esimo elemento de la matriz de conductancia mutua
b_{ik}	Ik-esimo elemento de la matriz de suceptancia mutua
δ_{ik}	Ángulo de voltaje entre el bus i y el bus k

(Fuente: Elaboración del autor)

2.1. Modelo de optimización

Una vez que se ha realizado el análisis matemático asociado al problema de flujos de potencia, y de acuerdo a la teoría de programación matemática, se colige que el modelo corresponde a una programación no lineal entera mixta.

El modelo a desarrollar pretende determinar la ubicación óptima de generación distribuida en un sistema de distribución tipo de 33 barras IEEE, usando para el efecto un modelo matemático de programación no lineal entero mixto que considerará las características inherentes a la operación de los sistemas eléctricos. En este contexto, el sistema eléctrico tipo de 33 Barras IEEE será modificado a fin de que éste contemple las características eléctricas de los sistemas de distribución del Ecuador. Bajo este escenario, se realizará los análisis comparativos correspondientes a fin de determinar las bondades de la implementación de generación distribuida en los sistemas de distribución, enfocándose principalmente en la minimización de pérdidas.

El modelo matemático de optimización a ser propuesto será resuelto usando la herramienta computacional GAMS (General Algebraic Modeling System) el cual es un entorno de alto nivel para el modelo de sistemas para la optimización matemática.

2.2. Función objetivo

El modelo matemático tiene como objetivo encontrar la minimización de pérdidas activas del sistema, como se muestra en la ecuación Ec. (2.18).

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^G P_{g_i} - \sum_{j=1}^J P_{L_j} \quad \text{Ec. (2.18)}$$

Tabla 2.2: Descripción de los elementos asociados a la función objetivo

Nombre	Descripción
P_{loss}	Pérdidas activas del sistema
P_{g_i}	Potencia del generador i-ésimo
P_{L_j}	Carga activa en el nodo j-ésimo
G	Número de generadores
J	Numero de nodos

(Fuente: Elaboración del autor)

2.3. Restricciones

La función objetivo está sujeta a las restricciones de funcionamiento del sistema como son las de balance de potencia, niveles máximos y mínimos de voltaje, potencias máximas de los generadores distribuidos, así como a la decisión de ubicación o no de generación distribuida.

2.3.1. Restricción de balance de potencia

La potencia activa y reactiva que un nodo entrega al sistema es igual a la potencia activa y reactiva que ingresa a dicho nodo, a esto se le conoce como balance de potencias y en el caso de estudio quedan definidas por las Ec. (2.19) y Ec. (2.20) siguientes:

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i=j}}^G P_{g_i} - P_{L_j} = \sum_{k=1}^n |V_j| * |V_k| * (g_{jk} \cos \delta_{jk} + b_{jk} \sin \delta_{jk}) \quad \text{Ec. (2.19)}$$

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i=j}}^G Qg_i - QL_j = \sum_{k=1}^n |V_j| * |V_k| * (g_{jk} \sin \delta_{jk} - b_{jk} \cos \delta_{jk}) \quad \text{Ec. (2.20)}$$

Tabla 2.3: Descripción de los elementos asociados al balance de potencias.

Nombre	Descripción
Pg_i	Potencia activa del generador i conectado en el nodo j
PL_j	Potencia de carga activa ubicada en el nodo j
Qg_i	Potencia reactiva del generador i conectado en el nodo j
QL_j	Potencia de carga reactiva ubicada en el nodo j
V_j	Voltaje en el nodo j
V_k	Voltaje en el nodo k
g_{jk}	jk-esimo elemento de la matriz de conductancia mutua
b_{jk}	jk-esimo elemento de la matriz de susceptancia mutua
δ_{jk}	Angulo de voltaje entre el nodo j y el bus k

(Fuente: Elaboración del autor)

2.3.2. Restricción de niveles de voltaje

Para el caso de estudio y considerando que es un sistema de distribución, los voltajes máximos y mínimos tolerables en por unidad están en los valores de 0.92pu y 1.05pu respectivamente.

$$Vmin_j \leq V_j \leq Vmax_j \quad \text{Ec. (2.21)}$$

2.3.3. Restricción binaria

La variable binaria es utilizada por el optimizador para decidir y analizar nodo a nodo la ubicación óptima de un generador distribuido en dicho lugar.

$$U_j \in \{0,1\} \quad \text{Ec. (2.22)}$$

2.3.4. Restricción de potencia máxima del generador distribuido

Las potencias de los generadores están restringidas, ya que al ser una red de distribución y estar cerca de zonas densamente pobladas no es factible ubicar un generador de gran envergadura, con este antecedente las siguientes ecuaciones restringen las potencias

máximas y mínimas de los generadores distribuidos, y a su vez determinan, a través del uso de la variable binarias, los generadores distribuidos que se considerarán para la ubicación óptima en las barras de sistema que se usará de caso de estudio.

$$PGD_j \leq PmaxGD_j * U_j \quad \text{Ec. (2.23)}$$

$$PGD_j \geq PminGD_j * U_j \quad \text{Ec. (2.24)}$$

$$QGD_j \leq QmaxGD_j * U_j \quad \text{Ec. (2.25)}$$

$$QGD_j \geq QminGD_j * U_j \quad \text{Ec. (2.26)}$$

Tabla 2.4: Descripción de elementos asociados a la potencia activa y reactiva de GD

Nombre	Descripción
PGD_j	Potencia activa del generador distribuido en el nodo j
$PmaxGD_j$	Potencia activa máxima del generador distribuido en el nodo j
$PminGD_i$	Potencia activa mínima del generador distribuido en el nodo i
QGD_i	Potencia reactiva del generador distribuido en el nodo i
$QmaxGD$	Potencia reactiva máxima del generador distribuido en el nodo i
$QminGD_i$	Potencia reactiva mínima del generador distribuido en el nodo i
Vb_i	Variable binaria para cada generador a ser ubicado en el nodo i

(Fuente: Elaboración del autor)

En las ecuaciones descritas se observa como la variable binaria de decisión entra a formar parte del modelo matemático.

2.3.5. Restricción de unidades de generación

Otra restricción indispensable en el modelo matemático es el número de generadores que pueden entrar en el sistema, esta restricción queda definida por la siguiente ecuación.

$$\sum_{i=1}^n U_j \leq NmaxGD \quad \text{Ec. (2.27)}$$

2.4. Procedimiento de resolución

Con el fin de resolver el problema planteado de optimización, se utiliza el software GAMS, el cual mediante el solver COINBONMIN del MINLP tomará los valores iniciales de las magnitudes eléctricas de todos los elementos del sistema dado, resolviendo el problema de optimización propuesto anteriormente.

En este estudio GAMS es el encargado de determinar el flujo óptimo de potencia, minimizando las pérdidas del sistema y determinando la inclusión de GD al sistema, tomando en cuenta las restricciones del modelo matemático y el incremento de carga que se suscita en cada uno de los escenarios y variando las posiciones y potencias de los generadores distribuidos.

El algoritmo presentado a continuación muestra el procedimiento empleado para la resolución del modelo de optimización propuesto.

Algoritmo de resolución

Paso 1: Adquiere valores del sistema.

Paso 2: **Set** Matriz de admitancias

Paso 3: **Set** Valores iniciales de las variables eléctricas

Paso 4: Problema de optimización en GAMS

Set Condiciones iniciales

Set variable binaria

$$U_j \in \{0,1\} \quad \text{Ec. (2.28)}$$

Set Restricciones de igualdad

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i=j}}^G P g_i - PL_j = \sum_{k=1}^n |V_j| * |V_k| * (g_{jk} \cos \delta_{jk} + b_{jk} \sin \delta_{jk}) \quad \text{Ec. (2.29)}$$

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i=j}}^G Q g_i - QL_j = \sum_{k=1}^n |V_j| * |V_k| * (g_{jk} \sin \delta_{jk} - b_{jk} \cos \delta_{jk}) \quad \text{Ec. (2.30)}$$

Set Restricciones de desigualdad

$$PGD_j \leq PmaxGD_j * U_j \quad \text{Ec. (2.31)}$$

$$PGD_j \geq PminGD_j * U_j \quad \text{Ec. (2.32)}$$

$$QGD_j \leq QmaxGD_j * U_j \quad \text{Ec. (2.33)}$$

$$QGD_j \geq QminGD_j * U_j \quad \text{Ec. (2.34)}$$

$$\sum_{i=1}^n U_j \leq NmaxGD \quad \text{Ec. (2.35)}$$

Paso 5: Minimización de la función objetivo e ingreso de la GD

$$Ploss = \sum_{i=1}^G Pg_i - \sum_{j=1}^J PL_j \quad \text{Ec. (2.36)}$$

Paso 6: Análisis de resultados

Paso 7: Fin

2.5. Caso de estudio

El caso de estudio considera un sistema de distribución de topología radial como es el modelo de 33 buses de la IEEE.

Los datos de los parámetros eléctricos del sistema corresponden a los de datos del modelo, entre los más relevantes se puede mencionar los siguientes: niveles de voltajes nominales, potencias de las cargas, configuración de la red e impedancias de las líneas, las siguientes tablas ilustran estos datos.

Para el efecto de poder realizar el flujo óptimo de potencia del sistema se ha tomado en referencia las siguientes bases, la potencia nominal de 10MVA y el voltaje nominal de 12.66 kV.

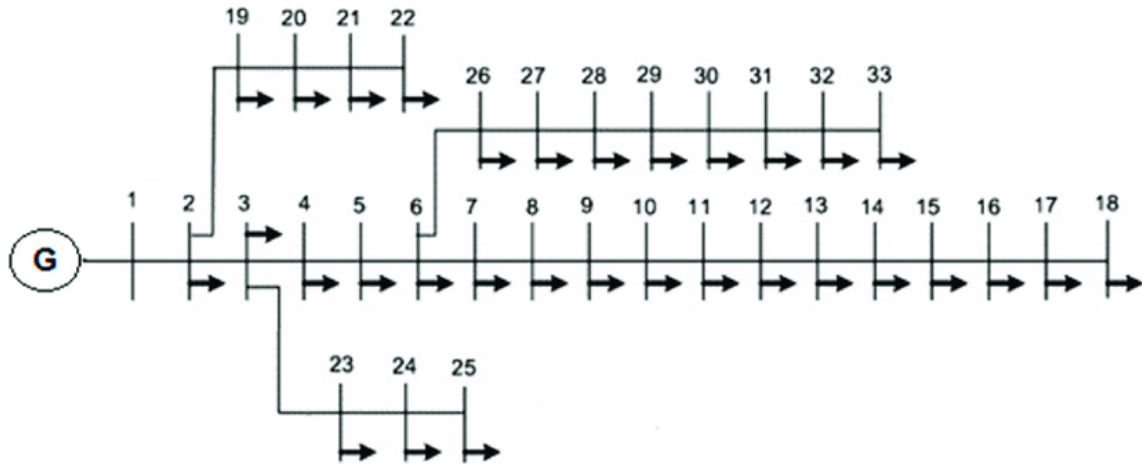


Figura 2.1. Diagrama del sistema.

(Fuente: https://www.researchgate.net/figure/Single-line-diagram-of-the-IEEE-33-bus-radial-distribution-system-20_fig1_319906918)

Para el modelo inicial del sistema se toman las siguientes consideraciones:

- La base de potencia aparente es de 10 MVA.
- El voltaje nominal en todas las barras del sistema es de 12.66 kV, teniendo un voltaje máximo y mínimo de 0.92 y 1.05 en pu.
- El bus uno es considerado bus slack, así el modelo ubicara generadores en distintas barras del sistema según sea óptimo.

Como se puede observar en la Tabla 2.5, se muestran los datos de las líneas o tramos de conexión del sistema mencionado en la Figura 2.1, se ha considerado que el voltaje en todos los tramos es de 12.66 kV y su longitud es de 1 km.

Tabla 2.5: Características eléctricas de las líneas.

	Bi	Bj	V	RLpu	XLpu	RLohm	XLohm	LongKm
L1	1	2	12.66	0.00575	0.00293	0.0922	0.0477	1
L2	2	3	12.66	0.03076	0.01567	0.493	0.2511	1
L3	3	4	12.66	0.02284	0.01163	0.366	0.1864	1
L4	4	5	12.66	0.02378	0.01211	0.3811	0.1941	1
L5	5	6	12.66	0.0511	0.04411	0.819	0.707	1
L6	6	7	12.66	0.01168	0.03861	0.1872	0.6188	1
L7	7	8	12.66	0.04439	0.01467	1.7114	1.2351	1
L8	8	9	12.66	0.06426	0.04617	1.03	0.74	1
L9	9	10	12.66	0.06514	0.04617	1.004	0.74	1
L10	10	11	12.66	0.01227	0.00406	0.1966	0.065	1
L11	11	12	12.66	0.02336	0.00772	0.3744	0.1238	1
L12	12	13	12.66	0.09159	0.07206	1.468	0.155	1
L13	13	14	12.66	0.03379	0.04448	0.5416	0.7129	1
L14	14	15	12.66	0.03687	0.03282	0.591	0.526	1
L15	15	16	12.66	0.04656	0.034	0.7463	0.545	1
L16	16	17	12.66	0.08042	0.10738	1.289	1.721	1
L17	17	18	12.66	0.04567	0.03581	0.732	0.574	1
L18	2	19	12.66	0.01023	0.00976	0.164	0.1565	1
L19	19	20	12.66	0.09385	0.08457	1.5042	1.3554	1
L20	20	21	12.66	0.02555	0.02985	0.4095	0.4784	1
L21	21	22	12.66	0.04423	0.05848	0.7089	0.9373	1
L22	3	23	12.66	0.02815	0.01924	0.4512	0.3083	1
L23	23	24	12.66	0.05603	0.04424	0.898	0.7091	1
L24	24	25	12.66	0.0559	0.04374	0.8986	0.7011	1
L25	6	26	12.66	0.01267	0.00645	0.203	0.1034	1
L26	26	27	12.66	0.01773	0.00903	0.2842	0.1447	1
L27	27	28	12.66	0.06607	0.05826	1.059	0.9337	1
L28	28	29	12.66	0.05018	0.04371	0.8042	0.7006	1
L29	29	30	12.66	0.03166	0.01613	0.5057	0.2585	1
L30	30	31	12.66	0.0608	0.06008	0.9744	0.963	1
L31	31	32	12.66	0.01937	0.02258	0.3105	0.3619	1
L32	32	33	12.66	0.02128	0.03319	0.341	0.5302	1

(Fuente: V. Vita (2017))

El modelo matemático está diseñado para ubicar la GD en puntos específicos según considere el modelo de programación no lineal entera mixta mediante variables binarias, las cuales representa la ubicación de la GD en el sistema.

El sistema cuenta con 33 variables binarias, las cuales el optimizador activará estas variables con el valor de 0 a 1, indicando la mejor ubicación para la implementación de la GD.

En la Tabla 2.6 se pueden observar las características eléctricas de las cargas conectadas a cada uno de los nodos, sus potencias activas expresadas en kW y sus potencias reactivas expresadas en kVAr así como sus voltajes mínimos y máximos.

Tabla 2.6. Características eléctricas de las cargas.

	Bus	Vn	Vmin	Vin	Vmax	Pc	Qc
B1	1	12.66	12.027	12.66	13.293	0	0
B2	2	12.66	12.027	12.66	13.293	100	60
B3	3	12.66	12.027	12.66	13.293	90	40
B4	4	12.66	12.027	12.66	13.293	120	80
B5	5	12.66	12.027	12.66	13.293	60	30
B6	6	12.66	12.027	12.66	13.293	60	20
B7	7	12.66	12.027	12.66	13.293	200	100
B8	8	12.66	12.027	12.66	13.293	200	100
B9	9	12.66	12.027	12.66	13.293	60	20
B10	10	12.66	12.027	12.66	13.293	60	20
B11	11	12.66	12.027	12.66	13.293	45	30
B12	12	12.66	12.027	12.66	13.293	60	35
B13	13	12.66	12.027	12.66	13.293	60	35
B14	14	12.66	12.027	12.66	13.293	120	80
B15	15	12.66	12.027	12.66	13.293	60	10
B16	16	12.66	12.027	12.66	13.293	60	20
B17	17	12.66	12.027	12.66	13.293	60	20
B18	18	12.66	12.027	12.66	13.293	90	40
B19	19	12.66	12.027	12.66	13.293	90	40
B20	20	12.66	12.027	12.66	13.293	90	40
B21	21	12.66	12.027	12.66	13.293	90	40
B22	22	12.66	12.027	12.66	13.293	90	40
B23	23	12.66	12.027	12.66	13.293	90	50
B24	24	12.66	12.027	12.66	13.293	420	200
B25	25	12.66	12.027	12.66	13.293	420	200
B26	26	12.66	12.027	12.66	13.293	60	25
B27	27	12.66	12.027	12.66	13.293	60	25
B28	28	12.66	12.027	12.66	13.293	60	20
B29	29	12.66	12.027	12.66	13.293	120	70
B30	30	12.66	12.027	12.66	13.293	200	600
B31	31	12.66	12.027	12.66	13.293	150	70
B32	32	12.66	12.027	12.66	13.293	210	100
B33	33	12.66	12.027	12.66	13.293	60	40

(Fuente: V. Vita (2017))

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De manera inicial se procede a resolver el modelo matemático planteado, obteniéndose los resultados correspondientes, los cuales serán contrastados con el simulador ETAP, lo que permitirá garantizar que el modelo matemático obedece a las leyes físicas asociadas a los sistemas eléctricos. Posteriormente se evaluará los casos de estudio que se muestran en las siguientes secciones.

3.1. Ubicación de generación distribuida

Como primer paso del caso de estudio se procede a evaluar si el optimizador está realizando un correcto análisis del sistema. Para el efecto, se realiza una simulación en ETAP (Programa analizador y transiciones eléctricas) el cual es un software utilizado por técnicos e ingenieros de diseño fundamentalmente para la simulación y seguimiento de sistemas de energía.

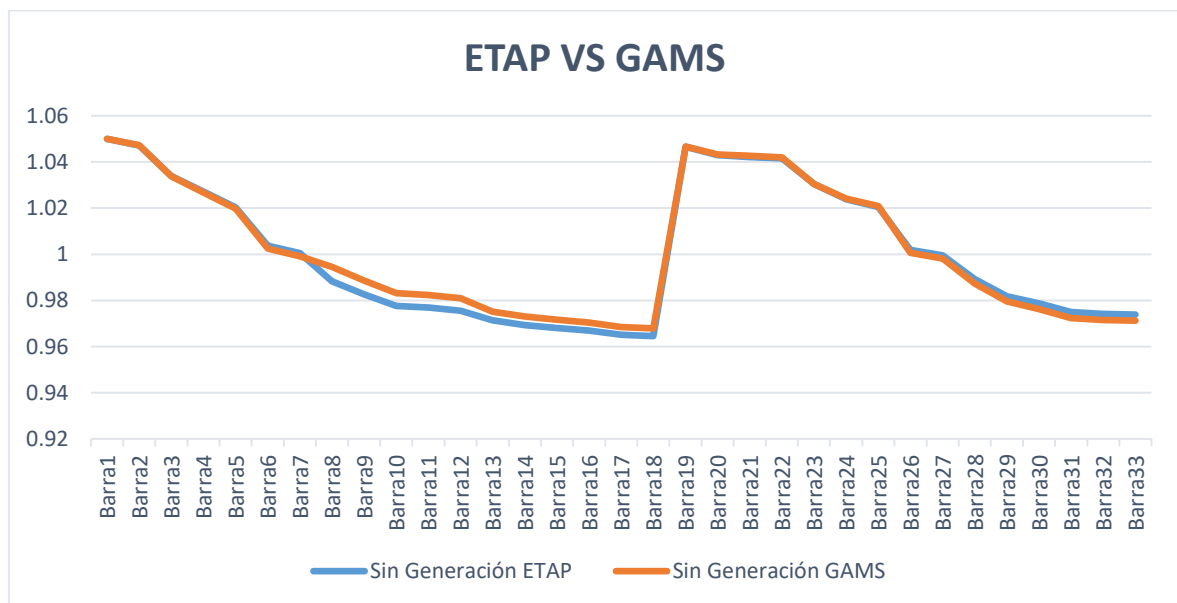


Figura 3.1: Comparativa de Vpu de ETAP, GAMS en un sistema de 33 Buses

(Fuente: Elaboración del autor)

En la Figura 3.1 Se comprueba de forma gráfica que los resultados obtenidos con el optimizador GAMS de Vpu y los valores obtenidos del Simulador ETAP de Vpu generan la misma curva del sistema sin GD, eso da una validación del modelo de optimización, tomado en cuenta que no se aplican las restricciones del modelo sino las inherentes del sistema.

Tabla 3.1. Valores de Voltajes por unidad de ETAP y GAMS

Barra ID	Nominal kV	Sin Generación ETAP	Sin Generación GAMS
Barra1	12.66	1.05	1.05
Barra2	12.66	1.047156398	1.047190876
Barra3	12.66	1.033965245	1.03385014
Barra4	12.66	1.027093207	1.026777749
Barra5	12.66	1.020379147	1.019787462
Barra6	12.66	1.003633491	1.002402861
Barra7	12.66	1.000473934	0.999109836
Barra8	12.66	0.988230648	0.994532575
Barra9	12.66	0.982622433	0.988613661
Barra10	12.66	0.977567141	0.983123785
Barra11	12.66	0.97685624	0.982311567
Barra12	12.66	0.975513428	0.980896124
Barra13	12.66	0.971327014	0.975127315
Barra14	12.66	0.969352291	0.972988456
Barra15	12.66	0.968088468	0.97165603
Barra16	12.66	0.966903633	0.970365561
Barra17	12.66	0.965086888	0.968453196
Barra18	12.66	0.964533965	0.967880521
Barra19	12.66	1.046603476	1.046688168
Barra20	12.66	1.042890995	1.043283559
Barra21	12.66	1.042180095	1.04261312
Barra22	12.66	1.041548183	1.042006554
Barra23	12.66	1.030410742	1.030444819
Barra24	12.66	1.023775671	1.024109883
Barra25	12.66	1.020458136	1.020953178
Barra26	12.66	1.001895735	1.000580679
Barra27	12.66	0.999526066	0.998159912
Barra28	12.66	0.989257504	0.987358421
Barra29	12.66	0.981832543	0.979599139
Barra30	12.66	0.978672986	0.976240831
Barra31	12.66	0.974960506	0.972313328
Barra32	12.66	0.974091627	0.971449428
Barra33	12.66	0.97385466	0.971181253
Sumatoria		33.0107425	33.04204999

(Fuente: Elaboración del Autor)

En la Tabla 3.1 se observan los valores de voltaje por unidad del sistema IEEE de 33 buses sin GD, utilizando el optimizador GAMS y el simulador ETAP.

Con el fin de determinar la diferencia existente entre GAMS Y ETAP, se realiza una sumatoria de todos los valores de voltaje por unidad, obteniendo como resultado un error del 0.094%. Con los resultados obtenidos se concluye que el modelo matemático desarrollado en el simulador GAMS cumple con los aspectos técnicos de los sistemas de eléctricos.

3.2. Casos de implementación de la GD

En la Tabla 3.2, se puede observar las variables binarias obtenidas al optimizar el sistema en 4 casos, estos son propuestos sin ningún tipo de secuencia o restricción del sistema o método de estudio:

Tabla 3.2 : Tabla de variables binarias utilizando GAMS

Barra	GD	kW	BINARIOS DE 1 A 4 GD			
			PARA	PARA	PARA	PARA
			1 GD	2 GD	3 GD	4 GD
1	G1	3900	0	0	0	0
2	G2	5000	0	0	0	0
3	G3	2000	0	0	0	0
4	G4	5000	0	0	1	0
5	G5	5000	0	0	1	0
6	G6	2000	0	0	0	0
7	G7	5000	0	0	0	0
8	G8	5000	0	0	0	1
9	G9	2000	0	0	0	0
10	G10	5000	0	0	1	0
11	G11	5000	0	0	0	0
12	G12	2000	0	0	0	0
13	G13	5000	0	0	0	0
14	G14	5000	0	0	0	0
15	G15	2000	0	0	0	0
16	G16	5000	0	0	0	0
17	G17	5000	0	0	0	0
18	G18	2000	0	0	0	0
19	G19	5000	0	0	0	0
20	G20	5000	0	1	0	0
21	G21	2000	0	0	0	0
22	G22	5000	0	0	0	0
23	G23	5000	0	0	0	0
24	G24	2000	0	1	0	1
25	G25	5000	0	0	0	1
26	G26	5000	1	0	0	0
27	G27	2000	0	0	0	0
28	G28	5000	0	0	0	0
29	G29	5000	0	0	0	0
30	G30	2000	0	0	0	1
31	G31	5000	0	0	0	0
32	G32	5000	0	0	0	0
33	G33	2000	0	0	0	0

(Fuente: Elaboración del autor)

Toda GD tiene límites máximos y mínimos de generación, por lo cual se plantea para el estudio potencias que abordan desde los 2MW hasta los 5MW según se observa en la Tabla 3.2, se generan en Gams 4 casos de simulaciones lo que corresponden a lo siguiente:

- Primer caso: Variable binaria de 1 GD
- Segundo caso: Variable binaria de 2 GD
- Tercero caso: Variable binaria de 3 GD
- Cuarto caso: Variable binaria de 4 GD

Como ejemplo en el proceso de simulación y adquisición de variables se escoge la generación distribuida (GD) de 4 barras, obteniendo los datos que se presenta la Tabla 3.1, en la cual se muestra 4 GD de los siguientes valores: 5MW, 2MW ,5MW y 2MW.

En la Figura 3.2 se muestra la simulación del sistema en condiciones normales, los colores rojo y morado que se observan en las barras hacen referencia a los límites y márgenes propios del Software Etap, dichos límites y márgenes se pueden modificar, pero al ser condiciones de advertencia del programa y no interferir en la simulación con alguna restricción se obvió esta modificación.

Los colores de los parámetros mencionados se observan en la Figura 3-2.

	Critical	Marginal
Loading	<input checked="" type="checkbox"/> 100 %	<input checked="" type="checkbox"/> 95 %
OverVoltage	<input checked="" type="checkbox"/> 105 %	<input checked="" type="checkbox"/> 102 %
UnderVoltage	<input checked="" type="checkbox"/> 95 %	<input checked="" type="checkbox"/> 98 %

Figura 3.3. Límites que se considera en el software Etap

(Fuente: Elaboración del autor)

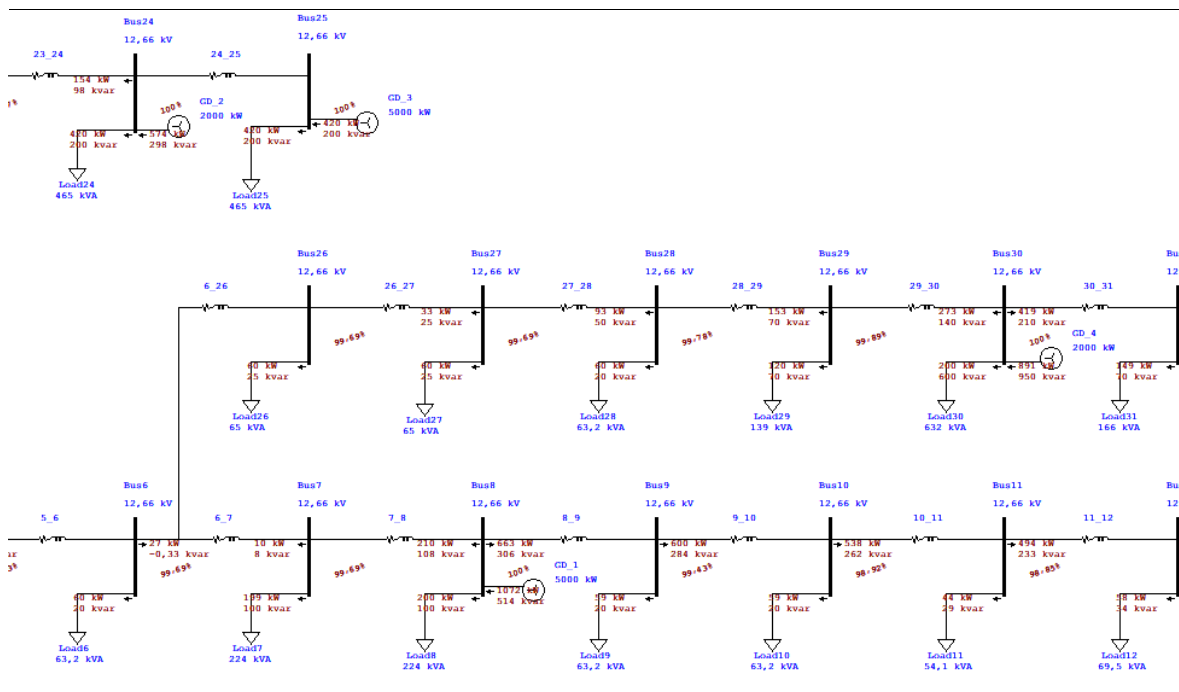


Figura 3.4. Simulación del sistema con GD en 4 barras.

(Fuente: Elaboración del autor)

Se observa la simulación con 4 GD en la Figura 3.4, que los límites y márgenes cambiaron de color morado y rojo al color negro, al considerar óptima la ubicación de la GD en el

sistema, caso contrario se obtuviera alguna barra en color que indique alguna alerta en sistema.

Si se comparan las Figuras 3.3 y la Figura 3.4 se obtienen los siguientes resultados:

- La GD solucionó los márgenes de inestabilidad en el sistema.
- GAMS obtuvo la correcta ubicación según las variables binarias.
- Al implementar GD cambia el flujo de potencia, es decir para utilizar GD se necesitan sistemas bidireccionales y consideraciones en las protecciones del sistema.

3.3. Perfiles de voltaje

En la Figura 3.5, se muestran los valores de Voltaje por unidad de la solución de los cuatro casos propuestos de implementación de la GD, de lo cual se observa que con la ubicación de 1GD en el sistema IEEE de 33 buses mejora el perfil de voltaje.

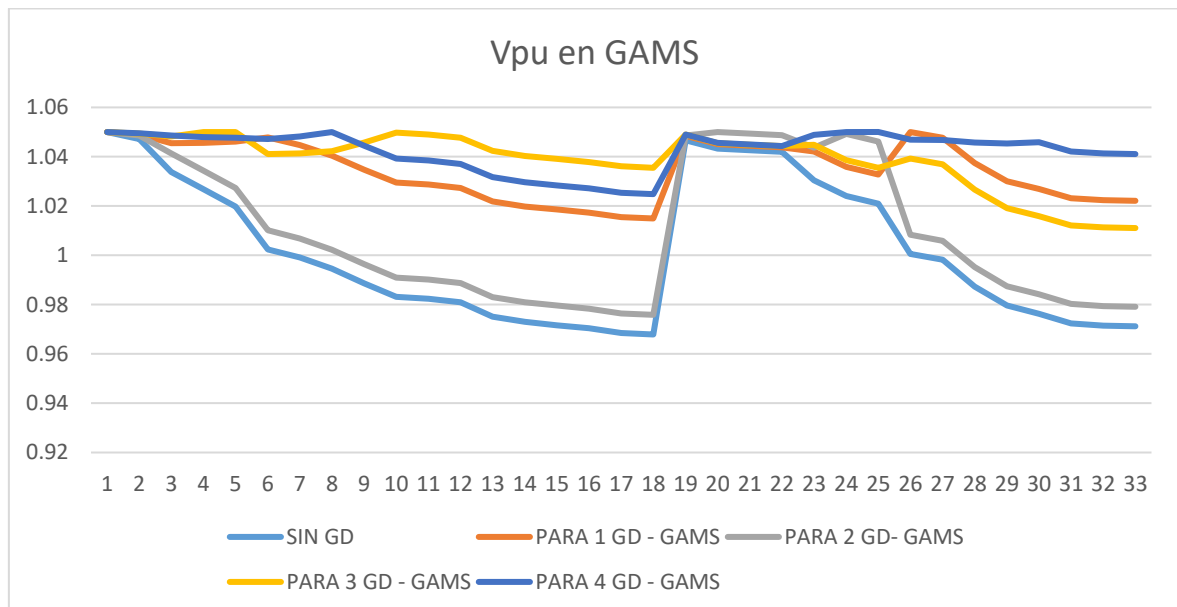


Figura 3.5: Perfil de voltaje en cada barra

(Fuente: Elaboración del autor)

De la misma forma en esta Figura 3.5 se observa que, de acuerdo a los casos de estudio, cada vez que se añade GD al sistema, esta mejora su perfil de voltaje.

3.4. Pérdidas de Potencia

En la Figura 3.6 se muestra las pérdidas de potencia tanto activas como reactivas del modelo optimizador para los cuatro casos de estudio, de lo cual se observa la reducción de pérdidas al ingresar GD al sistema.

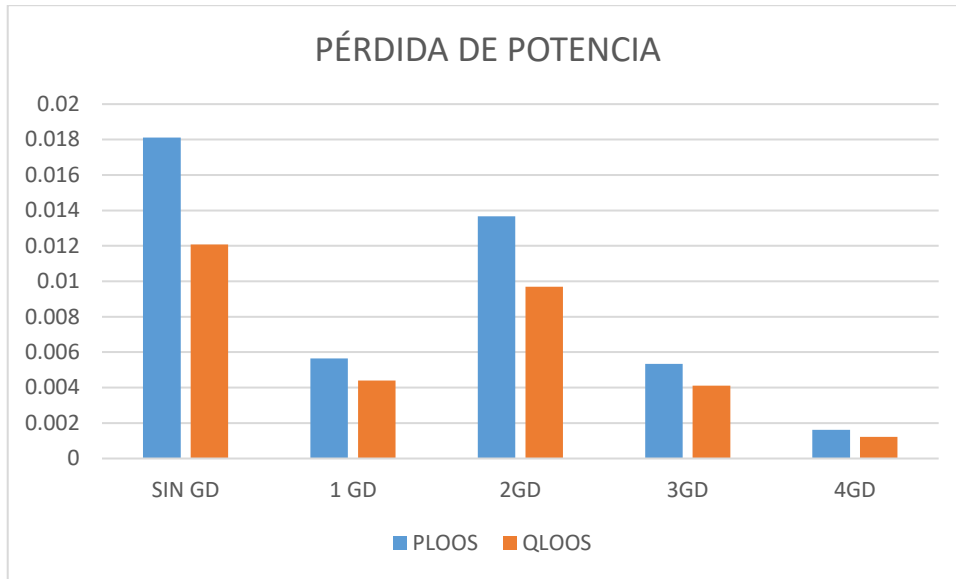


Figura 3.6. Pérdidas de Potencia Activa y Reactiva
(Fuente: Elaboración del autor)

3.5. Balance de Potencia

En la Figura 3.7 y Figura 3.8, se observa una comparativa de las potencias de pérdidas, Potencia de Generación y Potencia demandada del Sistema, a fin de realizar una comprobación de la ecuación de balance de potencias del sistema, en donde:

$$\text{Potencia de Generación} = \text{Potencia de Pérdidas} + \text{Potencia Demandada}$$

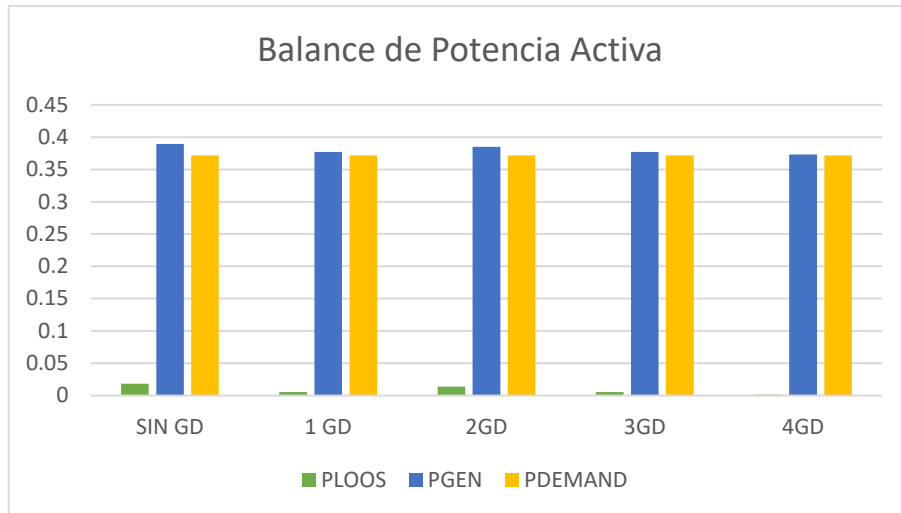


Figura 3.7. Balance potencia activa
(Fuente: Elaboración del autor)

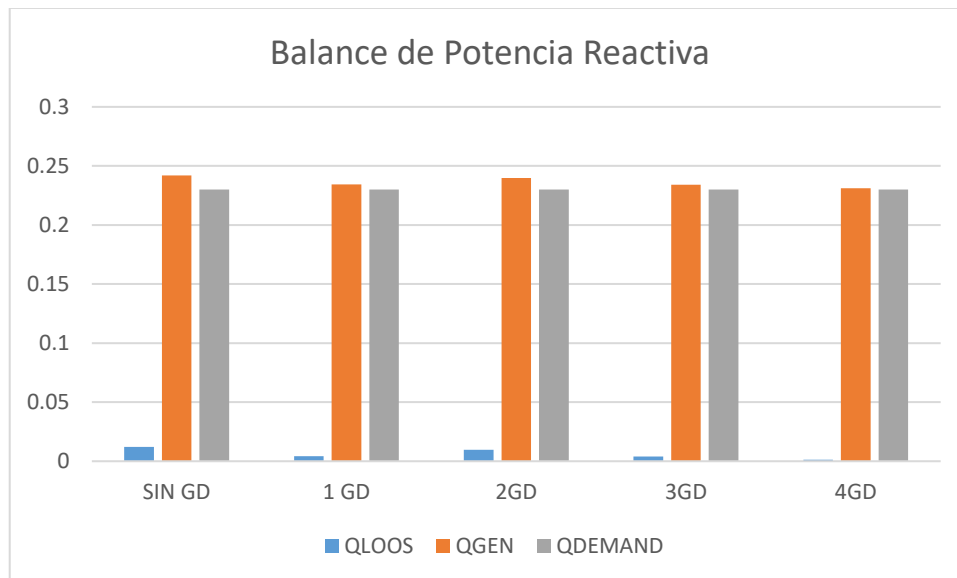


Figura 3.8. Balance potencia reactiva
(Fuente: Elaboración del autor)

Tabla 3.3 : Balance de Potencia valores por unidad

BALANCE DE POTENCIA	SIN GD	1 GD	2GD	3GD	4GD
PLOOS kW	181.201329	56.5033613	136.695546	53.440639	16.2033053
PGEN kW	3896.20131	3771.50335	3851.69553	3768.44064	3731.2033
PDEMAND kW	3714.99998	3714.99999	3714.99999	3715	3714.99999
QLOOS kVar	120.793422	43.9967194	96.9415404	41.1884278	12.2161139
QGEN kVar	2420.79342	2343.99672	2396.94154	2341.18843	2312.21611
QDEMAND kVar	2300	2300	2300	2300	2300

(Fuente: Elaboración del autor)

En la Tabla 3.3 se muestran los balances de potencias en referencia a la potencia activa y reactiva, en los cuales se consideran la generación, la demanda y las pérdidas, se observa que al no poseer GD las pérdidas de potencia activa son 181,2 kW y al implementar cuatro GD, estas pérdidas disminuyen en un 89,4 %, mostrando la efectividad de implementar la GD de forma óptima.

Es necesario considerar que las pérdidas en el sistema afectan al sistema económico directamente. Existen dos tipos de pérdidas en el sistema:

- Pérdida técnica; Que hace relación a efectos físicos propios de los materiales, efecto joule, caídas de voltaje, impedancias, entre otros.
- Pérdida no técnica: Se considera al error humano como principal al no tomar la lectura adecuada en los registros de consumo de la factura eléctrica, dispositivos en mal estado, entre otros

Si se consideran que las pérdidas de 1 [kW] equivale a \$ 1.00 y siguiendo los datos que se presentan en la Tabla 3.3 lo cual muestra que el sistema sin GD tiene pérdidas de 181 [kW], para este caso es \$181 y si este valor se lo multiplica por las horas en las cuales se tiene estas pérdidas, días e inclusive meses, la afectación tiene una escala mayor a la inversión de la GD en ciertos casos.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- El modelo de programación no lineal entero mixto ha sido validado y permite encontrar la ubicación óptima de varias unidades de GD en la red asegurando los aspectos técnicos relacionados con el nivel del voltaje, es decir que el modelo garantiza el abastecimiento de la demanda cumpliendo con criterios de calidad del servicio a los usuarios y a su vez cumple con el objetivo de minimización de pérdidas.
- El modelo fue aplicado a un sistema de distribución tipo de 33 barras IEEE, el cual a través de sus resultados se puede verificar que la ubicación óptima de generación distribuida permite a los sistemas de distribución incrementar su operatividad y su flexibilidad en relación a la operación confiable.
- Dado que la GD se encuentra ubicada cerca de la demanda, esta brinda grandes beneficios repercutiendo en la eficiencia energética ya que se contribuye a la disminución de pérdidas activas y al mejoramiento del perfil de voltajes mejorando la confiabilidad del sistema, no obstante, los beneficios de la GD dependen en gran medida de su ubicación y dimensionamiento.
- Una inadecuada planificación de la GD puede conducir efectos negativos al sistema como el aumento de pérdidas y sobrevoltajes en la red razón por la cual es de vital importancia contar con metodologías que permitan determinar la ubicación apropiada de GD para lograr sus máximos beneficios y al mismo tiempo respetar las restricciones operativas de la red.
- El modelo matemático desarrollado y resuelto por GAMS, permite valorar de forma implícita el impacto de la GD, la efectividad de este modelo se realiza a través de pruebas en un sistema de distribución, la GD cuando se ubica de manera óptima, puede contribuir al mejoramiento del perfil de voltajes y a la reducción de pérdidas siendo eficientes en el uso de la energía, lo cual podría repercutir en el abastecimiento económico de la demanda.

4.2. Recomendaciones

- Se debe tener en cuenta que la GD al estar de forma cercana al consumidor, esta puede causar un aumento de voltaje en las redes de distribución y puede ocurrir que en situación de mínima carga del sistema se exceda el límite máximo admisible de tensión en clientes cercanos al generador
- De existir incumplimiento en la distribución de energía eléctrica de valores de voltaje admisibles, podría generarse posibles daños eléctricos en los equipamientos de los clientes y a la vez existir multas impuestas a la distribuidora por el ente regulador.
- Se debe tener en cuenta que la inserción de la GD ocasiona flujos de potencia de forma bidireccional, al ocurrir esto se podría desensibilizar los relés de protección de los radiales de distribución ocasionando una corriente de falla en el caso de no estar el generador conectado a la red
- Al existir una apertura del elemento de maniobra de la red de distribución en donde se encuentre ubicada la GD, esta deja aislada la parte de la red, ocasionando una isla no intencional de potencia, acentuándose problemas de calidad de energía hacia el consumidor como voltaje, frecuencia, armónicos, flicker, desbalance.
- Para un futuro estudio se recomienda realizar un análisis de implementación de la GD en el Ecuador, ya que las redes de distribución están diseñadas para flujos de potencia unidireccional.

Referencias Bibliográficas

- [1] J. López, Ubicación óptima de generación distribuida en sistemas de energía eléctrica, Universidad EAFIT, 2009.
- [2] O. Aravena, Máxima capacidad de generación distribuida en un alimentador, Chile: Universidad de Chile, 2010.
- [3] P. Narváez , «Ubicación de Generación Distribuida para minimización de pérdidas usando un algoritmo genético híbrido,» *Información Tecnológica* , vol. Vol. 26(3), pp. 123-132, 2015.
- [4] MEER, Plan Nacional de eficiencia energética 2016 -2035, Quito: Manthra, 2017.
- [5] ARCONEL, «Atlas del Sector Eléctrico Ecuatoriano 2017,» Septiembre 2018.
- [6] ARCONEL, «REGULACIÓN Nro. ARCONEL - 003/18,» 2018.
- [7] ARCONEL, «Resolución Nro. ARCONEL-057/18,» 2019.
- [8] T. Ackermann, G. Anderson y L. Söder, «Distributed generation: a definition,» *Electric Power Research*, pp. 195-2014, 2000.
- [9] «See Electric Power Research Institute web-page,» January 1998. [En línea]. Available: <http://www.epri.com/gg/newgen/disgen/index.html>.
- [10] Gas Research Institute , «Distributed Power Generation: A Strategy,» Chicago, USA, Gas Research Institute, 1998.
- [11] R. T. J. Cardell, «Operation and control in a competitive market: distributed generation in a restructured industry, in: The energy Journal Special Issue: Distributed Resources: Toward a New Paradigm of the Electricity Business,» de *The International Association for Energy Economics*, Ohio, USA, Cleveland, 1998, pp. 111-135.
- [12] CIGRE, «Impact of increasing contribution of dispersed generation on power system,» *Final Report*, Septiembre 1998.
- [13] L. Tecnalía, «Guía básica de la generación distribuida. Fund. la Energía la Comunidad Madrid.,» 2007.
- [14] L. Loan, M. Abrudean y B. Dorin, «Effects of distributed generation on electric power systems,» *Procedia Technology*, vol. Vol. 12, pp. p.681 -686, 2014.
- [15] S. Singh, «Distributed Generation in Power Systems:,» *Indian Engineering Congress*, 2009.
- [16] J. Bloem, «Producera distribuita si regenerabila - Integrate - i interconectare, Calitatea -i utilizarea energiei electrice - Ghidde aplicare (Distributed Generation and

Renewables -Integration and Interconnection, quality and use of electricity -Application Guide),» 2007.

- [17] F. Gonzalez-Longatt, «Fuentes de Energía Distribuida Tecnologías Disponibles,» 2017.
- [18] D. Treballe, «La generación distribuida en España,» Universidad Pontificia Comillas, Madrid, 2006.
- [19] J. Muñoz, M. Rojas y C. Barreto , «INCENTIVO A LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA,» *Ingenius*, nº 19, pp. 60-68, 2017.
- [20] Á. Bayod, Energías Renovables - Sistemas Fovoltáicos, Zaragoza: Servicio de Publicaciones. Universidad de Zaragoza, 2019.
- [21] M. Villarrubia, Energía Eólica, Barcelona: Ediciones Ceac, 2004.
- [22] A. Suñé, J. Fonollosa, V. Fernández y J. Sallán, Programación lineal : Métodos cuantitativos para la toma de decisiones, Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 2016, p. 144.
- [23] GAMS, «GAMS,» 2019. [En línea]. Available: https://www.gams.com/latest/docs/UG_ModelSolve.html. [Último acceso: 10 Agosto 2019].
- [24] M. Bussiek y A. Pruessner, «Mixed-Integer Nonlinear Programming,» *Universitat Wien*, 2003.
- [25] J. Grainger y W. Stevenson, Análisis de Sistemas de Potencia, México: McGraw-Hill, 1996.
- [26] A. Ramos y P. Sánchez, «Modelos Matemáticos de Optimización,» Madrid, 2010.
- [27] A. Goikoetxea, Integration of distributed generation using energy storage systems, Arrasate: Mondragon, 2011.
- [28] V. Vita, «Development of a Decision-Making Algorithm for the Optimum Size and Placement of Distributed Generation Units in Distribution Networks,» *Energies*, 2017.

Anexos

Anexo I: Modelo matemático en Gams

```
1 Scalars
2 Sbase Potencia Base KVA/10000/
3 ;
4
5 SETS
6 i Generadores /G1*G33/
7 j Nodos /B1*B33/
8 k Enlaces de transmision /L1*L32/
9 ;
10
11 ALIAS(j1,j);
12
13 TABLE Buses(j,*) Datos de los nodos
14 $call =xls2gms r=Data_33Bus!A4:I37 i=B:\T_Carvajal\33_Bus_Distribution_Systeme
    .xlsx o=Buses1.inc
15 $include Buses1.inc
16 ;
17
18 TABLE Lines(k,*) Datos de las lineas
19 $call =xls2gms r=Data_33Bus!K4:S36 i=B:\T_Carvajal\33_Bus_Distribution_Systeme
    .xlsx o=Lines1.inc
20 $include Lines1.inc
21 ;
22
23 TABLE Gn(i,*) Datos de los generadores
24 $call =xls2gms r=Data_33Bus!A4:I74 i=B:\T_Carvajal\33_Bus_Distribution_Systeme
    m.xlsx o=Gn1.inc
25 $include Gn1.inc
26 ;
27
28
29 PARAMETERS GL(k),BL(k),YG(k,j),YB(k,j),Gii(j),Bii(j),Gik(j,j1),Bik(j,j1);
30 PARAMETERS SIL(k),T_SIL(k,j),FlowMax(j,j1);
31 *Conductancia de la linea (G):
32 GL(k)=Lines(k,'RLpu')/(SQR(Lines(k,'RLpu'))+SQR(Lines(k,'XLpu')));
33
34 *Susceptancia de la linea (B):
35 BL(k)=-Lines(k,'XLpu')/(SQR(Lines(k,'RLpu'))+SQR(Lines(k,'XLpu')));
36
37 *Table G:
38 YG(k,j)$((Lines(k,'Bi')eq Buses(j,'Bus')) or (Lines(k,'Bj') eq Buses(j,'Bus'))
    )= GL(k);
39
40 *Table B:
41 YB(k,j)$((Lines(k,'Bi')eq Buses(j,'Bus')) or (Lines(k,'Bj') eq Buses(j,'Bus'))
    )= BL(k);
42
43 *Matris de G y B propias:
44 Gii(j)=sum(k,YG(k,j));
45 Bii(j)=sum(k,YB(k,j));
46
47 *Matris de G y B mutuas:
48 Gik(j,j1)=-sum(k,YG(k,j)$ (YG(k,j) and YG(k,j1) and (Buses(j,'Bus') ne Buses(j)
    1,'Bus')));
49 Bik(j,j1)=-sum(k,YB(k,j)$ (YB(k,j) and YB(k,j1) and (Buses(j,'Bus') ne Buses(j)
    1,'Bus')));
50
51 VARIABLES
52 PG(i) Potencias activas de generacion
53 QG(i) Potencias reactivas de generacion
54 Vpu(j) Voltaje en cada nodo (pu)
```

```

55 delta(j)      Angulos de las tensiones nodales
56
57 FLOSS         Pérdidas activas
58
59 PFlow(j,j1)   Flujo de P en el enlace
60 PTFlow(j)     Flujo de P asociado a nodo j
61 QFlow(j,j1)   Flujo de Q en el enlace
62 QTFlow(j)     Flujo de Q asociado a nodo j
63 ;
64
65 BINARY VARIABLES
66 U(i)          Variable de decisión para ubicacion de GD
67 ;
68 * Limites de Pg y Qg
69 PG.lo(i)=Gn(i,'Pmin')/Sbase;
70 PG.l(i)=Gn(i,'Pin')/Sbase;
71 PG.up(i)=Gn(i,'Pmax')/Sbase;
72
73 QG.lo(i)=Gn(i,'Qmin')/Sbase;
74 QG.l(i)=Gn(i,'Qin')/Sbase;
75 QG.up(i)=Gn(i,'Qmax')/Sbase;
76
77 *Limites de Voltaje:
78 Vpu.lo(j)=0.92;
79 Vpu.l(j)=Buses(j,'Vin')/Buses(j,'Vn');
80 Vpu.up(j)=1.05;
81
82 Vpu.fx('B1')=1.05;
83
84 *Angulo:
85 delta.l(j)=Buses(j,'Din')*pi/180;
86 delta.fx('B1')=0;
87
88 EQUATIONS
89 Bal_P(j)      Balance de P
90 Bal_Q(j)      Balance de Q
91 FO            Funcion Objetivo
92
93
94 FlowP(j,j1)   Flujo de P por cada enlace
95 FlowPT(j)     Total del Flujo P al nodo j
96 FlowQ(j,j1)   Flujo de Q por cada enlace
97 FlowQT(j)     Total del Flujo Q al nodo j
98
99 PGD_Max(i)    Maxima P de los GD
100 PGD_Min(i)    Minima P de los GD
101 QGD_Max(i)    Maxima Q de los GD
102 QGD_Min(i)    Minima Q de los GD
103 GDMaximum     Numero maximo de GD
104 ;
105
106
107 * Flujos P y Q
108 FlowP(j,j1).. PFlow(j,j1)=E=(SQR(Vpu(j))*Gik(j,j1)-Vpu(j)*Vpu(j1)*(Gik(j,j1)*cos(delta(j)-delta(j1))+Bik(j,j1)*sin(delta(j)-delta(j1))));
109 FlowPT(j)..   PTFlow(j)=E=SUM(j1,PFlow(j,j1));
110
111 FlowQ(j,j1).. QFlow(j,j1)=E=-SQR(Vpu(j))*Bik(j,j1)-Vpu(j)*Vpu(j1)*(Gik(j,j1)*sin(delta(j)-delta(j1))-Bik(j,j1)*cos(delta(j)-delta(j1)));
112 *
113 FlowQT(j)..   QTFlow(j)=E=SUM(j1,QFlow(j,j1));

```

```

114
115 * Restricciones:
116
117 * 1) Balance de P y Q a cada nodo:
118
119 Bal_P(j) .. SUM(i,PG(i)$ (Gn(i,'Nc') eq Buses(j,'Bus'))) - Buses(j,'Pc')/Sbase +»
    PTFlow(j)=E=0;
120
121 Bal_Q(j) .. SUM(i,QG(i)$ (Gn(i,'Nc') eq Buses(j,'Bus'))) - Buses(j,'Qc')/Sbase +»
    QTFlow(j)=E=0;
122
123 * 2) Restricción para ubicación de GD:
124
125 PGD_Max(i)$ (ord(i) > 1) .. PG(i)=L= Gn(i,'Pmax')*U(i)/Sbase;
126 PGD_Min(i)$ (ord(i) > 1) .. PG(i)=G= Gn(i,'Pmin')*U(i)/Sbase;
127 QGD_Max(i)$ (ord(i) > 1) .. QG(i)=L= Gn(i,'Qmax')*U(i)/Sbase;
128 QGD_Min(i)$ (ord(i) > 1) .. QG(i)=G= Gn(i,'Qmin')*U(i)/Sbase;
129
130 * 3) Restricción para ubicación de GD max:
131
132 GDMaximum .. sum(i, U(i))=1=0;
133
134 * Funcion Objetivo FO) a minimizar:
135 FO .. PLOSS=e= SUM(i,PG(i))-sum(j,Buses(j,'Pc')/Sbase);
136
137 Model GDPerd /all/;
138
139 Solve GDPerd using MINLP minimizing PLOSS;
140
141 execute unload 'GDPerd',GL,BL,YG,YB,Gii,Bii,Gik,Bik,PFlow,QFlow,Vpu,delta,PG,»
    QG,Bal_P,Bal_Q,PLOSS,U;
142 execute 'gdxviewer GDPerd.gdx';
143
144

```

Anexo II: Valores característicos de un sistema IEEE de 33 barras

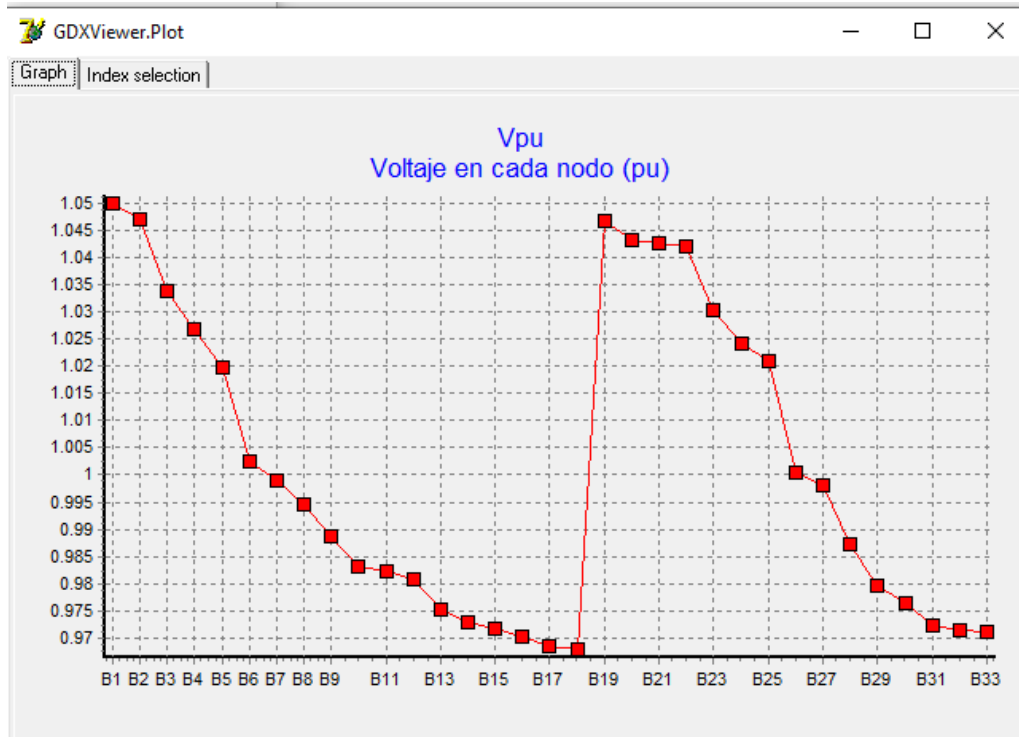
VMAX pu	1.05		Sb	10000 kVA				
VMIN pu	0.95		Vb	12.66 kV				
	Bus	Vn	Vmin	Vin	Vmax	Din	Pc kW	Qc kVar
B1	1	12.66	12.027	12.66	13.293	0	0	0
B2	2	12.66	12.027	12.66	13.293	0	100	60
B3	3	12.66	12.027	12.66	13.293	0	90	40
B4	4	12.66	12.027	12.66	13.293	0	120	80
B5	5	12.66	12.027	12.66	13.293	0	60	30
B6	6	12.66	12.027	12.66	13.293	0	60	20
B7	7	12.66	12.027	12.66	13.293	0	200	100
B8	8	12.66	12.027	12.66	13.293	0	200	100
B9	9	12.66	12.027	12.66	13.293	0	60	20
B10	10	12.66	12.027	12.66	13.293	0	60	20
B11	11	12.66	12.027	12.66	13.293	0	45	30
B12	12	12.66	12.027	12.66	13.293	0	60	35
B13	13	12.66	12.027	12.66	13.293	0	60	35
B14	14	12.66	12.027	12.66	13.293	0	120	80
B15	15	12.66	12.027	12.66	13.293	0	60	10
B16	16	12.66	12.027	12.66	13.293	0	60	20
B17	17	12.66	12.027	12.66	13.293	0	60	20
B18	18	12.66	12.027	12.66	13.293	0	90	40
B19	19	12.66	12.027	12.66	13.293	0	90	40
B20	20	12.66	12.027	12.66	13.293	0	90	40
B21	21	12.66	12.027	12.66	13.293	0	90	40
B22	22	12.66	12.027	12.66	13.293	0	90	40
B23	23	12.66	12.027	12.66	13.293	0	90	50
B24	24	12.66	12.027	12.66	13.293	0	420	200
B25	25	12.66	12.027	12.66	13.293	0	420	200
B26	26	12.66	12.027	12.66	13.293	0	60	25
B27	27	12.66	12.027	12.66	13.293	0	60	25
B28	28	12.66	12.027	12.66	13.293	0	60	20
B29	29	12.66	12.027	12.66	13.293	0	120	70
B30	30	12.66	12.027	12.66	13.293	0	200	600
B31	31	12.66	12.027	12.66	13.293	0	150	70
B32	32	12.66	12.027	12.66	13.293	0	210	100
B33	33	12.66	12.027	12.66	13.293	0	60	40
Total							3715	2300

	Bi	Bj	V	RLpu	XLpu	BuS	RLohm	XLohm	LongKm	Z	SIL
L1	1	2	12.66	0.00575	0.00293	15	0.0922	0.0477	1	0.10380814	8.52658461
L2	2	3	12.66	0.03076	0.01567	15	0.493	0.2511	1	0.55326324	3.71630149
L3	3	4	12.66	0.02284	0.01163	15	0.366	0.1864	1	0.41073222	4.31331665
L4	4	5	12.66	0.02378	0.01211	15	0.3811	0.1941	1	0.42768215	4.22689566
L5	5	6	12.66	0.0511	0.04411	15	0.819	0.707	1	1.08194732	2.21474938
L6	6	7	12.66	0.01168	0.03861	15	0.1872	0.6188	1	0.64649616	2.36733186
L7	7	8	12.66	0.04439	0.01467	15	1.7114	1.2351	1	2.11053594	1.67564971
L8	8	9	12.66	0.06426	0.04617	15	1.03	0.74	1	1.26826653	2.16480327
L9	9	10	12.66	0.06514	0.04617	15	1.004	0.74	1	1.24724336	2.16480327
L10	10	11	12.66	0.01227	0.00406	15	0.1966	0.065	1	0.20706656	7.30428344
L11	11	12	12.66	0.02336	0.00772	15	0.3744	0.1238	1	0.39433717	5.29265972
L12	12	13	12.66	0.09159	0.07206	15	1.468	0.155	1	1.47616022	4.73007957
L13	13	14	12.66	0.03379	0.04448	15	0.5416	0.7129	1	0.89529714	2.20556564
L14	14	15	12.66	0.03687	0.03282	15	0.591	0.526	1	0.79117444	2.56768311
L15	15	16	12.66	0.04656	0.034	15	0.7463	0.545	1	0.92411508	2.52252828
L16	16	17	12.66	0.08042	0.10738	15	1.289	1.721	1	2.15020046	1.41952766
L17	17	18	12.66	0.04567	0.03581	15	0.732	0.574	1	0.93021503	2.45798003
L18	2	19	12.66	0.01023	0.00976	15	0.164	0.1565	1	0.22668977	4.70735688
L19	19	20	12.66	0.09385	0.08457	15	1.5042	1.3554	1	2.02477821	1.59956007
L20	20	21	12.66	0.02555	0.02985	15	0.4095	0.4784	1	0.62972757	2.6923946
L21	21	22	12.66	0.04423	0.05848	15	0.7089	0.9373	1	1.17518956	1.92351239
L22	3	23	12.66	0.02815	0.01924	15	0.4512	0.3083	1	0.5464708	3.3538801
L23	23	24	12.66	0.05603	0.04424	15	0.898	0.7091	1	1.14421449	2.21146746
L24	24	25	12.66	0.0559	0.04374	15	0.8986	0.7011	1	1.13974698	2.2240488
L25	6	26	12.66	0.01267	0.00645	15	0.203	0.1034	1	0.22781694	5.79127284
L26	26	27	12.66	0.01773	0.00903	15	0.2842	0.1447	1	0.31891649	4.89553354
L27	27	28	12.66	0.06607	0.05826	15	1.059	0.9337	1	1.41183451	1.92721699
L28	28	29	12.66	0.05018	0.04371	15	0.8042	0.7006	1	1.06657302	2.22484228
L29	29	30	12.66	0.03166	0.01613	15	0.5057	0.2585	1	0.56793903	3.66272255
L30	30	31	12.66	0.0608	0.06008	15	0.9744	0.963	1	1.36997239	1.89767201
L31	31	32	12.66	0.01937	0.02258	15	0.3105	0.3619	1	0.47684574	3.09556554
L32	32	33	12.66	0.02128	0.03319	15	0.341	0.5302	1	0.63039118	2.55749288

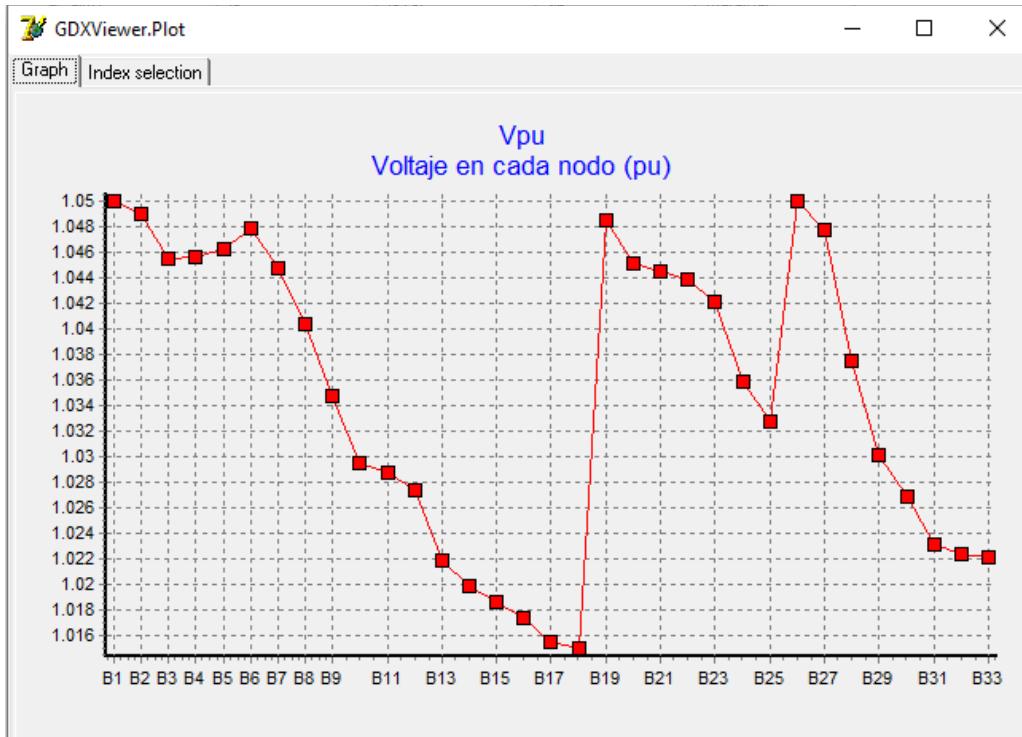
	Nc	Pmax kW	Pin kW	Pmin kW	Qmax kVar	Qin kVar	Qmin kVar	CV
G1	1	3900	0	0	2500	0	0	0.3
G2	2	5000	0	0	1600	0	-1600	0.3
G3	3	2000	0	0	657	0	-657	0.25
G4	4	5000	0	0	1600	0	-1600	0.5
G5	5	5000	0	0	1600	0	-1600	0.3
G6	6	2000	0	0	657	0	-657	0.25
G7	7	5000	0	0	1600	0	-1600	0.5
G8	8	5000	0	0	1600	0	-1600	0.3
G9	9	2000	0	0	657	0	-657	0.25
G10	10	5000	0	0	1600	0	-1600	0.5
G11	11	5000	0	0	1600	0	-1600	0.3
G12	12	2000	0	0	657	0	-657	0.25
G13	13	5000	0	0	1600	0	-1600	0.5
G14	14	5000	0	0	1600	0	-1600	0.3
G15	15	2000	0	0	657	0	-657	0.25
G16	16	5000	0	0	1600	0	-1600	0.5
G17	17	5000	0	0	1600	0	-1600	0.3
G18	18	2000	0	0	657	0	-657	0.25
G19	19	5000	0	0	1600	0	-1600	0.5
G20	20	5000	0	0	1600	0	-1600	0.3
G21	21	2000	0	0	657	0	-657	0.25
G22	22	5000	0	0	1600	0	-1600	0.5
G23	23	5000	0	0	1600	0	-1600	0.3
G24	24	2000	0	0	657	0	-657	0.25
G25	25	5000	0	0	1600	0	-1600	0.5
G26	26	5000	0	0	1600	0	-1600	0.3
G27	27	2000	0	0	657	0	-657	0.25
G28	28	5000	0	0	1600	0	-1600	0.5
G29	29	5000	0	0	1600	0	-1600	0.3
G30	30	2000	0	0	657	0	-657	0.25
G31	31	5000	0	0	1600	0	-1600	0.5
G32	32	5000	0	0	1600	0	-1600	0.3
G33	33	2000	0	0	657	0	-657	0.25

Anexo III: Resultados de gráficas de Vpu en Gams

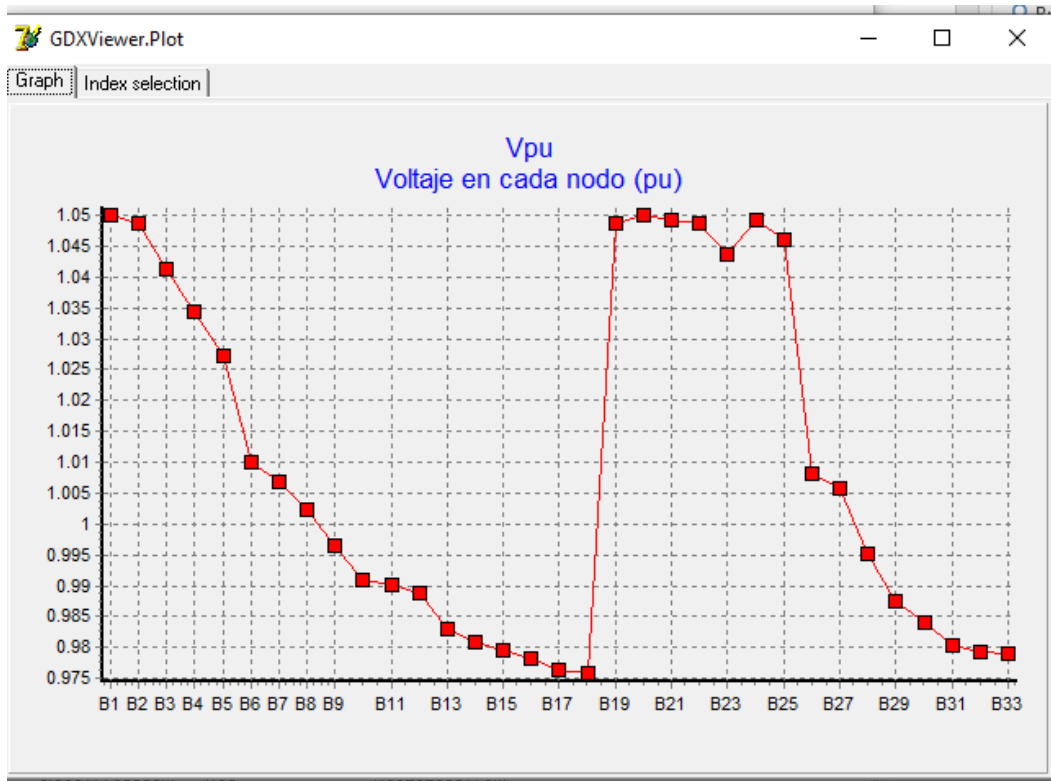
Valores de voltaje por unidad sin GD



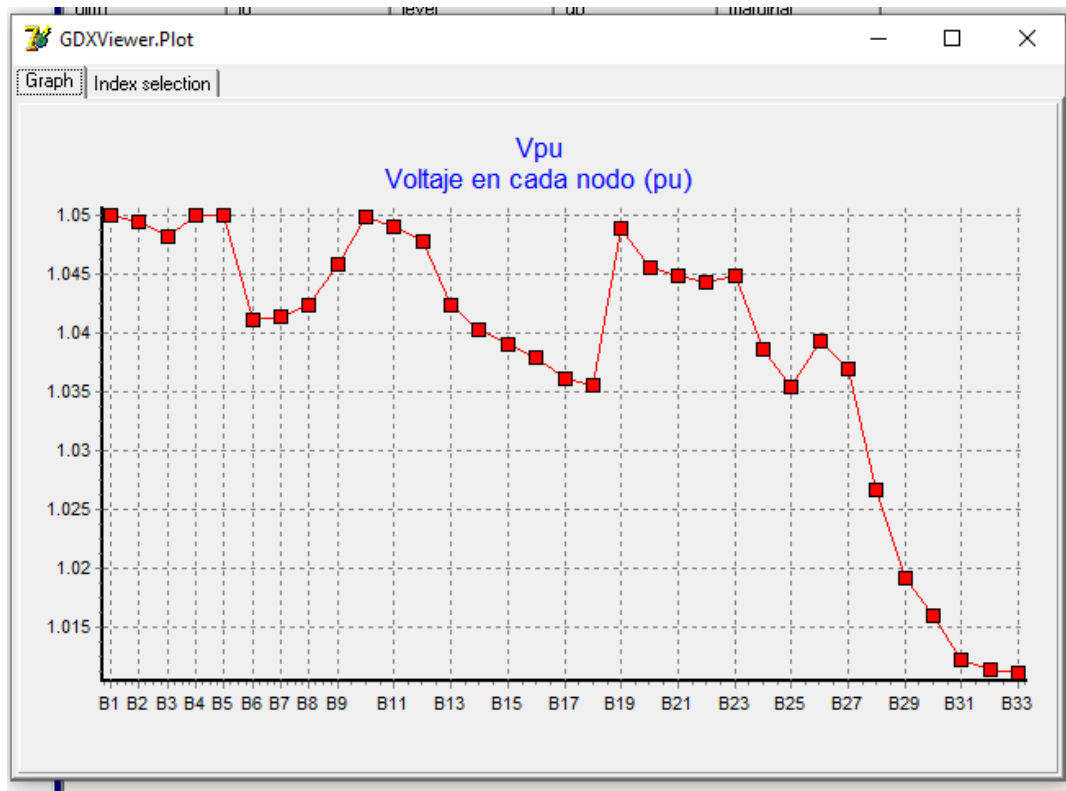
Valores de voltaje por unidad con la implementación de 1 GD



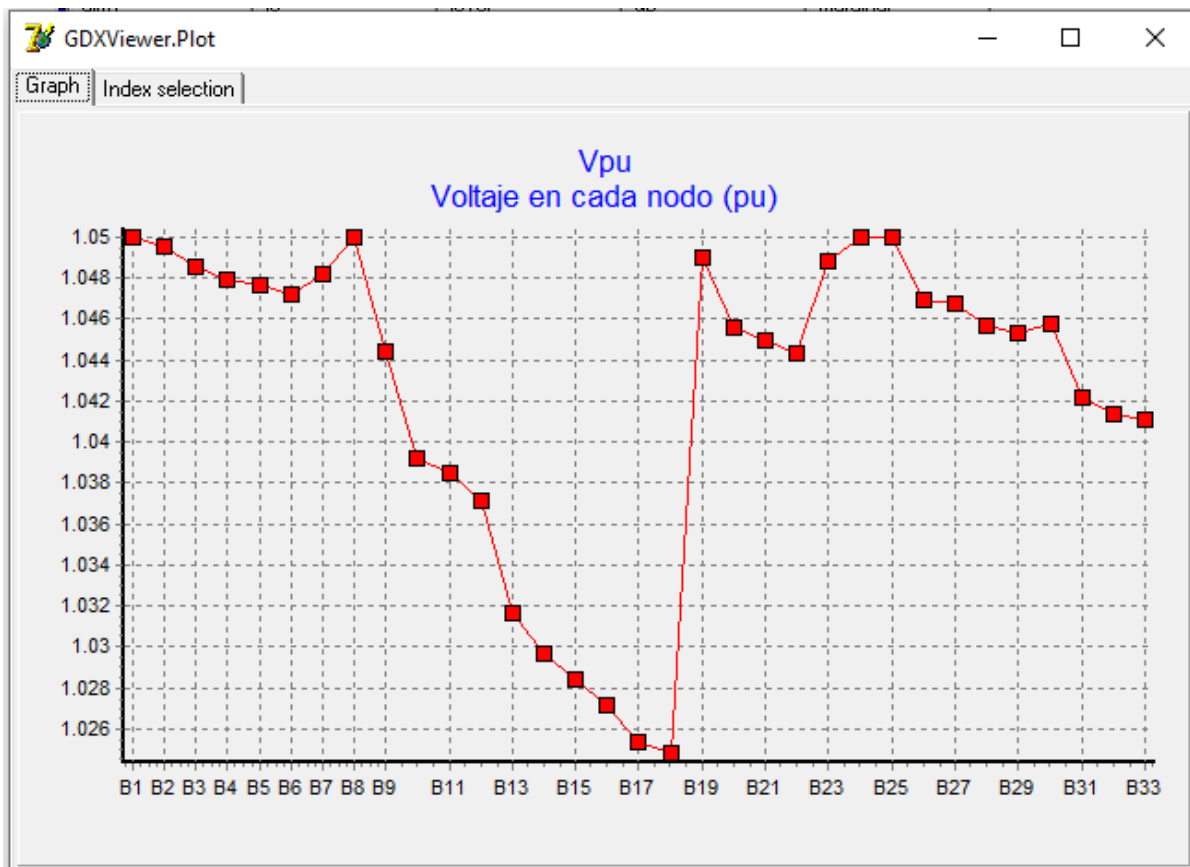
Valores de voltaje por unidad con la implementación de 2 GD



Valores de voltaje por unidad con la implementación de 3 GD



Valores de voltaje por unidad con la implementación de 4 GD



Anexo IV: Resultados del solucionador gams para los cuatro casos de estudio

Valores de Voltaje por unidad

	Vpu0	Vpu1	Vpu2	Vpu3	Vpu4
B1	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05
B2	1.04719088	1.0490242	1.04857675	1.04950956	1.04969453
B3	1.03385014	1.04548634	1.04129759	1.04856722	1.04892949
B4	1.02677775	1.04565869	1.03428126	1.04793397	1.04852202
B5	1.01978746	1.04620369	1.02734661	1.04763942	1.04846233
B6	1.00240286	1.04789102	1.0101008	1.04723035	1.04871219
B7	0.99910984	1.04474744	1.00683408	1.04821173	1.05
B8	0.99453257	1.04037762	1.00229333	1.05	1.04852247
B9	0.98861366	1.03472969	0.99642214	1.04440576	1.04770163
B10	0.98312379	1.02949164	0.99097662	1.0392176	1.04733353
B11	0.98231157	1.02871669	0.99017097	1.03845004	1.04735389
B12	0.98089612	1.02736631	0.98876699	1.03711254	1.04751512
B13	0.97512731	1.02186369	0.98304508	1.03166263	1.0490073
B14	0.97298846	1.01982369	0.98092364	1.02964221	1.04999996
B15	0.97165603	1.01855294	0.97960209	1.02838368	1.04876602
B16	0.97036556	1.01732226	0.97832215	1.02716483	1.04757099
B17	0.9684532	1.01549862	0.97642543	1.02535875	1.04580026
B18	0.96788052	1.0149525	0.97585743	1.02481789	1.04526999
B19	1.04668817	1.04852238	1.04860721	1.04900797	1.04950638
B20	1.04328356	1.04512377	1.05	1.04561095	1.04893627
B21	1.04261312	1.04445452	1.04933386	1.04494201	1.04910055
B22	1.04200655	1.04384902	1.04873118	1.04433679	1.04999988
B23	1.03044482	1.04211972	1.04368068	1.04880544	1.04903742
B24	1.02410988	1.03585687	1.04923766	1.05	1.04995542
B25	1.02095318	1.03273619	1.04615702	1.04999405	1.04687689
B26	1.00058068	1.05	1.00829327	1.04697066	1.0482997
B27	0.99815991	1.04769887	1.00589201	1.04673047	1.04784544
B28	0.98735842	1.03743138	0.99517759	1.04572018	1.04620746
B29	0.97959914	1.03005605	0.98748091	1.04533941	1.04534382
B30	0.97624083	1.02686416	0.98414974	1.04581761	1.04543663
B31	0.97231333	1.02313206	0.98025411	1.04215374	1.04999993
B32	0.97144943	1.02231115	0.97939722	1.04134785	1.04920006
B33	0.97118125	1.02205633	0.97913122	1.04109768	1.04895177

Anexo V: ecuaciones gams

Tipo	Descripción
=e=	Igualdad: el lado derecho debe ser igual al lado izquierdo.
=g=	Mayor que: el lado izquierdo debe ser mayor o igual que el lado derecho.
=l=	Menor que: el lado izquierdo debe ser menor o igual que el lado derecho.
=n=	No hay relación implícita entre el lado izquierdo y el lado derecho. Este tipo de ecuación es ideal para usar en modelos MCP y en desigualdades variacionales .
=x=	La ecuación se define por programas externos. Ver Ecuaciones Externas .
=c=	Restricción cónica. Ver Programación cónica en GAMS .
=b=	Ecuaciones booleanas. Ver Ecuaciones lógicas .

Tabla 1: Tipos de ecuaciones

Función	Operador	Notación alternativa	Valores de retorno	Orden de precedencia
Negación	not x	bool_not(x)	devuelve 1 si , de lo contrario devuelve 0	1
Conjunción lógica	x and y	bool_and(x,y)	devuelve 1 si , de lo contrario devuelve 0	2
Disyunción lógica	x or y	bool_or(x,y)	devuelve 0 si , de lo contrario devuelve 1	3
Disyunción exclusiva	x xor y	bool_xor(x,y)	devuelve 1 si exactamente un argumento es 1, de lo contrario devuelve 0	3

Implicación material	$x \text{ imp } y \text{ o } x \rightarrow y$	<code>bool_imp(x, y)</code>	devuelve 0 si e , de lo contrario devuelve 1	3
Equivalencia material	$x \text{ eqv } y \text{ o } x \Leftrightarrow y$	<code>bool_eqv(x, y)</code>	devuelve 0 si exactamente un argumento es 0, de lo contrario devuelve 1	3

Tabla 2: Funciones booleanas y precedencia del operador

Anexo VI: tipos de modelo Gams

Tipo de modelo GAMS	Modelo Tipo Descripción	Requisitos y comentarios
LP	Programa lineal	Modelo sin términos no lineales o variables discretas (es decir, binarias, enteras, etc.).
PNL	Programa no lineal	Modelo con términos generales no lineales que involucran solo funciones <i>suaves</i> , pero no variables discretas. Para una clasificación de funciones en cuanto a suavidad, vea la sección Funciones .
QCP	Programa restringido cuadráticamente	Modelo con términos lineales y cuadráticos, pero sin términos generales no lineales o variables discretas.
DNLP	Programa no lineal discontinuo	Modelo con términos no lineales <i>no lisos</i> con derivadas discontinuas, pero sin variables discretas. Esto es lo mismo que NLP , excepto que también pueden aparecer funciones no uniformes. Estos modelos son más difíciles de resolver que los NLP modelos normales y recomendamos encarecidamente no utilizar este tipo de modelo.
MIP	Programa de enteros mixtos	Modelo con binario, entero, SOS y / o semi variables, pero sin términos no lineales.
RMIP	Programa entero mixto relajado	Como MIP , excepto que el requisito de la variable discreta es relajado. Consulte la nota a continuación sobre tipos de modelos relajados.
RMINLP	Programa no lineal de entero mixto relajado	Me gusta, MINLP excepto que el requisito de la variable discreta es relajado. Consulte la nota a continuación sobre tipos de modelos relajados.
MINLP	Programa entero no lineal mixto	Modelo con términos no lineales y variables discretas.

<u>MIQCP</u>	Programa mixto entero restringido cuadráticamente	Modelo con términos cuadráticos y variables discretas, pero sin término general no lineal.
RMIQCP	Programa entero mixto relajado restringido cuadráticamente	Me gusta, <u>MIQCP</u> excepto que el requisito de la variable discreta es relajado. Consulte la nota a continuación sobre tipos de modelos relajados.
<u>MCP</u>	Problema de complementariedad mixta	Un modelo cuadrado, posiblemente no lineal, que generaliza un sistema de ecuaciones. Las filas y las columnas se corresponden en relaciones complementarias uno a uno.
<u>CNS</u>	Sistema no lineal restringido	Modele la resolución de un sistema de ecuaciones cuadrado, posiblemente no lineal, con un número igual de variables y restricciones.
<u>MPEC</u>	Programas matemáticos con restricciones de equilibrio	Un tipo de modelo difícil para el cual los solucionadores y reformulaciones se están desarrollando actualmente.
RMPEC	Programa matemático relajado con restricciones de equilibrio	Un tipo de modelo difícil para el cual los solucionadores y reformulaciones se están desarrollando actualmente. Consulte la nota a continuación sobre tipos de modelos relajados.
<u>EMP</u>	Programa matemático extendido	Una familia de extensiones de programación matemática.
MPSGE	Equilibrio general	En realidad no es un tipo de modelo pero se menciona para completar, ver <u>MPSGE</u> .

Anexo VII: tipos de modelo Gams

Una gran cantidad de solucionadores para modelos de programación matemática se han conectado a GAMS. Las tablas a continuación proporcionan una breve descripción de cada solucionador, los tipos de modelos que cada solucionador puede resolver y las plataformas compatibles con cada solucionador. Para obtener información general sobre el uso de solucionadores GAMS, consulte Uso del solucionador.

Solucionador	Vendedor	Descripción
<u>ALFAECP</u>	Universidad de Abo	Solucionador MINLP basado en el método de plano de corte extendido (ECP)
<u>AMPL</u>	GAMS Development Corp	Un enlace para resolver modelos GAMS utilizando solucionadores dentro del sistema de modelado AMPL
<u>ANTIGONE 1.1</u>	Universidad de Princeton	Optimización global determinista para MINLP
<u>BARÓN</u>	The Optimization Firm, LLC	Navegador de optimización de sucursal y reducción para soluciones globales comprobadas
<u>BDMLP</u>	GAMS Development Corp	Solucionador de LP y MIP que viene con cualquier sistema GAMS
<u>BANCO</u>	GAMS Development Corp	Una utilidad para facilitar la evaluación comparativa de los solucionadores de GAMS y la verificación de soluciones
<u>BONMIN 1.8</u>	Fundación COIN-OR	Solucionador COIN-OR MINLP que implementa varios algoritmos de aproximación externa y de ramificación
<u>CBC 2.10</u>	Fundación COIN-OR	Solucionador de LP / MIP de alto rendimiento
<u>CONOPTO 3</u>	Consultoría y Desarrollo ARKI	Solucionador de PNL a gran escala
<u>CONOPTO 4</u>	Consultoría y Desarrollo ARKI	Solucionador de PNL a gran escala

<u>CONVERTIR</u>	GAMS Development Corp	Marco para traducir modelos a modelos escalares de otros idiomas
<u>COUENNE 0.5</u>	Fundación COIN-OR	Optimización global determinista para (MI) PNL
<u>CPLEX 12.9</u>	IBM ILOG	Solucionador de LP / MIP de alto rendimiento
<u>Delaware</u>	GAMS Development Corp	Genera y resuelve el equivalente determinista de un programa estocástico, incluido en EMP / SP
<u>DECIS</u>	G. Infanger, Inc.	Solucionador de programación estocástica a gran escala
<u>DICOPT</u>	EDRC, Universidad Carnegie Mellon	Marco para resolver modelos MINLP
<u>EXAMINADOR</u>	GAMS Development Corp	Una herramienta para examinar puntos de solución y evaluar su mérito
<u>GAMSCHK</u>	Bruce McCarl	Un sistema para examinar las propiedades de estructura y solución de los problemas de programación lineal resueltos usando GAMS
<u>GLOMIQO 2.3</u>	Universidad de Princeton	Optimización global de ramificación y unión para modelos cuadráticos de enteros mixtos
<u>GUROBI 8.1</u>	Optimización de Gurobi	Solucionador LP / MIP de alto rendimiento
<u>GUSS</u>	GAMS Development Corp	Un marco para resolver muchas instancias de modelos relacionados de manera eficiente (Gather-Update-Solver-Scatter)
<u>IPOPT 3.12</u>	Fundación COIN-OR	Interior Point Optimizer para programación no lineal a gran escala
<u>ENJAMBRES</u>	GAMS Development Corp	Solucionador para reformular programas matemáticos extendidos (incluido LogMIP)
<u>CERNÍCALO</u>	NEOS	Marco para usar solucionadores NEOS remotos con un sistema GAMS local
<u>KNITRO 11.1</u>	Artelys	Solucionador de PNL a gran escala

<u>LGO</u>	Servicios de consultoría de Pinter	Un conjunto de soluciones de optimización no lineal global-local
<u>LINDO 12.0</u>	Lindo Systems Inc.	Un solucionador estocástico de Lindo Systems, Inc. Incluye una versión sin restricciones de LINDOGLOBAL
<u>LINDOGLOBAL 12.0</u>	Lindo Systems Inc.	Solucionador MINLP para soluciones globales probadas
<u>JERGA</u>	GAMS Development Corp	Un enlace para resolver modelos GAMS utilizando solucionadores dentro del sistema de modelado LINGO
<u>LOCALSOLVER 8.5</u>	Innovación 24	Solucionador de búsqueda local de vecindario híbrido
<u>LS</u>	Solucionador de mínimos cuadrados	Un solucionador de regresión lineal para GAMS
<u>Millas</u>	Universidad de Colorado en Boulder	Solucionador de MCP
<u>MINOS</u>	Universidad Stanford	Solucionador de PNL
<u>MOSEK 9</u>	MOSEK ApS	Solucionador de programación cónica de entero mixto a gran escala
<u>MSNLP</u>	Sistemas OptTek y métodos óptimos	Método de inicio múltiple para optimización global
<u>NLPEC</u>	GAMS Development Corp	Traductor de MPEC a NLP que utiliza otros solucionadores GAMS NLP
<u>ODHCPLEX 4</u>	Optimization Direct Inc	ODHeuristic encima de Cplex
<u>OsiCplex</u>	Fundación COIN-OR	Enlace de huesos desnudos a CPLEX
<u>OsiGurobi</u>	Fundación COIN-OR	Enlace de huesos desnudos a Gurobi

<u>OsiMosek</u>	Fundación COIN-OR	Enlace de huesos desnudos a Mosek
<u>OsiXpress</u>	Fundación COIN-OR	Enlace de huesos desnudos a Xpress
<u>PATHNLP</u>	Universidad de Wisconsin-Madison	Solucionador de PNL a gran escala para problemas convexos
<u>CAMINO</u>	Universidad de Wisconsin-Madison	Solucionador de MCP a gran escala
<u>PYOMO</u>	GAMS Development Corp	Un enlace para resolver modelos GAMS utilizando solucionadores dentro del sistema de modelado PYOMO
<u>SBB</u>	Consultoría y Desarrollo ARKI	Algoritmo Branch-and-Bound para resolver modelos MINLP
<u>SCIP 6.0</u>	Zuse Institute Berlin et al.	Solucionador de programación de enteros de restricción de alto rendimiento
<u>SELKIE</u>	Universidad de Wisconsin-Madison	Descomposición y solución paralela para EMP
<u>SNOPT</u>	Universidad Stanford	Solucionador de PNL a gran escala basado en SQP
<u>SOLVEENGINE</u>	Satalia	Enlace para usar solucionadores de Satalia SolveEngine con un sistema GAMS local
<u>SOPLEX 4.0</u>	Instituto Zuse de Berlín	Solucionador LP de alto rendimiento
<u>XA</u>	Sunset Software	Solucionador de LP / MIP a gran escala
<u>XPRESS 33.01</u>	FICO	Solucionador LP / MIP de alto rendimiento

Tipos de modelo

GAMS es capaz de formular modelos en muchos tipos diferentes de clases de problemas o tipos de modelos . Por lo general, un solucionador será capaz de resolver (es decir, aceptará

como entrada) más de un tipo de modelo. La matriz de tipo de solucionador / modelo muestra qué solucionador es capaz de qué tipo de modelo:

	<u>L</u> <u>P</u>	<u>MI</u> <u>P</u>	<u>PN</u> <u>L</u>	<u>MC</u> <u>P</u>	<u>MP</u> <u>EC</u>	<u>CN</u> <u>S</u>	<u>DN</u> <u>LP</u>	<u>MIN</u> <u>LP</u>	<u>QC</u> <u>P</u>	<u>MIQ</u> <u>CP</u>	<i>Sto</i> <i>ch</i>	<i>Glo</i> <i>bal</i>
ALFAECP								✓		✓		
ANTIGONE 1.1			✓			✓	✓	✓	✓	✓		✓*
BARÓN	✓	✓	✓			✓	✓	✓	✓	✓		✓*
BDMLP	✓	✓										
BONMIN 1.8								✓		✓		
CBC 2.10	✓	✓										
CONOPTO 3	✓		✓			✓	✓		✓			
CONOPTO 4	✓		✓			✓	✓		✓			
COUENNE 0.5			✓			✓	✓	✓	✓	✓		✓*
CPLEX 12.9	✓	✓							✓	✓		
DECIS	✓										✓	
DICOPT								✓		✓		
GLOMIQO 2.3									✓	✓		✓*
GUROBI 8.1	✓	✓							✓	✓		
GUSS	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓		
IPOPT 3.12	✓		✓			✓	✓		✓			

CERNICAL O	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
KNITRO 11.1	✓		✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓		
LGO	✓		✓				✓		✓			✓
LINDO 12.0	✓	✓	✓				✓	✓	✓	✓	✓	✓*
LINDOGLO BAL 12.0	✓	✓	✓				✓	✓	✓	✓		✓*
LOCALSOL VER 8.5		✓	✓			✓	✓	✓	✓	✓		
Millas				✓								
MINOS	✓		✓			✓	✓		✓			
MOSEK 9	✓	✓	✓				✓	✓	✓	✓		
MSNLP			✓				✓		✓			✓
NLPEC				✓	✓							
ODHCPLE X 4		✓								✓		
CAMINO				✓		✓						
SBB								✓		✓		
SCIP 6.0		✓	✓			✓	✓	✓	✓	✓		✓*
SNOPT	✓		✓			✓	✓		✓			
SOLVEEN GINE	✓	✓										
SOPLEX 4.0	✓											
XA	✓	✓										
XPRESS 33.01	✓	✓							✓	✓		

* solucionador global determinista

Al elegir un solucionador, se debe aplicar algún criterio al considerar las capacidades de tipo de modelo enumeradas para el solucionador: las mismas "casillas de verificación" de capacidad no implican igualdad en la capacidad o idoneidad. Por ejemplo, tome un solucionador hipotético diseñado por WeOpt para resolver modelos MINLP. Dado que la clase problemática MINLP incluye NLP, MIP y LP como subclases, el solucionador WeOpt también podría incluir estas capacidades. Si WeOpt también tiene un buen desempeño en los modelos de PNL, incluiría esa capacidad. Pero si no brilla en absoluto como un solucionador de MIP o LP, optaríamos por no incluir MIP y LP en la lista de capacidades de WeOpt. En tal caso, siempre se puede resolver utilizando un tipo de modelo más general (por ejemplo, resolver un modelo LP como NLP para que se pueda usar WeOpt), pero WeOpt no se anunciará como un solucionador LP.

Existen otras diferencias en los solucionadores que son difíciles de cuantificar o que no pueden ser capturadas por una tabla de capacidades como la que se muestra. Por ejemplo, para modelos NLP o QCP no convexos, un solucionador podría buscar solo puntos estacionarios de primer orden, otro para soluciones locales, un tercero para soluciones locales que utilizan una búsqueda dispersa o una búsqueda heurística similar, y un cuarto podría hacer una búsqueda global verdadera para el óptimo global. Los méritos relativos (medidos típicamente solo por la velocidad) de los solucionadores son objeto de una considerable actividad de evaluación comparativa y discusión.

El equipo de ventas de GAMS puede ayudarlo a responder preguntas que pueda tener sobre la capacidad de resolución. También ofrecemos licencias de evaluación gratuitas para ayudarlo a decidir qué solucionadores son más adecuados para sus modelos.

Plataformas Soportadas

La matriz de solucionador / plataforma muestra en qué plataformas se admite cada solucionador. Además, cuando un proveedor ha descontinuado el soporte de solucionador para una plataforma en particular y seguimos enviando la última versión compatible disponible, también se indica este número de versión.

	x86 32bit MS Windows	x86 64bit MS Windows	x86 64bit Linux	x86 64 bits Mac OS X	Sparc 64bit SOLARIS	IBM Power 64 bits AIX
ALFAECP	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ANTIGONE 1.1	✓	✓	✓	✓		

BARÓN	18.5.8	✓	✓	✓		
BDMLP	✓	✓	✓	✓	✓	✓
BONMIN 1.8	✓	✓	✓	✓		
CBC 2.10	✓	✓	✓	✓		
CONOPTO 3	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CONOPTO 4	✓	✓	✓	✓	✓	✓
COUENNE 0.5	✓	✓	✓	✓		
CPLEX 12.9	12,6	✓	✓	✓	12,6	✓
DECIS	✓	✓	✓	✓	✓	
DICOPT	✓	✓	✓	✓	✓	✓
GLOMIQO 2.3	✓	✓	✓	✓		
GUROBI 8.1	7.5	✓	✓	✓		✓
GUSS	✓	✓	✓	✓	✓	✓
IPOPT 3.12	✓	✓	✓	✓		
CERNÍCALO	✓	✓	✓	✓	✓	✓
KNITRO 11.1	11,0	✓	✓	✓		
LGO	✓	✓	✓	✓	✓	
LINDO 12.0	✓	✓	✓	✓		
LINDOGLOBAL 12.0	✓	✓	✓	✓		
LOCALSOLVER 8.5	✓	✓	✓	✓		
Millas	✓	✓	✓	✓	✓	✓
MINOS	✓	✓	✓	✓	✓	✓
MOSEK 9	✓	✓	✓	✓		
MSNLP	✓	✓	✓	✓	✓	

NLPEC	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ODHCPLEX 4		✓	✓			
CAMINO	✓	✓	✓	✓	✓	✓
SBB	✓	✓	✓	✓	✓	✓
SCIP 6.0	✓	✓	✓	✓		
SNOPT	✓	✓	✓	✓	✓	✓
SOLVEENGINE	✓	✓	✓	✓		
SOPLEX 4.0	✓	✓	✓	✓		
XA	✓	✓	✓			
XPRESS 33.01	✓	✓	✓	✓	32,01	29,01