

**GENERACIÓN DISTRIBUIDA Y REDES INTELIGENTES
“ADMINISTRACIÓN Y CONTROL EFECTIVO DE LA RED ELÉCTRICA
MEDIANTE SMART GRID, BENEFICIOS SOCIALES Y ECONÓMICOS EN LA
CIUDAD DE PASTO”**

**LISED KATHERINE CHAVES ACOSTA
CAMILO JOSE CHAVES ROSERO
JONATHAN VILLOTA REVELO**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
SAN JUAN DE PASTO
2011**

**GENERACIÓN DISTRIBUIDA Y REDES INTELIGENTES
“ADMINISTRACIÓN Y CONTROL EFECTIVO DE LA RED ELÉCTRICA
MEDIANTE SMART GRID, BENEFICIOS SOCIALES Y ECONÓMICOS EN LA
CIUDAD DE PASTO**

**LISED KATHERINE CHAVES ACOSTA
CAMILO JOSÉ CHAVES ROSERO
JONATHAN VILLOTA REVELO**

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Electrónico**

**Director
MSC. ING. ANDRÉS PANTOJA BUCHELLI**

**Codirector
MSC. ING. DARÍO FAJARDO FAJARDO**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
SAN JUAN DE PASTO
2011**

NOTA DE RESPONSABILIDAD

“La Universidad de Nariño no se hace responsable por las opiniones o resultados obtenidos en el presente trabajo y para su publicación priman las normas sobre el derecho de autor”.

Acuerdo 1. Artículo 324. Octubre 11 de 1966, emanado del honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño.

Nota de aceptación

Presiente de Tesis

Jurado 1

Jurado 2

San Juan de Pasto, Mayo de 2011

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Universidad de Nariño por la enseñanza recibida durante estos hermosos años de crecimiento profesional y humano. Y en ella por mérito de Dios, permitirnos encontrar personas maravillosas que han guiado nuestros pasos, que nos enseñaron a no desfallecer, nos han dado consejo, aliento y apoyo pero sobre todo, personas que nos dieron ejemplo de grandes seres humanos. De lo más profundo de nuestro corazón agradecemos al Ing. José Dolores Rodríguez Martínez Q.E.P.D por todas las enseñanzas recibidas, dedicación y tiempo. Gracias por dejar en nosotros la semilla del éxito.

Un agradecimiento especial por la colaboración de los directores Ing. Andrés Pantoja Buchelli y a nuestro codirector Ing. Darío Fajardo por sus sabios aportes, participación y gran interés en este trabajo, quienes nos motivaron y apoyaron.

Agradecimientos a: Ing. David Salcedo por su inmensa ayuda en el proceso de investigación sobre sector eléctrico, al grupo de investigación Sílice de la Universidad de los Andes, por su participación y opiniones para enriquecer este trabajo, en especial al Ing. German Obando por su valiosa ayuda y explicaciones, Ing. Carlos Vitery por compartir sus conocimientos con nosotros sobre el sistema de comunicación; Ing. Jean Alexander León de la Universidad Mariana por su asesoría sobre aspectos en el aprovechamiento del biogas y a las Empresas CEDENAR S.A E.S.P, EMAS S.A E.S.P e INGEOMINAS por la información recibida.

DEDICATORIA

Dedicamos este proyecto a Dios y a la Virgen que nos dieron fortaleza y sabiduría en los tiempos difíciles, por permitirnos la realización de una meta más y por su constante acompañamiento en nuestras vidas.

A mi familia por que la búsqueda de la felicidad ha sido un camino corto en mi vida; y puedo afirmar que la conozco y la vivo gracias a ustedes. Gracias por su apoyo y su constante motivación. Los amo Lised.

Se la dedico a mis padres en retribución a su amor, enseñanza, confianza, apoyo y sacrificio en el proceso de formación como profesional y persona. A mi hermana y familia por hacerme feliz, brindarme su cariño, atención y acompañamiento en todo momento. Camilo.

En homenaje a mis amados Padres César y Gloria, porque su amor, dedicación y motivación hacen que alcance todas mis metas. Gracias por estar siempre a mi lado, por todos los momentos de felicidad y amor que me brindan. Les dedico este logro uno de los muchos que quiero que compartan conmigo. También quiero dedicar este trabajo a la memoria del Ing. José Dolores mi maestro y amigo. Jonathan.

GLOSARIO

AMI: (Advanced Metering Infrastructure) son sistemas que miden, recolectan y analizan el uso de la energía. Esta tecnología es de doble vía entre usuarios y empresas.

AMR: (Automatic meter Reading) es la tecnología de recolección automática de consumo, diagnóstico y los datos de estado del medidor de agua o de energía. Transfiere los datos a una base de datos central para la facturación, resolución de problemas y el análisis.

CEDENAR: Centrales eléctricas de Nariño S.A E.S.P

GD: generadores distribuidos son una variedad de tecnologías de generación de baja potencia, representando una alternativa económica. Estos se conectan a la red de distribución y se caracteriza por encontrarse instalados en puntos cercanos al consumo.

GEC: Granja experimental de Corpoica.

GPRS: (General Packet Radio Services) es una extensión del sistema GSM para la transmisión de datos mediante una técnica de conmutación de paquetes.

HAN: (Home Área Network) es una zona residencial de la red de área local (LAN). Este es usado para la comunicación entre los dispositivos típicos digitales de un usuario.

HSDPA: (High Speed Downlink Packet Access), también denominada 3.5G, es la optimización de la tecnología espectral UMTS/WCDMA, con mejoras significativas en la capacidad máxima de transferencia de información.

LAN: (local Área Network) es la interconexión de varias computadoras y periféricos. Su extensión está limitada físicamente a un edificio o a un entorno de 200 metros.

MICROGRID: Puede tener elementos inteligentes y es conectada a la Smart Grid por una red de datos. Permiten el funcionamiento independiente al poseer generadores distribuidos capaces de soportar la demanda de energía.

PLC: (Power Line Communications) tecnología de comunicaciones que utiliza las líneas de energía eléctrica convencionales para transmitir señales para propósitos de comunicación.

PSO: (Particle Swarm Optimization) técnica de búsqueda multiagente traza su evolución en la propuesta emergente de una bandada de pájaros en búsqueda de alimento.

SISTEMA MULTIAGENTE: es un sistema computacional en el que muchos agentes interactúan o trabajan juntos para alcanzar una meta.

SMART GRID: red de distribución de energía eléctrica "inteligente". Es un sistema que identifica y se conecta a la red eléctrica para optimizar la producción y la distribución de Electricidad con el fin de equilibrar mejor la oferta y la demanda entre productores y consumidores.

WAN: (Wide Área Network) es un tipo de red de comunicaciones capaz de cubrir distancias desde unos 100 hasta unos 1000 km.

ZIGBEE: un conjunto de protocolos de alto nivel de comunicación inalámbrica para su utilización con redes de área domesticas de bajo consumo.

RESUMEN

El presente trabajo es la primera aproximación de la tecnología Smart Grid en el ambiente regional. La motivación de esta investigación es resaltar los beneficios económicos, sociales y ambientales de las Smart Grids en comparación a la situación actual de la red Eléctrica en la ciudad Pasto.

La investigación toma su curso en cinco etapas, la primera inicia con el estudio de la infraestructura actual de la red de eléctrica en Pasto, la generación, distribución, transmisión y comercialización. En la segunda etapa se define el concepto y la conformación de una Smart Grid desde el punto de vista investigativo, comercial y aplicativo. Con el análisis proporcionado en la primera etapa, la Smart Grid puede ser visto como una solución a las dificultades existentes actualmente en la red, al problema del calentamiento global y la ineficiencia en administración de los recursos energéticos.

En la tercera etapa se establece los estándares, protocolos y medios de comunicación necesarios para compartir información entre cada elemento que conforma la Smart Grid y la microgrid. Para la micro red a simular se referencian los métodos y equipos usados para la transmisión de datos tanto en monitoreo como en control. La cuarta etapa es una parte esencial del proyecto, se exploran los tipos de generación que pueden ser implementados en la región y los necesarios para la microgrid a simular, esta investigación tiene en cuenta el factor medioambiental como Smart Grid sugiere, se da uso de fuentes renovables, con el fin de eliminar las restricciones impuestas a este tipo de energías por el sector energético y demostrar su viabilidad técnica y económica gracias al uso efectivo de sus recursos. En el capítulo final se describe la estrategia de control utilizada para administrar los elementos de la red en especial los generadores, este tipo de estrategia se basa en el uso de algoritmos multi agentes de optimización aplicados al despacho económico. Estos buscan el mejor beneficio económico con la capacidad de escoger que generador es más accesible y aprovecharlo de la mejor manera mientras se restringe el uso de aquellos cuyo uso no muestre el mejor beneficio.

La microgrid a simular es establecida por cargas que son formadas por usuarios destacados de tipo industrial. Contendrá tres generadores distribuidos (PCH, Biogás y Metanización) y será administrada mediante el algoritmo de control PSO, este determina el nivel de potencia de cada GD de acuerdo a la demanda y al costo de generación en ese instante. La micro red debe ser soportada bajo una estructura de comunicaciones que da vida a todo el proceso.

ABSTRACT

The present research is the first approach of the Smart Grid technology in region. The main motivation for this research is to stand out the economic, social and environmental benefits that Smart Grid provides composed to the current electrical grid operation.

The research takes place in five steps. The first is a study of current Pasto's electrical grid infrastructure with all of its process the generation, distribution and commercialization. The second step defines the concept and conformation of the Smart Grid, from research, commercial and practical point of view. With the analysis provided by the first step Smart Grid would be known as a solution for the global warming issue, a solution for current difficulties and problems in the existing grid and a way to improve the efficiency of the energetic resources.

The third step establishes necessary standards protocols and communication systems to share information between each element that conform Smart Grid and the microgrid. In the microgrid study this research suggests the methods and equipment used for the transmission of data and control commands applied to monitoring and control. The fourth step is the essential part of the project, types and viability of power generation that could be applied on the region are explored and the needed ones to simulated the microgrid, this research takes into count the environmental factor and the concept of Smart Grid about renewable power trying to eliminate the restrictions of the uses of this kind of generation imposed by the energy sector and showing the technical and economic viability thanks of the effective administration of resources. The last step describes the control strategy used to administrate the elements of the grid in special the generators, this kind of strategy is based on multiagent algorithms of stochastic optimization and heuristic search applied to economic dispatch. These algorithms search the best economic benefit and the capability to choose the generator who is accessible to take the best advantage and restrict those that do not show much economic benefit.

The established microgrid is composed by featured loads of industrial type and three distributed generation (small central of hydrogenation, landfill degasification and agricultural waste). This will be administrated for the control algorithm IPSO, this determinate the power of each DG based in the generation cost at each instant. The microgrid has to be supported by the communication structure which come a live the whole process.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	24
1. SISTEMA DE TRANSMISIÓN, DISTRIBUCIÓN, Y GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN COLOMBIA, ANÁLISIS EN LA CIUDAD DE PASTO	27
1.1 SECTOR ELÉCTRICO ACTUAL EN COLOMBIA	27
1.1.1 Suministro de electricidad	29
1.1.2 Generación eléctrica en Colombia.....	29
1.1.2.1 Tipos de generación eléctrica renovable en Colombia	29
1.1.3 Sistema de transmisión	34
1.1.3.1 Sistema de transmisión Nacional Colombiano (STN).....	34
1.1.4 Sistema de distribución	37
1.2 SISTEMA DE GENERACIÓN, TRANSMISIÓN Y DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA EN LA CIUDAD DE PASTO	41
1.2.1 Generación eléctrica en la ciudad de Pasto	41
1.2.2 Sistema de transmisión y distribución en la ciudad de Pasto.	43
2. TECNOLOGÍAS EN SMART GRID, BENEFICIOS FRENTE A LA.....	47
2.1 SMART GRID, SU CONFORMACIÓN, ESTRUCTURA Y FUNCIONAMIENTO	47
2.1.1 Smart Grid	48
2.1.2 Transición hacia Smart Grid	49
2.1.3 Componentes fundamentales en Smart Grid.	52
2.1.3.1 Micro redes inteligentes o smart microgrids.	53

2.1.3.2	Medidores Inteligentes.	55
2.2	LA EVOLUCIÓN DE LA RED ACTUAL HACIA UNA SMART GRID	58
2.2.1	El futuro de la medición inteligente.....	58
2.2.2	La red de energía actual.....	59
2.2.3	Coexistencia de las dos redes eléctricas (smart grid y red actual).	60
2.2.4	Beneficios de una Smart Grid frente a la situación actual, análisis en el Departamento de Nariño y la ciudad de Pasto	61
2.2.4.1	Beneficios de la energía suministrada por Smart Grid en comparación a energía centralizada	62
3.	ESTÁNDARES DESARROLLADOS Y SISTEMAS DE	70
3.1	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS ESTÁNDARES DE SMART GRID	70
3.1.1	Estándares aplicados en Smart Grid.....	71
3.2	SISTEMA DE TELECONTROL PARA LA MICROGRID	71
3.3	MEDIOS FÍSICOS DE COMUNICACIÓN EN SMART GRID Y SISTEMAS DISTRIBUIDOS	74
3.3.1	PLC (Power Line Communications).....	74
3.3.2	GPRS (Servicio general de paquetes vía radio).....	75
3.3.3	HSDPA (acceso de paquetes a alta velocidad en el enlace descendente	76
3.3.4	Funcionamiento de los medidores inteligentes o Smart Meters.	78
3.4	ESTRUCTURA PROPUESTA DE LOS MEDIOS DE COMUNICACIONES A UTILIZAR EN LA MICROGRID DE LA CIUDAD DE PASTO.....	80
3.4.1	Características y propiedades de los equipos de monitoreo y control propuestos:.....	80
3.4.1.1	Equipos de monitoreo para los GD.....	80

3.4.1.2	Equipos de monitoreo para los usuarios (cargas).	81
3.4.1.3	Equipos de control para los GD.....	82
3.4.1.4	Equipos de control ubicado en el centro de control de operaciones.....	82
4.	GENERADORES DISTRIBUIDOS: ENERGÍA SOLAR, EÓLICA, BIOMASA Y PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS. FACTIBILIDAD EN LA CIUDAD DE PASTO	85
4.1	ENERGÍA SOLAR	85
4.1.1	Energía solar definición, análisis en Colombia y Nariño	85
4.1.1.1	Sistemas de aprovechamiento de la energía solar	85
4.1.1.2	Datos de radiación solar registrados en la ciudad de Pasto.....	88
4.1.2	Análisis de factibilidad	89
4.1.2.1	Factibilidad técnica.....	89
4.1.2.2	Factibilidad económica.....	90
4.2	SISTEMAS DE ENERGÍA EÓLICOS	91
4.2.1	Energía eólica en Colombia y Nariño	91
4.2.2	La energía eólica.....	92
4.2.2.1	Energía generada con el sistema eólico.....	92
4.2.3	Análisis de factibilidad	94
4.2.3.1	Factibilidad técnica.....	95
4.3	ENERGÍA POR BIOMASA	97
4.3.1	Energía por biomasa.....	97
4.3.2	Recursos biomásico:	98
4.3.3	Características de la biomasa	99
4.3.4	Procesos de conversión	99
4.3.4.1	Procesos Bio-químicos.....	100

4.3.5	Características del biogás.	102
4.3.6	Formas de energía.	102
4.3.7	Aplicaciones y recursos necesarios de una planta de electricidad en el relleno sanitario ANTANAS.....	102
4.3.7.1	Análisis de factibilidad técnica de generación eléctrica en ANTANAS.	107
4.3.8	Aplicaciones y recursos necesarios de una planta de Metanización	113
4.3.8.1	Capacidad de generación eléctrica en la mecanización:.....	116
4.3.8.2	Análisis de factibilidad técnica de una planta de metanización de residuos vacunos.....	118
4.3.9	Análisis de factibilidad económica para los casos propuestos:	121
4.3.9.1	Metanización y desgasificación.	121
4.3.9.2	Factibilidad económica desgasificación del relleno sanitario ANTANAS.....	124
4.4	ENERGÍA GEOTÉRMICA	126
4.4.1	Campos geotérmicos.....	127
4.4.2	Generación de energía.....	127
4.4.3	Potencial en Colombia.....	129
4.4.3.1	Mapa de fuentes termales	129
4.4.4	Datos de energía geotérmica registrados en el departamento de Nariño.	130
4.4.5	Análisis de factibilidad:	134
4.4.5.1	Factibilidad técnica	134
4.4.5.2	Factibilidad económica	135
4.5	PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS (PCH)	135
4.5.1	Aspectos económicos y factibilidad técnica.....	135
4.5.1.1	Costos operativos.....	138

5.	SIMULACIÓN Y CONTROL DE DESPACHO ECONÓMICO EN UNA MICROGRID DE LA CIUDAD DE PASTO	140
5.1	ESTRUCTURA DEL SISTEMA	141
5.2	ALGORITMO MULTIAGENTE: PARTICLE SWARM OPTIMIZATION (PSO)	142
5.2.1	Algoritmos metaheurísticos y estocásticos para optimización:	144
5.3	UN ACERCAMIENTO A LA MINIMIZACIÓN DE LA GENERACIÓN DE ENERGÍA	147
5.3.1	Problema del despacho económico.....	147
5.3.2	Despacho económico	147
5.3.2.1	Determinación de límites de igualdad.....	148
5.3.2.2	Determinación de los límites de desigualdad.	149
5.4	METODOLOGÍAS DE OPTIMIZACIÓN PARA PROBLEMAS DE DESPACHO ECONOMICO	149
5.4.1	Implementación de algoritmo IPSO para problemas de despacho económico	152
5.5	CASO DE ESTUDIO, SIMULACIÓN, COMPARACIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES	155
5.5.1	Simulación y comparación de resultados.	157
5.5.2	Resultados de las pruebas	160
5.5.3	Comparación de algoritmos heurísticos de acuerdo con los resultados.....	163
5.5.4.	Análisis de resultados en la microgrid propuesta:	166
5.5.4.1	Funciones de consumo y costo de los generadores.....	166
5.5.4.2	Simulación.....	167
6.	CONCLUSIONES.....	182
7.	RECOMENDACIONES	185

BIBLIOGRAFIA 186
ANEXOS 191

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Estructura del modelo operativo del sector eléctrico	28
Figura 2. Sistema interconectado nacional.....	36
Figura 3. División de cargas de flujo por tipo de usuario	38
Figura 4. Sistema de distribución radial y b. Sistema de distribución anillado..	40
Figura 5. Red de distribución típica	41
Figura 6. Subestación Pasto.....	44
Figura 7. Capacidades deseadas de las empresas de energía eléctrica.....	49
Figura 8. Componentes básicos de una Smart Grid	50
Figura 9. Retorno de las inversiones de una Smart Grid	51
Figura 10. La Smart Grid del futuro	53
Figura 11. Topología de una micro red inteligente o Smart microgrid	54
Figura 12. Esquemática en bloques de funciones de un medidor inteligente	55
Figura 13. Diferencia entre el proceso de manejo de datos en medidores.....	57
Figura 14. La red de electricidad actual.....	60
Figura 15. Topología de una red Smart Grid en transición	61
Figura 16. Estándares propuestos para Smart Grid	71
Figura 17. Configuración de hardware de un SCADA	73
Figura 18. Estructura red GPRS.....	77
Figura 19. Arquitectura general de una HSDPA	77
Figura 20. Microgrid propuesta en la ciudad de Pasto.....	84
Figura 21. Diagrama de un sistema fotovoltaico aislado	87

Figura 22.	Diagrama de un sistema fotovoltaico conectado a la red	88
Figura 23.	Radiación Global Solar mensual promedio en la ciudad de Pasto	90
Figura 24.	Tamaño relativo de turbinas eólicas	93
Figura 25.	Origen de la biomasa.....	98
Figura 26.	Esquema de generación de electricidad en un relleno sanitario.....	104
Figura 27.	Proceso de desgasificación y quema de metano en BIONERSIS ...	105
Figura 28.	Desgasificación del relleno sanitario de ANTANAS en Pasto.....	106
Figura 29.	Curva de biogás recuperado y generado.....	113
Figura 30.	Esquema de una planta de producción eléctrica por Metanización.	117
Figura 31.	Modelo de campo geotérmico	127
Figura. 32	Mapa de Áreas Geotérmicas en Colombia	131
Figura 33.	Costo índice de instalación en función de la capacidad. Ministro de minas y energía. Colombia.	139
Figura 34.	Niveles de control del entorno de una microgrid.....	141
Figura 35.	Concepto de modificación de un punto de búsqueda por PSO	151
Figura 36.	Microgrid de prueba en la Ciudad de Pasto.....	156
Figura 37.	Demanda horaria del sistema.....	157
Figura 38.	Resultados del Caso 1.....	169
Figura 39.	Resultados del Caso 2.....	170
Figura 40.	Resultados del Caso 3.....	171
Figura 41.	Resultados del Caso 4.....	172
Figura 42.	Resultados del Caso 5.....	173
Figura 43.	Características de los generadores y coeficientes de costo para el Caso 6.	175
Figura 44.	Algoritmo Genético en OPTIMTOOL DE Matlab	177

Figura 45. Resultados Caso 1: UDENARPSO vs. AG	178
Figura 46. Variación de precios de los insumos en los GDS	178

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Participantes del Mercado de Colombia	29
Tabla 2. Capacidad instalada efectiva Mega Watts (MW)	30
Tabla 3. Principales empresas generadoras en Colombia.....	30
Tabla 4. Potencial de fuentes principales de energía geotérmica en Colombia..	33
Tabla 5. Líneas de transmisión total SIN hasta el 2010.....	35
Tabla 6. Tipos de carga en el sistema de distribución	38
Tabla 7. Tipo de área densidad en kVA/km ²	38
Tabla 8. Capacidad de producción en MW hidroeléctricas Pasto.....	42
Tabla 9. Energía demandada en la ciudad de Pasto	45
Tabla 10. Circuitos, usuarios y distancia de redes de distribución en la subestación Pasto.....	45
Tabla 11. Consumo de energía hora a hora de las cargas propuestas	46
Tabla 12. La red Smart Grid comparada con la red actual	62
Tabla 13. Consumo de combustible en el SIN 2008 a 2010	64
Tabla 14. Requerimientos de capacidad QoS para una red triple-play.....	78
Tabla 15. Disponibilidad Promedio multianual de energía solar por región	89
Tabla 16. Datos obtenidos en tecnología fotovoltaica	90
Tabla 17. Velocidades de vientos en la ciudad de Pasto y sus alrededores	92
Tabla 18. Valores medios mensuales de velocidad del viento (m/s). IDEAM	96
Tabla 19. Relaciones generales entre viabilidad y velocidad de viento	96
Tabla 20. Fortalezas y debilidades de un sistema de metanización	114

Tabla 21. Porcentaje de fertilizante en fermentación anaeróbica.....	115
Tabla 22. Inventario clases de bovino	117
Tabla 23. Datos de producción de estiércol de acuerdo a clases de bovino	118
Tabla 24. Datos de producción de biogás.....	120
Tabla 25. Inversión para el desarrollo de una planta de Metanización	122
Tabla 26. Inversión para el desarrollo de una planta de generación con Biogás.....	124
Tabla 27. Inventario de Yacimiento de Aguas Termales en Colombia	130
Tabla 28. Inversión de una central Geotermoeléctrica de 15MW.	136
Tabla 29. Clasificación de PCH según potencia instalada. OLADE.....	136
Tabla 30. Clasificación de PCH según potencia instalada ISA.....	136
Tabla 31. Rango de costo de la generación eléctrica	137
Tabla 32. Potencial nominal de los GD en el sistema de prueba.....	156
Tabla 33. Características y coeficientes de costo de los 3 generadores	158
Tabla 34. Resultados obtenidos IPSO y su comparación con otros algoritmos..	161
Tabla 35. Resultados obtenidos en la presente investigación.	161
Tabla 36. Resultados encontrados al comparar CFPSO e IPSO ¹⁸² . (STD: Desviación estándar.)	161
Tabla 37. Demostración de posibles situaciones.....	162
Tabla 38. Comparación entre PSO y EP.	163
Tabla 39. Parámetros y Características de los 6 generadores.	164
Tabla 40. Comparación de generación y costo total para el caso planteado.....	165
Tabla 41. Datos de costos para cada tipo de hidroeléctricas.....	166
Tabla 42. Datos de costos para una planta de desgasificación en el relleno sanitario ANATANAS	167

Tabla 43. Costos para una planta de metanización.....	167
Tabla 44. Costos de insumos, operación y mantenimiento. Caso 1	168
Tabla 45. Características de los GDs y coeficientes de costo Caso 1	168
Tabla 46. Costos de insumos, operación y mantenimiento. Caso 2	169
Tabla 47. Características de los GDs y coeficientes de costo Caso 2	170
Tabla 48. Costos de insumos, operación y mantenimiento. Caso 3	171
Tabla 49. Características de los GDs y coeficientes de costo Caso 3.....	171
Tabla 50. Costos de insumos, operación y mantenimiento. Caso 4	172
Tabla 51. Características de los GDs y coeficientes de costo Caso 4	172
Tabla 52. Costos de insumos, operación y mantenimiento. Caso 5	173
Tabla 53. Características de los GDs y coeficientes de costo Caso 5.....	173
Tabla 54. Costos de insumos, operación y mantenimiento. Caso 6	174
Tabla 55. Características de los GDs y coeficientes de costo Caso 6.....	174
Tabla 56. Coeficientes de cada uno de los GDs en los casos propuestos con variación de precio en combustible.....	179
Tabla 57. Resultados caso 7	179
Tabla 58. Resultados caso 8	179
Tabla 59. Resultados caso 9	180
Tabla 60. Resultados caso 10	180
Tabla 61. Resultados caso 11	180

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. SUBESTACIONES DE CEDENAR EN NARIÑO.....	192
Anexo B. DIAGRAMA UNIFILAR CEDENAR 2009	193
Anexo C. TABLA PROVISTA POR BIONERSIS, DATOS DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS	194
Anexo D. PLANTA DE BIOGÁS ILUSTRATIVA ACZIA BIOGAS	195
Anexo E. TABLA DE COSTOS REQUERIDOS PARA EL ANÁLISIS DE LA FACTIBILIDAD ECONÓMICA	196
Anexo F. HOJA DE ALIMENTACIÓN DE DATOS, CON RESPECTO A LOS DATOS.....	197
Anexo G. COSTOS A PAGAR POR CEDENAR S.A. E.S.P. POR EL USO DEL CAUDAL DE RIO PASTO PARA LA PEQUEÑA CENTRAL HIDROELÉCTRICA JULIO BRAVO	198
Anexo H. ESTRUCTURA PROPUESTA DE MEDIOS DE COMUNICACIÓN Y FLUJO DE INFORMACIÓN EN LA MICROGRID PASTO.....	199
Anexo I. EJEMPLO DE UNA LECTURA AUTOMÁTICA, MÍNIMOS Y MÁXIMOS BENEFICIOS CON EL MEDIDOR INTELIGENTE O SMART METER	200

INTRODUCCIÓN

La evolución tecnológica se explica como la creación y la adaptación de nuevos mecanismos que solucionen las necesidades emergentes de cualquier sistema, llevando estos avances hacia el problema y brindando las mejores herramientas de solución. Es evidente la evolución de muchos sistemas tecnológicos: la telefonía, la televisión, canales de información y entretenimiento (Publicaciones impresas), manejo de datos, etc. Todos han evolucionado a un entorno digital, que garantiza su fidelidad, cobertura y eficiencia creando nuevos escenarios, mercados y oportunidades para seguir creciendo. Es por esto que el desarrollo y la evolución es un fenómeno creciente en el tiempo, y nace de las nuevas necesidades que presentan los individuos a medida que su número va en aumento.

Colombia como país en vía de desarrollo y con una población en aumento, necesita nuevos objetivos en cómo administrar la energía eléctrica de forma más eficiente desde su generación, transmisión y distribución. Para prestar con total garantía un buen servicio se involucra la búsqueda de mayores recursos para producir energía junto con la ampliación de las redes de distribución para satisfacer la demanda en todo el territorio, evocando una necesidad urgente, de soluciones globales a estas variables.

El sistema eléctrico Colombiano, al igual que el latinoamericano es una estructura implementada entre 40 y 60 años atrás. Desde entonces los cambios realizados solo se enfocan a ampliar la cobertura, crear más generación y reducir las pérdidas causadas por la transmisión. Estas soluciones no arreglan el problema sino que lo amortizan. Las empresas generadoras de energía se enfrentan a una crisis a corto y mediano plazo donde la materia prima tiende a reducirse viendo seriamente afectada la producción y el aumento del precio de la energía para el consumidor. La búsqueda de una solución es cada vez más urgente.

Al reconocer que el estado actual de los modelos Colombianos de generación, transmisión y distribución se convierten en un mal ajuste a las nuevas necesidades del mercado, se debe observar la experiencia de países desarrollados que aplican adelantos energéticos, se descubrirá y un sinnúmero de herramientas que presenta la evolución tecnológica. Adelantos en telecomunicaciones, sistemas de control mediante algoritmos, mejores facilidades de adquisición y monitoreo de datos, establecen un nuevo cambio desde el tradicional patrón de operación centralizada a una nueva alternativa de prestación del servicio de electricidad.

Que modifica la arquitectura de los sistemas de potencia, especialmente la de las redes de distribución, que basados en la Generación Distribuida se logra máxima eficiencia energética. En la presente investigación se exponen un análisis de la red actual, conceptos y beneficios de una Smart Grid, diferentes tipos de generadores distribuidos GD, estándares y medios de comunicación y el algoritmo multiagente IPSO Improved Particle Swarm Optimization . Se analiza los trabajos y adelantos más significativos entorno a las Smart grids, en investigaciones internacionales y nacionales, como los desarrollados por la Universidad de los Andes y la Universidad Nacional.

Es necesario motivar la implementación de soluciones que apunten a la administración y control de recursos de forma eficiente y eficaz, para que se convierta en uno más fiable, robusto, versátil con el paso del tiempo (actualizable) y que incurra al buen manejo de los recursos para la generación de energía con una capacidad de implementar energías alternativas o verdes apoyados en la generación distribuida. La Smart Grid brinda un sistema de control con mayores ventajas para las empresas, reduciendo costos de operación, mantenimiento y adecuación del sistema.

El proyecto expone una introducción de una nueva área de investigación como la tecnología de Smart Grids en el mercado de distribución, buscando: la descentralización de las decisiones, la automatización, sistematización y monitoreo de las redes eléctricas siendo una opción interesante para la industria eléctrica, abriendo numerosas posibilidades para desarrollar un mercado con modelos adaptados al nuevo contexto competitivo con amplios beneficios sociales, ambientales y creando más ventajas económicas. Así, la investigación pretende mostrar como la aplicación de una Smart Grid, junto con un estudio sobre fuentes renovables de energía son la solución para crear energía más económica, amigable al medio ambiente, de fácil distribución, al alcance de todos.

Objetivos

Objetivo general:

Realizar una investigación basada en las fuentes de energía alternativas y la administración de la energía producida mediante un sistema Smart Grid y los beneficios económicos y ambientales establecidos en la ciudad de San Juan de Pasto por la generación y transmisión inteligente de energía eléctrica.

Objetivos específicos:

- Analizar la generación, transmisión y distribución de red eléctrica en Colombia, especialmente en la ciudad de Pasto.

- Estudiar las características técnicas de un Smart Grid, su conformación, estructura y funcionamiento; enfocados en las redes de comunicaciones que se componen por la implementación de medidores inteligentes y la intercomunicación de generadores distribuidos.
- Estudiar las características de fuentes renovables de energía como: la energía solar, eólica, biomasa, geotermia y pequeñas centrales hidroeléctricas. Con los resultados obtenidos analizar la factibilidad económica y técnica para un desarrollo futuro en la ciudad de Pasto.
- Simular el control y distribución de los flujos de carga obtenidos por energías renovables, con la ayuda de un algoritmo multiagente para realizar la comparación de los resultados obtenidos con algoritmos desarrollados por otros grupos de investigación.
- Estudiar detalladamente la emisión de metano generado en el relleno sanitario de la ciudad de Pasto y en otras fuentes de generación, para determinar los beneficios ambientales y económicos que se producirían si se utiliza el metano para generar energía eléctrica, realizando el análisis de capacidad productiva de energía por sistema de biomasa.
- Hacer la comparación de energía suministrada eficientemente por generación distribuida versus energía centralizada proveniente de energía hidráulica, siendo las GD solución para la preservación de los recursos naturales. Observar si Smart Grid y las GD traen beneficios ambientales, sociales y económicos en comparación a la red Actual.

1. SISTEMA DE TRANSMISIÓN, DISTRIBUCIÓN, Y GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN COLOMBIA, ANÁLISIS EN LA CIUDAD DE PASTO

Colombia cuenta con un mercado energético liberalizado desde 1995. El sector se caracteriza por un marco que desagrupa generación, transmisión, distribución y comercialización. La estructura del mercado energético colombiano se basa en las Leyes 142 (Ley de Servicios Públicos) y 143 (Ley de Electricidad) de 1994, siendo el Ministerio de Minas y Energía la principal institución del sector energético de Colombia. Dentro del Ministerio, UPME (Unidad de Planificación de Minería y Energía) es responsable del estudio de los futuros requerimientos de energía y escenarios de suministro, así como de la elaboración del Plan Nacional de Energía y Plan de Expansión.

Instituciones como la CREG (Comisión de Regulación de Energía y Gas) está a cargo de regular el mercado para un suministro eficiente de energía, definiendo estructuras de tarifas para consumidores y garantizando libre acceso a la red, cobros de transmisión, y normas para el mercado mayorista, cerciorando la calidad y confiabilidad del servicio y eficiencia económica. Actualmente se realizan estrategias para el uso racional y eficiente de energía del PROURE, esta se orientan fundamentalmente a la disminución de la intensidad. También se encarga de la promoción de las fuentes no convencionales de energía.

1.1 SECTOR ELÉCTRICO ACTUAL EN COLOMBIA

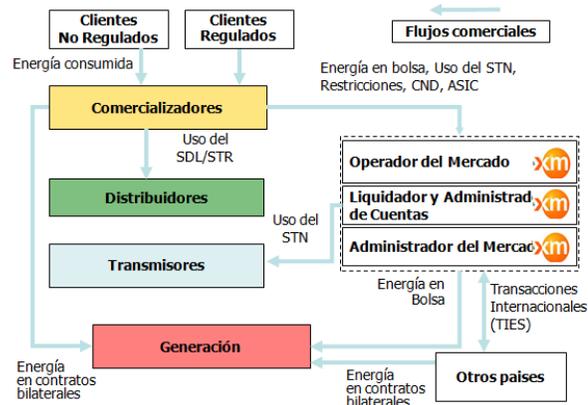
El sector energético colombiano está conformado por entidades y empresas que cumplen diversas funciones en los mercados de comercialización, distribución, generación y transmisión de energía. Este mercado se fundamenta en el hecho de que las empresas comercializadoras y los grandes consumidores adquieren la energía y potencia en el mercado de grandes bloques de energía operando libremente. Para promover la competencia entre generadores, se permite la participación de agentes económicos, públicos y privados, los cuales deben estar integrados al sistema interconectado para participar en el mercado de energía mayorista¹.

Para brindar transparencia al mercado de electricidad ha sido necesario separar claramente las actividades económicas propias del servicio. La Figura 1 esquematiza el mercado eléctrico, indicando la estructura de la industria del sector y la forma cómo se relacionan los diferentes agentes y/o entidades participantes.

¹ www.xm.com.co

La operación y la transmisión del mercado Colombiano la realiza XM empresa filial de ISA, la cual tiene a su cargo las funciones de Centro Nacional de Despacho (CND), Administrador del Sistema de Intercambios Comerciales (ACSI) y Liquidador y Administrador de Cuentas de cargos por uso de las redes del Sistema Interconectado Nacional (LAC).

Figura 1. Estructura del modelo operativo del sector eléctrico



Con relación al mercado, el marco regulatorio estableció la separación de los usuarios en dos categorías: usuarios regulados y no regulados. La diferencia básica entre ambos, se relaciona con el manejo de los precios o tarifas que son aplicables a las ventas de electricidad. Mientras en el primer caso, las tarifas son establecidas por la CREG mediante una fórmula tarifaria, en el segundo caso los precios de venta son libres y acordados entre las partes. Las principales entidades que conforman el sector eléctrico, son:

DIRECCION: Ministerio de Minas y Energía (Presidencia).

PLANEACION: Unidad de Planeación Minero Energética UPME (MinMinas).

REGULACION: Comisión de Regulación de Energía y Gas CREG (MinMinas, MinHacienda y DNP).

OPERACIÓN: Operador del Mercado XM (Consejo Nacional de Operación).

CONTROL Y VIGILANCIA: Superintendencia de Servicios Públicos (Presidencia).

AGENTES: Generación, Transmisión, Distribución y Comercialización.

En la Tabla 1, se presenta el número de agentes y fronteras comerciales del sector eléctrico a 31 de diciembre de 2010², se puede observar que no todos los agentes registrados están en funcionamiento, pero sí la mayoría de ellos.

² VERA DÍAZ, Marco A. sector eléctrico en Colombia: Mercado y Regulación. Director Sectorial de Energía y Gas ANDESCO. Bogotá, Febrero de 2010.

Tabla 1. Participantes del Mercado de Colombia

Actividad	Registrados	Transan
Generadores	48	41
Comercializadores	85	68
Operadores de red	30	29
Transmisores	11	9

1.1.1 Suministro de electricidad. El suministro eléctrico en Colombia depende del Sistema de Interconexión Nacional (SIN) y varios sistemas locales aislados en las Zonas No Interconectadas (ZNI). El SIN comprende la tercera parte del territorio, creando una cobertura al 96% de la población, siendo parte de este 32 plantas hidroeléctricas y treinta estaciones de energía térmica. El sistema ZNI, que cubre las dos terceras partes restantes del territorio nacional, solamente provee servicio al 4% de la población. Este es servido principalmente por pequeños generadores diesel, muchos de los cuales no están en buenas condiciones de funcionamiento.³

1.1.2 Generación eléctrica en Colombia. La capacidad efectiva neta instalada en el SIN al 31 de diciembre de 2010 fue 13.289,5 MW donde participaron generación hidráulica, térmica y varias menores como se indica en la Tabla 2. Definiendo así los recursos hidráulicos como la principal fuente de energía en Colombia, las principales empresas generadoras de energía son: Empresas Públicas de Medellín (EPM) con casi 2.800 megavatios de capacidad instalada, EMGESA e ISAGEN operando con cinco centrales de generación, ubicadas en los departamentos de Antioquia, Santander y Caldas con una capacidad instalada total de 2.132 MW, equivalente al 16% de la capacidad total del Sistema Interconectado Nacional y GECELCA proporcionando casi el 75 % de la demanda de energía de la costa atlántica que corresponde al 10% de la demanda del país. La Tabla 3, indica las principales empresas generadoras del país asociadas a la Asociación Colombiana de Generadores de Energía Eléctrica (ACOLGEN).

1.1.2.1 Tipos de generación eléctrica renovable en Colombia. El país cuenta con 28,1 MW de capacidad instalada de las energías renovables (excluyendo grandes hidroeléctricas), que consiste principalmente en la energía eólica. El país tiene pequeñas centrales hidroeléctricas, de viento y solares que quedan en gran

³ < <http://www.esgamma.com/panorama.php>>

medida sin explorar. De acuerdo con un estudio realizado por el Banco Mundial de Energía del Sector de Gestión del Programa de Asistencia ESMAP, la explotación del país en el potencial de viento podría cubrir más que las necesidades totales de energía del país.⁴

Tabla 2. Capacidad instalada efectiva Mega Watts (MW)

RECURSOS	MW 2010	% Total 2010	VARIACION (%) 2010-2009
HIDRÁULICOS	8525	64,1	0
TÉRMICOS	4089	30,8	6,3
Gas	2478		
Carbón	990		
Fuel-Oil	434		
Combustóleo	187		
ACPM	0		
MENORES	620,6	4.7	8,2
Hidráulicos	518,8		
Térmicos	83,4		
Eólica	18,4		
COGENERADORES	54,9	0,4	56,9
Total SIN	13289,5	100	-1,5

Tabla 3. Principales empresas generadoras en Colombia

Empresa Asociada	Capacidad Instalada (MW)	Propiedad Accionaria	Hidráulica Capacidad Instalada (MW)	Gas	Carbón	Eólica
EPM ESP	3350	Publica	2877	455		18
EMGESA S.A ESP	2858	Privada	2448	187	223	
ISAGEN S.A ESP	2338	Mixta	1903	285		
AES CHIVOR & CIA SCA	1000	Privada	1000			
EPSA S.A	915	Privada	915			
COLINVERSIONES S.A ESP	769	Privada		769		

⁴ < <http://energiaelectrica12.blogspot.com>>

- **Energía hidroeléctrica.** Representada con el 64,1 % de la generación de energía del país, la energía hidroeléctrica es una fuente nacional de energía muy importante.⁵ El potencial total de las grandes hidroeléctricas en Colombia se estima en 8525 MW en el año 2010 como lo indica la Tabla 2 manteniendo el mismo valor con respecto al 2009, con un adicional de 3.9% de pequeñas centrales hidroeléctricas (<20 MW). Sin embargo, el potencial de energía hidroeléctrica enfrenta dificultades debido al aumento de los costos ambientales y sociales. Estos son asociadas a las grandes represas, los impactos del cambio climático, la variabilidad climática en el régimen hidrológico del país, aumentos drásticos en la temperatura de la superficie en los Andes, los cambios en los patrones de precipitación, el aumento de la intensidad y la frecuencia del fenómeno del Niño Oscilación Sur (ENOS), las señales que conducen períodos prolongados de sequía.

La función de una central hidroeléctrica es utilizar la energía potencial del agua almacenada y convertirla, primero en energía mecánica y luego en eléctrica. De manera que la masa de agua en desnivel (en altura) posee una cierta energía potencial acumulada. Al caer el agua, la energía se convierte en cinética (de movimiento) y hace girar una turbina, la cual, a su vez, acciona un generador que produce la corriente eléctrica.⁶

- **Generación eólica.** El régimen de vientos en Colombia está entre los mejores en América del Sur. Las regiones del norte de Colombia, como en el departamento de la Guajira, han sido clasificadas con la clase 7 en vientos (más de 10 metros por segundo (m/s)). La única región de América Latina con tan alta clasificación en la energía eólica es la región de la Patagonia de Chile y Argentina.⁷

Colombia cuenta con una potencia estimada de viento potencial teórico de 21 GW sólo en el Departamento de la Guajira. Lo suficiente como para generar energía para satisfacer la demanda nacional de casi el doble. Sin embargo, el país tiene una capacidad instalada de 19.5 MW de energía eólica, aprovechando sólo el 0.4% de su potencial eólico teórico. Esta capacidad se concentra en un solo proyecto, el proyecto eólico Jeparachi, desarrollado por Empresas Públicas de Medellín (EPM) en virtud de un financiamiento de carbono, mecanismo dispuesto por el del Banco Mundial.⁸

Una central eólica es una instalación en donde la energía cinética del viento se puede transformar en energía mecánica de rotación. Para ello se instala una

⁵ <www.xm.com.co>

⁶ Alfonso Meléndez. Bryan Yuste. Centrales hidroeléctricas.

⁷ <<http://redenergiaalternativa.org/viento.html>>

⁸ Luis Guillermo Ricardo, Yeison Venecia Núñez, Álvaro Realpe Jiménez Estudio y evaluación del recurso eólico en Colombia para su aprovechamiento como fuente de energía eléctrica.

torre en cuya parte superior existe un rotor con múltiples palas, orientadas en la dirección del viento. Las palas o hélices giran alrededor de un eje horizontal que actúa sobre un generador de electricidad.

- **Energía solar.** Colombia tiene importantes recursos en la energía solar debido a su ubicación en la zona ecuatorial, pero el país se encuentra en una compleja región de los Andes, donde las condiciones climáticas varían considerablemente. La radiación media diaria es de 4.5 kWh/m², y el área con el mejor recurso solar es la Península de la Guajira, con 6 kWh/m² de la radiación. De los 6 MW de energía solar instalados en Colombia (equivalente a alrededor de 78.000 paneles solares de tamaño medio), el 57 por ciento se distribuye en aplicaciones rurales y 43 por ciento en las torres de comunicación y señalización vial. Los sistemas solares pueden ser muy convenientes para los usos en las zonas rurales, donde la demanda de energía es dispersa, modesta y la conexión a la red es a menudo más costosa.

Una central solar es aquella instalación en la que se aprovecha la radiación solar para producir energía. Este proceso puede realizarse mediante dos vías:⁹ Fotovoltaica y fototérmica.

- **Energía geotérmica.** El antiguo Instituto Colombiano de Energía Eléctrica, hoy IPSE, y la Organización Latinoamericana de Energía han identificado tres zonas potenciales para producir energía geotérmica¹⁰, como se muestra en la Tabla 4. Entre ellas se pueden destacar:

Azufral: en el departamento de Nariño, donde se localiza el volcán Azufral y al parecer existe un depósito de alta temperatura.

Cerro Negro-Tufiño: también en el departamento de Nariño, cerca del volcán Chiles, este volcán se encuentra sobre una cámara magnética de 5-10 kilómetros de profundidad con temperaturas entre 220°C y 230°C, temperaturas óptimas para la utilización en la generación geotérmica de energía.

Paipa: ubicado en la cordillera oriental, en Boyacá, en donde las rocas sedimentarias y el magma se encuentran a una profundidad de aproximadamente 5 kilómetros.

Una central térmica para producción de energía eléctrica, es una instalación en donde la energía mecánica que se necesita para mover el rotor del

⁹ Debilidades y desafíos tecnológicos del sector productivo energías alternativas (Eólica y Solar) Jujuy, San Juan y Tierra del Fuego

¹⁰ < <http://www.dforcesolar.com/> >

generador y por tanto para obtener la energía eléctrica, se obtiene a partir del vapor formado al hervir el agua en una caldera. El vapor generado tiene una gran presión, y se hace llegar a las turbinas para que su expansión sea capaz de mover los álabes de las mismas. (Ver tabla 4)

Tabla 4. Potencial de fuentes principales de energía geotérmica en Colombia

Área	Departamento	Potencial
Chiles-Cerro Negro	Nariño	Alto
Azufra de Túqueres	Nariño	Alto
Doña Juana	Nariño	Desconocido
Grupo Sotará	Cauca	Desconocido
Puracé	Cauca	Desconocido
Machía	Huila	Alto
Cerro Bravo	Nariño	Alto
Nevado del Ruiz-Santa Isabel	Caldas	Alto
Cerro España	Caldas	Alto
Machía	Huila	Alto

- **Energía por biomasa.** Colombia tiene un potencial de biomasa muy alto a partir de residuos agrícolas (banano, pulpa de café, y los residuos de origen animal). Su potencial anual de biomasa se estima en más de 16 GWh, lo que es todavía inferior al 0,1% de la producción actual de electricidad. El potencial se distribuye de la siguiente manera:

11.828 MWh / año de residuos de la agricultura.

2.640 MWh / año de bioetanol.

698 MWh / año de residuos forestales naturales.

658 MWh / año de biodiesel.

442 MWh / año de residuos de bosques plantados.

La región de Urabá en el norte del departamento de Antioquia cuenta con aproximadamente 19.000 hectáreas de plantaciones de plátano, produciendo más de 1 millón de toneladas anuales. También se ha estimado que aproximadamente a partir de los 190 millones de m³/año de biogás generado a partir de plantaciones de café podría generarse a 995.000 MWh. Además, los vertederos en las cuatro principales ciudades de Colombia (Bogotá, Medellín, Cali y Barranquilla) podrían tener una capacidad instalada de 47 MW (0,3% de la capacidad instalada actual).

- **Generación mareomotriz.** La energía mareomotriz es la energía asociada a las mareas provocadas por la atracción gravitatoria el sol y principalmente de la luna. La técnica utilizada consiste en encauzar el agua de la marea en una

cuenca y, en su camino, accionar las turbinas de una central eléctrica. Cuando las aguas se retiran, también generan electricidad, usando un generador de turbina reversible. También se puede extraer energía de la radiación incidente en los océanos en determinadas condiciones atmosféricas, que da lugar a los gradientes térmicos¹¹

El obstáculo principal para la explotación de esta fuente es el económico. Los costes de inversión tienden a ser altos con respecto al rendimiento, debido a las bajas y variadas cargas hidráulicas disponibles. Estas bajas cargas exigen la utilización de grandes equipos para manejar las enormes cantidades de agua puestas en movimiento. Por ello, esta fuente de energía es sólo aprovechable en caso de mareas altas y en lugares en los que el cierre no suponga construcciones demasiado costosas, no solamente se centra en el mayor coste de la energía producida, si no, en el impacto ambiental que generan.

1.1.3 Sistema de transmisión. Uno de los grandes problemas de la electricidad es que no puede almacenarse, sino que debe ser transmitida y utilizada en el momento mismo que se genera. Este problema no queda resuelto con el uso de acumuladores o baterías, como las que utilizan los automóviles y los sistemas fotovoltaicos, pues sólo son capaces de conservar cantidades pequeñas de energía y por muy poco tiempo. Conservar la electricidad que producen las grandes plantas hidroeléctricas y termoeléctricas es un reto para la ciencia y la tecnología.

En cuanto se produce la electricidad en las plantas, una enorme red de cables tendidos e interconectados a lo largo y ancho del país, se encargan de hacerla llegar, casi instantáneamente, a todos los lugares de consumo como hogares, fábricas, talleres, comercios, oficinas, etc. Miles de trabajadores vigilan día y noche que no se produzcan fallas en el servicio y cuando éstas ocurren, se acude en el menor tiempo posible, para reparar las líneas y restablecer la energía. Para tal efecto, hay centros de monitoreo, estratégicamente situados, para mantener una vigilancia permanente en toda la red. A veces, los vientos, las lluvias, los rayos, las voladuras de torres, entre otros, afectan las líneas de transmisión, las cuales deben ser revisadas y reparadas por los técnicos, ya sea en las ciudades o en el campo.

1.1.3.1 Sistema de transmisión Nacional Colombiano (STN). La transmisión en el Sistema Nacional Interconectado es servida por siete compañías públicas distintas, cuatro de las cuales trabajan exclusivamente en transmisión (ISA, EEB, TRANSELCA y DISTASA). Las tres restantes (EPPM, ESSA y EPSA) son compañías integradas que llevan a cabo todas las demás actividades de la cadena eléctrica (es decir, generación, transmisión y distribución). La compañía más

¹¹ <<http://educasitios2008.educ.ar>>

grande es Interconexión Eléctrica S.A. (ISA), su accionista mayoritario es la Nación con una participación del 52.94%.¹²

El negocio fundamental de ISA es el transporte de energía en alta tensión, con una participación del 71.37% en la propiedad del Sistema de Transmisión Nacional (STN), equivalente a 10,000 km de circuito de transmisión con tensión de 230 y 500 kV, 57 subestaciones, 12,672 MVA de transformación y 4,177 MVAR de compensación reactiva.

Adicionalmente, ofrece los servicios de conexión al SIN, servicios asociados al transporte de energía y servicios relacionados con la construcción de proyectos de infraestructura. Adicionalmente, la empresa cuenta con el Centro de Supervisión y Maniobras (CSM), encargado de realizar la coordinación, supervisión y el control del sistema eléctrico de propiedad de ISA.

TRANSELCA es la segunda empresa de transmisión de energía de Colombia, con una participación del 9.11% en la propiedad del STN. TRANSELCA opera el sistema eléctrico de la región Caribe colombiana, presta servicios de transporte de energía eléctrica en alta tensión, servicios de conexión al SIN y servicios asociados a su negocio fundamental.

Para la prestación de sus servicios, TRANSELCA utiliza su infraestructura eléctrica, conformada por 1,532.2 km circuitos de transmisión a 220 kV, 12.58 km líneas de transmisión a 110 kV, 1.4 km líneas a 34.5 kV y una capacidad de transformación de 2,817 MVA en diez subestaciones a 220 kV, dos a 110 kV y una a 34.5 kV. Además, cuenta con un centro de control que permite atender la supervisión de su infraestructura eléctrica. En la Tabla 5, se indican las líneas de transmisión total SIN a 31 de diciembre de 2010.

Tabla 5. Líneas de transmisión total SIN hasta el 2010

Líneas	Longitud km
Transmisión 110 – 115 kV	10,074.3
Transmisión 138 kV	15.5
Transmisión 220 – 230 kV	11,654.6
Transmisión 500 kV	2,646.3
TOTAL SIN	24,390.7

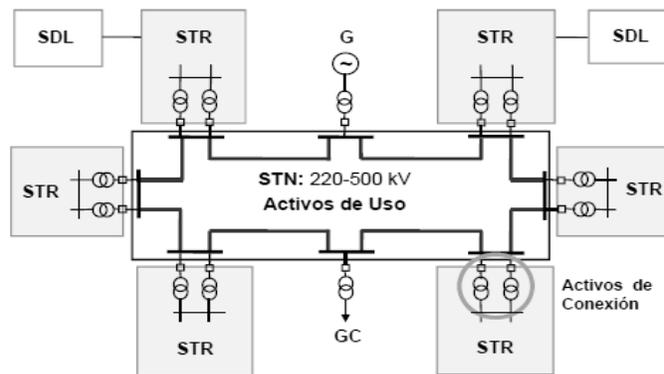
- **Conexión al Sistema Interconectado Nacional (SIN).** El servicio consiste en proveer el acceso al SIN a los generadores, distribuidores, transportadores

¹² Portafolio de servicios, Interconexión Eléctrica S.A. ISA Y TRANSELCA. Enero 2010.

regionales y grandes consumidores, que les permita recibir o entregar la potencia y energía eléctrica requerida o generada.

Actualmente ISA presta el servicio de conexión con una infraestructura en Colombia de 76,8 km a 230 kV y 109 km en tensiones inferiores, una capacidad de transformación de 3.490 MVA en operación y 618 MVA de reserva, distribuidos en 89 puntos de conexión, es decir, una participación del 47,6 %. Entre los activos de conexión también se registran dos puntos asociados a interconexiones internacionales. En la Figura 2, se indica un diagrama del sistema interconectado nacional.¹³

Figura 2. Sistema interconectado nacional



Dónde: G: Generador
 GC: Gran Consumidor
 Nivel 1: Hasta 1 kV
 Nivel 2: Entre 1 kV y 30 kV
 Nivel 3: Entre 30 kV y 57,5 kV
 Nivel 4: Mayor de 57,5 kV

Sistema de Transmisión Regional (STR): Sistema compuesto por los activos de conexión al STN y el conjunto de líneas y subestaciones con sus equipos, que operan en el nivel de tensión 4 y que están conectados eléctricamente entre sí a este nivel de tensión.

Sistema de distribución local (SDL): Sistema compuesto por el conjunto de líneas y Subestaciones, con sus equipos asociados, que operan a los niveles de tensión 3, 2 y 1 dedicados a la prestación del servicio de uno o varios Mercados de Comercialización.

¹³ Transporte de energía eléctrica en Colombia. Módulo 3, Características de la transmisión, ISA. Febrero de 2006

Activos de Conexión al STN: Son los bienes que se requieren para que un generador, operador de red, usuario final, o varios de los anteriores, se conecten físicamente al STN.

1.1.4 Sistema de distribución. Un sistema de distribución de energía eléctrica es un conjunto de equipos que permiten energizar en forma segura y confiable un número determinado de cargas, en distintos niveles de tensión, ubicados generalmente en diferentes lugares. Para lograr esto se cuenta con un sistema de distribución que puede considerarse como un sistema de dos niveles distribución, uno de alta tensión y otro de baja tensión.¹⁴

Las subestaciones de distribución de alta tensión, tiene como objetivo el reducir el voltaje desde el nivel de transporte al de alta tensión de distribución. Las redes de alta tensión de distribución de las empresas eléctricas son llamadas comúnmente en esta parte de los sistemas como alimentadores, que pueden ser subterráneas y a su vez, pueden alimentar directamente a clientes de altas potencias, que cuentan con transformadores propios. Llamados clientes de alta tensión, o bien, a subredes por medio de transformadores de baja tensión de distribución, a las que se conectan clientes que poseen niveles de potencia bajos y medianos. A estas redes de baja tensión normalmente se les llama circuitos.

- **Componentes del sistema de distribución.** Los siguientes elementos trabajan secuencialmente y buscan transformar la energía proveniente del STN a potencias aprovechables para los usuarios, pasando de grandes tensiones hasta bajas. Transformador de estación de potencia (principal), sistema de subtransmisión, subestación de distribución, transformador de distribución, red secundaria.
- **Tipos de cargas en la clasificación de los sistemas de distribución.** Dependiendo de las características de las cargas, los volúmenes de energía involucrados, las condiciones de confiabilidad y seguridad con que deban operar, los sistemas de distribución se clasifican en: Industriales, comerciales, urbana- rural. En la Tabla 6, se muestra las divisiones o clases de usuarios manejados por una subestación. Aunque los valores que siguen solo deben tomarse en modo indicativo, sirven para caracterizar áreas de distribución de energía eléctrica.

¹⁴ J.A. Alamos Hernández, "Descripción General de un Sistema de Distribución". Chile 1998.

Tabla 6. Tipos de carga en el sistema de distribución

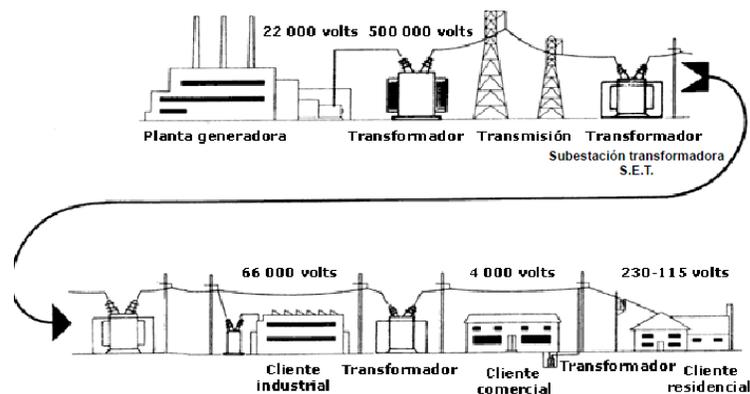
Residencial	Urbana
	Suburbana
	Rural
Comercial	Zona de centro ciudad
	Zona comercial
	Edificios comerciales
Industrial	Pequeña plantas
	Grandes plantas

- **Densidades de carga kVA /km:²** El autor en¹⁵ clasifica los diferentes tipos de usuario determinando la capacidad de cada transformador a instalar, el tipo de conexión del banco y el número de usuarios por cada transformador. En la Tabla 7, se muestra la densidad de carga establecida por tipo de usuarios y en la Figura 3, se muestra la división de voltaje en cada una de las secciones que contempla el sistema de distribución eléctrico.

Tabla 7. Tipo de área densidad en kVA/km²

Residencial baja densidad - área rural 4 – 100
Residencial media densidad - área suburbana 100 – 500
Residencial alta densidad - área urbana 400 – 2000
Residencial muy alta densidad - área totalmente electrificada 5000 - 7500
Comercial 4000 – 100000

Figura 3. División de cargas de flujo por tipo de usuario



¹⁵ Ibid., p. 30.

- **Clasificación de las redes del sistema de distribución:** El suministro de energía eléctrica puede ser de dos niveles¹⁶: alta tensión o baja tensión. Las redes de las empresas eléctricas concesionarias Figura 4, tienen como punto de partida las denominadas subestaciones de distribución primaria, cuyo objetivo es el de reducir el voltaje desde el nivel de transporte al de alta tensión de distribución. Las redes de alta tensión de distribución de las empresas eléctricas son llamadas comúnmente como: “alimentadores”, las que pueden ser tanto aéreas como subterráneas, y que a la vez, pueden alimentar directamente a clientes de grandes potencias que cuentan con transformadores propios, o a sub redes por medio de transformadores de baja tensión de distribución, donde se conectan clientes que poseen niveles de potencia bajos y medianos. A estas redes de baja tensión normalmente se les llama: circuitos.

Tensiones normales para sistemas e instalaciones:

Nivel de tensión campos tensión nominal (kV)

Tensión extra alta kV > 220

Tensión alta 60 < kV 220 alta tensión

Tensión media 1 < kV 60

Tensión baja 0.1 < kV 1 baja tensión

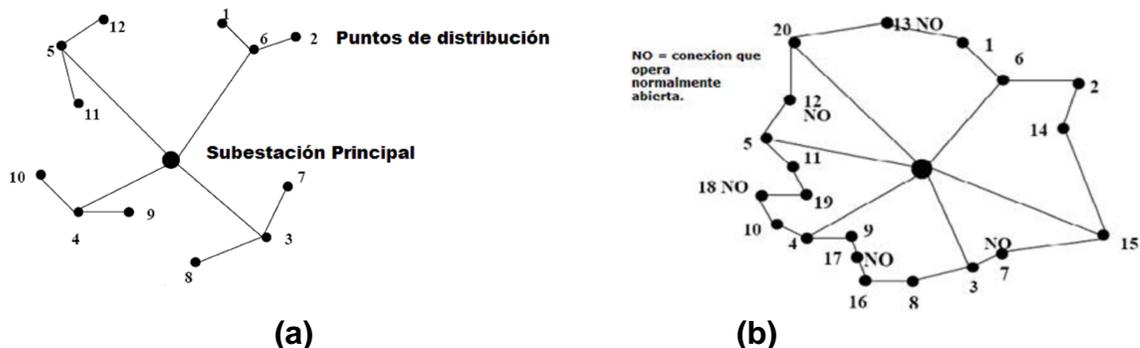
Tensión reducida kV 0.1

Las empresas concesionarias en Pasto, presentan dos esquemas de alimentación: los sistemas radiales y los anillados. Los sistemas radiales son los de uso más común a lo largo de Colombia. Este tipo de configuración consiste en poseer un conjunto de alimentadores de alta tensión, que suministran potencia en forma individual, a un grupo de transformadores. Cuando una red radial Figura 4a alimenta a transformadores, se obtienen las redes de distribución de baja tensión, normalmente trifásicas de cuatro hilos, y siempre del tipo sólidamente aterrizadas.

Los sistemas anillados en alta tensión Figura 4, se caracterizan por tener el lado primario del transformador conectado a una barra donde le llegan dos puntos de alimentación, proporcionando así una continuidad del servicio en caso de que ocurra una falla en alguno de los extremos de alimentación pudiéndose suministrar la energía por el punto de alimentación que está en operación sin falla. Cabe mencionar que el sistema se hace más complejo en las operaciones.

¹⁶ Ibid., p.30

Figura 4. a. Sistema de distribución radial y b. Sistema de distribución anillado.¹⁷



Fuente: J.A. Alamos Hernández, “Descripción General de un Sistema de Distribución”, 1998, Chile.

- **Características de los sistemas de distribución:** Las redes de distribución presentan características muy particulares, que las diferencian de las de transmisión. Entre éstas se distinguen:

Topologías radiales

Razón R/X alta (líneas de resistencia comparables a la reactancia)

Múltiples conexiones (monofásicas, bifásicas, etc.).

Estructura lateral compleja

Cargas de distinta naturaleza.

Líneas sin transposiciones.

Los sistemas de distribución son típicamente radiales, esto es, el flujo de potencia nace sólo de un nodo. Este nodo principal se reconoce como la subestación que alimenta al resto de la red Figura 5. En la subestación se reduce la tensión del nivel de alta tensión (AT) al de media tensión (MT).

La distribución se hace en el nivel de MT o en baja tensión (BT). Los clientes residenciales o comerciales se alimentan en BT, los clientes industriales se alimentan en MT o en BT, según los requerimientos particulares de cada uno de ellos. En la Figura 5 se muestra un esquema de manejo y distribución de la energía eléctrica, subdivisiones, conexiones tipos de usuarios y cada uno de los elementos que la conforman.

En estos sistemas se pueden encontrar muchos tipos de conexiones: trifásicas, bifásicas, o monofásicas. Si bien es cierto que en MT predominan las redes trifásicas es frecuente encontrar cargas bifásicas, especialmente en zonas rurales. Sin embargo, es en BT donde se encuentran las más variadas conexiones,

¹⁷ Ibíd., p. 30.

consecuencia de una mayoría de cargas residenciales de naturaleza monofásica. Los desequilibrios que se generan en BT tratan de amortiguarse repartiendo equitativamente las cargas en las tres fases.

- **Componentes de los sistemas de distribución:** En todo sistema de distribución suelen encontrarse los siguientes elementos: alimentadores, transformadores, líneas y cables, capacitores o condensadores, equipos de protección y bancos de regulación.

1.2 SISTEMA DE GENERACIÓN, TRANSMISIÓN Y DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA EN LA CIUDAD DE PASTO

1.2.1 Generación eléctrica en la ciudad de Pasto. La producción de energía eléctrica en el departamento de Nariño se realiza mediante 5 plantas de generación hidráulica como se indica en la Tabla 8, los datos obtenidos a continuación son brindados por Centrales Eléctricas de Nariño S.A.

Figura 5. Red de distribución típica

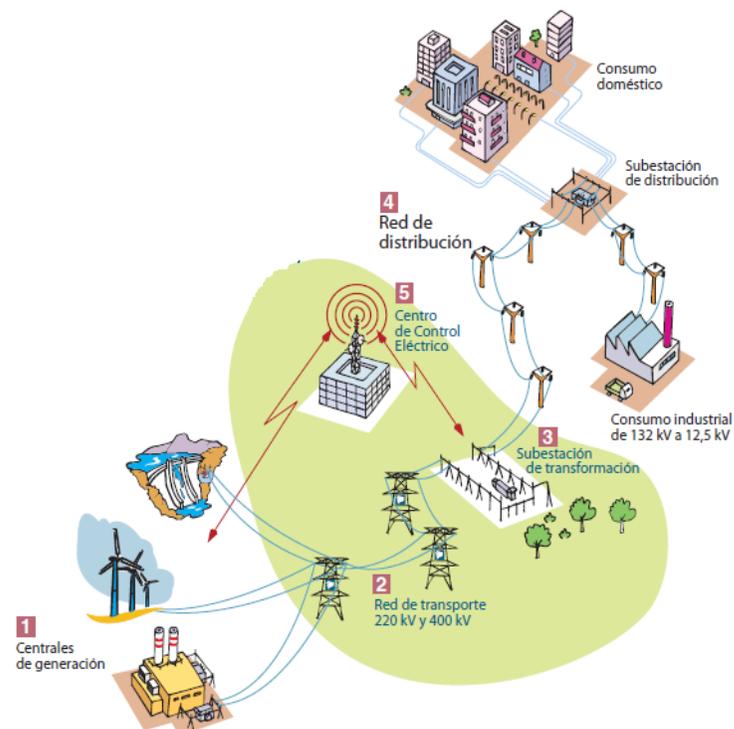


Tabla 8. Capacidad de producción en MW hidroeléctricas Pasto

Planta	Capacidad MW	Zona
Central Rio Mayo	19.8	Norte
Rio Bobo	3.8	Centro
Rio Sapuyes	1.8	Sur
Rio Julio Bravo	1.5	Centro
Minicentral Rio ingenio	0.2	Occidente

En promedio de la demanda de energía consumida en la ciudad de Pasto, estas hidroeléctricas soportan el 18% y para cumplir la demanda se compra en promedio un 82% correspondiendo aproximadamente a 750 Gw/h de consumo al año.

Hidroeléctricas de Nariño pertenecientes a la empresa CEDENAR (Centrales Eléctricas de Nariño)

- Pequeña Central Hidroeléctrica de río Bobo ubicada en la vereda Chachatoy, del corregimiento de Santa Bárbara, municipio de Pasto, departamento de Nariño. La PCH fue construida en el año 1960. La mayoría de los equipos instalados y en operación son de esa fecha. Actualmente las turbinas en operación han perdido su eficiencia hidráulica. El grupo uno cuenta con un generador marca Marely de 1400 kW y la turbina actual solo entrega 800 kW es decir que hay una pérdida efectiva de 600 kW, solo en este grupo. El grupo 2 cuenta con un generador Westinghouse de 1500 kW, sin embargo la turbina Pelton de este grupo se cambió en el año 1995, razón por la cual su vida útil todavía está vigente. El grupo tres cuenta con un generador marca Oerlikon con capacidad de 1500 kW. Sin embargo, la turbina solo abastece con un máximo de 800 kW. Es decir, presenta una pérdida de potencia de 700 kW equivalente.
- Central Hidroeléctrica de río Mayo ubicada en el municipio de San Pablo, al norte del departamento de Nariño. La PCH de río Mayo entró a operar en el año de 1969 y cuenta con tres unidades de generación de 8.75 MVA a 6.6 kV. Con turbinas tipo Francis, representa el 15% de la demanda comercial de energía del sistema de CEDENAR S.A. E.S.P. Se encuentra interconectada al STN a través de dos circuitos de 115 kV, uno con la subestación Pasto y el otro circuito con la subestación Popayán. Se constituye en el más grande e importante activo para CEDENAR en cuanto a generación se refiere. Tiene una potencia instalada y efectiva de 21.000 kW y genera anualmente cerca de 100.000 MWh/año con unos ingresos anuales superiores a los \$9.000 millones de pesos.

- Pequeña Central Hidroeléctrica de Julio Bravo ubicada en el municipio de Pasto, departamento de Nariño. La PCH de Julio Bravo inició su operación en el año de 1942. Tiene una capacidad de 1.5 MW y produce 6.45 GW hora año. Funciona con tres turbinas marca Pelton cuyo generador es de 500 KW cada uno.
- Pequeña Central Hidroeléctrica de río Sapuyes ubicada en el municipio de Túquerres, departamento de Nariño. En 1952, se inicia la obra ubicada en la vereda la Flor a 3 km del municipio de Túquerres. La planta de río Sapuyes posee una capacidad de 1.8 MW produce 9.76 GW hora año.
- Pequeña Central Hidroeléctrica de río Ingenio ubicada en el municipio de Sandoná, departamento de Nariño. La planta de río Ingenio con una capacidad de 0.2 MWw produjo 0.71 GWw hora año.

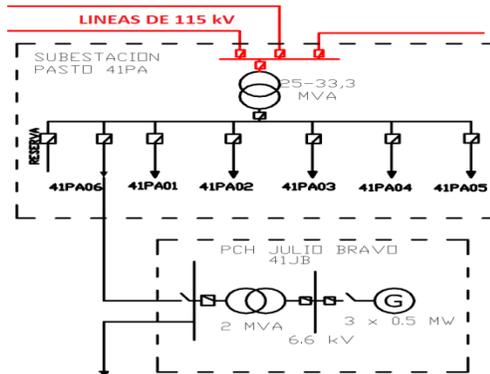
1.2.2 Sistema de transmisión y distribución en la ciudad de Pasto. La subestación Pasto encargada de la distribución de tensión en toda la ciudad de Pasto se encuentra dentro del sistema de subtransmisión de Nariño. El sistema de subtransmisión de Nariño es manejado por la empresa CEDENAR, esta tiene labores de generación, distribución y comercialización. CEDENAR además de atender una cobertura del 78% ha diversificado sus negocios y en la actualidad presta el servicio de alumbrado público a 57 municipios del departamento, siendo su principal cliente el Municipio de Pasto, con una demanda mensual de 680 MW hora mes.

El sistema de subtransmisión de Nariño se conecta desde la subestación San Bernardino en el Cauca a través de la subestación Jamondino en Nariño y a través del Sistema de Transmisión Regional – Cauca Nariño a 115 kV. La línea de transmisión de 115 kV proveniente desde el Cauca pertenece a la empresa ISA y alimenta a las subestaciones Pasto, Panamericana, Catambuco, Jamondino, río Mayo, Junin y Buchely. Para atender la distribución de energía eléctrica el sistema cuenta con 8 subestaciones en la zona Centro, 10 subestaciones en la zona Sur, 7 subestaciones en la zona Norte, 8 subestaciones en la zona Pacífico y 5 subestaciones en la zona Occidente.

Estas subestaciones abarcan a 321966 usuarios con 11673 transformadores de distribución. En el Anexo A y B se pueden observar las subestaciones del departamento de Nariño y el diagrama unifilar del sistema eléctrico CEDENAR. En el diagrama unifilar está representada la interconexión de todas las subestaciones, generadores, transformadores, interruptores, circuitos de cargas, etc. Además, se representan en colores las líneas de media y alta tensión. Las líneas de media tensión que se manejan en el sistema de subtransmisión de Nariño son de 13.8 kV y 34.5 kV, las líneas de alta tensión tienen valores de 115 kV y en el caso del STN son de 230 kV.

La subestación Pasto está conformada por seis circuitos radiales Figura 6, a los que se les conectan las cargas. Los circuitos están representados en el diagrama unifilar con el prefijo 41PA y van de 41PA01-41PA06. Estos circuitos son de media tensión y además de su conexión con las cargas, el circuito 41PA06 está conectado a la PCH Julio Bravo. En la Tabla 10 se puede observar las cargas que contempla cada circuito de la subestación Pasto y su longitud en redes de distribución.

Figura 6. Subestación Pasto



Esta información dió pautas importantes a tener en cuenta para la elección del tipo de cargas y la ubicación de estas dentro de la microgrid a simular. La ubicación de las cargas debió elegirse de tal manera que estas no queden muy alejadas entre sí, que compartan el mismo circuito y que no estén muy alejadas al nodo principal de la subestación Pasto.

La Tabla 9, indica cómo se divide el consumo de energía en la ciudad de Pasto, aquí se encuentra la cantidad exacta de los diferentes tipos de consumidores ubicados en la parte urbana y rural.

En el caso de estudio, se trabajó con 8 cargas de tipo industrial Tabla 10 ya que demandan más energía que las cargas comunes y su interconexión es cercana. Se determinó el consumo de energía promedio (kWh) en cada carga, tomando como referencia su consumo horario a diario durante una semana Tabla 11. Se hará uso y se ampliará la información brindada en la Tabla 11, en el capítulo 5.

Tabla 9. Energía demandada en la ciudad de Pasto

MUNICIPIO	USO	E S T R A T O	USUARIOS			CONSUMO (kw- h)		
			RURAL	URBANO	TOTAL	RURAL	URBANO	TOTAL
SAN JUAN DE PASTO	ALUMBRADO	0		7	7		1113066,92	1113066,92
	AUTOCONSUMO	0	6	6	12	319.408,08	92.771,45	412.179,53
	COMERCIAL	0	294	7763	8057	183.155,56	2.896.775,35	3.079.930,91
	ESPECIAL	0	20	110	130	4.913,00	96.492,99	101.405,99
	INDUSTRIAL	0	26	305	331	115.492,91	340.688,88	456.181,79
	OFICIAL	0	54	275	329	23.796,98	466.242,48	490.039,46
	PROVISIONAL	0	9	33	42	1.794,62	61.906,52	63.701,14
	RESIDENCIAL	1	7291	13005	20296	527.750,64	1.374.112,37	1.901.863,00
		2	11049	27456	38505	774.945,66	3.350.032,31	4.124.977,96
		3	205	22617	22822	19.973,37	2.959.151,65	2.979.125,02
		4	21	7451	7472	4.707,00	1.044.130,24	1.048.837,24
5		73	2172	2245	13.506,00	305.114,78	318.620,78	
6		2	10	12	194,00	3.393,00	3.587,00	
Total SAN JUAN DE PASTO		19050	81210	100260	1.989.637,8	14.103.878,9	16.093.516,7	

Tabla 10. Circuitos, usuarios y distancia de redes de distribución en la subestación Pasto

CIRCUITO	USUARIOS	LONGITUD mts
41PA01	5028	11909
41PA02	3576	8761
41PA03	5956	31266
41PA04	4909	14846
41PA05	7476	24350
41PA06	5157	132674

Para realizar posteriores análisis se trabajó con 8 cargas de tipo industrial Tabla 11, estas ocho cargas se escogieron debido a su interconexión entre si y su cercanía geográfica. Se análisis de consumo de energía promedio (KWh) en cada carga, tomando como referencia su consumo horario a diario durante una semana.

Tabla 11. Consumo de energía hora a hora de las cargas propuestas

HORA	MISTER POLLO NORTE (kwh)	LA RIVIERA (KWh)	CLINICA PALERMO (KWh)	MISTERPOLLO COLINA (KWh)	UNIV. COOPERATIVA (KWh)	UDENAR (KWh)	HOSP. SAN PEDRO (KWh)	UNIV. MARIANA (KWh)
HORA 1	36,11457143	5,8622857	4,502857143	20,6	8,812571429	60,43714286	29,96	22,44
HORA 2	34,31057143	5,6097143	4,04	18,99428571	8,950857143	60,43714286	28,9	21,56
HORA 3	33,09114286	5,168	5,374285714	19,53714286	9,328	59,58857143	25,08	21,56
HORA 4	32,94971429	5,2011429	5,091428571	18,8	8,881714286	61,85142857	25,35	21,56
HORA 5	32,88057143	5,1422857	4	18,67428571	7,033714286	60,24857143	26,66	25,52
HORA 6	30,16828571	5,2091429	3,997142857	19,37714286	9,302857143	55,81714286	30,36	31,24
HORA 7	29,23485714	5,3234286	5,434285714	20,82857143	17,18514286	61,00285714	58,34	61,16
HORA 8	36,84685714	7,3754286	9,865714286	23,44571429	40,71885714	121,8171429	60,192	97,68
HORA 9	41,844	8,8291429	15,91142857	26,42857143	47,14285714	174,4285714	58,608	11,76
HORA 10	46,552	9,2011429	15,64571429	27,84571429	48,82742857	202,62	60,72	114,84
HORA 11	48,092	8,8354286	14,89428571	29,22285714	50,18514286	205,0714286	57,02	115,72
HORA 12	47,04542857	8,8097143	13,9	30,50285714	45,188	192,3428571	44,88	85,8
HORA 13	47,63	7,2085714	10,65428571	30,33714286	30,90685714	142,4657143	42,37	73,48
HORA 14	54,28342857	7,8777143	9,528571429	30,46285714	27,84571429	136,62	53,72	93,72
HORA 15	49,98714286	8,0582857	9,44	30,77714286	39,908	178,4828571	55,04	110
HORA 16	47,96	9,1811429	12,41714286	30,76	44,86114286	198,0942857	57,68	111,32
HORA 17	48,50371429	9,0005714	14,34	29,42285714	45,94857143	200,2628571	59,79	118,36
HORA 18	50,18828571	9,556	15,94857143	28,75428571	45,848	193,2857143	46,86	103,4
HORA 19	48,08571429	9,896	16,44285714	30,47428571	39,89542857	156,7028571	48,18	83,6
HORA 20	49,00657143	9,4022857	13,36285714	29,58285714	25,33142857	119,5542857	40,92	70,84
HORA 21	49,47485714	8,604	9,437142857	29,79428571	15,19257143	86,55428571	35,5	64,68
HORA 22	45,39228571	7,9948571	7,268571429	28,79428571	10,61657143	71,94	36,43	43,53
HORA 23	41,21542857	7,1228571	6,051428571	28,15428571	9,284	64,58571429	40,92	26,84
HORA 24	38,75142857	6,1377143	4,837142857	23,14285714	8,850285714	61,19142857	31,15	23,32

2. TECNOLOGÍAS EN SMART GRID, BENEFICIOS FRENTE A LA RED ACTUAL

2.1 SMART GRID, SU CONFORMACIÓN, ESTRUCTURA Y FUNCIONAMIENTO

Se concibe la definición de este sistema desde el punto de vista¹⁸, la Smart Grid proveen amplios beneficios sociales, permitiendo una adecuada gestión energética y reduciendo los costos de operación de las empresas. Estos sistemas se están introduciendo a raíz de las mayores exigencias en la gestión de las empresas de redes. La visión más general de una Smart Grid y de la cual se puede presentar un concepto es: “Smart Grid es una red inteligente que incluye un sistema plenamente conectado a la red e identifica todos los elementos de la red eléctrica, comunica su estado y el impacto de las decisiones de consumo a los sistemas automatizados de toma de decisiones en dicha red”.¹⁹

Esta visión sirve para apalancar los sistemas de control disponibles en la actualidad con el fin de que coordine todas las variables involucradas en el suministro de energía para los consumidores. Convirtiéndose en un sistema avanzado de toma de decisiones que permite entregar de una manera más eficiente la energía mientras se proporciona al consumidor mayores beneficios económicos ante las reducciones de precio.²⁰ El impacto de un sistema de entrega mejorado en gran medida que optimiza los recursos del medio ambiente, garantiza la entrega más eficiente, y maximiza la fiabilidad.

Smart Grid es una evolución estructural, funcional y conceptual del modelo actual del cual se ha dependido por más de medio siglo atrás. El método fundamental de operar la red actual no ha cambiado mucho en los últimos años. Ha seguido siendo esencialmente el mismo, aunque el número de clientes y sus necesidades han aumentado de manera exponencial. Muchos países alrededor del mundo están tratando de encontrar la manera de llevar sus redes a una era digital. Este esfuerzo a realizar, pretende crear una red de energía más inteligente y es un proyecto propio de la industria energética que considere una transformación para la mejora de los métodos de entrega, así como el consumo. Esta mejora no solo es la solución a un problema de seguridad energética, si no que es de mucha utilidad si se quiere ver a la red inteligente como una solución ambiental,

¹⁸ Diego Miranda Perez, Estado y desarrollo de la tecnología Smart Grid en Colombia, , Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Mecánica y Control, Ingeniería Eléctrica, 2008.

¹⁹ Hassan Farhangi, “The Path Of Smart Grid”, IEEE Power Energy Mag, January 2010.

²⁰ Mario Hernández, Inteligencia en la Red Eléctrica, Instituto Universitario de Ingeniería Computacional SIANI, Universidad de las Palmas de Gran Canarias, España, 2009.

ayudando a resolver un problema mundial que es el más apremiante, el del cambio climático.²¹

Aunque los detalles varían mucho, Smart Grid pretende ser una red, auto-equilibrada, con capacidad de auto-monitorización en la que acepta cualquier fuente de energía y suministre energía con la mínima intervención humana. Smart Grid es un sistema que permitirá a la sociedad optimizar el uso de fuentes de energía renovables, un sistema que tiene la capacidad de detectar cuando una parte de su sistema está sobrecargado y el poder re-direccionarla y reducir esa sobrecarga y evitar situaciones de interrupción potencial; una red que permite comunicación en tiempo real entre el consumidor y la empresa que permite optimizar el consumo de energía.²²

Es importante considerar la importancia de su aplicación en la red actual, muchas razones apuntan hacia las empresas de servicios públicos en especial las de energía eléctrica, dado que a nivel mundial se están enfrentando a muchos retos que incluye: generación, despliegue óptimo de los activos, respuesta a la demanda, conservación de la energía y compromiso medio ambiental. Es evidente que estos problemas no pueden ser solucionados ni enfrentados por la estructura de la red eléctrica actual.

La estructura eléctrica actual es lineal en sí. Solo convierte un tercio de la energía transformada ya sea por combustible o fuerza hídrica, sin recuperar las pérdidas de calor en caso de producción eléctrica por combustibles. Al menos el ocho por ciento de la energía resultante se pierde en las líneas de transmisión.²³ En países con gran capacidad hídrica se desperdicia miles de toneladas de agua en tiempos de invierno por la inexistencia de sistemas de almacenaje de energía.

Debido a la topología jerárquica de la estructura actual de la red, esta tiende a sufrir un efecto dominó de fallas²⁴. En esencia las redes inteligentes o Smart Grids tratan de brindar a las empresas de energía una completa visibilidad y control persuasivo sobre sus componentes (redes, torres de energía, centrales de generación, transformadores, etc.). Lo que se busca en una Smart Grid es que sea auto sostenible, auto suficiente, que tenga la propiedad de auto reparación y sea flexible ante anomalías y cambios del sistema.

2.1.1 Smart Grid. Para lograr un control y monitoreo persuasivo, Smart Grid emerge como la convergencia entre tecnologías de la información y comunicación mezclándolas con la tecnología de las redes eléctricas. Dado el hecho que las raíces de los problemas de la actual red eléctrica es el sistema de distribución, es

²¹ Xcel Energy Smart Grid A White Paper

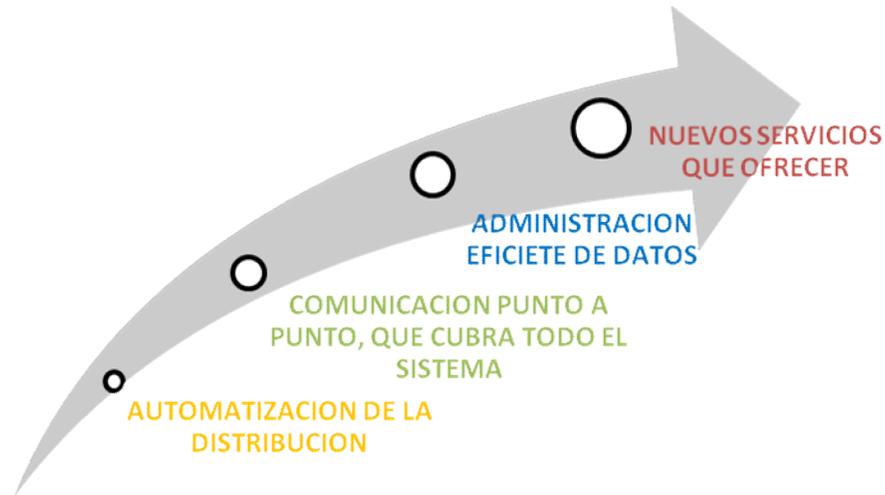
²² H. Alan Mantooh. Perspectives on Smart Grid from Generation to the Meter and Into the Home. Electrical Engineering, University of Arkansas, Junio 24 2010.

²³ Xcel., Op.Cit. p. 39

²⁴ Hassan Farhangi, "The Path Of Smart Grid", IEEE Power Energy Mag, January 2010.

este el punto de partida para realizar una completa readecuación del sistema, como se observa en la Figura 7.

Figura 7. Capacidades deseadas de las empresas de energía eléctrica



Muchos estudios técnicos demuestran que la inversión en la automatización de la distribución eléctrica proveerá de muchas ventanas, mejores capacidades y servicios a lo largo del tiempo. Tenido muy en cuenta esto, las nuevas tecnologías de comunicaciones y administración brindarán los componentes básicos que permiten a las empresas de energía eléctrica introducir nuevas aplicaciones y mejorar procesos en sus negocios.²⁵ En la Figura 8, se muestra la convergencia de tecnologías de la información junto con los sistemas de electricidad.

2.1.2 Transición hacia Smart Grid. Smart Grid es un compilado de tecnologías, conceptos, topologías y enfoques que permite salir de la clásica jerarquía de generación, transmisión y distribución, para ser reemplazada por una estructura inteligente con completa conexión con cada una de sus partes, completamente integrada; donde todos los objetivos, metas y necesidades de cada uno de los agentes están apoyados por un eficiente intercambio de datos, servicios y transacciones, optimizando el uso de los recursos existentes y minimizando los costos de operación y mantenimiento.²⁶

Como se menciona en,²⁷ dado el caso que solo el 90% de los cortes de energía o apagones y problemas con la red eléctrica tienen sus raíces en la red de

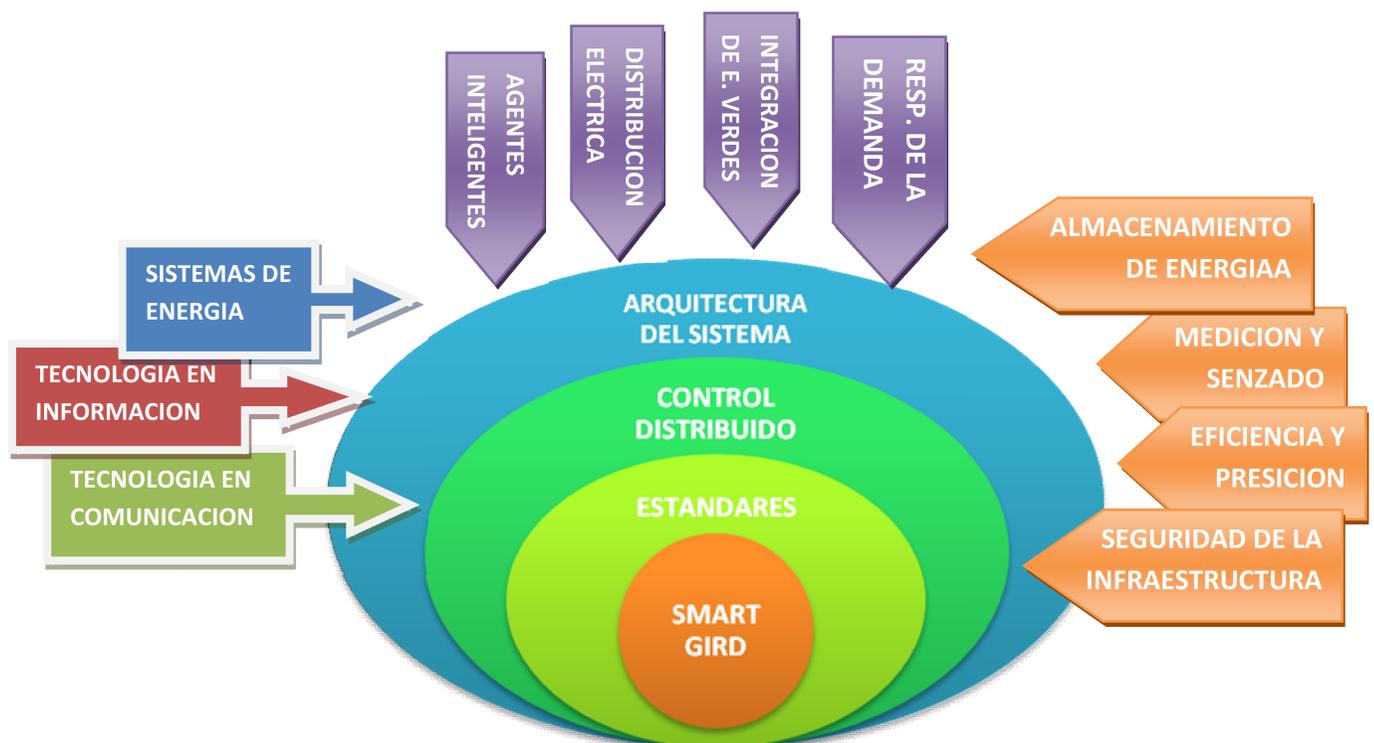
²⁵ A. Vojdani, "Integration challenges of the smart grid— Enterprise integration of DR and meter data," in Proc. IEEE Electrical Power System Conf. (EPEC'08), Vancouver, Canada, Oct. 2008, p. 21.

²⁶ Cisco Smart Grid, Why You Hve to Choose CISCO Smart Grid, White Paper, 2009

²⁷ Hassan Farhangi. Op.cit., p. 40.

distribución, el paso hacia una Smart Grid debe iniciar en el sistema de distribución. Algunos factores como el constante crecimiento de la demanda de energía, deja a las compañías de electricidad sin muchos agentes capaces de sostener esta demanda creciente, además las compañías enfrentan nuevos retos como: el aumento de los precios de los combustibles fósiles (petróleo, carbón), la posible extinción de recursos hídricos y el daño medio ambiental causado por la producción de energía. Todos estos factores mencionados causan la necesidad urgente de una modernización de la red de distribución, introduciendo nuevas tecnologías que puedan ayudar al manejo efectivo, control exhaustivo y protección de la red de distribución.

Figura 8. Componentes básicos de una Smart Grid



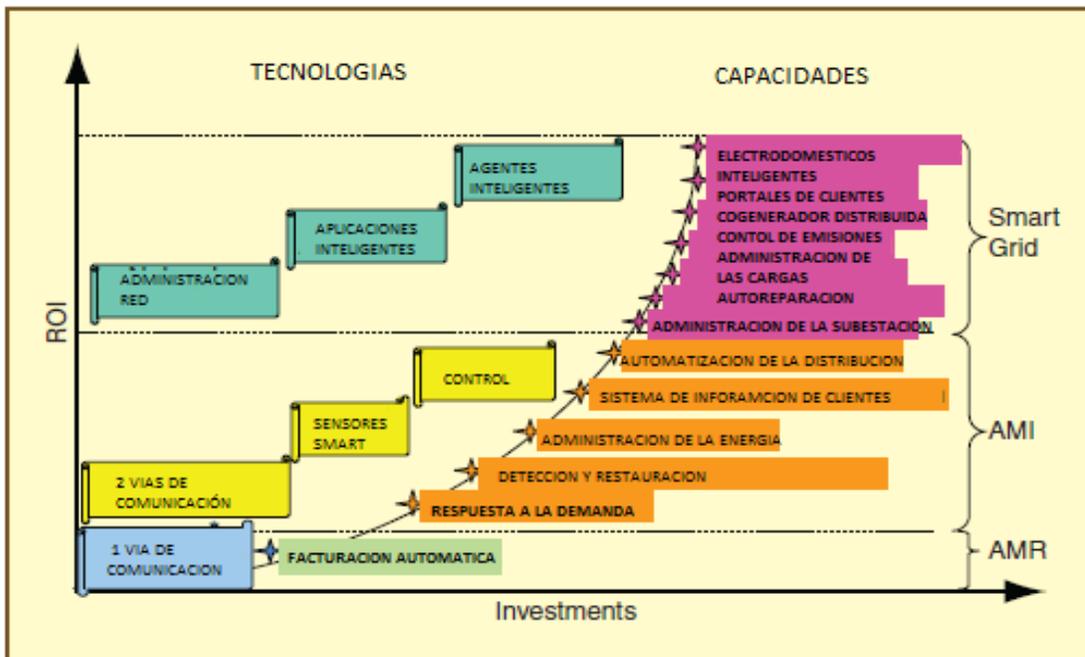
El control es necesario ya que muchas de las pérdidas para las compañías se deben primero: a pérdidas por líneas de transmisión o distribución, puesto que los niveles de generación no son los adecuados, y la inexistencia de generadores distribuidos en la red actual evita aumentar ese valor de generación necesaria para compensar las pérdidas. La segunda razón para aplicar un control son: las fugas o robos de energía causados por los usuarios. Una solución que se ha venido interponiendo frente al control de la red de distribución es el "Automated Metering Reading" (AMR), fue uno de los componentes al cual se le destinó gran cantidad de tiempo e inversión con el fin de su perfeccionamiento, y por el cual las

compañías podían leer los reportes de consumo y su estado de manera remota de cada usuario.

Como lo sugiere la Figura 9, AMR probó ser una herramienta que en su iniciativa fue atractiva pero no se dirigía a solucionar los problemas de las compañías de energía eléctrica que era la administración y control de energía para los usuarios, ya que AMR solo prestaba una comunicación de una vía (usuarios - empresa), y solo era capaz de la lectura de los medidores y no permitía tomar acciones correctivas frente a la información que recibían. En otras palabras AMR solamente era un sistema que no permitiría la transición a Smart Grid, donde el control persuasivo en todo nivel es clave.²⁸

La nueva tecnología llamada “Automated Metering Infraestructure” (AMI), permite dos vías de comunicación (usuarios-empresa-usuarios) lo que permitía modificar los parámetros de servicio para cada cliente, personalizar su consumo y monitorear la red permitiendo a las empresas tomar el control sobre su red de manera remota. A través de AMI las compañías lograron cumplir sus primeros objetivos en administración de cargas y protección sobre la distribución y una tecnología que permitirá la incorporación de tecnologías Smart Grid.

Figura 9. Retorno de las inversiones de una Smart Grid



²⁸ Hassan Farhangi. Op.cit., p. 40.

Inversiones dedicadas a implementar AMI tendrán como consecuencia la automatización y control de la distribución gracias a la respuesta a la demanda e información de los clientes en tiempo real. Dado el hecho que Smart Grid se fundamenta en una arquitectura AMI que debe estar ya funcionando, las inversiones hacia una Smart Grid traerán consigo más funcionalidades como la automatización de las subestaciones, mayor compatibilidad con la conexión de generadores distribuidos y su control, administración de las cargas manejadas, auto reparación de la red y como objetivo final centrales eléctricas inteligentes y autónomas.

2.1.3 Componentes fundamentales en Smart Grid. Al ser la red de electricidad la columna vertebral de la industria energética y foco de nuevas innovaciones tecnológicas, hoy se convierte en núcleo de la transformación, haciendo más eficiente el uso de los elementos de cada empresa de energía, obteniendo mejores ganancias, reduciendo costos y aumentando la eficiencia. La inversión de una empresa de energía eléctrica deberá dirigirse a la estructura base de una Smart Grid, denominada administración de los recursos, logrando la intercomunicación para desarrollar una integración vertical de las nuevas funciones. Reivindicando la importancia de un sistemas de comunicaciones muy bien estructurado y funcional muy similar a una compañía celular o IT's (Información y Telecomunicaciones) la cual tienen control y monitoreo exhaustivo de cada uno de sus elementos.²⁹

La estructura básica de una Smart Grid, se conforma por:

- Canal de comunicación de doble vía de datos
- Canal de transmisión de la energía
- Generadores distribuidos
- Medidores inteligentes
- Central de control
- Micro redes

El componente fundamental para hacer que la tecnología de Smart Grid funcione es una red robusta y dinámica de comunicaciones; brindando a la empresa la habilidad de tener una comunicación de dos vías a través de la red, permitiendo la interacción con cada uno de los elementos que la componen desde las fuentes de energía, líneas de trasmisión, centro de control y el usuario final, conectados por un medidor inteligente.³⁰ Otros componentes esenciales para hacer que la Smart Grid tome vida, son los dispositivos como: sensores, switches, fusibles, etc. que realizan la comunicación a lo largo de la infraestructura de la red. Los dispositivos que están en contacto con los usuarios son los medidores inteligentes, además de

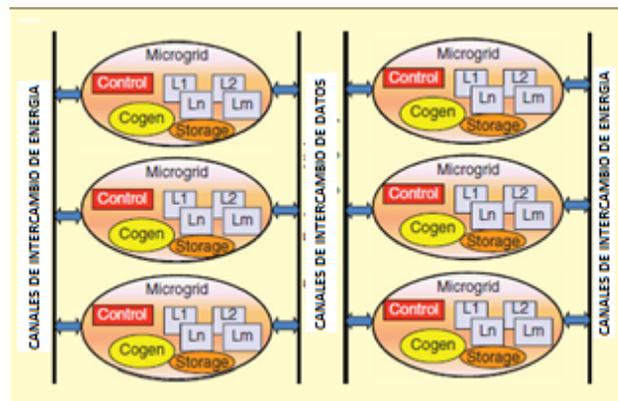
²⁹ Hassan Farhangi. Op.cit., p. 40.

³⁰ Xcel. Op. Cit., p. 39.

los dispositivos de control de energía que estarán comunicados con la central y serán la interfaz principal entre la empresa y el cliente. Finalmente, debe haber una integración lógica que recoja toda esta información de sondeo de cada una de las partes de la red inteligente y la administre, realizando un proceso de control inteligente sobre la energía de acuerdo las situaciones y datos recogidos.

- **Topología de una Smart Grid.** Como se indica en la Figura 10 una Smart Grid es una estructura muy bien planeada, una entidad plug and play de diferentes micro redes inteligentes o Smart microgrids³¹ cada una de ellas cuenta con un sistema de almacenamiento de energía y de control y están interconectadas por canales dedicados de intercambio de datos y de energía. El surgimiento de estas Smart microgrids no se espera que sea unánime en todas las regiones donde sea implantada una tecnología como esta, sino que dependerá de las variedades de cargas que existan, la variedad de energía distribuida que se pueda usar, qué tipo de energía primaria se usará, la economía y necesidades de la región.

Figura 10. La Smart Grid del futuro



2.1.3.1 Micro redes inteligentes o smart microgrids. Una Smart Grid no puede y no debe ser el reemplazo total de la red eléctrica actual, pero si debe ser un complemento básico e importante para ella. En otras palabras una Smart Grid debe coexistir con la red actual añadiéndole sus capacidades, facultades y funcionalidades. Para que esto sea posible se necesita una topología que permita fácilmente la inclusión de nueva tecnología, que sea adaptativa a las tecnologías existentes y que permita el cambio fácilmente.

La integración de estos conceptos se definen en³² envolviendo el concepto de las micro redes o microgrids, que en sí permiten el concepto plug and play ya que

³¹ Hassan Farhangi, "The Path Of Smart Grid", IEEE Power Energy Mag, January 2010

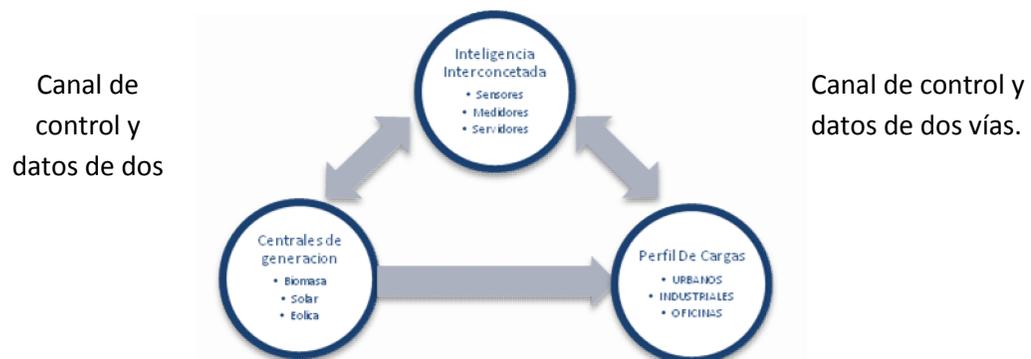
³² P. Piagi , R. H. Lasseter. Autonomous Control of microgrids, IEEE PES, 2009

están dotadas de inteligencia y contienen los mismos componentes de una red inteligente normal. La forma en que las microgrids se defienden es: son micro redes de energía distribuida (alternativa) que pueden funcionar estando conectadas o desconectadas de la red de electricidad, tiene inteligencia y son conectadas a la Smart Grid por una red de datos, y permiten el islanding o el funcionamiento independiente de esta sin necesidad de estar conectada a la red central, al poseer generadores distribuidos capaces de soportar la demanda de energía.

- **Topología de una microred o microgrid.** Una red Smart de microgrids es aquella que puede funcionar de forma independiente o conectada a la red, e incorpora seis principios fundamentales de funcionamiento, Figura 11.

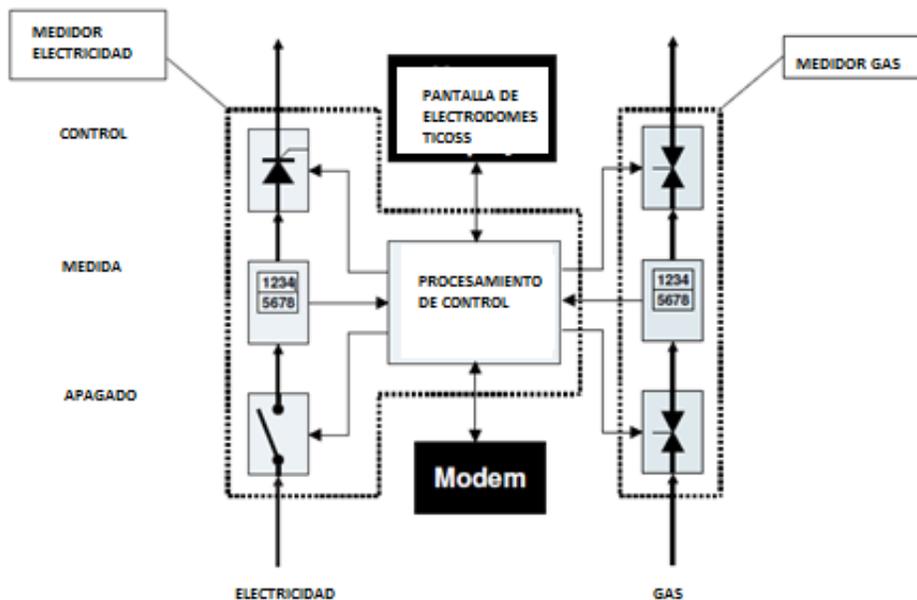
- Incorpora plantas de energía capaces de soportar la demanda local además de devolver la energía que no se usa a la red de electricidad. Esta clase de plantas de energía son conocidas como cogeneradoras y muchas veces son del tipo "verde" o de energías renovables como eólicas, fotovoltaicas y biomasa.
- Funciona con muchas variantes de cargas (domésticos, industriales, empresas).
- Utiliza almacenamiento de energía en baterías locales o distribuidas, que atenúa el comportamiento intermitente de las fuentes de energía renovable.
- Incorpora medidores y sensores inteligentes capaces de la medición de muchos parámetros de consumo tales como: energía activa reactiva, voltaje, corriente y demanda. Con una enorme precisión y exactitud. Los medidores inteligentes serán capaces de conectar y desconectar remotamente las cargas.
- Incorpora una infraestructura de comunicaciones que permite a los componentes intercambiar información de manera segura y confiable. Protegida mediante sistemas antihackeo de los datos.
- Incorpora un núcleo inteligente, compuesto por una infraestructura de cómputo, comunicaciones y trabajo en red, en la cual se administra eficientemente la energía de los nodos de la red, supervisa su comportamiento e intercambia datos entre otras micro redes.

Figura 11. Topología de una micro red inteligente o Smart microgrid



2.1.3.2 Medidores Inteligentes. El medidor inteligente es un sucesor lógico del contador de electricidad mecánico, tiene la capacidad de llevar un registro en tiempo real de la electricidad y, posiblemente, la electricidad generada localmente, por ejemplo, en el caso de las celdas fotovoltaica, brindando una lectura remota. En algunos modelos y dependiendo de las necesidades estos son capaces de integrar funciones de medición de agua y gas.³³ En la Figura 12, se muestra esquemáticamente un ejemplo de un medidor inteligente típico y sus funciones.

Figura 12. Esquemática en bloques de funciones de un medidor inteligente



Este modelo esquemático tiene tres funciones básicas, medida de la electricidad utilizada (o generada), desconectar automáticamente al usuario de forma remota y controlar de forma remota el consumo eléctrico máximo. El contador de la luz se comunica por medio de un módem. Una característica importante es la comunicación, que utiliza la infraestructura de red celular (HSPA), WiMax, WiFi o una conexión existente de Internet permanente (ADSL). Una interfaz electrónica se conecta al medidor inteligente que permite la comunicación interna entre el medidor y los electrodomésticos. Los aparatos pueden ser controlados directamente y la pantalla se puede usar para mostrar un historial de datos de energía y el costo de la energía.

³³ P. Daigle, La Tecnología Moderna se da cita con los Medidores de Energía, Analog Divices Publications, Product Marketing And Publisity, Wilmington, Massachusetts,2001

Tecnológicamente, no hay obstáculos para la introducción de contadores inteligentes. Es un ejemplo claro el proyecto italiano³⁴ que despliega más de 30 millones de contadores inteligentes entre los clientes residenciales. Númerosos proyectos de demostración en otros países muestran que la tecnología es madura y puede ser implementada en una gran escala.

- **Beneficios de los medidores inteligentes.** Muchas ventajas se atribuyen a los medidores inteligentes, incluido el costo de medición más bajo, el ahorro de energía para los clientes residenciales, más fiabilidad del suministro, y también se planea un mercado de energía con precios variables para atraer a nuevos clientes con dos objetivos: el primero se basa en que cuando los usuarios tienen precios más altos en horas pico siendo estas horas de mayor consumo, los usuarios consumirían una menor cantidad de electricidad y planificarán sus consumos, y la segunda de igual manera, establecerá horarios con precios de electricidad más bajos. Estas dos medidas buscan hacer más conscientes a los consumidores ya que actualmente se maneja tarifa plana. Otra ventaja es que se pueden detectar de manera más fácil los fraudes.

Beneficios adicionales también se prevén en relación a los generadores distribuidos (GD).³⁵ El medidor inteligente puede ser usado por separado para medir la electricidad entregada por los generadores distribuidos a la red y la infraestructura de comunicación de los medidores inteligentes se puede utilizar para controlar de forma remota los generadores distribuidos GD.

Beneficios ante la situación actual. Los medidores inteligentes ofrecen beneficios para múltiples partes. Por lo tanto, se hace una distinción entre usuarios, la compañía de red eléctrica, la compañía de medición, el proveedor y el gobierno. Muchos de los beneficios pueden ser explicados si se observan las diferencias entre la situación actual con el medidor viejo y la situación futura con el nuevo medidor, como se muestra esquemáticamente en la Figura 13. La respuesta a la demanda por los usuarios de energía no es todavía una práctica común, pero podría ser activa ahora con el uso de los medidores inteligentes. Los medidores inteligentes son capaces de limitar o incluso realizar el corte del uso de energía cuando son activados por la central de control de la empresa de red. Cuando todos los hogares y las pequeñas o medianas empresas (PYME) en un país son capaces de adaptar el uso de energía durante un período de precios altos o que la disponibilidad de energía disminuya, esto mejoraría la fiabilidad de la oferta, las transacciones del mercado energético, el ahorro, la conciencia y la eficiencia de la energía.

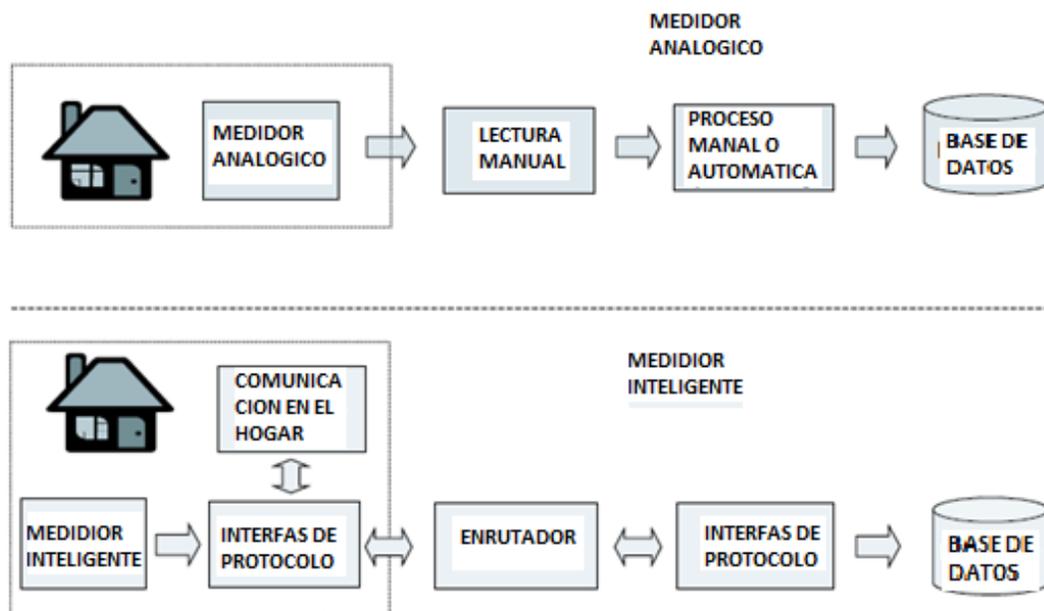
³⁴ F. Borghese, Evaluating The Leading-Edge Italian Telegestore Project, ENEL, Business Development Executive, Infrastructure and Networks Division.

³⁵ R. Gerwen, S. Jaarsma, R. Wilhite, Smart Metering, Distributed Generation Magazine, KEMA, 2006.

Este listado largo de ventajas podría cumplir algunos de los objetivos gubernamentales en términos energéticos que el gobierno del presidente Obama y de varias naciones europeas ha marcado como prioridad dentro de su administración y esta es la justificación de una inversión de más de \$300.000 millones de dólares para investigación, desarrollo de Smart Grid y energías renovables³⁶.

Como se menciona en³⁷, la empresa de medición se enfrenta al reto de sustituir inicialmente los medidores antiguos por los medidores inteligentes. Cuando los medidores inteligentes se encuentren instalados, se requerirá otro tipo de operación para la recogida y comunicación de los datos. Como los contadores inteligentes introducen una gran cantidad de flujo de datos, se deben preparar procesos y sistemas que deben ser adaptados y preparados en consecuencia para un correcto funcionamiento. La recolección de datos no dependerá de los clientes ya que será un proceso automático y remoto que reduce el trabajo de recolección manual.

Figura 13. Diferencia entre el proceso de manejo de datos en medidores



Cuando todo el consumo de energía sea monitoreado por los medidores inteligentes, las empresas de distribución recibirán información más detallada en

³⁶ Smart Grid—Building on The Grid, The Association of Electrical and Medical Imaging Equipment Manufacturers, 2009.

³⁷ Ibid., p. 48.

tiempo real sobre el consumo de sus clientes en las regiones donde disponen del servicio. Esto significa que las empresas pueden examinar aéreas sospechosas donde el consumo de energía es más alto de lo esperado, así los medidores inteligentes proveerán a las empresas operadoras de la red una herramienta para detectar los fraudes. En tiempo de recortes de energía o escases en la producción, la empresa operadora de la red tiene la opción de limitar el uso de energía o cortarla remotamente. Reuniendo todos los datos de consumo la empresa operadora de la red podrá predecir los flujos de electricidad con mucha más exactitud y usar este conocimiento para realizar mantenimientos a la red.³⁸

Para el proveedor, los medidores inteligentes tienen la posibilidad de ofrecer nuevos servicios a los consumidores de valor agregado, es una de las muchas ventajas mencionadas en³⁹. También para el proceso de facturación, el consumo en tiempo real puede ser usado para tener un control de los clientes más estricto, observando sus gastos y simplificando la tarea de obtención y manipulación de los datos.

En el Anexo I se muestra un ejemplo de los beneficios con el sistema de lectura automática del medidor para una situación típica americana, muy aplicable a Colombia puesto que hay muchas similitudes en el modelo y sistemas de generación, transmisión y distribución. Los ahorros de lectura se refieren a la reducción directa e indirecta de la labor de lectura manual de los contadores. Esta reducción se inicia en la no necesidad de utilizar los servicios del centro de control de lectura, facturación y desconexión de usuarios infractores. Las mejoras de estos procesos incluyen la reducción de robo de energía, mejor precisión de facturación y un control más exigente a la cartera del operador de la red.

2.2 LA EVOLUCIÓN DE LA RED ACTUAL HACIA UNA SMART GRID

2.2.1 El futuro de la medición inteligente. No hay duda sobre los beneficios de la medición inteligente, los medidores inteligentes parecen ser una de las más grandes innovaciones de estos años e indispensable para cualquier parte del mercado energético basado en Smart Grid.

- Para empresas dedicadas a la medición de consumo eléctrico, hay disminución de costos por lectura.
- Para las empresas operadoras de la red, que quieran preparar su red para el futuro.

³⁸ H. Mantooth , Perspectives on Smart Grid from Generation to the Meter and Into the Home, IEEE POWER ELECTRONIC SOCIETY, 2010.

³⁹ Ibid., p. 50.

- Para empresas generadoras que deseen introducir, nuevos servicios y mejor control sobre la energía generada y despachada.
- Para gobiernos que desasen alcanzar ahorros energéticos e impulsar nuevos mercados.
- Para los consumidores finales, que aumente su conciencia energética reduciendo el consumo de energía y el costo de la misma.

La introducción de la medición inteligente parece ser un paso lógico en un mundo donde las comunicaciones son digitalizadas y estandarizadas y donde el costo de la “inteligencia digital” tiende a decrecer muy rápido⁴⁰.

Sin embargo, se deben enfrentar dos obstáculos muy importantes al introducir la medición inteligente. El primero se debe a que al existir muchas partes involucradas en el proyecto, los beneficios podrían ser acumulados por partes diferentes a las que realizan la inversión. Segundo, existe mucha incertidumbre por la cuantificación de beneficios, muchos inversionistas privados ven con mucha cautela la inversión, pero muchos investigadores académicos y del sector económico invitan a tomar riesgos.

Actualmente para luchar contra estos imprevistos, se deben implantar estándares internacionales que adopten reglas, deberes y derechos para las partes involucradas como las empresas y los usuarios, de esta manera al tener una legislación bien establecida es más posible la inversión abierta de capital y la adopción por parte de los consumidores, porque se sentirán más respaldados, Cambiando de manera total la forma en la que se compara energía.

2.2.2 La red de energía actual. La red eléctrica actual es resultado de una rápida urbanización y un desarrollo en la infraestructura en varias partes del mundo en el siglo pasado. Aunque muchas de las compañías de energía adoptaron modelos muy similares, el crecimiento de cada central eléctrica ha sido influenciado por factores económicos, políticos y geográficos; que es único e independiente para cada compañía.

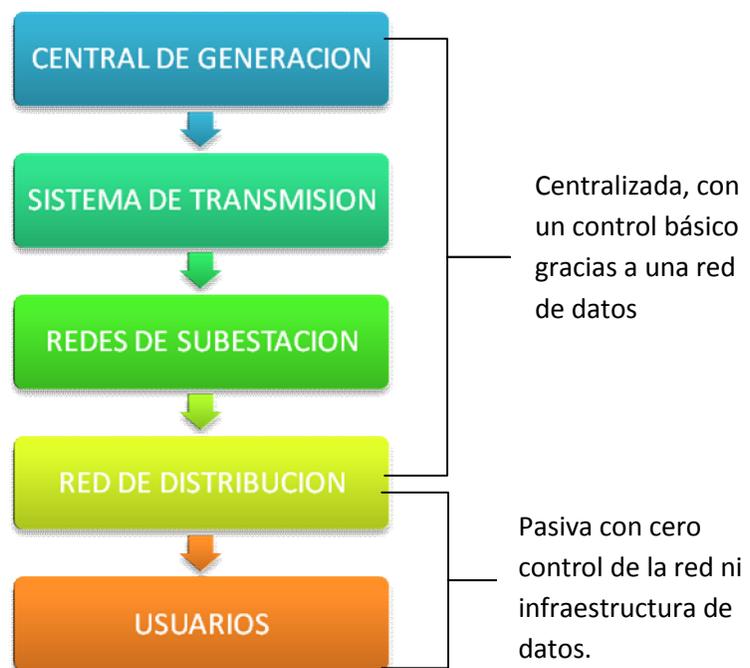
En la Figura 14 se muestra la red actual, definida como estrictamente jerárquica, en la cual se encuentran en la parte superior de la cadena las empresas que suministran energía eléctrica y al final de la cadena se encuentra las cargas de los consumidores finales. El sistema es de una sola vía, donde las empresas reciben poca información en tiempo real sobre el comportamiento y parámetros en los

⁴⁰ Mario Hernández, Inteligencia en la Red Eléctrica, Instituto Universitario de Ingeniería Computacional SIANI, Universidad de las Palmas de Gran Canarias, España, 2009.

puntos terminales. Un problema muy visible dentro de esta estructura es la poca fiabilidad del servicio, debido al aumento casi exponencial de la población que exige el cubrimiento del servicio de energía eléctrica, es por esto que las inversiones dentro del sector de energía eléctrica solo se ubican en mejorar la infraestructura para garantizar un mejor cubrimiento del servicio.

Para facilitar la solución de problemas y garantizar el mantenimiento las compañías de electricidad han introducido varios niveles de “command and control” o de sistemas de monitoreo. Un ejemplo muy básico que cubre todo este tema es la instalación de sistemas SCADA (Supervisory Control And Data Adquisition). Estos sistemas proveen un control muy limitado sobre todas las funciones globales que se manejan, este sistema se está implantando en algunos sectores de la red por parte de la empresa de energía eléctrica en Pasto CEDENAR.

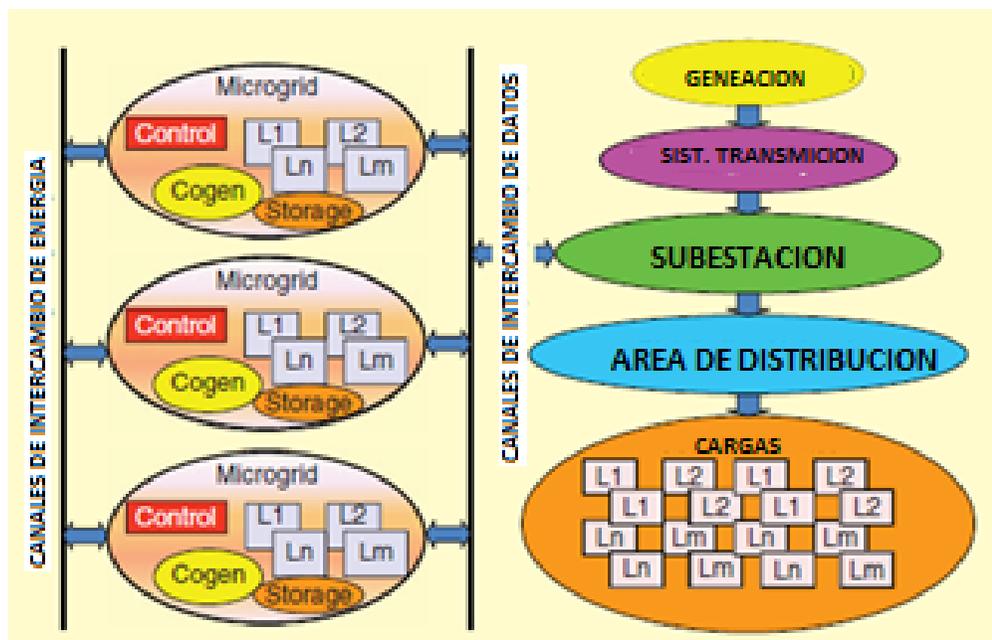
Figura 14. La red de electricidad actual



2.2.3 Coexistencia de las dos redes eléctricas (smart grid y red actual). Las compañías de energía eléctrica necesitan que los sistemas AMI, sean implementados en gran medida para que sean la interfaz que produzca el cambio hacia una Smart Grid. Los costos que implica la instalación de sistemas AMI son muy altos por lo tanto el proceso de cambio debe tener una duración prudente y no ser un cambio apresurado, por lo tanto Smart Grid y la red actual deben coexistir y con el tiempo migrar de un sistema a otro. Como se muestra en la

Figura 15, se plantea un modelo híbrido entre Smart Grid y la red existente teniendo como puntos adyacentes un canal de flujo de energía y un canal de datos para la monitorización, control y administración de la red actual. Cabe resaltar en este punto que el presente proyecto plantea la creación de una microgrid, que coexista con la red actual (semejante al de la Figura 15) con la puesta de tres generadores distribuidos y un centro de control que los controle autónomamente de acuerdo a los perfiles de demanda de las cargas. Con el objetivo de analizar algunas estrategias de control mencionadas más adelante.

Figura 15. Topología de una red Smart Grid en transición



2.2.4 Beneficios de una Smart Grid frente a la situación actual, análisis en el Departamento de Nariño y la ciudad de Pasto. En la Tabla 12, se muestra una comparación entre Smart Grid y la red existente. Se pudo identificar muchos beneficios cuantificables para la Smart Grid si se llegase a una implementación de la red inteligente.

- Eficiencia en la generación (desplazamiento de la demanda a horas de generación más eficiente).
- Acceso de los usuarios a tarifas flexibles, aprovechando el uso de energía a menor costo.
- Reducciones de demanda residencial por la inclusión al sistema de generadores distribuidos.

- Reducción de pérdidas de energía por más del 30%, a causa del óptimo factor de potencia y balance del sistema.
- Mejoramiento del sistema para prevenir y/o predecir apagones incluso mejorar la respuesta para la restauración del sistema en caso de ocurrir uno.
- Ahorro de costos para las empresas al realizarse de manera autónoma las desconexiones y reconexiones del sistema.
- Ahorro para las empresas al no tener que contratar empresas terceras que se encarguen del control de consumo de cada usuario para crear facturación ya que el sistema lo realiza autónomamente.
- Inclusión de generadores distribuidos y el uso de energías verdes.
- Reducción de costos de generación por uso de óptimos niveles de generación que involucren solo la cantidad de energía generada.

Tabla 12. La red Smart Grid comparada con la red actual

Red eléctrica actual	Red eléctrica con Smart Grid
Electromecánica	Digital
Una sola vía de comunicación	Dos vías de comunicación
Generación centralizada	Generación distribuida
Jerárquica	En red (sin jerarquía)
Pocos sensores	Sensores sobre toda la red
Siega	Auto monitoreada
Restauración manual	Restauración automática
Fallas y apagones	Fuentes adaptativas y de backup
Chequeo/testeo manual	Chequeo/testeo automático
Control limitado	Control persuasivo
Pocos sub servicios para los consumidores	Muchos sub servicios para los consumidores

2.2.4.1 Beneficios de la energía suministrada por Smart Grid en comparación a energía centralizada. El proyecto Smart Grid surge con el objetivo de mejorar la eficiencia y la fiabilidad de la red eléctrica, adaptándola a las necesidades actuales y teniendo en cuenta la problemática del cambio climático. A pesar de que los sistemas eléctricos son en un gran porcentaje fiables las interrupciones tienen un costo anual muy alto, por ejemplo en EEUU la fiabilidad del 99,97 %, no es suficiente ya que las interrupciones traen pérdidas de más de un costo anual de \$150 mil millones, Además de esto el incremento de la demanda debido al crecimiento tanto demográfico como de productos de consumo han multiplicado las fallas en el sistema.⁴¹

⁴¹ U.S. Department of Energy & Litos Strategic Communication, The Smart Grid: An Introduction, Octubre 2008.

La red inteligente transforma radicalmente la manera de generar, distribuir y consumir energía eléctrica maximizando la eficiencia en todas las etapas y niveles, minimizando los costos, analizando la situación actual de la red y el precio instantáneo de la electricidad. Los beneficios de una Smart Grid impactan sobre la energía primaria beneficiando a la comunidad en general permitiéndoles a los usuarios tarifas más flexibles, analizando información bidireccional consumo-generación recibiendo informaciones de precios, aprovechando el uso de la energía a menor costo y reduciendo las emisiones de efecto invernadero debidas a menor generación.

El uso de generación eléctrica por medio de combustibles fósiles y nucleares es motivo de preocupación hoy para el planeta, junto con el aumento de emisiones altamente contaminantes que agravan día a día el problema del calentamiento global. Junto con lo anterior debe mencionarse la continua alza del precio del petróleo, a través de los años, los problemas políticos internos de países súper-productores de petróleo, hacen mucho más delicado encontrar un precio estable, lo que infiere en aumento del precio de la energía, y muchas veces la reducción de la capacidad de generación.

Son estas algunas de las razones por la cual Smart Grid nace en países desarrollados como solución al problema energético, por la cual pretenden dejar de depender del precio del petróleo extranjero, crear su propia capacidad de generación eléctrica, evitar la compra de energía a otros países y ser energéticamente sostenibles, todo esto gracias al control y monitoreo de los recursos de la red eléctrica.

- **Situación actual en Colombia.** Gran parte de la generación eléctrica en Colombia es ofrecida por hidroeléctricas y PCH, estas producen menor cantidad de impactos ambientales en especial las PCH en comparación a otras tecnologías.⁴² A pesar de esto el uso de las centrales hidroeléctricas traen consigo problemas ambientales, los más relevantes, son: la división del río en dos secciones ocasionando la división de las especies aguas arriba y por debajo de la central, perjudicando la especie de Peses Ascensores además de causar un cambio en el ecosistema original.

En Colombia tanto las empresas generadoras como el Gobierno aseguran que Colombia está preparada desde el punto de vista eléctrico para afrontar fenómenos naturales. Según la firma XM, que es la administradora del mercado de energía mayorista, por lo pronto las preocupaciones están alejadas ya que el Índice General Energético (IGE) que plantea la diferencia entre el valor del embalse útil esperado en un escenario de referencia respecto al valor del embalse real presentado, se encuentra en niveles del 11,63 %.

⁴² Análisis de Ciclo de Vida de tecnologías de generación eléctrica (Impactos Ambientales de la Producción Eléctrica)

Siempre que el indicador sea positivo, significa que el valor real está por encima del valor del escenario de referencia, lo que representa una ganancia en el nivel del embalse.

Por otra parte, las consecuencias del fenómeno de La Niña o El Niño marcan la producción energética, por ejemplo la falta de lluvias trae consigo pequeñas reservas en los embalses disminuyendo la energía generada, El Niño tiene un impacto considerable sobre la generación de energía eléctrica del país, como el sucedido en los años 1991- 1992 y 1997-1998.

A pesar de que el 64,1% de la energía en Colombia es brindada por generadores hidroeléctricos parte del porcentaje restante se debe a recursos térmicos, el incremento en el precio de los combustibles como el carbón, el petróleo, entre otros influye directamente aumentando el precio del kWh y las pérdidas de la red se han vuelto significativas. La producción requiere el uso de más carbón, petróleo y gas natural como reemplazo del agua, cuando esta escasea durante temporadas anuales de verano y cuando se presentan fenómenos climáticos como El Niño aumentando las emisiones de gases de efecto invernadero.

Las estadísticas brindadas por XM Expertos en mercado sobre el consumo promedio de combustibles para generación de energía, aumento en casi 47 % 2008 con respecto al 2009 y en el 5 % 2009-2010, como se puede observar en la tabla 13.

Tabla 13. Consumo de combustible en el SIN 2008 a 2010

Combustible	2008	2009	2010	Participación en 2010
Gas	49137,8	92649,4	102178,9	72,9%
Carbón (2)	22048,7	37108,1	32162,4	23%
ACPM	4,1	2154,4	3737,9	2,7%
Fuel Oil	222,7	1096,0	2012,4	1,4%
Queroseno	0	61,9	12,8	0%
Total	71413,3	133114,9	140104,4	100%

- **Beneficios ambientales por Smart Grid.** En la actualidad por razones medioambientales se busca limitar la utilización de la generación térmica, ya que el 78% de las emisiones de gases de efecto invernadero tiene origen energético (Fuente: Ministerio de Medio Ambiente) para esto se quiere integrar nuevas fuentes de energía renovables permitiendo reducir las emisiones de dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero a la

atmosfera. Smart Grid incluye las GD pequeñas y micro energías renovables, disminuyendo las pérdidas en transmisión y distribución reduciendo el precio de kWh al consumidor final.

En el Departamento de Nariño, hay 5 centrales hidroeléctricas que soportan el 18% de la demanda total, al implantar generadoras distribuidas en el departamento especialmente en lugares cercanos a la ciudad se podría suplir un porcentaje de la demanda restante reduciendo la necesidad de comprarla al resto del país, trayendo consigo una disminución en las pérdidas por transmisión y brindar una energía más limpia, en el capítulo 4 se realiza un análisis general de las energías renovables y su factibilidad en la ciudad de Pasto y sus alrededores, de donde se concluye que es una buena opción la generación por desgasificación en vertederos, metanización y PCH. La generación eólica y solar son una solución a los problemas de generación, aunque su relación costo/beneficio no es muy alta se puede efectuar un análisis más detallado en el sector donde se requiere la instalación.

La implementación de un generador por desgasificación del vertedero “Relleno Sanitario Antanas” ubicado en el kilómetro 35 vía al norte de la ciudad de Pasto disminuiría la emisión de gases de efecto invernadero, como es el metano, a la atmósfera, esto traería una doble remuneración económica, la primera por la generación de electricidad y la segunda por la venta de bonos de carbono propuestos por el protocolo de Kioto como se menciona en el capítulo 4. A pesar de que los costos de inversión son muy altos superiores a un millón de dólares (US \$ 1'000.000) se podrían recuperar por la capacidad generada.

La instalación de pequeñas centrales hidroeléctricas son posibles debido a la hidrografía del departamento de Nariño por la cantidad de vertientes, las más importantes son: la vertiente del Pacífico, que comprende los ríos Patía, Guátara, Mayo, Juanambú, Pasto, Iscuandé, Mira y Mataje, y la vertiente Amazónica formada por los ríos Guamuez, Churuyaco, San Miguel, Patascoy, Afiladores y Lora. Únicamente 5 ríos son utilizados actualmente para la generación eléctrica y pertenecen a la empresa de Centrales Eléctricas de Nariño.

Como se menciona en el capítulo 4, los costes de inversión e implantación dependen de diversos factores como la orografía del terreno, los accesos, el tipo de instalación, el tamaño, la potencia y el punto de conexión.⁴³ La obtención de energía a través de minicentrales hidroeléctricas es uno de los sistemas de producción energética más limpio y respetuoso con el medio ambiente, como indica el estudio Impactos Ambientales de la Producción Eléctrica, análisis de ciclo de vida de ocho tecnologías de generación eléctrica (IDAE 2000). Como toda actividad humana provoca alteraciones sobre el

⁴³ Minicentrales hidroeléctricas, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

entorno donde se desarrolla, pero si se realizan adecuadamente todas las medidas minimizadoras de los impactos ambientales que produce, la energía mini hidroeléctrica resulta una alternativa completamente viable y necesaria en el futuro.

Según el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía las emisiones evitadas de CO₂ en el año 2010 son de 472.812 tCO₂, debido al incremento de potencia previsto de la energía hidroeléctrica entre 2005-2010.

De acuerdo a lo anterior se puede inferir que al existir un mayor número de opciones de generación eléctrica, podría ayudar a reducir en cierto porcentaje la cantidad de energía generada por las centrales hidroeléctricas, disminuyendo el uso del recurso hídrico en generación y dejándola fluir. Este excedente aumentaría el nivel de agua en los ríos, de esta manera aumentarían los proyectos productivos agrarios (mejores sistemas de riego al existir mayor caudal), en verano el nivel de agua no sería tan bajo por lo que no afectará la producción agrícola, debido a que se retiene agua para garantizar un nivel de producción de energía.

De igual forma, el dejar de usar los recursos hídricos reducirán el daño colateral que se hace al medio ambiente por quitarle sus recursos, devolvería fertilidad a los campos, no se seguiría cambiando el hábitat a la fauna silvestre que se alimenta de las cuencas hidrográficas, volvería fertilidad a los ríos, puesto que reducir el nivel de agua a los ríos causa disminución de oxígeno en el agua. A las comunidades indígenas que viven cerca de las cuencas hidrográficas se respetaría su cultura, ya que el río es parte de sus creencias milenarias y ancestrales. Devolver los recursos hídricos evitaría el represamiento de lagunas y ríos, evitando el desarraigo de la población que debe ser reubicada para evitar desastres a causa de inundaciones en temporada invernal.

Por otra parte la generación por Metanización en el departamento de Nariño podría ser una buena opción debido a la gran cantidad de residuos que se pueden aprovechar como forestales y cultivos agrícolas, residuos de industrias agroforestales, combustibles líquidos derivados de productos agrícolas, los denominados biocarburantes, residuos de origen animal o humano, debido a ser un departamento agrícola. Esto supone unas ventajas medioambientales de primer orden, como son: Disminución de las emisiones de azufre, CO₂ y emisiones de partículas sin contribución al efecto invernadero, reducir emisiones de contaminantes como CO, HC.

Además, se mejoraría socioeconómicamente las áreas rurales, representando una fuente potencial de empleo en el futuro en la construcción, operación y mantenimiento. Permite su uso a los corregimientos donde la energía es

escasa y costosa de transportar para el SIN, siendo un elemento de gran importancia para el equilibrio territorial, en especial en las zonas rurales.⁴⁴

- **Hidroeléctricas problema ambiental.** El agua es el factor más importante y su principal característica es que constituye un ecosistema extremadamente frágil. La alteración que va a sufrir el caudal de agua crea el impacto más fuerte. La interrupción de la corriente de agua se traduce en una alteración directa sobre la población piscícola, disminuyendo además la capacidad de autodepuración del cauce en el tramo interrumpido. Aguas arriba: existirá una disminución de la velocidad de flujo que desencadenará la deposición de los materiales transportados en suspensión. Esto puede afectar incluso al nivel de la capa freática. Aguas abajo: el curso de agua tendrá una mayor capacidad erosiva.

En el tramo donde se ha construido la minicentral: los efectos serían de menor importancia, pero alteran igualmente el ecosistema. Según la magnitud de la presa o los diques, se alterará el microclima por las aguas remansadas (estratificación de temperatura, evaporación, formación de neblinas, etc.). Pérdida de calidad de las aguas a consecuencia de vertidos accidentales al río como consecuencia de las labores de construcción, movimientos de tierra, etc. o por la proliferación de algas en el embalse. Efectos barrera para la población piscícola por la construcción de la presa.

Invasión del terreno al levantar las instalaciones necesarias para el funcionamiento de la minicentral, y al abrir los caminos de acceso. Erosión del suelo al desaparecer la cubierta vegetal en aquellas zonas donde ha habido movimiento de tierras para levantar el edificio principal, caminos de acceso, tuberías, canales, etc.

Pérdida de cobertura vegetal por los movimientos de tierra que se derivan de las obras de construcción e inundación de márgenes por la construcción de presas y azudes. Cambios en los tipos y/o la estructura de las comunidades ripícolas por la modificación del flujo de caudal, aguas abajo de la central.

La fauna piscícola es la más afectada por la minicentral, ya que la presa o azud representa cambios muy notables en las condiciones de su hábitat, además del efecto barrera de las presas y azudes sobre las migraciones de peces, que remontan los ríos para desovar. Pérdida del hábitat de algunas especies terrestres debido a la desaparición de parte de la cobertura vegetal durante la fase de construcción y por la inundación de zonas para la creación de la presa o azud. Dificultad en la movilidad de determinadas especies que no puedan cruzar la superficie de agua embalsada. Aumento de la mortandad de las aves de la zona a consecuencia del tendido eléctrico conectado a la minicentral.

⁴⁴ Energía de la biomasa, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

Desplazamiento de especies sensibles a los ruidos provocados por la actividad desarrollada en la construcción y funcionamiento de la central.

- **Beneficios económicos y sociales en la ciudad de Pasto.** La sociedad tiene a la energía eléctrica como motor y mecanismo de desarrollo para todas las actividades, y desde el siglo XIX se la utiliza con recursos que se concebían inagotables y duraderos; pero el tiempo y los daños causados al ambiente han determinado que ningún recurso es infinito y si se utiliza indebidamente este perecerá.

Los beneficios sociales que Smart Grid crea, son la motivación a la investigación, el planteamiento de nuevas soluciones que ayuden a corregir los vicios presentes en la administración de la energía actual, la creación de empleo por la necesidad de potencial humano que diseñe, cree e innove en nuevas herramientas que puedan ser usadas en esta tecnología. Crea la posibilidad de que más personas accedan al servicio de energía puesto que Smart Grid no es un sistema centralizado sino que tiende a ser independiente y abierto. Además crea precios más cómodos y bajos con lo que mucha más gente puede acceder a ella.

- **Beneficios en el control por Smart Grid.** El control propuesto en esta investigación busca la mayor eficiencia cubriendo la demanda solicitada, trabajando bajo el mínimo costo y la oportunidad de generar energía renovable. El control que se da para la microgrid analizada se desarrolla en el capítulo 5, plantea cuanta energía debe producir cada GD dependiendo de la demanda solicitada por las cargas y su costo de generación; produciendo lo necesario, encontrando un ahorro significativo de combustible y dinero. Otra ventaja es la disminución del desgaste de las máquinas puesto que no se trabaja en un máximo de generación para producir más rentabilidad. Una ventaja global del sistema de control es la reducción en el precio del kWh cuando la demanda sea baja y un precio más caro en horas pico, utilizando la metodología de respuesta a la demanda lo que crea un mercado más flexible y ventajoso para los usuarios, los agentes generadores y las empresas de comercialización.

Las ventajas sociales que se encuentran en el sistema de control son todas las posibilidades nuevas de investigación que traten planes de desarrollo en búsqueda de mejores y nuevas alternativas de energía y procesos productivos. Al establecerse un nuevo mercado las posibilidades de creación de nuevas empresas comercializadoras y generadoras abren la oportunidad laboral, se deja de tener un mercado centralizado y monopolizado. Los usuarios tienen más opciones de compra y se vuelve un servicio verdaderamente público porque tendrá más penetración en más espacios geográficos, ya no solo será un privilegio de las ciudades capitales, invitando a las poblaciones rurales al

progreso, ya que la energía se encontraría donde se necesitase mas no donde es posible usarla.

- **Beneficios en comunicación por Smart Grid.** Dentro de una red inteligente, es de gran importancia el medio físico por el cual se intercambia información. Mejorando características de velocidad, seguridad de la información transmitida, capacidad de datos a ser transmitidos, costos, etc., lo cual permite escoger entre diferentes medios de transmisión. En la actualidad se puede encontrar medios de transmisión inalámbricos, fibra óptica, cable UTP, coaxial, etc., que son utilizados para la transmisión de datos, pero para poder hacerlo necesitan elevados costos de instalación. En la ciudad de Pasto, sería ideal la existencia de este tipo de medios físicos para poder transmitir datos de consumo de las cargas a una subestación, pero a diferencia de ello se puede encontrar un medio físico existente en todas las subestaciones que son las líneas de distribución. La tecnología PLC o BPL se basa en estas líneas de distribución como medio físico de transmisión, y en la ciudad de Pasto sería una solución para poder pasar de un sistema centralizado a un sistema distribuido. Los beneficios de implementar un sistema de comunicaciones dentro de una red eléctrica son los siguientes:

- Se deroga el control de energía a las empresas y a los consumidores, ya que las empresas controlan la cantidad de energía que se debe entregar al sistema y los consumidores controlan en que instantes consumir más energía, facilitándoles información más detallada sobre el consumo.
- Los datos detallados de consumo de la energía se recogen continuamente a intervalos regulares (por ejemplo, cada 30 minutos), proporcionando un buen nivel de manejo de los datos. Los detalles adicionales recogidos proporcionan a las empresas de energía, un mayor control sobre el manejo de carga y permite a los consumidores adaptar su uso para reducir los costos.
- Los medidores inteligentes pueden ser leídos de forma remota mediante un proceso automatizado, con los datos de uso, enviado a la dirección de la empresa de energía y el sistema de facturación. (Esto se conoce como la lectura de metro automática o AMR.)
- La comunicación bidireccional está disponible, entre el medidor y la utilidad y entre el medidor inteligente y el consumidor. Esto significa que además de proporcionar lecturas, el medidor también pueden recibir (y actuar) las instrucciones enviadas desde la utilidad o el consumidor.
- Permite a los consumidores controlar y administrar el uso a distancia (por ejemplo, para encender un calentador por unos pocos grados, o desactivar un artefacto) y notificación a los consumidores sobre el mal funcionamiento o problemas potenciales, tales como futuras reparaciones, alteraciones detectadas en un medidor de electricidad. Solución de algunos problemas de forma remota, por ejemplo, desconexión de la oferta en una situación potencialmente peligrosa.

3. ESTÁNDARES DESARROLLADOS Y SISTEMAS DE COMUNICACIONES EN SMART GRID

3.1 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS ESTÁNDARES DE SMART GRID

Muchos de los problemas que se podrían generar cuando los sistemas de Smart Grid se integran entre sí y al sistema de control son: la ausencia de interfaces universales, protocolos de mensajería y control. Se requerirán estándares para asegurar un lenguaje entre los sistemas de comunicación y las aplicaciones. Algunos ejemplos de estandarización de los sistemas de Smart Grid para que sean dispositivos plug and play son las normas ANCI C12.22 para medidores inteligentes e IEC 61850 para la automatización dentro de las subestaciones de control. Para cooperar con el desarrollo de estos estándares se están adoptando diferentes tecnologías para seccionar los niveles de inteligencia que tiene una Smart Grid en HAN, LAN y WAN.

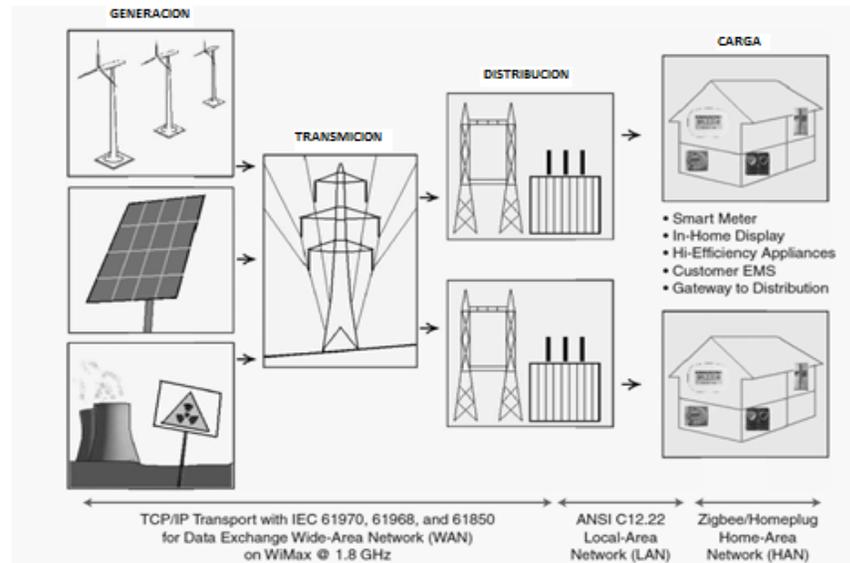
En HAN (Home Área Network), se utiliza para identificar la red de comunicación de datos de consumos, sensores y aplicaciones dentro de la propiedad de los usuarios, en pocas palabras se encarga de la comunicación del consumo que tenga el usuario para administrarlo y controlarlo inteligentemente dentro del hogar. Se tiene también una red LAN (Local Área Network), utilizada para identificar redes de integración de los medidores inteligentes, componentes de campo y puntos de acceso que se forman entre los generadores distribuidos y los usuarios. Por último se tiene WAN (Wide Área Network), utilizada para identificar la red de control de los generadores, los generadores distribuidos, almacenamiento distribuido y subestaciones. En la Figura 16 se muestra la distribución de funcionalidades de cada estándar de comunicaciones y qué función desempeñan en la Smart Grid.⁴⁵

Se han desarrollado estándares internacionales que establecen los requerimientos mínimos de desempeño (con calidad de servicio) para cada uno de los entornos definidos en la Figura 16. De esta forma se abre el mercado tecnológico para las diferentes compañías y fabricantes, siempre y cuando cumplan con los requerimientos de desempeño establecidos en los estándares. Existen estándares para cada uno de los entornos dentro de un sistema de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica, sin embargo una sola norma que los integre bajo un mismo esquema aún no se ha desarrollado, dada la complejidad requerida y la dimensión del sistema. Todos los adelantos que en materia energética y su efectiva administración se han venido presentando son apuntados a crear un

⁴⁵ HASSAN, Farhangi, "The Path Of Smart Grid", IEEE Power Energy Mag, January 2010

consenso que permita una comunicación punto a punto y un intercambio ágil de datos entre cada uno de los componentes de Smart Grid.

Figura 16. Estándares propuestos para Smart Grid



3.1.1 Estándares aplicados en Smart Grid. Los estándares que se aplican a Smart Grid como se muestra en la Figura 16, establecen las bases de comunicación entre los elementos de la red. Como Smart Grid en su concepto es el obtener una red inteligente con capacidad de manejo efectivo de la energía y de la red. Además de los estándares propuestos en la Figura 16, se considerara como se realiza el intercambio de información, el monitoreo y control de recursos distribuidos con el sistema de energía eléctrica dirigida por la norma IEEE 1547.3⁴⁶, se incluye el estándar IEC 60870⁴⁷ que determina la interconexión entre subestaciones remotas, los estándares DNP3.0 e IEC 60870-5-104⁴⁸ definen el intercambio de información entre estaciones remotas, RTUs (Remote Terminal Units) e IEDs (Intelligent Electronic Devices).

3.2 SISTEMA DE TELECONTROL PARA LA MICROGRID

La microgrid se constituye por una estación Central de Control de Operaciones, las cargas y tres estaciones remotas correspondientes a los generadores distribuidos de desgasificación de vertedero “Relleno Sanitario Antanas”,

⁴⁶ IEEE 1547_3, Guide for Monitoring, Information Exchange, and Control of Distributed Resources Interconnected with Electric Power Systems, 2007

⁴⁷ IEC 61850, Communication Networks and Systems in Substations.

⁴⁸ IEC 60870-5-104 Telecontrol equipment and systems – Part 5-104: Transmission protocols – Network access for IEC 60870-5-101 using standard transport profiles, 2006.

metanización ubicado en la granja de experimentación en Corpoica y a la pequeña central hidroeléctricas PCH Julio Bravo.

En la arquitectura de telecomunicaciones se manejan 5 nodos correspondientes a la estación central, los 3 GD y por último un nodo en las cargas; las cargas en particular son ya monitorizadas individualmente para obtener los datos consumo de cada uno de los usuarios industriales o domésticos según sea el caso de aplicación, la arquitectura de telecomunicaciones que se aplica para los usuarios es AMR (Automated Metering Reading). Para esta propuesta solo es necesario reducir el tiempo de envío de datos de las cargas hacia la estación central a 15 minutos como tiempo de establecimiento para el monitoreo de cada carga.

Las funciones de monitoreo y control remoto de los dispositivos son conocidas como “Sistemas de Control Supervisor y Adquisición de Datos” SCADA que corresponde a una red de comunicaciones ampliamente distribuida espacialmente, donde se combina la telemetría y adquisición de datos. Gracias a la telemetría se logra la interacción de equipos intercambiando datos o programas con distancias de metros o kilómetros entre ellos. Los equipos tanto de recepción como de transmisión deben usar la misma tecnología para codificar y decodificar la información manteniendo el mismo protocolo.

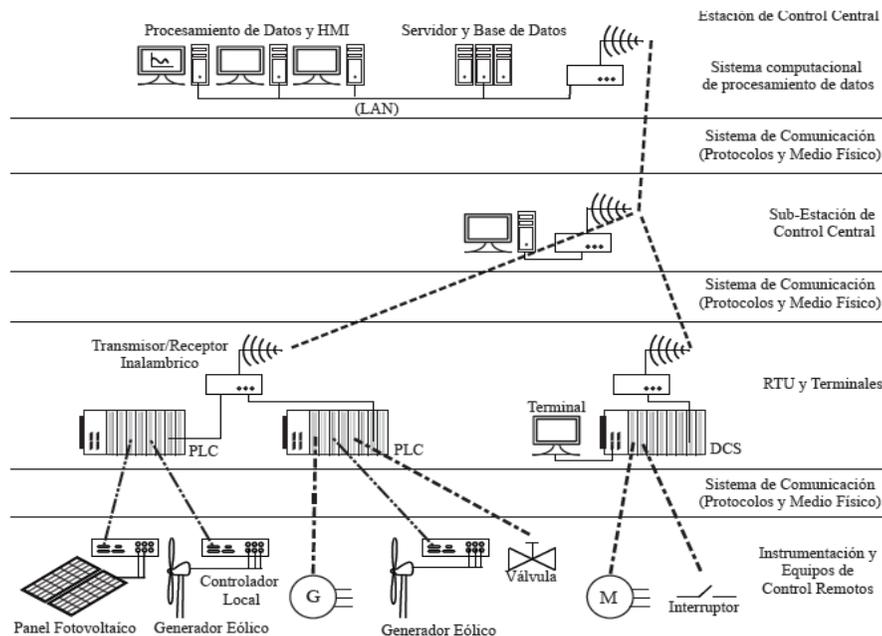
En una red SCADA, la información es recolectada en terreno por medio de una Unidad Terminal Remota (RTU, del inglés Remote Terminal Unit) que en nuestro caso estarían ubicadas en las cargas y los GD, posteriormente transferida por medio de una red de comunicaciones hacia una o varias Estaciones de Control Central (ECC) para su análisis. El sistema SCADA puede subdividirse en:⁴⁹

- **Instrumentación y equipos de control remotos (en terreno):** Corresponde a los instrumentos directamente involucrados en la medición sobre la que se quiere actuar, como son las máquinas giratorias, controladores, válvulas, contactores y sensores en general.
- **RTU y terminales ubicados en terreno:** Equipos de interacción con los dispositivos anteriores. Estos se encuentran ubicados en terreno, poseen lógica interna y comunicación a través de diversos protocolos. En esta categoría se encuentran los PLC, DCS e IED.
- **Sistema de comunicaciones:** Utilizado para transferir información entre los dispositivos de la red SCADA (RTU y ECC). Entre las posibilidades se consideran las señales de radio, radiofrecuencia, telefonía, cable, satélite, fibra-óptica, etc. Además del medio físico, existe un amplio conjunto de protocolos de comunicación correctamente normados y creados para aplicaciones de esta índole.

⁴⁹ Bailey, D. y Wright, E. “Practical SCADA for Industry”. IDC Technologies. 2003.

- **La Estación de control central (ECC):** Puede tratarse de un solo computador o un conjunto de estos conectados por una red interna local (LAN, del inglés Local Área Network). El ECC es la base del control y monitoreo del sistema en donde los operadores observan el funcionamiento y realizan acciones de control sobre este.
- **Sistema computacional de procesamiento de datos:** El software SCADA permite visualizar el funcionamiento del sistema y el análisis de este a través de indicadores, gráficos y alarmas derivadas de la información recibida por el ECC. Permite el monitoreo de las RTU y los dispositivos asociados, control remoto de estos y almacenamiento de información en bases de datos.

Figura 17. Configuración de hardware de un SCADA



En la central de operaciones se reúne toda la información capturada por las RTUs, para dar paso al procesamiento de la información recibida y posteriormente al control, mostrada por medio de indicadores, gráficos de tendencia, alarmas, etc. Como contraparte, el operador puede ejecutar acciones de control remotas. Dependiendo de la topología de la red, pueden existir varias subestaciones que recogen información de un área específica y luego la transmiten al centro de control.

3.3 MEDIOS FÍSICOS DE COMUNICACIÓN EN SMART GRID Y SISTEMAS DISTRIBUIDOS

En la actualidad los avances tecnológicos han desarrollado medios físicos diferentes para comunicar la información de dispositivos externos e internos de una red, cabe destacar que la información intercambiada y la forma en cómo se comunica esta información debe estar desarrollada en un mismo lenguaje para que así todos los elementos que conforman la red entiendan que acción se deba realizar. En sistemas distribuidos dentro de una Smart Grid se encontraron diferentes partes entre las que se debe transmitir información, estas partes deben arreglar la información a ser intercambiada de manera que la parte receptora entienda que información se le esté mandando.

Entre los medios físicos de comunicación más importantes trabajados en la actualidad en redes Smart Grid podemos encontrar PLC (Power Line Communication), GPRS (General Packet Radio Service) y HSPA (High-Speed Packet Access).

3.3.1 PLC (Power Line Communications). La tecnología PLC permite la transmisión de información digital usando las redes existentes de distribución de energía eléctrica. Para la transmisión de datos, voz y video en PLC se utiliza alta frecuencia (1,6 – 30 MHz).⁵⁰ La respuesta del canal es todo lo contrario a la ideal, este es variante en el tiempo dependiendo de la carga (del consumo de energía en cada momento) y tiene grandes fluctuaciones en frecuencia, es decir, es hostil y muy ruidoso. A estas frecuencias de trabajo la señal sufre una gran atenuación con la distancia. La función de transferencia del canal presenta desvanecimientos selectivos. Por todo ello se hace imprescindible utilizar sistemas de modulación muy robustos y adaptativos a las características del canal.

PLC aprovecha los niveles de media y baja tensión para el transporte de datos. Transforma esta parte de la red de distribución de electricidad en bucle de abonado.

- **Red de acceso PLC (Access Network):** Suministra el acceso de los datos y voz de los usuarios finales a la red de distribución que permite el acceso a los servicios. Consta de los siguientes elementos:
 - **Equipo de acceso de usuario (CPE):** El CPE dispone de un puerto de datos (ethernet / USB) en donde se conecta el equipo de datos del usuario (por ejemplo, un PC) y un puerto para la conexión de un teléfono analógico convencional, con el gateway de VoIP integrado en el CPE. Así mismo, el CPE

⁵⁰ Ignacio Mayans Porras, PLC (Power Line Communication), Redes de Datos y Servicios Multimedia Domésticos. Mayo de 2004.

contiene el módem PLC necesario para la inyección de la información digital (voz y datos) en los cables eléctricos para su transmisión.

- **Cables de la red eléctrica:** Aportan el soporte físico para la transmisión de la información digital entre los CPEs de los usuarios hasta la cabecera PLC.
- **Repetidores PLC:** No siempre presentes, se sitúan en los cuartos de contadores de un edificio concentrando la voz y los datos de los usuarios residentes en el edificio. Así mismo regeneran la señal para aumentar su alcance y eliminar errores de transmisión.
- **Cabeceras (Head End) PLC:** Concentran la información de todos los usuarios correspondientes al mismo Centro de transformación de media a baja tensión o, lo que es lo mismo, de todos los usuarios correspondientes a la misma malla de baja tensión.

En los Centros de Transformación (CT) se instala una Cabecera PLC que, por un lado se conecta a la red de datos y por otro a la red eléctrica, inyectando en la red eléctrica los datos provenientes de la red de datos y viceversa. Así pues, hasta el cuarto de contadores de una vivienda llegan dos señales:

- Una de baja frecuencia que transmite la energía eléctrica (corriente alterna de baja frecuencia, 50 ó 60 Hz)
- Otra de alta frecuencia en la que se transmiten los datos (1,6 – 30 MHz). El 'tramo PLC' asegura la capilaridad de la red. Es necesario ahora interconectar las cabeceras PLC a un backbone (red de distribución) de datos que sepa cursar el tráfico, aplicar calidades de servicio, ofrecer servicios de valor añadido, y en definitiva ofrecer a los usuarios todas las prestaciones de una red IP de última generación.

3.3.2 GPRS (Servicio general de paquetes vía radio). GPRS es una nueva tecnología que comparte el rango de frecuencias de la red GSM, el concepto principal que gobierna el comportamiento de GPRS es su orientación a la comunicación de paquetes. La diferencia principal entre una comunicación orientada a circuitos y una orientada a paquetes es la utilización de los recursos de red; mientras en circuitos se ocupa el recurso durante toda la comunicación, en paquetes sólo se requiere cuando existe algo que transmitir o recibir. Esto posibilita una mejora en la eficacia de uso de los recursos y permite tarificar no por tiempo de conexión, sino por volumen de datos intercambiados.

GPRS está basado en la arquitectura GSM incorporando dos nuevos nodos, el SGSN (Serving GPRS Support Node) y el GGSN (Gateway GPRS Support Node), cuyas misiones son complementarias. A nivel general, el SGSN es el que se

encargará de toda la gestión de la movilidad, y mantenimiento del enlace lógico entre móvil y red, mientras que el GGSN es el que proporciona acceso a las redes de datos actuales, sobre todo a las basadas en IP.

A nivel radio, los cambios requeridos son pocos, ligados únicamente a la introducción de una comunicación de paquetes sobre el interfaz aire. Básicamente se necesita introducción de software a nivel de BTS y un nuevo hardware en BSC, la PCU (Packet Control Unit), encargada de manejar la comunicación de paquetes.

- **Arquitectura de Red GPRS.** Como ya se explicó con anterioridad, GPRS es una red superpuesta a GSM, por lo que comparte con ella la red de acceso (GSM-IP). Para lograr esto, GPRS introduce dos nuevos nodos, GGSN y SGSN:

GGSN (Gateway GPRS Support Node): Actúa como un interfaz lógico hacia las redes de paquetes de datos externas (router). Se conecta a redes externas como Internet o X.25. Es un dispositivo de encaminamiento hacia una subred ya que hace que la infraestructura de la red GPRS sea transparente vista desde fuera. Cuando recibe datos dirigidos hacia un usuario específico, comprueba si la dirección está activa, y en caso afirmativo, envía los datos al SGSN y encamina hacia la red correspondiente los datos que origina el móvil

SGSN (Serving GPRS Support Node): Básicamente es un nodo de conmutación de paquetes que se sitúa jerárquicamente al mismo nivel que las MSC. Se encarga del transporte de los paquetes de datos hacia y desde BTS que se encuentran en su área de servicio, también cumple la función de detectar nuevos móviles GPRS en dicha área guardando un registro de su localización, consultando con el HLR el perfil del usuario, de gestionar la movilidad de los MS y controlar aspectos relacionados con tarificación, control de accesos y seguridad de las comunicaciones (encriptación y compresión de datos).

PCU (Packet Control Unit): Este elemento se introduce a nivel de BSC (Base Station Control), es el encargado de manejar la comunicación de paquetes.

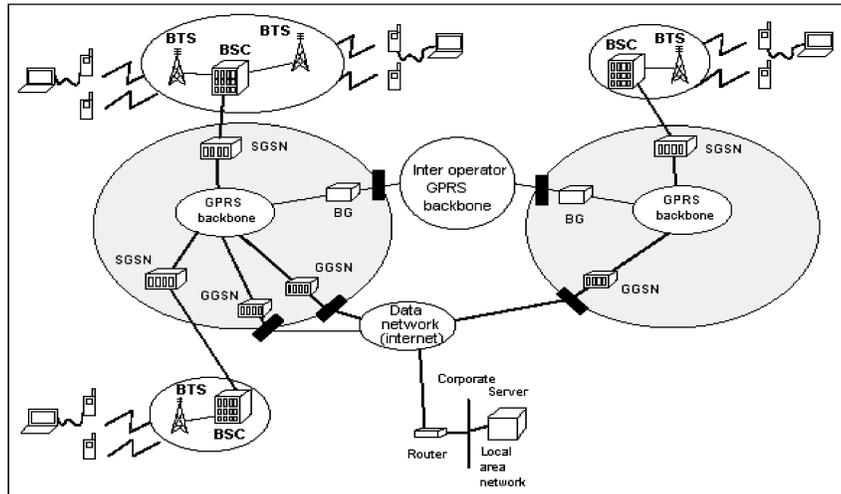
CG (Charging Gateway): Su función principal es recoger los CDRs generados por los SGSNs y GGSNs de manera que los consolida y pre-procesa antes de enviarlos al sistema de tarificación o BS (Billing System).

BG (Border Gateway): Básicamente es un nodo pasarela que realiza la interfaz entre backbones GPRS de distintas operadoras.

3.3.3 HSDPA (acceso de paquetes a alta velocidad en el enlace descendente). HSDPA mejora ampliamente el rendimiento de las transferencias de datos entregando tasas máximas teóricas de aproximadamente 14 Mbps. Este permite

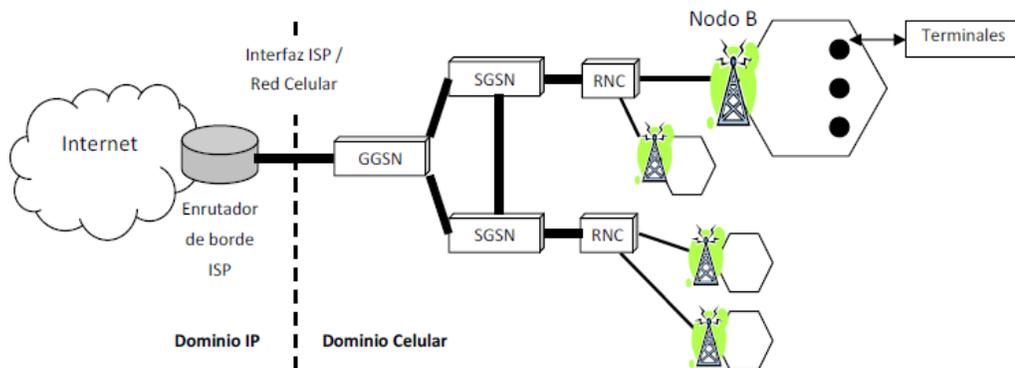
aumentar las tasas de transmisión de datos de las redes UMTS y permite la comunicación en paquetes. La Figura 19, muestra la arquitectura general de HSDPA.⁵¹

Figura 18. Estructura red GPRS



Análisis y Estudio de Redes GPRS, Juan Andrés Sánchez Wevar. Valdivia 2005

Figura 19. Arquitectura general de una HSDPA



- **Servicios.** Una de las ventajas que entrega HSPA es el soporte a una gran variedad de servicios, debido a la capacidad de transmisión que posee esta tecnología. El desarrollo de servicios se encuentra bastante avanzado, debido a la existencia de contratos entre proveedores de infraestructura, terminales y

⁵¹ Roberto Bustamante Miller, Carolos Andrés Viteri Mera, Modelo de simulación de una red HSDPA en ns-2.

proveedores de servicios; así como entre proveedores de servicios y proveedores de contenidos.⁵²

Los servicios especificados para HSPDA son: multimedia o streaming (donde se encontró tráfico altamente interactivo como por ejemplo los juegos, mensajes, multimedia y videotelefonía; preserva la variación de tiempo entre paquetes. Retardo constante pero necesariamente reducido.), voz (streaming de sonido y VoiP; preserva el límite del retardo y la variación de tiempo entre paquetes. Este retardo es pequeño, constante y en tiempo real), interactivo (tráfico HTTP y web browsing; modelo de petición y respuesta. Preserva el contenido de los datos. Posee retardos moderados, no en tiempo real y bajas tasas de errores), back ground (descarga de archivos FTP, MMS y SMS; preserva el contenido de los datos).⁵³ Los requerimientos de calidad de servicio se especifican en la Tabla 14.

Tabla 14. Requerimientos de capacidad QoS para una red triple-play.

Parámetro	Multimedia	Voz	Interactivo	Background
Tasa de transmisión requerida	384 Kbps 2 Mbps	30 Kbps	144- 384 Kbps	-
Máximo retardo extremo a extremo	100 ms	100 ms	1 seg	-
Máxima variación de retardo	50ms	50 ms	-	-
Máxima tasa de pérdida de paquetes	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}	-

3.3.4 Funcionamiento de los medidores inteligentes o Smart Meters. El medidor inteligente puede ser usado para medida de electricidad entregada por los generadores distribuidos a la red y las cargas de la microred, la infraestructura de comunicación de los medidores inteligentes se puede utilizar para controlar de forma remota los GD o las cargas dependiendo del control realizado desde la subestación o estación de control.

Los medidores electrónicos viables están basados en DSPs (Digital Signal Processing o Procesamiento de la Señal digital) programables o de función fija,

⁵² Samuel Ignacio Rodríguez, Modelo de calidad de servicio para una red de datos HSDPA (High Speed Downlink Packet Access) para el entorno local memoria para optar al título de ingeniero civil Electricista. Cardemil.

⁵³ *Ibíd.*, p. 70.

estos digitalizan las señales de corriente y voltaje por medio de ADCs (analog-to-digital converters o convertidores análogo-a-digital) antes de hacer los cálculos. El procesamiento digital de las señales permite el cálculo estable y exacto por encima de las variaciones de tiempo y medio ambiente. Las soluciones con DSPs programables ofrecen la ventaja de reconfiguración post diseño. Obviamente, la facilidad de la reconfiguración es una consideración importante para cualquier medidor electrónico pero un DSP programable no es el método más exacto o el más económico de conseguir un medidor que ofrezca la flexibilidad de la reconfiguración.⁵⁴

Primero, un microprocesador de bajo ancho de banda complementa un DSP de función fija para operar el sistema de comunicaciones y pantalla (display) electrónica. Al quitarle la gran carga computacional, la potencia y costo del aparato microprocesador puede ser reducido en forma considerable. Muchos diseños de medidores de energía se han fabricado en el último año con microprocesadores de 4MHz y 4-bits. El micro-controlador permite un grado limitado de configuración al mismo tiempo de manejar algunas funciones operativas internas (house-keeping functions), como:

Encriptación y demodulación de datos para las redes de comunicaciones, grabación de la hora (time stamping) para facturación multitarifa, inteligencia sobre el suministro de energía (detección de apagones, desconexión remota, prepago, administración de cargas). El microprocesador permite a los usuarios seleccionar el nivel de servicio que deseen y/o la empresa de servicios públicos puede configurar remotamente cada medidor.⁵⁵

Segundo, los productos standard basados en DSPs de función fija usan ADCs integrados que digitalizan las ondas de voltaje y corriente a la más alta resolución a un costo muy bajo. Los DSPs programables que intentan integrar la conversión análogo-a-digital fallan en la habilidad de continuamente efectuar sobre muestreo a las señales análogas. La selección de una arquitectura ADC para los DSPs programables tendrá mayores costos y tendrá unos resultados más bajos en el número efectivo de bits de resolución.

Tercero, los DSPs programables tienen un error inherente porque éstos están limitados por un procesamiento discreto del tiempo. La potencia consumida durante los intervalos de los cálculos no es registrada. Un producto con un DSP de función fija usa ADCs de muestreo continuo y calcula la energía activa continuamente procesando la señal de potencia instantánea.

⁵⁴ P. Daigle, La Tecnología Moderna se da cita con los Medidores de Energía, Analog Divices Publications, Product Marketing And Publisity, Wilmington, Massachusetts, 2001.

⁵⁵ Ibid., p. 71.

Finalmente, el costo de los DSPs programables puede ser expresado en términos de tiempos más largos para llegar al mercado, costo de programación del código fuente, y costos unitarios más altos. El mayor costo unitario pierde sentido cuando el usuario se da cuenta que “programable” implica circuitos adicionales que no se están utilizando. La simpleza de un DSP de función fija ofrece un bajo tiempo para llegar al mercado y costos generales bajos. Un micro-controlador programable de 4 bits siempre será menos costoso que un DSP programable de 16-bits.

3.4 ESTRUCTURA PROPUESTA DE LOS MEDIOS DE COMUNICACIONES A UTILIZAR EN LA MICROGRID DE LA CIUDAD DE PASTO

La estructura de la microgrid planteada en la ciudad de Pasto Figura 20, se adapta a dos medios de comunicación. Para realizar la transmisión de datos de las cargas al centro de control de operaciones se hace uso de la tecnología HSDPA, debido a la ubicación de las cargas y a la presencia de esta tecnología en la zona urbana. En relación a los GD, la información de control a ser enviada se realiza a través de la tecnología GPRS ya que esta tecnología se encuentra en la zona rural de la ciudad de Pasto al igual que la ubicación de los GD.

El flujo de información planteado se indica en el Anexo H. Esta información debe estar presente en el centro de control de operaciones, para así poder realizar cálculos de despacho económico para cada uno de los generadores. Según información actual de demanda en las cargas, esta información puede ser transmitida cada 15 minutos, permitiendo así obtener un menor tráfico, retardo y disponibilidad de la interfaz para comunicación de señales de emergencia.

3.4.1 Características y propiedades de los equipos de monitoreo y control propuestos:

3.4.1.1 Equipos de monitoreo para los GD. Los equipos de monitoreo son aquellos que se encargan de la adquisición de datos y el monitoreo de cada generador, estos revisan el nivel de energía generada (activa, reactiva y aparente), el voltaje suministrado, la frecuencia, temperatura y otros datos propios del generador. Sin embargo algunos generadores traen consigo un panel de control, que incluyen estos sistemas de monitoreo; como los motogeneradores propuestos para la generación de electricidad por Metanización como el de Desgasificación. Lo cual simplifica el proceso de obtención de datos, gracias a que traen conexiones seriales (RS232) y RJ45, se plantearía crear un interfaz electrónica, que almacene los datos de generación en una memoria EEPROM, y que envíe los datos obtenidos por puerto serial (RS232) a internet por medio de un módulo inalámbrico embebido (Sierra Wireless AirPrime Wireless Embedded Modules) que funciona bajo redes celular HSDPA. La interfaz electrónica debe tener la capacidad de modificar el tiempo en que sean leídos y enviados los datos de la memoria EEPROM, adecuándose las necesidades del centro de control y operaciones.

Para la PCH Julio Bravo, se propone la implementación de un medidor electrónico Landis+Gyr Qualigr ZMQ202 para grandes potencias y alta precisión, se encarga de la medición de la capacidad de energía generada (activa y aparente), voltaje y frecuencia; gracias a que este modelo tiene un canal óptico de tipo serial para manejo de datos a una tasa de muestreo de 9600Bd. Para comunicar los datos obtenidos hacia la central de control de operación se necesita una interfaz electrónica que se encargue de manejar o solicitarle al equipo, por medio de códigos el dato que se necesita ya que están almacenados en una memoria EEPROM. Este proceso se realiza de acuerdo a la norma IEC62056-21,⁵⁶ que trata de la medición de consumo eléctrica, basado en el intercambio de datos para la lectura del medidor, tarifas y control de la carga, esta norma trata de acceder al medidor por medio de códigos según la modalidad o el proceso a realizar, todo esto con el fin de restringir las operaciones en contra del medidor (alteraciones).

El fabricante explica en el manual⁵⁷ los códigos a ingresar dependiendo del dato solicitado a leer, la interfaz electrónica propuesta debe convertir el código de caracteres ASCII a pulsaciones, el canal óptico siempre va estar activo para recibir los pulsos y tiene un retardo de 1ms para realizar el proceso solicitado. El medidor devuelve el dato solicitado por medio de pulsos por lo que se debe contar con un decodificador de los pulsos a ASCII, generalmente los datos son de 6 dígitos más 2 que representan las unidades. Se debe tener en cuenta la frecuencia de tiempo en que deben ser leídos los datos según lo requiera la central de control de operaciones. Los datos obtenidos por el canal óptico, se preparan para ser enviarlos a internet por medio del módulo embebido bajo red celular HSDPA explicado anteriormente.

3.4.1.2 Equipos de monitoreo para los usuarios (cargas). Se maneja un número de 8 cargas industriales, comprendidas entre los valores de voltaje de: 115V hasta 1320V, el sistema de captura de datos sobre el consumo de cada usuario, realizando medidas sobre potencia consumida tanto activa, reactiva como aparente. Lo destacable del modelo del medidor propuesto Landis+Gyr ZxG300/400 es la capacidad de los medidores para trabajar dentro de un rango variable de voltajes, ya sean cargas trifásicas, bifásicas o monofásicas. El modelo seleccionado es capaz de trabajar entre el rango de voltajes de las cargas por ser cargas industriales, el proceso de obtención de datos para cada medidor es el mismo que se plantea anteriormente para la PCH Julio Bravo; de igual forma es similar el uso del módulo inalámbrico para él envío de datos a internet en HSDPA.

- **Revisión del módulo inalámbrico embebido.** El Sierra Wireless AirPrime SL809x es un dispositivo, de transmisión y recepción de datos de forma inalámbrica a través de redes celulares, GPRS o HSPDA. El modulo trabaja en quad-band operando en las frecuencias de 850/900/1800/1900 MHz. Presenta

⁵⁶ Manual técnico Contador De Alta Precisión, Landis+Gyr Qualigr id ZMQ202, Landis & Gyr Inc., 2011.

⁵⁷ Manual técnico Industrial / Comercial Landis+Gyr ZxG300/400, Landis & Gyr Inc., 2011.

capacidad de envío de voz y SMS como funcionalidad GSM y permite la transmisión de paquetes vía GPRS o HSDPA mediante protocolos UDP ó TCP.⁵⁸

Dentro de las especificaciones de paquetes de datos, el Sierra Wireless AirPrime SL809x es un dispositivo clase B, por lo que puede estar conectado a la red GPRS/HSDPA y GSM simultáneamente, pero sólo soporta un solo servicio a la vez. Además, este módulo tiene una velocidad en downlink 3.6 Mbps y 384 Kbps en uplink. Cabe mencionar que el modulo utiliza una SIM CARD con un paquete de datos activado.

- **Almacenamiento de los datos enviados.** Los datos obtenidos de los elementos mencionados anteriormente, son enviados a internet por medio de cada una de los módulos de comunicación HSDPA que poseen. Se crea una conexión VPN (Virtual Private Network) entre cada estación remota (generadores) y cargas para que los datos de cada uno sea almacenado en un servidor VPN, ubicada en el centro de control de operaciones. Una Virtual Private Network (VPN) es un sistema para simular una red privada sobre una red pública, por ejemplo, Internet. La red pública sea "vista" desde dentro de la red privada como un cable lógico que une las dos o más redes que pertenecen a la red privada. Se utiliza este tipo de redes por la seguridad provista en la cual los datos viajan en un canal seguro y con fuertes restricciones de entradas externas al compartir un canal público.⁵⁹

3.4.1.3 Equipos de control para los GD. El control realizado a las GD por medio de un algoritmo multiagente es la parte esencial del presente trabajo de investigación. El centro de control de operaciones envía los niveles apropiados de generación de acuerdo a los datos de demanda que llegaron al servidor VPN. En la estación remota de cada GD se utilizaría el mismo sistema de envío de datos como medio para recepción por medio de la comunicación serial del módulo inalámbrico, este se conecta a un PLC SIEMENS S3001 (que cuenta con una CPU y un procesador de comunicaciones CP340), un modem MD720-3⁶⁰ (con su respectiva antena cuatribanda) y una SIM Card con el servicio GPRS o HSDPA habilitado. La función de los PLC en cada estación remota de las GD será controlar el flujo de combustible por medio de electroválvulas para los casos de Metanización y Desgasificación; mientras para la PCH Julio Bravo, controlará el caudal de agua entrante.

3.4.1.4 Equipos de control ubicado en el centro de control de operaciones. Los equipos que se ubican en la central de control de operaciones son: un servidor

⁵⁸ Especificaciones técnicas, Sierra Wireless AirPrime SL809x, Sierra Wireless

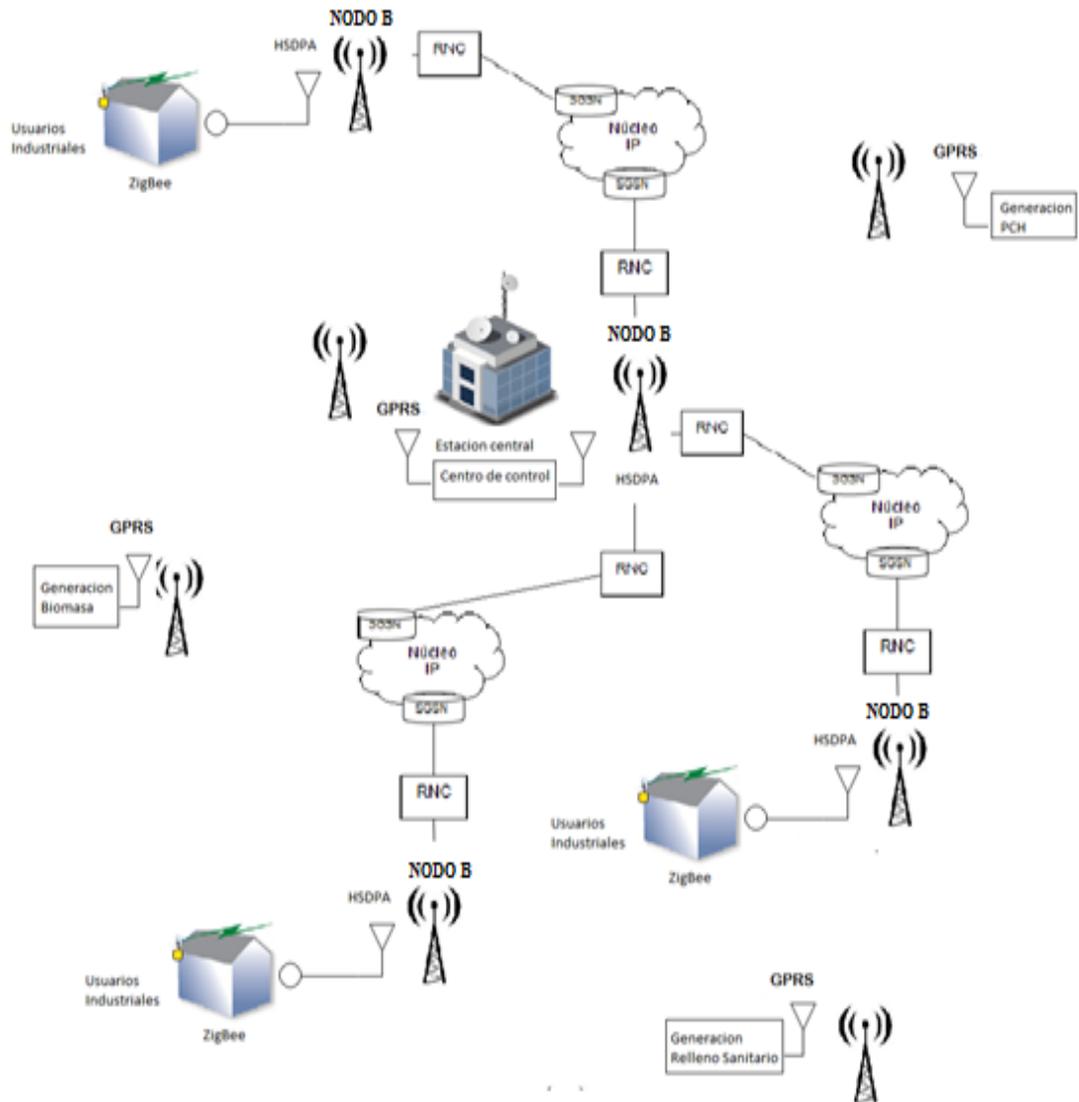
⁵⁹ Especificaciones técnicas. Óp. Cit. p. 73.

⁶⁰ SIEMENS. Gprs/gsm-modem sinaut md720-3: System manual. Technical report, SIEMENS, 2006

VPN que recibirá los datos obtenidos de la medición de consumo de las cargas y el valor de energía generada en los GD. Se propone la creación de una aplicación software que será ejecutada en un servidor con el objetivo de recibir los datos enviados por el módem GPRS o HSDPA a través de una conexión a internet. Para la recepción remota de datos, se crea un socket UDP, que es el componente software que permite establecer la comunicación entre el proveedor de servicios de telefonía móvil y el servidor VPN. Los datos obtenidos se adecuarán y ordenarán de acuerdo al tipo y a que elemento de la red pertenecen creando una base de datos. De la base de datos se extraerá los datos de entrada necesarios para ejecutar el algoritmo desarrollado en Matlab por los autores de la presente investigación; al ejecutar el algoritmo se obtendrá los niveles de generación adecuados a la demanda y que brinde el menor costo.

Los datos de nivel de generación serán enviados a través de internet por medio del servidor VPN hacia los módulos inalámbricos de cada generador, estos estarán configurados de igual manera para activar un puerto de escucha en el cual realice la entrada de los datos.

Figura 20. Microgrid propuesta en la ciudad de Pasto



4. GENERADORES DISTRIBUIDOS: ENERGÍA SOLAR, EÓLICA, BIOMASA Y PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS. FACTIBILIDAD EN LA CIUDAD DE PASTO

Dentro de la Generación Distribuida (GD) se encuentra una variedad de tecnologías de producción de energía eléctrica de baja potencia en forma modular. Estos sistemas son interconectados con la red de distribución eléctrica convencional o aislados representando una característica básica de estos, además puede existir una cercanía de las unidades o módulos de generación a los sitios de consumo de energía.

Las tecnologías de energía renovable a pequeña escala en Colombia representan una alternativa económica y ambiental factible para la provisión de energía a comunidades rurales remotas y para la expansión de la capacidad eléctrica instalada, ya sea por medio de sistemas aislados o por proyectos conectados a la red eléctrica. La región cuenta con suficientes recursos para desarrollar sistemas hidráulicos, solares, eólicos y de biomasa, principalmente.

Adicionalmente, estas tecnologías pueden disminuir la contaminación del medio ambiente, causada por las emisiones de gases de los sistemas convencionales que utilizan combustibles fósiles, como el carbón, y productos derivados del petróleo. Estos gases contribuyen al efecto invernadero y al calentamiento global de nuestro planeta. Una conciencia de preservación del sector energético apoyado en implementar sistemas de generación alternativos garantizaría un medio ambiente más limpio y apropiado para las futuras generaciones.

4.1 ENERGÍA SOLAR

4.1.1 Energía solar definición, análisis en Colombia y Nariño. De la enorme cantidad de energía que emite constantemente el sol, una parte llega a la atmósfera terrestre en forma de radiación solar. De ella, un tercio es enviado de nuevo al espacio a consecuencia de los procesos de refracción y reflexión que tienen lugar en la atmósfera de la tierra. De los dos tercios restantes, una parte es absorbida por las distintas capas atmosféricas que rodean el globo terráqueo. El resto llega efectivamente a la superficie de la tierra por dos vías: directamente, es decir, incidiendo sobre los objetivos iluminados por el sol; e indirectamente, como reflejo de la radiación solar que es absorbida por el polvo y el aire. La primera recibe el nombre de radiación directa y a la segunda se le llama radiación difusa.

4.1.1.1 Sistemas de aprovechamiento de la energía solar. En la actualidad, la energía solar está siendo aprovechada para fines energéticos a través de dos vías basadas en principios físicos diferentes. Por un lado la vía térmica. Los sistemas

que adoptan esta vía absorben la energía solar y la transforman en calor. Los sistemas basados en la vía térmica también pueden hacer posible el aprovechamiento de la energía solar en forma de energía eléctrica, pero siguiendo un método que se podría llamar "indirecto". En efecto, algunos de estos sistemas absorben la energía solar en forma de calor mediante un captor térmico y después la transforman en electricidad mediante una máquina termodinámica. Por otro lado, la vía fotovoltaica. Esta permite la transformación directa de la energía solar en energía eléctrica mediante las llamadas "células solares" o "células fotovoltaicas". Dichas células hacen posible la producción de electricidad a partir de la radiación solar. El efecto fotovoltaico es un efecto por el que se transforma directamente la energía luminosa en energía eléctrica y que se produce cuando la radiación solar entra en contacto con un material semiconductor cristalino.⁶¹

- **Tecnología fotovoltaica.** La célula fotovoltaica: La producción eléctrica está basada en el fenómeno físico denominado "efecto fotovoltaico", que básicamente consiste en convertir la luz solar en energía eléctrica por medio de unos dispositivos semiconductores denominados células fotovoltaicas.⁶² Estas células son capaces de generar cada una de ellas una corriente de 2 a 4 Amperios, a un voltaje de 0,46 a 0,48 Voltios, utilizando como fuente de energía la radiación luminosa.

Módulos fotovoltaicos: Conjunto completo, medio ambientalmente protegido, de células interconectadas. Para obtener potencias utilizables para aparatos de mediana potencia, hay que unir un cierto número de células con la finalidad de obtener la tensión y la corriente requeridas. Para tener más tensión hay que conectar varias células en serie. Conectando 36 (dimensiones normales, 7.6 cm de diámetro) se obtienen 18 V, tensión suficiente para hacer funcionar equipos a 12 V, incluso con iluminaciones mucho menores de 1kW/m². La unidad básica de las instalaciones fotovoltaicas es, pues, la placa fotovoltaica, que contiene entre 20 y 40 células solares; estas placas se conectan entre sí en serie y/o paralelo para obtener el voltaje deseado (12 V, 14 V, etc.). Estas células interconectadas y montadas entre dos láminas de vidrio que las protegen de la intemperie constituyen lo que se denomina un módulo fotovoltaico.

- **Aplicaciones.** En una primera gran división las instalaciones fotovoltaicas se pueden clasificar en dos grandes grupos: Instalaciones fotovoltaicas aisladas de la red: En el primer tipo, la energía generada a partir de la conversión fotovoltaica se utiliza para cubrir pequeños consumos eléctricos en el mismo lugar donde se produce la demanda. Los sistemas aislados, por el hecho de no estar conectados a la red eléctrica, normalmente están equipados con

⁶¹ José Manuel Arroyo Sánchez. Centrales de energía alternativas. Universidad de Castilla, La Mancha.

⁶² M. Teresa Miranda García-Cuevas. Componentes de una instalación solar fotovoltaica. Universidad de Extremadura. España 2006.

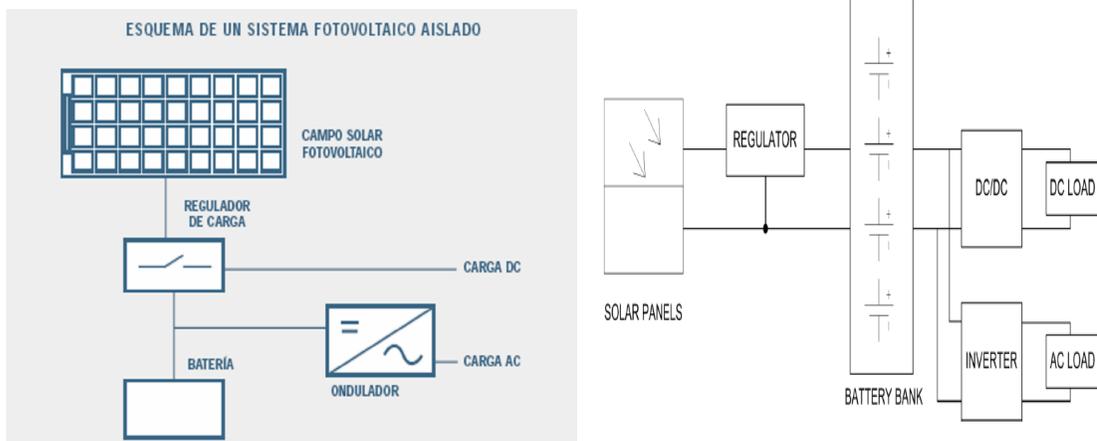
sistemas de acumulación de la energía producida. La acumulación es necesaria porque el campo fotovoltaico puede proporcionar energía sólo en las horas diurnas, mientras que a menudo la mayor demanda por parte del usuario se concentra en las horas de la tarde y de la noche.

Durante la fase de insolación es, por tanto, necesario prever una acumulación de la energía no inmediatamente utilizada, que es proporcionada a la carga cuando la energía disponible es reducida e incluso nula. Una configuración de este tipo implica que el campo fotovoltaico debe estar dimensionado de forma que permita, durante las horas de insolación, la alimentación de la carga y de la recarga de las baterías de acumulación.

- **Componentes de la instalación:**

- Subsistema de generación - Generador Fotovoltaico: Grupo de paneles fotovoltaicos interconectados para el aprovechamiento de la radiación solar del lugar.
- Subsistema de acumulación: Regulador de carga y grupo de baterías.
- Subsistema de acomodación de energía a las cargas: Convertidor CC-CC o seguidor de potencia. Convertidor CC-CA.

Figura 21. Diagrama de un sistema fotovoltaico aislado



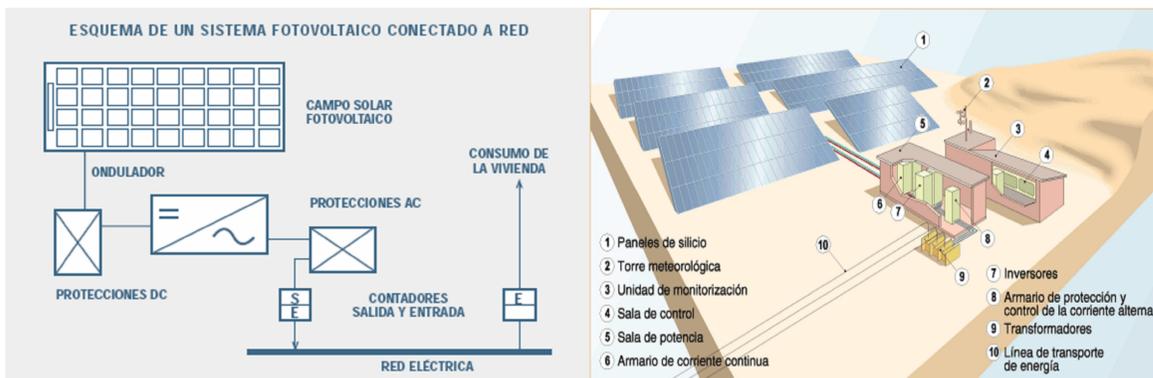
Miranda García-Cuevas, Ma. Teresa Componentes de una instalación solar fotovoltaica, Universidad de Extremadura. España 2006.

- **Instalaciones fotovoltaicas conectadas de la red:** En cuanto a las instalaciones conectadas a la red se pueden encontrar dos casos: centrales fotovoltaicas, (en las que la energía eléctrica generada se entrega directamente a la red eléctrica, como en otra central convencional de

generación eléctrica) y sistemas fotovoltaicos en edificios o industrias, conectados a la red eléctrica, en los que una parte de la energía generada se invierte en el mismo autoconsumo del edificio, mientras que la energía excedente se entrega a la red eléctrica. También es posible entregar toda la energía a la red; el usuario recibirá entonces la energía eléctrica de la red, de la misma manera que cualquier otro abonado al suministro.

Los sistemas conectados en red, a diferencia de los aislados, normalmente no tienen sistemas de acumulación, ya que la energía producida durante las horas de insolación es canalizada a la red eléctrica; al contrario, durante las horas de insolación escasa o nula, la carga viene alimentada por la red⁶³. Un sistema de este tipo, desde el punto de vista de la continuidad de servicio, resulta más fiable que uno no conectado a la red que, en caso de avería, no tiene posibilidad de alimentación alternativa. En este caso, se pueden obtener sistemas de alta fiabilidad integrando el sistema aislado con una fuente energética tradicional, por ejemplo, diesel (sistema híbrido diesel-fotovoltaico). La tarea de los sistemas conectados a la red es, por tanto, la de introducir en la red la mayor cantidad posible de energía.

Figura 22. Diagrama de un sistema fotovoltaico conectado a la red



4.1.1.2 Datos de radiación solar registrados en la ciudad de Pasto. Basados en los estudios realizados a nivel nacional publicados por las entidades IDEAM⁶⁴ y UPME⁶⁵ sobre la radiación global solar en Colombia se proponen estudios de factibilidad del uso de recursos renovables para la generación de energía eléctrica haciendo uso de los dispositivos fotovoltaicos. De los datos recolectados a través

⁶³ Componentes de una instalación solar fotovoltaica. Op. Cit. p. 77.

⁶⁴ Atlas de Radiación Solar de Colombia, INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIO AMBIENTALES. 2005.

⁶⁵ Atlas de Radiación Solar de Colombia. Ministerio de Minas y Energía, UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA. 2005.

de distintos dispositivos de medición de radiación global solar pertenecientes a estas entidades se lograron concluir los siguientes valores.

Tabla 15. Disponibilidad Promedio multianual de energía solar por región

REGIÓN	kWh/m ² /año
GUAJIRA	2.190
COSTA ATLÁNTICA	1.825
ORINOQUIA	1.643
AMAZONIA	1.551
ANDINA	1.643
COSTA PACÍFICA	1.278

De la anterior tabla 15 se puede determinar que en Colombia la mejor región para implementar un sistema fotovoltaico es la región de la guajira debido a que tiene el mayor índice de radiación solar anualmente, pero las otras regiones no presentan un índice muy bajo. En nuestro caso la región andina presenta un promedio multianual de 1.643 kWh/m², siendo este un valor no muy bajo para la implementación de un sistema fotovoltaico.

4.1.2 Análisis de factibilidad. Para especificar la factibilidad de la implementación de un sistema fotovoltaico en la ciudad de Pasto, se presenta un diagrama de barras de la radiación solar global mensual promedio en la ciudad de Pasto basado en los datos presentados en el atlas de radiación solar global de Colombia y datos obtenidos en la estación agrometereológica situada en el corregimiento de Botana zona rural de la ciudad de Pasto.

4.1.2.1 Factibilidad técnica. El comportamiento de la radiación solar mes a mes se puede observar en la Figura 23, con base a estos resultados y al consumo de las cargas indicadas en la Tabla 16, se puede calcular el número de paneles necesarios para cubrir la demanda de energía de cada carga⁶⁶. Los resultados obtenidos son los siguientes:

Se puede concluir que un sistema generador de energía eléctrica conformado por paneles o módulos fotovoltaicos es técnicamente viable implementarlo en la ciudad de Pasto siempre y cuando se utilice para cubrir parte de la demanda de energía y no la carga entera, debido a que la cantidad de energía generada es directamente proporcional a la radiación solar y al número de módulos fotovoltaicos, no sería viable técnicamente si la radiación solar en el lugar fuera nula o inferior a los límites de radiación solar al cual trabaja una célula fotovoltaica.

⁶⁶ Diseño de una instalación solar fotovoltaica. Diego Oñate Arresti. Junio 2006.

Figura 23. Radiación Global Solar mensual promedio en la ciudad de Pasto

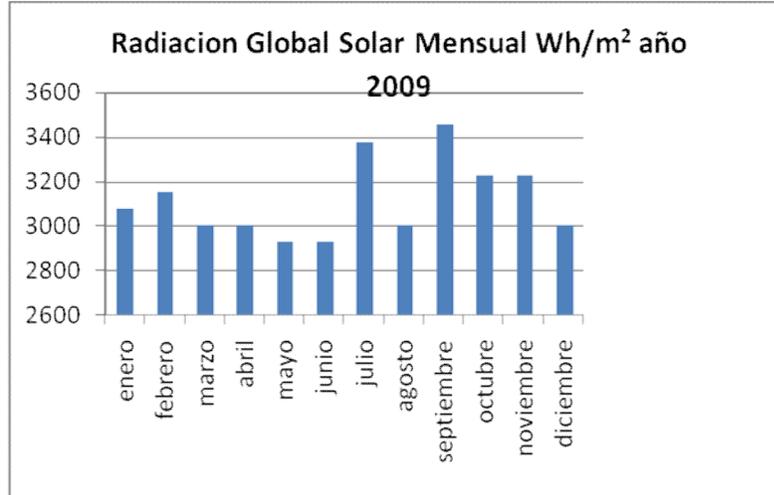


Tabla 16. Datos obtenidos en tecnología fotovoltaica

CARGA	CONSUMO TEORICO MENSUAL PROMEDIO (KWh)	RADIACION SOLAR MENSUAL PROMEDIO (KWh/m ²)	CONSUMO TOTAL MENSUAL PROMEDIO (KWh)	NÚMERO DE PANELES NECESARIOS
MISTER POLLO NORTE	30588,2657	3,116	41959,2122	83,1217852
MALL LARIVIERA	5418,20571	3,116	7432,38095	14,7236504
CLINICA PALERMO	6971,57143	3,116	9563,19812	18,944829
MISTER POLLO COLINA	18741,4286	3,116	25708,4069	50,9287129
UNIV. COOPERATIVA	19381,3714	3,116	12660,1159	52,6677193
UDENAR	87762,0857	3,116	120386,949	238,488227
HOSPITAL SAN PEDRO	31638,9	3,116	43400,4115	85,9768212
UNIV. MARIANA	46617,9	3,116	63947,7366	126,681359

4.1.2.2 Factibilidad económica. La factibilidad económica depende de la cantidad de costos generados de implementar el sistema fotovoltaico en la ciudad de Pasto. Económicamente este sistema se ve afectado por el número de módulos fotovoltaicos utilizados, el número de baterías, reguladores, inversores, soportes, instalaciones, etc. Tomando como ejemplo el costo por unidad de cada módulo fotovoltaico que en este caso debe ser un módulo solar isofoton de silicio

monocristalino con una potencia máxima de 250W su costo promedio es de \$3'000.000, lo cual representaría que todo el sistema de módulos fotovoltaicos de las cargas trabajadas sería costoso y resultaría más favorable la compra de energía eléctrica a la red, económicamente el sistema no es factible implementarlo en la ciudad de Pasto, además la vida útil de un panel solar es limitado.

Cabe señalar que se tomaron datos ideales de radiación solar para realizar los cálculos, es decir se tomó el promedio de radiación solar en el año 2009. El número de paneles aumenta cuando la radiación solar es menor.

4.2 SISTEMAS DE ENERGÍA EÓLICOS

4.2.1 Energía eólica en Colombia y Nariño. La energía eólica como una fuente renovable de energía se constituye hoy en día como uno de los recursos más limpios que los originados en las fuentes fósiles. Estos recursos son cada vez más competitivos, en especial si se toma en consideración que permiten un desarrollo más sostenible en la tierra. Colombia, por su posición en la franja tropical, con gran variabilidad en la estructura física de sus cordilleras y por su localización frente al mar caribe y al océano Pacífico tiene privilegios en la energía asociada al viento.

Gracias al análisis espacial que brinda el atlas de viento y energía eólica de Colombia se determina sectores donde prevalecen vientos con intensidades iguales o superiores a 5 m/s y persistentes a lo largo del año teniendo buen potencial de energía eólica, estos sectores corresponden a la península de La Guajira, Isla de San Andrés, sectores de Boyacá y, centro del litoral caribe en el departamento de Bolívar.⁶⁷

Analizando los datos durante todo el año, vientos iguales o superiores a 5 m/s, alcanzando aun los 11m/s, se mantienen en la península de la Guajira. El resto del país presenta variaciones dentro del ciclo estacional, siendo este el sector en Colombia donde es totalmente rentable la instalación de energía eólica. La velocidad del viento en superficie se refiere a la velocidad que alcanza esta variable meteorológica a 10 metros de altura, que es la norma internacional establecida por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) como estándar para la medición y seguimiento del viento.⁶⁸

Teniendo como referencia el Atlas de Viento y Energía Eólica de Colombia y analizando el sector de Nariño y en especial a la ciudad de San Juan de Pasto y

⁶⁷ Ministerio de Minas y Energía. Atlas de Viento y Energía Eólica. UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA U P M E. IDEAM, CENICAFE, CAR, SENAMI y MRI.

⁶⁸ *Ibid.*, p. 82.

sus alrededores, en el ciclo temporal comprendido entre mayo y septiembre se aprecian vientos cercanos a los 5m/s en las montañas nariñenses.

Tabla 17. Velocidades de vientos en la ciudad de Pasto y sus alrededores

Velocidad media de viento en la ciudad de Pasto y sus alrededores.	
Meses	Velocidad de viento en superficie (m/s)
Enero, Febrero, Marzo	2.0-3.0
Abril, Mayo	2.0-2.5
Junio	2.5-3.0
Julio	3.0-3.5
Agosto	3.0-3.8
Septiembre	2.5-3.5
Octubre	2.0-3.0
Noviembre y Diciembre	2.0-2.5

Ministerio de Minas y Energía. Atlas de Viento y Energía Eólica. UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA U P M E. IDEAM, CENICAFE, CAR, SENAMI y MRI.

4.2.2 La energía eólica. Los sistemas de energía eólica cuentan con una de las mejores relaciones costo/beneficio para aplicaciones de energías renovables en la carga. Dependiendo del recurso eólico una turbina eólica puede reducir la facturación eléctrica entre el 50 y el 90%, y ayudar a evitar los altos costos de extender las redes de suministro a sitios remotos, prevenir interrupciones de energía y además no es contaminante.⁶⁹ El viento se genera por un calentamiento irregular de la superficie terrestre por parte del sol. Las turbinas eólicas convierten la energía cinética del viento en energía mecánica, la cual acciona un generador que produce energía eléctrica limpia. Actualmente, las turbinas eólicas son versátiles fuentes de electricidad. Sus alabes o “palas” tienen un diseño aerodinámico que les permite capturar la mayor cantidad de energía del viento, pues éste las hace rotar, accionando una flecha acoplada al generador y así obtener electricidad.

4.2.2.1 Energía generada con el sistema eólico. La mayoría de fabricantes en los Estados Unidos clasifican a sus equipos de acuerdo a la potencia que en forma segura, operan a cierta velocidad de viento, usualmente entre 24mph (10.5m/s) y 36 mph (16m/s). La ecuación 1 ilustra los factores de importancia en el funcionamiento de una turbina eólica. Note que la velocidad del viento tiene un

⁶⁹ William F. Hagy and Chris Humes Sistemas Eólicos Pequeños para Generación de Electricidad. Una guía para consumidores en los EE.UU. Departamento de Energía, EE.UU. Energía Eficiencia y Energía Renovable www.windpoweringamerica.gov

exponente a la tercera potencia. Esto significa que aún con un pequeño incremento de la velocidad del viento, la potencia disponible se incrementa en una forma mayor. Al incrementar la altura en la torre, se tiene acceso a mayores velocidades de viento como se muestra en la Figura 24, de incremento de velocidad con la altura.

$$P = k C_p 0.5 \rho A V^3 \quad (1)$$

Dónde:

P = Potencia obtenida, kilowatts

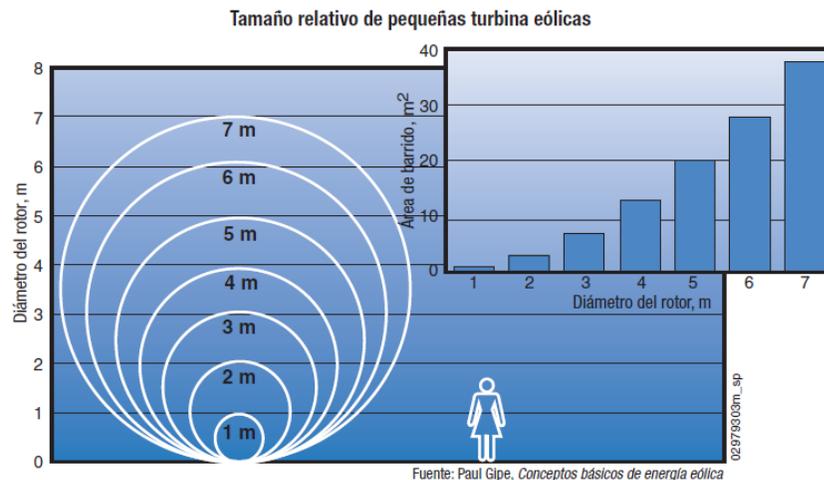
C_p = Coeficiente de máxima potencia, en el rango de 0,25 a 0,45 adimensional, (Teóricamente el máximo es 0,59)

ρ = Densidad del aire, lb/pie³, A = Área de barrido del rotor, pie² ó $\pi \times D^2/4$ (D es el diámetro del rotor y $\pi = 3,1416$)

V = Velocidad del viento, mph

$K = 0.000133$ una constante para transformar las unidades a Kilowatts (multiplicando el resultado obtenido por 1,340 se obtiene un resultado en Caballos de potencia (H.P.) por lo tanto 1kW = 1,340 H.P.)

Figura 24. Tamaño relativo de turbinas eólicas



El área de barrido A , es un factor importante, porque el rotor es la parte de la turbina que captura la energía del viento. Por esto entre más grande sea este más energía se puede obtener. La densidad del aire varía ligeramente con la temperatura del aire y la altitud. Las clasificaciones de turbinas se encuentran referidas a condiciones normalizadas de 59 °F (15 °C) y altitud al nivel medio del mar.

Aunque el cálculo de la potencia eólica ilustra algunas características importantes, la mejor forma de medir el funcionamiento de una turbina es la generación anual de energía. La diferencia entre potencia y energía, es que la primera es la razón a la cual la energía es consumida (kilowatts), mientras que la energía es la cantidad consumida (kilowatts-hora). Una estimación de la energía generada, kWh/año es la mejor forma de determinar si una turbina eólica y su torre en particular, generarán suficiente energía para cubrir sus necesidades.

Para obtener una estimación preliminar del funcionamiento de una turbina eólica en particular, se usa la siguiente fórmula:

$$GAE = 0.01328 D^2 V^3 \quad (2)$$

Dónde:

GAE = Generación anual de energía, D = Diámetro del rotor, pies, V = Velocidad del viento promedio anual, mph.

4.2.3 Análisis de factibilidad. Costos de un sistema eólico. Un sistema de energía eólica puede costar, dependiendo del sitio de 30.000 a 35.000 dólares ya instalado tomando en cuenta su tamaño, su aplicación, y los acuerdos tomados de servicio con el vendedor este precio se toma basándose en la guía para consumidores de los EE, UU del departamento de energía, indica que un sistema para uso doméstico de unos 10 kW cuesta aproximadamente 32.000 dólares, lo cual es mucho más barato que la opción de considerar un sistema fotovoltaico, que para la misma capacidad costaría unos 80.000 dólares.

Por regla general, la estimación en costo de un sistema eólico es de unos 1.000 a 3.000 dólares por kilowatt. La energía eólica tiene una mejor relación costo/beneficio entre más grande sea el tamaño del rotor. Aunque las turbinas pequeñas tengan un costo inicial menor, son proporcionalmente más caras. El costo de un sistema eólico residencial que tiene una torre de 24,3m de alto, baterías y un inversor, típicamente está en el rango de los 13.000 a los 40.000 dólares para turbinas de entre los 3 y los 10 kW.

Aunque los sistemas de energía involucran una inversión inicial significativamente alta, pueden ser competitivos con fuentes convencionales de energía, cuando se toman en cuenta factores como el tiempo de vida útil o la reducción en los costos evitados con la compañía eléctrica. El período de retorno de la inversión, es decir el tiempo en que los ahorros se vuelven iguales al costo del sistema tomando en cuenta el costo del dinero en el tiempo, depende de la elección del sistema, el recurso eólico en el sitio, los costos de la electricidad en el área y como se utiliza el sistema de energía eólica.

4.2.3.1 Factibilidad técnica. En la actualidad y en varios países, en conjunto, para conexión a red se han instalado más de 25 000 turbinas eólicas de diversos tamaños y potencias nominales, con una tendencia a estandarizar el tamaño óptimo por turbina individual de nivel de potencia nominal de 250 kW y tamaños que oscilan entre 25 y 30 metros de diámetro. Los equipos instalados exceden una capacidad global de 6.200 MW (1996) (American Wind Energy Association) y una producción anual energética en exceso de los 13.000 millones de kW/h, lo cual ha demostrado que cuando se instalan equipos en condiciones favorables de viento, la viabilidad económica de estas instalaciones la hacen competitiva a alternativas convencionales de suministro de energía. Vale la pena anotar que de todas las tecnologías de energías renovables, la energía eólica ha emergido como una de las más ventajosas, como consecuencia del número de instalaciones y la potencia global instalada, sin ser comparable, por ninguna otra fuente renovable de energía.

El sistema eólico puede reducir la facturación de electricidad que está siendo usada para iluminación, algunos aparatos, calefacción entre otros pero es necesario obtener el beneficio costo de la implementación de este sistema. Es recomendable instalar la turbina en zonas donde la velocidad promedio del viento es de al menos 10mph aproximadamente 4,5 m/s según la producción de electricidad del departamento de energía de los Estados Unidos.

Para el análisis realizado se tiene en cuenta la información de los valores medidos mensuales de velocidad de viento (m/s) en la estación de Obonuco suministrada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y estudios Ambientales IDEAM Tabla 18 por ende y realizando el análisis basados en dicha información la factibilidad técnica para la instalación de generación de energía eólica en algunas locaciones de la ciudad de Pasto y cercanas a esta permite a las turbinas su arranque, mas no se lograría la potencia nominal puesto que la mayor velocidad de viento es de 4m/s en el mes de julio y la velocidad de viento anual es de 1.9m/s lo que nos da un beneficio costo muy bajo.

Inmensas diferencias en velocidad de viento (y por ende en potencia) se observan en pequeñas distancias debido a la cambiante topografía del terreno y su rugosidad. En pequeñas distancias la potencia eólica puede variar en un orden de magnitud. Por ende la información anterior no se generaliza para toda la región ya que la velocidad de viento involucra otros factores que en ciertas circunstancias se ven beneficiados por la zona geográfica; diferente a la velocidad de viento promedio anual por ejemplo variaciones estacionales, variaciones diurnas, borrascas, vientos extremos, períodos de calma, distribución de frecuencia de velocidades de viento analizado en la Tabla 18.

Tabla 18. Valores medios mensuales de velocidad del viento (m/s). IDEAM

ESTACIÓN : 5204501 OBONUCO													
Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Anual
2009	0.5 s	0.8 s	1.3 s	1.4 s	1.1 s	2.7 s	4.0 s	3.2 s	3.5 s	2.2 s	0.9 s	1.2 s	1.9
2010			2.3 s	0.8 s		2.7 s	1.8 s						
Máximos	0.5	0.8	2.3	1.4	1.1	2.7	4	3.2	3.5	2.2	0.9	1.2	4
Mínimos	0.5	0.8	1.3	0.8	0.4	2.7	1.8	3.2	3.5	2.2	0.9	1.2	0.4

Tabla 19. Relaciones generales entre viabilidad y velocidad de viento

Promedio Anual de Velocidad de Viento 10 metros de altura	Posibilidad de Uso de la Energía Eólica
Menor a 3 m/s	Usualmente no es viable, a menos que existan circunstancias especiales para evaluar mejor el recurso.
3 – 4 m/s	Puede ser una buena opción para equipos eólicos de bombeo de agua (Aerobombeo), poco viable para generación eléctrica con equipos eólicos (Aerogeneración)
4 – 5 m/s	Aerobombas son competitivas económicamente a los equipos Diesel, aerogeneración con equipos autónomos es viable.
Más de 5 m/s	Viable para aerobombeo y aerogeneración con sistemas autónomos
Más de 6 m/s	Viable para aerobombeo, aerogeneración con sistemas autónomos y para sistemas conectados a la red eléctrica

Otra de las condiciones de análisis se realiza en las inversiones en generación de energía que solo en Colombia son irreversibles, costosas, y están sujetas a numerosas fuentes de incertidumbre, características que inducen complejidad en el proceso de toma de decisiones.

Descripción general: La energía que contiene el viento puede ser cuantificada por la energía cinética de la masa en movimiento con densidad desplazándole a una velocidad uniforme V . Esta energía por unidad de tiempo expresa la potencia del viento circulando a través de un área transversal A , así:

$$P_{\text{viento}} = 0.5 \rho AV^3 \quad (3)$$

Dónde:

P_{viento} : potencia en el viento [Watts],

ρ : Densidad del aire (1.2 Kg/m³ condiciones estándar)

V: velocidad no perturbada del viento [m/s]

A: área transversal al campo de flujo uniforme de viento [m²]

El viento, generalmente, se mide como su velocidad y dirección. La potencia eólica es proporcional al cubo de la velocidad del viento.

- **Datos meteorológicos requeridos:** La información más importante para evaluar la aplicación de sistemas de conversión de la energía eólica, es: Velocidad de Viento Promedio Anual: La velocidad de viento promedio por un período largo puede ser utilizada como una primera indicación de la viabilidad de uso de la energía eólica y Variaciones Estacionales: Datos sobre variaciones estacionales de la velocidad de viento (normalmente presentada como promedios mensuales de velocidad de viento) son de importancia para estimar la variación estacional de entrega de energía, y así determinar el mes de diseño crítico (mes de menor energía eólica disponible) para la instalación que se desea.

4.3 ENERGÍA POR BIOMASA

4.3.1 Energía por biomasa. El término biomasa se refiere a toda la materia orgánica que proviene de árboles, plantas y desechos de animales que pueden ser convertidos en energía; o las provenientes de la agricultura (residuos de maíz, café, arroz, macadamiza, excretas de animales), del aserradero (podas, ramas, aserrín, cortezas) y de los residuos urbanos (aguas negras, basura orgánica y otros). La biomasa es cualquier material de tipo orgánico proveniente de seres vivos que puede utilizarse para producir energía.⁷⁰ Utilizan tecnologías que dependen de la cantidad y clase de biomasa disponible. Con los principales sistemas de transformación pueden obtenerse combustibles, energía eléctrica, fuerza motriz o energía térmica.

Este tipo de energía emite poco dióxido de carbono y podría ser una solución a los métodos alternativos para eliminar desechos (entierro de basura y quema al aire libre). Se estima que al reemplazar la energía generada a partir de combustible fósil por la generada empleando biomasa, la reducción neta de las emisiones de CO₂ se disminuyen en alrededor de 90%. La dificultad es que requiere alta inversión de capital y su rentabilidad sólo se vería a largo plazo.⁷¹

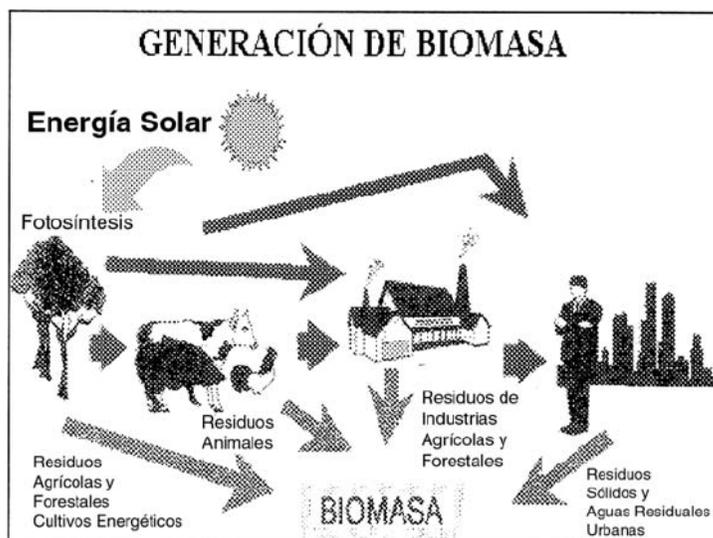
⁷⁰ ARVIZU FERNÁNDEZ, JOSÉ LUIS. "Energía a partir de la basura" en: Boletín IIE, Vol. 21, Núm. 6, 1997, p. 273-280.

⁷¹ GARUTI, G., (2005): "Los residuos después de la recogida selectiva". II Conferencia sobre BIOENERGÍA. Madrid, España.

Como se toma de⁷², se considera que la biomasa es una fuente renovable de energía porque su valor proviene de procesos naturales de transformación completamente biológicos de los cuales se está aprovechando su resultado con fines energéticos.

Las fuentes de biomasa que pueden ser usadas para la producción de energía y cubren un amplio rango de materiales y fuentes: los residuos de la industria forestal y la agricultura, los desechos urbanos y las plantaciones energéticas. Figura 25, se usan, generalmente, para procesos modernos de conversión que involucran la generación de energía a gran escala, enfocados hacia la sustitución de combustibles fósiles.

Figura 25. Origen de la biomasa



4.3.2 Recursos biomásico:

Desechos agrícolas. La agricultura genera cantidades considerables de desechos (rastros): se estima que, en cuanto a desechos de campo, el porcentaje es más del 60%, y en desechos de proceso, entre 20% y 40%.⁷³ Por otro lado, las granjas producen un elevado volumen de “residuos húmedos” en forma de estiércol de animales. La forma común de tratar estos residuos es esparciéndolos en los campos de cultivo, con el doble interés de disponer de ellos

⁷² ARVIZU FERNÁNDEZ, JOSÉ LUIS. “Energía a partir de la basura” en: Boletín IIE, Vol. 21, Núm. 6, 1997, p. 273-280.

⁷³ MARTÍNEZ CENTENO, L.M. (2004): “Tecnologías para el tratamiento de residuos”. Encuentro iberoamericano sobre calidad del aire y residuos. MIMAM. Santa Cruz de la Sierra, Bolivia.

y obtener beneficio de su valor nutritivo. Esta práctica puede provocar una sobre fertilización de los suelos y la contaminación de las cuencas hidrográficas.⁷⁴

Desechos urbanos. Los centros urbanos generan una gran cantidad de biomasa en muchas formas, por ejemplo: residuos alimenticios, papel, cartón, madera y aguas negras. La mayoría de los departamentos en Colombia carecen de adecuados sistemas para su procesamiento, lo cual genera grandes problemas de contaminación de suelos y cuencas; sobre todo por la inadecuada disposición de la basura y por sistemas de recolección y tratamiento con costos elevados de operación. Por otro lado, la basura orgánica en descomposición produce compuestos volátiles (metano, dióxido de carbono, entre otros) que contribuyen a aumentar el efecto invernadero. Estos compuestos tienen un considerable valor energético que puede ser utilizado para la generación de energía renovable.

4.3.3 Características de la biomasa. Para evaluar la factibilidad técnica y económica de un proceso de conversión de biomasa en energía, es necesario considerar ciertos parámetros y condiciones que la caracterizan. Estos que se explican a continuación; además determinan el proceso de conversión más adecuado y permiten realizar proyecciones de los beneficios económicos y ambientales esperados.

- **Composición química y física:** Las características químicas y físicas de la biomasa determinan el tipo de combustible o subproducto energético que se puede generar; por ejemplo, los desechos animales producen altas cantidades de metano.
- **Contenido de humedad (Humedad Relativa):** El contenido de humedad de la biomasa es la relación de la masa de agua contenida por kilogramo de materia seca. Para la mayoría de los procesos de conversión energética es imprescindible que la biomasa tenga un contenido de humedad inferior al 30%. Muchas veces, los residuos salen del proceso productivo con un contenido de humedad muy superior, que obliga a implementar operaciones de acondicionamiento, antes de ingresar al proceso de conversión de energía.
- **Poder calórico:** El contenido calórico por unidad de masa es el parámetro que determina la energía disponible en la biomasa. Su poder calórico está relacionado directamente con su contenido de humedad.

4.3.4 Procesos de conversión. Antes de que la biomasa pueda ser usada para fines energéticos, tiene que ser convertida en una forma más conveniente para su transporte y utilización. A menudo, la biomasa es convertida en formas derivadas tales como carbón vegetal, briquetas, gas, etanol y electricidad. Las tecnologías de conversión incluyen desde procesos simples y tradicionales, como la

⁷⁴ Ibid., p. 89.

producción de carbón vegetal en hogueras bajo tierra; hasta procesos de alta eficiencia como la cogeneración (generación de calor y electricidad). A continuación se presentan los procesos de conversión de biomasa más relevantes, los cuales se pueden clasificar en tres categorías⁷⁵:

- Procesos de combustión directa.
- Procesos termo-químicos.
- Procesos bio-químicos.

Existen diversas formas de transformar la biomasa en busca de aceites y gases combustibles, es el interés de este trabajo es la Metanización y Desgasificación de rellenos sanitarios, realizando estudios sobre la aplicación de generadores de electricidad usando el biogás generado en el relleno sanitario ANTANAS de la ciudad de Pasto y aprovechar de la misma forma el biogás generado por el uso de estiércol de vacas en la granja experimental de COPOICA (GEC). Algunos de los procesos de transformación son: procesos de combustión directa, procesos termo-químicos, y bioquímicos. Se hace un énfasis en los procesos bioquímicos ya que se buscan obtener biogás pro metanización y la desgasificación de rellenos sanitario.

4.3.4.1 Procesos Bio-químicos. Estos procesos utilizan las características bioquímicas de la biomasa y la acción metabólica de organismos microbiales para producir combustibles gaseosos y líquidos. Son más apropiados para la conversión de biomasa húmeda que los procesos termo-químicos. Los más importantes son:

- **Digestión anaeróbica (Metanización):** La digestión de biomasa humedecida por bacterias en un ambiente sin oxígeno (anaeróbico) produce un gas combustible llamado biogás el cual se compone fundamentalmente de metano (CH_4) y de dióxido de carbono (CO_2). En el proceso, se coloca la biomasa (generalmente desechos de animales) en un contenedor cerrado (el digestor) y allí se deja fermentar; después de unos días, dependiendo de la temperatura del ambiente, se habrá producido un gas, que es una mezcla de metano y dióxido de carbono. La materia remanente dentro del digestor es un buen fertilizante orgánico.

Los porcentajes de participación de los gases que componen el biogás son variables y dependen de las condiciones fisicoquímicas en que se desarrolla la "digestión" de la materia orgánica. Sin embargo, se puede considerar que el biogás es una mezcla de gases que está compuesta básicamente por:

⁷⁵ ARVIZU FERNÁNDEZ, JOSÉ LUIS. "Energía a partir de la basura" en: Boletín IIE, Vol. 21, Núm. 6, 1997, p. 273-280.

Metano (CH₄): 40-70 % vol.
Dióxido de carbono (CO₂): 30-60 % vol.
Hidrógeno (H₂): 0-1% vol.
Sulfuro de hidrógeno (H₂S): 0-3 % vol.

Así como cualquier gas puro las propiedades características del biogás dependen de la presión y la temperatura. El valor calorífico del biogás es de unos 6 kW/m³ que corresponde aproximadamente a la mitad de un litro de combustible diesel. El valor calorífico neto depende de la eficiencia de los quemadores o de su aplicación. La utilización de biogás en equipos comerciales requiere de adaptaciones sencillas para quemarlo eficientemente⁷⁶.

- **Desgasificación de rellenos sanitarios (Biogás):** Se puede producir un gas combustible de la fermentación de los desechos sólidos urbanos en los rellenos sanitarios. Este es una mezcla de metano y dióxido de carbono llamada biogás, al igual que en el proceso de Metanización. La fermentación de los desechos y la producción de gas es un proceso natural y común en los rellenos sanitarios; sin embargo, generalmente este gas no es aprovechado.⁷⁷

El aprovechamiento energético que plantea el presente trabajo hacer del gas generado naturalmente en vertederos con residuos urbanos será recuperado y depurado para su utilización en motores generadores de electricidad. El biogás producido al contener metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂), contribuye a la producción del efecto invernadero y como consecuencia, al calentamiento global del planeta.

La desgasificación del vertedero de ANTANAS en la ciudad de Pasto evita la emisión de estos gases a la atmósfera como lo ha vendido haciendo desde 2009 con la planta de desgasificación, pero este proyecto intenta analizar la viabilidad de producción de energía eléctrica. Desde la Empresa Metropolitana de Aseo de Pasto EMAS S.A E.S.P siempre ha apostado por la implantación de un modelo que incluyera la valorización y aprovechamiento de este recurso natural. Además de producir energía, su exploración y utilización reduce la contaminación y el riesgo de explosiones en estos lugares.

Aunque este proceso químico tiene muchas similitudes comparado con la digestión anaeróbica, los elementos que la componen varían de acuerdo a la inversión del proyecto y los fines de cada planta, ya que algunas son más

⁷⁶ J.D Arbeláez. Generación De Energía Eléctrica A Partir De Biogás. Universidad De Costa Rica, Tesis de Maestría en Ingeniería Eléctrica, Costa Rica, 2007.

⁷⁷ ARVIZU, J, F, HUACUZ, J, M, "Biogás de rellenos sanitarios para producción de electricidad", 2009

tecnificadas o energéticamente más eficientes y se encargan del tratamiento completo de las basuras, muchas apoyadas por el proceso del reciclaje y clasificación de basuras obtienen un mayor aprovechamiento de los residuos además de eliminar los gases, producir energía eléctrica, generar abono ecológico rico en nutrientes, de los residuos sólidos convierten el papel, el plástico y el aluminio de nuevo en materias primas.⁷⁸

4.3.5 Características del biogás. El biogás es un poco más liviano que el aire y posee una temperatura de inflamación de alrededor de los 700 ° C (Diesel 350 ° C, gasolina y propano cerca de los 500 ° C). La temperatura de la llama alcanza 870 ° C. Entre más largo es el tiempo de retención, más alto es el contenido de metano, y con esto el poder calorífico. Con tiempos de retención cortos el contenido de metano puede disminuir hasta en un 50%. Con un contenido de metano mucho menor del 50%, el biogás deja de ser inflamable.⁷⁹ El contenido de metano depende de la temperatura de fermentación. Con bajas temperaturas de fermentación se obtiene un alto porcentaje de gas metano, pero las cantidades de gas son menores.

Actualmente, la combustión directa es el proceso más aplicado para usos energéticos de la biomasa. Procesos más avanzados como la gasificación y la digestión anaeróbica han sido desarrollados como alternativas más eficientes y convenientes y para facilitar el uso de la biomasa con equipos modernos. Sin embargo, hasta la fecha, la aplicación de estos últimos no es tan común por tener un costo más alto y la complejidad de su aplicación.

4.3.6 Formas de energía. Aplicando los diferentes procesos de conversión, la biomasa se puede transformar en diferentes formas de energía: calor, vapor, combustibles gaseosos, biocombustibles y electricidad; siendo esta última el punto de interés del trabajo desarrollado. La electricidad generada a partir de los recursos biomásicos puede ser comercializada como energía renovable, pues no contribuye al efecto invernadero por estar libre de emisiones de dióxido de carbono (CO₂)⁸⁰. Este tipo de energía puede ofrecer nuevas opciones al mercado, ya que su estructura de costos permitirá a los usuarios soportar mayores niveles de inversión en tecnologías eficientes, lo cual incrementará la industria bioenergética.

4.3.7 Aplicaciones y recursos necesarios de una planta de electricidad en el relleno sanitario ANTANAS. Los rellenos sanitarios son en la actualidad la forma más utilizada para disponer la basura en nuestro país. Actualmente existen millones de toneladas de basura confinadas bajo el subsuelo nacional que, en

⁷⁸ EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (2003): "Europe's Environment: The third assessment: Waste Generation and Management". Europa / Dinamarca.

⁷⁹ MARTÍNEZ CENTENO, L.M. (2004): "Tecnologías para el tratamiento de residuos". Encuentro iberoamericano sobre calidad del aire y residuos. MIMAM. Santa Cruz de la Sierra, Bolivia.

⁸⁰ Europe's Environment: The third assessment: Waste Generation and Management. Op. cit. p. 92.

menor o mayor grado, están emitiendo gases a la atmósfera y líquidos al subsuelo, y en algunos casos representan un riesgo potencial de incendio o explosión. La posibilidad técnica de convertir este gas (biogás) en electricidad está plenamente probada; la tecnología para ello existe comercialmente, pero la práctica de aplicarla en un determinado entorno socio-político-económico, no está difundida en nuestro país.

La producción diaria municipal de basura en el año 2009, se estimó en 233 diarias toneladas en el relleno sanitario de ANTANAS. Conforme la población y la economía del país vayan creciendo, esta capacidad podrá también ir en aumento. Lamentablemente, el biogás producido en el país no se aprovecha, por lo que más de 40 millones de toneladas equivalentes de CO₂ terminan incorporándose anualmente a la atmósfera con las implicaciones ambientales que conllevan: el metano tiene un impacto equivalente a 21 veces el efecto invernadero producido por el bióxido de carbono.⁸¹

El metano es uno de los constituyentes principales al inventario mundial de gases con efecto invernadero (GEI) a los cuales se atribuye en gran medida el cambio de clima observado en nuestro planeta. Para dar seguimiento a los acuerdos derivados del Protocolo de Kyoto, las naciones comprometidas a reducir sus emisiones de GEI establecieron el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) y han creado instrumentos como el Mercado de Bonos de Carbono.⁸² Los proyectos de captura de metano y su conversión a electricidad, son idóneos para tales mecanismos. Las emisiones actuales en Colombia pueden ser negociadas con un valor que en el mercado internacional supera los cincuenta millones de dólares anuales, con lo que podría financiarse la capacidad de generación correspondiente.⁸³ Sin embargo, para que esto sea posible deben establecerse las reglas que den seguridad a las inversiones. De igual modo, se debe validar la información que sustenta las cifras anteriores y establecer los programas correspondientes para la ejecución de los proyectos.

- **Del proceso de generación del biogás a energía eléctrica.** El metano representa un poco más del 50% de los gases que constituyen el biogás, lo que hace a éste un combustible con buenas características para ser usado en turbinas o máquinas de combustión interna que accionen generadores eléctricos. Como se explica en⁸⁴ el proceso de generación comienza con la extracción del biogás a través de pozos verticales perforados en toda la profundidad del relleno sanitario. Mediante una red superficial de tuberías, el

⁸¹ TCHOBANOGLOUS, G., THEISEN, H., AND VIGIL, S. (1993): "Integrated Solid Waste Management", Chapter 4, McGraw-Hill, New York. Estados Unidos.

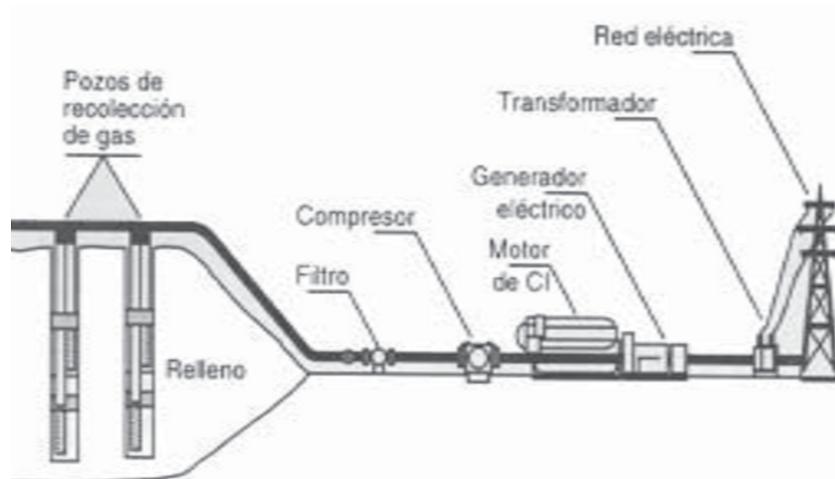
⁸² *Ibíd.*, p. 94.

⁸³ MARTÍNEZ CENTENO, L.M. (2001): "Valorización energética de lodos de depuradora". ISR. Sevilla, España.

⁸⁴ ARVIZU FERNÁNDEZ, JOSÉ LUIS. "Energía a partir de la basura" en: Boletín IIE, Vol. 21, Núm. 6, 1997, p. 273-280.

biogás es conducido hasta una estación en donde se le quita la humedad y otras sustancias indeseables, a fin de tener una combustión limpia y eficiente. Este proceso se muestra esquemáticamente en la Figura 26⁸⁵. La economía de generación con el biogás de rellenos sanitarios depende fuertemente de las inversiones que para ello deban hacerse. Si el relleno ya existe, las inversiones consideran la perforación de los pozos de extracción, la construcción de la red de recolección, de la planta de tratamiento del gas y del bloque de potencia. Como todos estos elementos (excepto el bloque de potencia) ya se encuentran instalados el costo de la energía dependerá de factores, como los acuerdos de contratación, costos de mantenimiento y operación.

Figura 26. Esquema de generación de electricidad en un relleno sanitario



- **Descripción de la instalación.** El relleno sanitario de ANTANAS está ubicado a 13 kilómetros de la ciudad de Pasto, sobre la variante Daza-Buesaco, en la vereda de Josefina corregimiento de Morasurco. Presenta una temperatura promedio de 14 grados centígrados, a una altura de 2.759 metros sobre el nivel del mar y una pluviosidad de 1.300 milímetros por año. Cuando hay invierno el caudal de lixiviado disminuye a 0,8 y en verano aumenta a 1,3. El área total del lote ANTANAS es de 100 hectáreas, proyectándose a 27 hectáreas para la disposición final de residuos sólidos, estimándose en una vida útil de 28 años. Entró en operación en abril de 2001, y recibe 233 toneladas, diarias de residuos sólidos de los municipios de Pasto, Buesaco, Nariño y Sibundoy.

⁸⁵ ARVIZU, J, F, HUACUZ, J, M, "Biogás de rellenos sanitarios para producción de electricidad", 2009

La instalación está formada por los siguientes conjuntos y equipos:⁸⁶

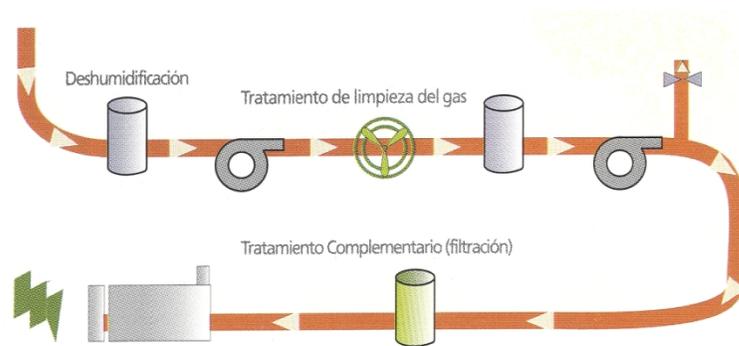
Sistema de Captación y Transporte de biogás

Sistema de Aspiración, acondicionamiento e impulsión

En la Figura 27, se muestra el esquema del proceso que se lleva a cabo en el relleno sanitario ANTANAS de EMAS S.A. E.S.P de la ciudad de Pasto administrado por BIONERSIS, siendo el proceso final es la destrucción del gas metano por medio de la quema controlada de este gas.

En la Figura 28, se muestra el relleno sanitario ANTANAS donde se ubican los pozos verticales de extracción del biogás. Los pozos tienen una profundidad diferente unos de otros, en relación a las diferencias deniveles de la masa de residuos, estimandose en promedio una profundidad de 15 m. la interconexion de los pozos por medio de na red de tuberías en PEAD (polietileno de alta densidad) la que desembocara en un dispositivo supresor que alimentara una antorcha de quema, de modo tal de realizar la extracción de biogás mediante un sistema de ventilación forzada.

Figura 27. Proceso de desgasificación y quema de metano en BIONERSIS



⁸⁶ Boucher Publicitario BIONERSIS, 2010

Figura 28. Desgasificación del relleno sanitario de ANTANAS en Pasto



La planta de desgasificación HOFGAS (HOFGASÒ- Ready/C) con capacidad de 900m³/h, realiza el proceso de extracción y combustión del biogás. La instalación está equipada con un sistema de reutilización del biogás con propósitos energéticos (calefacción o generación de electricidad).⁸⁷ La unidad completa de desgasificación es construida en el contenedor ventilado Figura 28, el sistema del contenedor derecho es el lugar de monitoreo y control del proceso de desgasificación con monitoreo de presión de gases y cantidad de gas quemado.

- **Sistemas de generación de electricidad.** Como se menciona en varias referencia bibliográficas consultas se usa el biogás como combustible en moto generadores estos pueden ser de combustible dual (uso de biogás y otro tipo de combustible como el Diesel) o el uso de motores especiales para biogás (incluyen el pre-tratamiento del gas). Es importante mencionar que el biogás se encuentra en cantidades variables de sulfuro de hidrógeno (H₂S), también denominado ácido sulfhídrico. El H₂S al reaccionar con agua se convierte en ácido sulfúrico (H₂SO₄) el cual es altamente corrosivo y puede ocasionar graves daños en el motor. Con el fin de eliminar o disminuir el porcentaje de H₂S en el biogás se emplean sistemas de filtro con sustancias como cal viva o pagada, limadura de hierro o ciertos tipos de tierras conocidas como hematites parda o limonita, las cuales son ricas en sustancias ferrosas.⁸⁸

⁸⁷ Datasheet HOFGAS- Ready/C, Hofstetter Umwelttechnik AG.

⁸⁸ Estudio De Pre-Factibilidad Para La Recuperacion De Biogás Y Produccion De Energía Relleno Sanitario Queretaro, Mexico, 2009.

- **Equipamiento para generación de electricidad. Generadores de electricidad a biogás:** Muchos de los generadores a biogás analizados tienen una característica en común que es el factor de funcionamiento según la concentración de gas metano a un porcentaje mayor al 48.7%. Dentro de las especificaciones contempla niveles de 150 a 250m³ como normales para trabajar ⁸⁹ con valores superiores de 4200Kcal/m³.

Generadores de electricidad a biogás- diesel: se considera estos generadores económicos puesto que los generadores diesel son comunes en el mercado, aunque a estos sistemas se les realizan adaptaciones para que funcionen con una mezcla de 70% biogás y 30% diesel a fin que el diesel realice la ignición del combustible. Las modificaciones que se deben realizar a este motor para utilizarlo en la generación de electricidad son: colocar una “T” entre el filtro y el sistema de admisión del aire, donde se conecta la tubería del biogás. Se debe instalar una válvula en esta tubería para regular el suministro del biogás y ajustarlo al porcentaje requerido de operación (se recomienda hacer un control electrónico para mantener los porcentajes de biogás y diesel). La mezcla de diesel y biogás se realiza directamente en la cámara de combustión del motor.

Cuando el motor recibe el biogás por la entrada de aire, este se acelera, por lo que el gobernador de la bomba de inyección reduce la cantidad de diesel suministrado a la cámara de combustión, logrando una estabilidad en la aceleración y potencia del motor. Estos motores soportan las variaciones de carga sin tener que operar la válvula de regulación del biogás, permitiendo operar en un rango más amplio de carga. Para los arranques del motor se debe alimentar únicamente con diesel, una vez arrancado el motor se realiza la transferencia de biogás gradualmente, hasta alcanzar el 70%. En⁹⁰ se recomienda la sustitución mayor a un 70% de biogás por diesel porque puede dañar el motor. En⁹¹ recomiendan el uso de un extractor de biogás o el uso de un sistema que la presión dentro del biodigestor de esta forma los porcentajes de biogás no bajen y obliguen al motor a inyectar diesel para mantener los niveles de generación deseados.

4.3.7.1 Análisis de factibilidad técnica de generación eléctrica en ANTANAS.

Para dar vía de avance aun proyecto de generación eléctrica en un relleno sanitario es de vital importancia la influencia de un sistema de extracción de biogás. Dado que el relleno sanitario ANTANAS tiene un control exhaustivo y avanzado sobre los residuos y un sistema de recuperación de gas metano de alta

⁸⁹ Datasheet Gas generator set, CATERPILLAR G 3520C, GECOLSA, 2009

⁹⁰ “Generación De Energía Eléctrica A Partir De Biogás”, Universidad De Costa Rica, Tesis de Maestría en Ingeniería Eléctrica, Costa Rica, 2007

⁹¹ MARTÍNEZ CENTENO, L.M. (2004): “Tecnologías para el tratamiento de residuos”. Encuentro iberoamericano sobre calidad del aire y residuos. MIMAM. Santa Cruz de la Sierra, Bolivia.

efectividad en el proyecto BIONERSIS que inicio en 2009. Plantear un proyecto de generación eléctrica es fácil, pero debe reconocerse que hay diferentes variables y características determinantes para saber si el proyecto tiene su viabilidad económica.

Como primera medida no debe confundirse el caudal generado de biogás en un vertedero con el caudal recuperado por el sistema de extracción. Puesto que el primero depende del grado de degradabilidad de la materia dispuesta en el relleno de acuerdo a sus características y otras dadas al ambiente de disposición (precipitaciones, temperatura, altura sobre el nivel del mar, tipo de material, etc.). El caudal recuperado se determina de acuerdo al correcto diseño y operación de la red de captación y del grado de impermeabilidad del material utilizado en la cobertura superficial del vertedero y en el sellado del vaso de vertido⁹².

Con una red de captación, control de extracción y depuración del Biogás, se analiza el gas para conocer la composición (porcentajes de participación del metano) del biogás, esto es importante puesto que si la cantidad de metano es inferior al 47% no sirve como combustible para poder dar marcha a un sistema de generación eléctrico. De igual forma es importante determinar el Poder Calorífico Inferior (PCI) del biogás, mediante la fórmula (4) Este dato es necesario para el cálculo de la potencia de la instalación.

$$PCI = \frac{\%CH_4 \times 35,880}{100} \left[\frac{KJ}{m^3} \right] \quad (4)$$

Para el presente proyecto tiene una presencia de CH₄ en el biogás (basados en el Anexo C de 51% lo cual es bueno en biogás usado como combustible; usando la fórmula (4), se tiene un PCI de 18,298.8 kJ/m³ o de 4370,59kcal/m³, relativamente más alto al promedio teórico de 4200 kcal. /m³, un PCI por encima del teórico garantiza un aprovechamiento energético mayor en un motor. Estos datos tienen importancia porque de ser bajos no se tendría eficiencia en los motores y la potencia además de ser baja sería muy fluctuante. Dependiendo del tipo de equipo, el fabricante requerirá otros datos, tales como la altitud sobre el nivel del mar, temperatura ambiente, fluctuaciones permitidas por el sistema de control en el caudal y la composición del biogás suministrado, las condensaciones de agua en las líneas o en los equipos, la presencia de partículas abrasivas en suspensión y también de compuestos orgánicos halogenados. Todo ello exige algún tipo de sistema de depuración puesto que el uso del biogás en motores de combustión

⁹² GONZÁLEZ S. M., Producción Y Recuperación Del Biogás En Vertederos Controlados De Residuos Sólidos Urbanos: Análisis De Variables Y Modelización, Tesis Doctoral, Departamento De Ingeniería Química Y Tecnología Del Medio Ambiente, Universidad de Guijón, España, 2008.

interna puede acarrear importantes problemas de corrosión interna debida a la presencia de compuestos orgánicos halogenados y de sulfuro de hidrógeno.⁹³

Para el desarrollo de la investigación, se tiene en cuenta Modelo Colombiano de Biogás, utilizado para la estimación de biogás generado y capturado en rellenos sanitarios municipales en Colombia. Este modelo fue desarrollado por SCS Engineers bajo un contrato con el programa Landfill Methane Outreach (LMOP) de la USEPA. Este Modelo puede ser utilizado para estimar generación y recuperación de biogás en rellenos sanitarios colombianos que cuenten o planeen tener un sistema de recolección de biogás, para su aprovechamiento energético.⁹⁴

Como objetivo plantea proveer a los propietarios de rellenos sanitarios y operadores en Colombia una herramienta para la evaluación de la factibilidad y los beneficios potenciales al capturar y utilizar el biogás generado. Para satisfacer este objetivo el Modelo usa una hoja de cálculo de Microsoft Excel para calcular la generación de biogás aplicando una ecuación de degradación de primer grado. El modelo provee estimaciones de la recuperación de biogás multiplicando la generación de biogás por los estimados de la eficiencia con la que el sistema de captura recuperara el biogás, esto es conocida como eficiencia de captura.

Para determinar la cantidad de gas generado en cualquier vertedero es importante analizar que al ser este un proceso biológico los parámetros que influyen sobre el mismo son diversos. Este modelo requiere que el usuario alimente datos específicos tales como el año de apertura, año de clausura, índices de disposición anual, ubicación del sitio y contestar algunas preguntas referente a las condiciones físicas pasadas y presentes del sitio.

El Modelo usa la siguiente información para estimar la generación y recuperación del biogás en un relleno sanitario:

La cantidad de residuos depositados en el relleno sanitario anualmente.

El año de apertura y clausura del sitio.

El índice de generación de metano (k).

La generación potencial de metano (L_0).

El factor de corrección de metano (MCF).

El factor de ajuste por incendios (F).

La eficiencia de recuperación del sistema de captura.

El modelo estima el índice de generación de biogás para cada año usando la ecuación de degradación de primer grado, la cual fue modificada por US EPA en el Modelo LandGEM versión 3.02 en el 2005.

⁹³ *Ibid.*, p. 98.

⁹⁴ V.Ludwig, Manual del Usuario: Modelo Colombiano de Biogás, Landfill Methane Outreach Program, Agencia para la Protección del Ambiente (U.S. EPA), Washington, D.C., 2009

$$Q_{LFG} = \sum_{t=1}^n \sum_{j=0.1}^1 2kL_0 \left[\frac{M_i}{10} \right] (e^{-kt_{ij}}) (MCF)(F) \quad (5)$$

i = Incremento en tiempo de 1 año

n = (año del cálculo) – (año inicial de disposición de residuos)

j = Incremento de tiempo en 0.1 años

k = Índice de generación de metano (1/año)

L_0 = Generación potencial de metano (m³/Mg)

M_i = Masa de residuos dispuestos en el año i (Mg)

t_{ij} = Edad de la sección j de la masa de residuos M_i dispuestas en el año i (años decimales)

MCF = Factor de corrección de metano

F = Factor de ajuste por incendios

La ecuación anterior estima la generación de biogás usando cantidades de residuos dispuestos acumulados a través de un año estimando la generación y recuperación de biogás en metros cúbicos por hora (m³/h).

La función de degradación exponencial asume que la generación de biogás está a su máximo un período antes que la generación de metano. El modelo asume un período de seis meses entre la colocación de los residuos y la generación de biogás. Por cada unidad de residuos, después de seis meses el Modelo asume que la generación de biogás desciende exponencialmente conforme la fracción orgánica de los residuos es consumida. El año de generación máxima normalmente ocurre en el año de clausura o el año siguiente (dependiendo del índice de disposición en los años finales). También el Modelo estima el contenido de energía del biogás recuperado (en millones de unidades térmicas británicas por hora [mmBtu/hr]). Además, estima la eficiencia de captura, la capacidad máxima de la planta de energía en megavatios (MW), y las toneladas de reducción de emisiones de CO₂.

El modelo provee automáticamente valores para el índice de generación de metano (k) y la generación potencial de metano (L_0) para cada uno de los 33 departamentos en Colombia. Estos valores se desarrollaron usando datos específicos de clima, caracterización de residuos y prácticas de disposición de residuos de Colombia y estima el efecto de estas condiciones en las cantidades y índices de generación de biogás. También se evaluó información de recuperación de biogás actual en dos rellenos sanitarios en Colombia para ayudarnos en la selección de los valores de k y L_0 .

Es importante mencionar que La USEPA reconoce que es difícil modelar la generación y recuperación de biogás en forma exacta debido a las limitaciones en la información disponible para alimentar el modelo; por lo tanto expresan que el fin de este es el de proyectar resultados ideales muy cercanos a los reales.

Para usar el Modelo de Biogás Colombiano, se inicia con la hoja “Alimentación” cuenta con 33 filas de texto que requieren información del usuario en la Columna C para 30 elementos. Todas las 30 preguntas o frases que tienen el texto en amarillo en la Columna C necesitan ser contestadas con información específica del sitio (elementos 25 y 30 se calculan automáticamente y no requieren entradas de información del usuario).

La hoja “Disposición y recuperación de Biogás” no requiere entradas de información del usuario pero proporciona al usuario la capacidad de cambiar los estimados de disposición de residuos y de eficiencia de captura del sistema que fueron calculados automáticamente, y los valores supuestos de recuperación actual de biogás y la línea base de recuperación de biogás (0m³/h). Como esta información por políticas de la empresa EMAS S.A no fue facilitada se la dejo con los datos calculados automáticamente.

La hoja Caracterización de Residuos, es utilizada por el Modelo para calcular automáticamente los valores L_0 y el porcentaje de residuos. El Modelo utiliza los valores predestinados para cada departamento para calcular L_0 a menos que el usuario seleccione “SI” en respuesta de la pregunta #6 de la hoja “Alimentación (¿Existen datos de caracterización de residuos específicos al relleno sanitario en cuestión?), en cuyo caso, la caracterización de residuos específica al sitio. Como ninguno de estos valores fueron facilitados por EMAS S.A, E.S.P se los dejó según las calculadas por el modelo. Respondiendo a la pregunta #6 “NO”.

La hoja de resultados del modelo se muestra en una tabla situada en la hoja “Resultados-Tabla” que esta lista para la impresión con un mínimo de edición Anexo F.

Año - empezando con el año de apertura del relleno sanitario y terminando con el año que el usuario seleccione.

Disposición - índices anuales de disposición de residuos en Mg por año

Disposición Acumulada - total de residuos acumulados en Mg.

Generación de biogás para cada año de proyección en m³/hr, pies³/min y mmBtu/hr.

Estimados de eficiencia de captura del sistema para cada año de proyección.

Capacidad máxima de la planta de energía que podría ser sostenida por este flujo
En el Anexo F muestran los resultados obtenidos para el RELLENO SANITARIO ANTANAS en la ciudad de Pasto. Los resultados del modelo también se muestran en forma gráfica en la hoja “Resultados- Gráfica Figura 29. Los datos mostrados en la gráfica incluyen los siguientes:

Índices de generación de biogás para cada año de proyección en m³/h.
Índices de recuperación de biogás para cada año de proyección en m³/h.
Índices actuales (históricos) de recuperación de biogás en m³/h.

La gráfica muestra la función de degradación exponencial asume un período de seis meses entre la colocación de los residuos y la generación de biogás. Por cada unidad de residuos, después de seis meses el Modelo asume que la generación de biogás desciende exponencialmente conforme la fracción orgánica de los residuos es consumida. El año de generación máxima normalmente ocurre en el año de clausura o el año siguiente, en este caso ocurre en el 2030.

En el mercado existen varias firmas que se dedican a la comercialización de motores específicos para la combustión de este gas; JENBACHER, GUASCOR, CATERPILLAR, etc. Los equipos más modernos queman eficazmente el gas un flujo de 1.2 a 1.8 m³/h de biogás generando 1KWH⁹⁵ o mayor dependiendo de la concentración de metano en el biogás y del grupo electrógeno utilizado.⁹⁶

Para este proyecto se propone un grupo electrógeno con alimentación de biogás CATERPILLAR de 1600 kW 2000 KVA, 60Hz, 1200RPM, 480V y una eficiencia eléctrica del 39.7%, con un consumo de caudal de biogás de 461m³/h o mayor. Con el caudal anteriormente mencionado el grupo electrógeno es capaz de generar la mitad de la potencia nominal.⁹⁷ En el presente proyecto con un caudal medido promedio actual ver Anexo C de 476m³/h generara 813.3KWh mensual, considerando perdidas por altitud se obtiene 691.3KWH. Los excedentes de biogás que no sean usados por el motor generador serán direccionados a la estación de quema y cumplir con los requerimientos del proyecto de Kyoto.

Se debe tener en cuenta que el “Modelo Colombiano de Biogás” es una proyección de los datos y fue usado en la presente investigación para demostrar la viabilidad técnica de implementar este mecanismo por lo menos 10 años después de haber instalado los equipos, mostrar el comportamiento del biogás y el uso de los sistemas de recuperación del biogás. Fue útil para determinar el tipo de generador a utilizar puesto que nos muestra que el caudal tiende a incrementarse, lo que incrementaría los niveles de energía generados por igual; por lo que se propuso un generador de gran capacidad. de igual forma fue usado para determinar los valores. Cabe mencionar que los datos del Anexo C tabla de metano son datos reales de producción y cantidad de biogás recuperado;

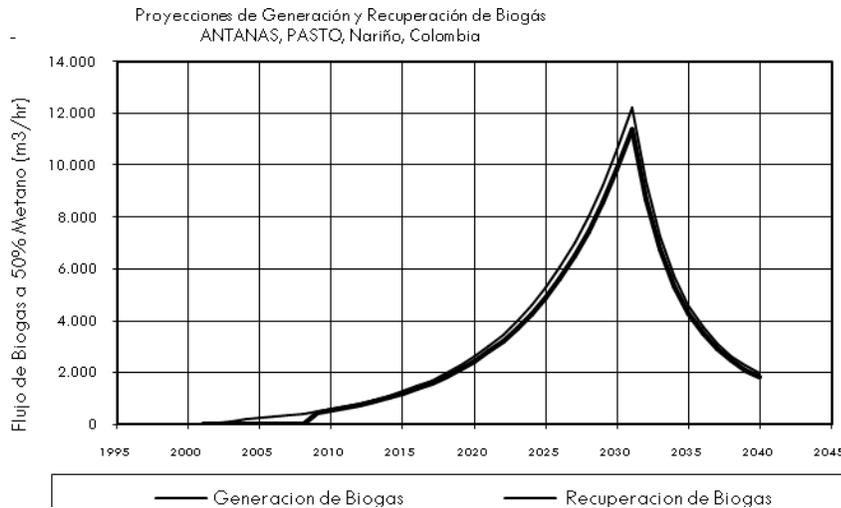
⁹⁵ GONZÁLEZ S. M., Producción Y Recuperación Del Biogás En Vertederos Controlados De Residuos Sólidos Urbanos: Análisis De Variables Y Modelización, Tesis Doctoral, Departamento De Ingeniería Química Y Tecnología Del Medio Ambiente, Universidad de Guijón, España, 2008.

⁹⁶ Estudio De Pre-Factibilidad Para La Recuparacion De Biogás Y Produccion De Energía Relleno Sanitario Queretaro, Mexico, 2009

⁹⁷ Datasheet Gas Generator Set, CATERPILLAR G3520C , GECOLSA, 2009

basados en los datos del Anexo C se concluye que esta propuesta es viable técnicamente. Se podría considerar mayor precisión de los datos propuestos anteriormente si EMAS S.A E.S.P, hubiese brindado más datos reales.

Figura 29. Curva de biogás recuperado y generado.



4.3.8 Aplicaciones y recursos necesarios de una planta de Metanización. La necesidad para las bacterias anaeróbicas de una atmósfera sin oxígeno obliga a confinar los residuos a tratar, en ambientes cerrados e impermeables denominados digestores. De acuerdo a⁹⁸ en los digestores se deben controlar ciertas condiciones de pH, presión y temperatura a fin de que se pueda obtener un óptimo rendimiento de la reacción anaeróbica. Se lleva a cabo con tiempos de residencia y temperaturas de entre 60 días a 20° C y 15 días a 35-55° C. El biogás producido debe someterse a un proceso de depuración mediante el cual se separa el metano del dióxido de carbono y de otros gases que aparecen en menor proporción, a los efectos de su utilización energética. Como se menciona en⁹⁹, la Metanización tiene la ventaja de reducir los olores producidos por la descomposición y la carga contaminante propia de la materia orgánica. Además por desarrollarse en ausencia de oxígeno, el proceso reduce los microorganismos que pueden causar enfermedades en personas y animales a niveles seguros en

⁹⁸ "Generación de energía eléctrica a partir de biogás", Universidad De Costa Rica, Tesis de Maestría en Ingeniería Eléctrica, Costa Rica, 2007

⁹⁹ CARMONA, J.C.; Bolívar, D.M.; Giraldo, L.A. 2005. El gas metano en la producción ganadera y alternativas para medir sus emisiones y aminorar su impacto a nivel ambiental y productivo (en línea). Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias 18(1): 49-63. Tomado de <http://kogi.udea.edu.co/revista/18/18-1-6.pdf>.

menor tiempo que otros tratamientos¹⁰⁰. Algunas fortalezas y debilidades se exponen en la Tabla 20.

El proceso se lleva a cabo de la siguiente forma:

- Depuración y almacenamiento del biogás
- Aprovechamiento energético del biogás
- Biogás es alimentado a motores generadores de electricidad
- Estabilización de la materia mediante su compostaje, que es el material resultante de la digestión del material biodegradable. El compost es un nutriente para el suelo que mejora la estructura y ayuda a reducir la erosión y ayuda a la absorción de agua y nutrientes por parte de las plantas.)

Como principales características se determina.

Tabla 20. Fortalezas y debilidades de un sistema de metanización

Fortalezas	Debilidades
Método respetuoso con el medio ambiente	Solución parcial de aprovechamiento energético (50%)
Aplicada ya con éxito a residuos agrícolas y Ganaderos	Intentos de metanizar residuos sólidos han fracasado como solución global
Conlleva la recogida selectiva y controlada de los residuos	Solución limitada a ciertos tipos de residuos orgánicos

Una planta de Metanización como se describe en¹⁰¹ contiene los siguientes elementos: el digestor es básicamente es un cilindro o contenedor sellado, por donde entran las materias a tratar, los digestores están contruidos de manera tal, que los excrementos se quedan allí bajo condiciones anaerobias por lo menos 40 días. Después el agua pasa por camas de oxigenación, antes de ser utilizada para el riego de los cultivos, enriquecida con nutrientes.

En la digestión participan multitud de cepas bacterianas cuya composición viene determinada por las condiciones existentes dentro del digestor. La materia orgánica se descompone en varios pasos hasta que se obtiene el producto final, el biogás. Los principales factores que inciden en las emisiones de CH₄ son la cantidad de estiércol que se produce y la porción que se descompone anaeróticamente. La primera depende de la tasa de producción de desechos por

¹⁰⁰ TCHOBANOGLOUS, G., THEISEN, H., AND VIGIL, S. (1993): "Integrated Solid Waste Management", Chapter 4, McGraw-Hill, New York. Estados Unidos.

¹⁰¹ The Economics and Feasibility of Electricity Generation using Manure Digesters on Small and Mid-size Dairy Farms

animal y de la cantidad de animales, mientras que la segunda depende de cómo se gestiona el estiércol.¹⁰² Cuando el estiércol se almacena o se procesa como líquido (en lagunas, estanques, tanques o pozos), se descompone anaeróbicamente y puede producir una cantidad significativa de CH₄¹⁰³.

La temperatura y el tiempo de retención de la unidad de almacenamiento son dos factores que inciden significativamente en la cantidad de metano producida. Cuando el estiércol se maneja como sólido (por ejemplo en pilas) o cuando se lo deposita en pasturas y prados, tiende a descomponerse bajo condiciones más aeróbicas y se produce menos CH₄.¹⁰⁴

En¹⁰⁵ se mencionan otros beneficios que incluye el proceso de Metanización ya que a parte del biogás se genera una mezcla de agua, de materia orgánica no degradada (sobretudo sustancias que contienen lignina de madera) y de materia inorgánica (arena, trozos de tierra, sales u otros minerales), que puede utilizarse como abono sin los inconvenientes del estiércol fresco o la materia orgánica sin tratar. Este residuo es de excelentes propiedades fertilizantes, su composición, Tabla 21, varía de acuerdo al desecho utilizado, y en promedio un análisis en base seca.

Los residuos orgánicos son problemáticos ya que se generan en grandes cantidades, con su aprovechamiento energético en forma de biogás, es posible transformar un problema en una oportunidad, por las siguientes ventajas:¹⁰⁶ [13]:

Tabla 21. Porcentaje de fertilizante en fermentación anaeróbica

PARÁMETRO	VALOR
Ph	7.5
Materia Orgánica	85%
Nitrógeno	2.6%
Fosforo	1.5%
Potasio	1.0%

¹⁰² *Ibíd.*, p. 105.

¹⁰³ MARTÍNEZ CENTENO, L.M. (2001): "Valorización energética de lodos de depuradora". ISR. Sevilla, España.

¹⁰⁴ TCHOBANOGLOUS, G., THEISEN, H., AND VIGIL, S. (1993): "Integrated Solid Waste Management", Chapter 4, McGraw-Hill, New York. Estados Unidos.

¹⁰⁵ J.D Arbeláez. Generación De Energía Eléctrica A Partir De Biogás, Universidad De Costa Rica, Tesis de Maestría en Ingeniería Eléctrica, Costa Rica, 2007

¹⁰⁶ *Ibíd.*, p. 105.

- El residuo fermentado está más estabilizado que el material original, pudiendo ser utilizado para diversos usos con o sin tratamiento posterior (aplicación directa al suelo, compostaje, abono, etc.).
- La humedad no es un problema en la producción de biogás, se pueden tratar distintos residuos conjuntamente, reduce el problema de olores, etc.
- Utilización del biogás como combustible para calderas y motores de cogeneración o para calefacción.
- Rendimientos económicos atípicos: ingresos adicionales por gestión de residuos de terceros, venta de abonos orgánicos, ahorro en energía (eléctrica y térmica), acceso a subvenciones por tratarse de una energía renovable.

Los procesos que se llevan a cabo en la planta de producción de biogás Figura 30¹⁰⁷ son tras la recogida de purines, residuos agroalimentarios y orgánicos se procede a elaborar la dieta en un depósito mezclador que más tarde se trasladará a los digestores. En el interior de los digestores se produce la reacción anaeróbica que dará lugar a la emisión de gas metano. El residuo de la digestión pasa por un sistema separador, dando como resultado abono en estado sólido y agua de riego bonificada

Tras conducir el gas metano hasta los motores de combustión se produce la generación de energía eléctrica que será volcada a la red general. La energía térmica resultante en forma de agua caliente es utilizada en la planta y en instalaciones próximas

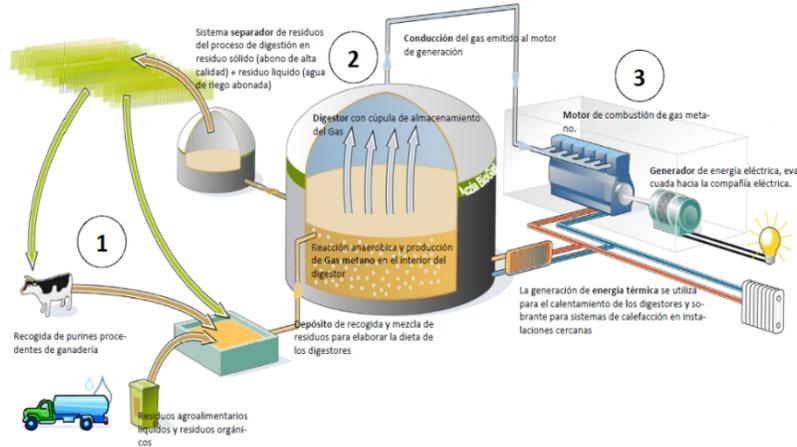
4.3.8.1 Capacidad de generación eléctrica en la mecanización:

Cálculo teórico de la producción de estiércol. Se tiene en cuenta en el estudio realizado en¹⁰⁸, que analiza la cantidad de gas metano producido en la Granja Experimental de CORPOICA (GEC). Para el realizar el cálculo teórico de la producción de estiércol y por presentar cierto grado de dificultad, la recolección de la cantidad total del estiércol de todos los animales y por tener la granja un área demasiado extensa en los sitios de pastoreo, se decidió utilizar la ecuación para estimar el estiércol producido teóricamente. Para realizar el cálculo teórico de la producción de estiércol se realizaron los cálculos teniendo como requisito la aplicación de la ecuación el peso de cada animal correspondiente a su categoría.

¹⁰⁷ L. D Ramirez, Generación de energía eléctrica a partir de biogás, Universidad de Costa Rica, Tesis de Maestría, 2007.

¹⁰⁸ C. J. TAQUEZ MOLINA, Evaluación Del Potencial De Producción De Biogás A Partir De Residuos Animales En La Granja Experimental Obonuco Municipio De Pasto, Tesis Pregrado, Universidad Mariana, 2010

Figura 30. Esquema de una planta de producción eléctrica por Metanización



La GEC tiene el siguiente inventario de animales como se muestra en la Tabla 22.

Tabla 22. Inventario clases de bovino

CATEGORÍA	INVENTARIO
Terneritas	43
Vacas secas	32
Vacas de producción	51
Toros	3

En la Tabla 23, se observa que en la GEC se generan aproximadamente 1'477.411kg de estiércol por año, siendo las vacas de producción las que más generan con 686.160 kg año, seguido de las vacas secas. Estos datos se relacionan directamente con la población de semovientes presentes. De acuerdo a¹⁰⁹ mencionan que los desechos orgánicos del bovino corresponden a 8% de su peso corporal, es decir, que una vaca con 600 kg de peso, produce 48 kg de excretas o 17,5 toneladas anuales.

¹⁰⁹ *Ibíd.*, p. 106.

Tabla 23. Datos de producción de estiércol de acuerdo a clases de bovino

CATEGORÍA	PRODUCCIÓN DE ESTIÉRCOL DIARIA (KG)	PRODUCCIÓN DE ESTIÉRCOL MENSUAL (KG)	PRODUCCIÓN DE ESTIÉRCOL PROMEDIO ANUAL (KG)
Tenera	731.12	21,933	263,203
Vacas Secas	1,281.6	38,448	461,376
Vacas de Producción	1,91	57,180	686,160
Toros	185.2	5,556	66,672
TOTAL	4,103.92	123,117.6	1'477,411.2

4.3.8.2 Análisis de factibilidad técnica de una planta de metanización de residuos vacunos. De igual forma que se realiza el estudio de factibilidad para un relleno sanitario, se estudia la posibilidad de crear una planta de producción de biogás a partir del estiércol de bovinos. Esta planta de desgasificación se describe anteriormente y comparte muchas características con un relleno sanitario, por lo tanto el proceso de generación de biogás y uso de este en generación eléctrica es algo muy parecido.

Dado el hecho que en ni en el departamento de Nariño, ni en el municipio de Pasto existe una planta de Metanización que utilice el biogás con principios de generación de energía eléctrica y los muchos proyectos sobre este proceso se basan en la combustión del gas para producir calefacción a los mismos establos, caso particular el GEC y la eliminación de olores, una propuesta como la presentada es innovadora.

Un modelo de planta de Metanización se describe en el Anexo D, donde se muestra los elementos principales de acción en una planta para este fin. La fuente del modelo es ACZIA BIOGAS¹¹⁰, empresa Española experta en construcción y puesta en marcha de plantas para Metanización.

Para el diseño del sistema se tomaron en cuenta parámetros importantes como la carga instalada y la cantidad de vacas que se ordeñan por día, lo cual dará la cantidad de estiércol que se puede recoger en dicho período de tiempo. Estos dos parámetros son muy importantes ya que se puede dar el caso de que la carga instalada sea muy grande y la cantidad de estiércol no produzca el suficiente biogás por día, por lo que se debe de determinar la carga que se considere apropiada alimentar y que represente en este caso un rubro importante en la factura eléctrica.¹¹¹

¹¹⁰ Gestion Integral de Inversion en plantas de Biogas, ACZIA BIOGAS, España 2010

¹¹¹ "Generación de energía eléctrica a partir de biogás", Universidad De Costa Rica, Tesis de Maestría en Ingeniería Eléctrica, Costa Rica, 2007

Volumen de biogás producido: Los biodigestores tienen que tener la capacidad de poder procesar este volumen de biomasa o estiércol por día. Para determinar el volumen del biodigestor, se aplica la fórmula (6).¹¹²

$$VB = TR \times \left[\frac{EP}{\rho EP} + \frac{RA}{\rho A} \right] \quad (6)$$

Dónde:

VB es el volumen del biodigestor.

TR es el tiempo de retención.

EP es el estiércol producido.

EP es la densidad del estiércol.

RA es la cantidad de agua agregada en la mezcla según la relación estiércol agua.

A es la densidad del agua.

Otras variables a considerar

La relación de mezcla de estiércol y agua es de 1:2, una parte de estiércol por dos de agua.

El tiempo de retención, es el período que duran las bacterias en descomponer el afluente para producir el biogás y depende de la relación estiércol y agua, por lo que una mayor cantidad de agua requiere un tiempo de retención mayor. Para el caso del proyecto se estimó un tiempo de 60 días por ubicarse en una zona de clima frío.¹¹³

Aplicando la fórmula a los valores obtenidos y considerando una densidad del estiércol de 993 kg/m³, y de 1000 kg/m³, para el agua se obtiene el volumen de biodigestor, que es de 277.5246 m³. De acuerdo se toma el 30% del valor del biodigestor para realizar la construcción de cámara de producción de gas que tendría la capacidad de 118.9391 m³.

Dependiendo de la relación de carbono y nitrógeno en el afluente así será la cantidad de biogás producido dentro del biodigestor. Por lo que una baja concentración de nitrógeno limita la reproducción de bacterias y una baja relación de carbono, no permite que las bacterias puedan producir el biogás. Según estudios el volumen de biogás producido se estima entre 0.3 y 0.5m³, de biogás por m³ de volumen del biodigestor. En definitiva se tendría una producción diaria de biogás entre 83.2574m³ y 138.7623m³. Se realizó el análisis del biogás producido por medio de la cromatografía de gases brindado los siguientes resultados.

¹¹² C. J. TAQUEZ MOLINA, Evaluación Del Potencial De Producción De Biogás A Partir De Residuos Animales En La Granja Experimental Obonuco Municipio De Pasto, Tesis Pregrado, Universidad Mariana, 2010

¹¹³ *Ibíd.*, p. 109.

Tabla 24. Datos de producción de biogás

PICO	PORCENTAJE	PRESUNTO GAS
1	3.7	Hidrogeno
2	9.9	Gas Carbono
3	1.6	Nitrógeno
4	82.6	Metano
5	2.1	Monóxido de Carbono

Al utilizar el estiércol total proveniente de la GEC se obtendría una cantidad de 138,7623m³ de biogás en el mejor caso ya que la relación Nitrógeno Carbono favorece que el metano oscile en un 82% de presencia en el biogás producido.

Cálculo de la capacidad de la unidad generadora. Para determinar la capacidad de la unidad generadora se requiere el cálculo del estiércol producido por los bovinos y determinar la cantidad de biogás que generan los biodigestores durante un día, además la máxima carga y el tiempo de operación. El biogás se mantendrá circulando en el 30% de excedente del biodigestor, durante el día y cuando se necesario su uso se dispondrá de él pasando por filtros y mecanismos de adecuación del biogás. Para evitar la sobrepresión en el biodigestor, se elimina los excedentes de agua y materia, manteniendo la relación de agua con respecto la materia igual a la establecida anteriormente.

Como primera medida se analiza en los cálculos, teniendo en cuenta que el valor de 1m³ de biogás generado por los biodigestores llega a generar por medio de los motores diesel- biogás 1.44 kVA. De esta manera se realizaron los cálculos para alimentar una carga de 37 kVA diarios con una producción de biogás de 25.62 m³. Realizando el mismo procedimiento se obtiene una generación de energía para satisfacer una carga aproximada de 199.81 kVA diarios, con una producción de biogás de 138.7623 m³. Se debe tener claro que por la altura a la que se encuentra la GEC se perderá un 15% de la capacidad nominal del generador. Como para la puesta en marcha se seleccionó un motor diesel CUMMINGS, con capacidad de 240 kVA/192 kW, con un factor de potencia de 0.8. El cálculo de generación con pérdidas por altura sería 204 kVA/163 kW. Como se mencionó en el numeral 3.4.3, sobre sistemas de generación eléctrica, se modificará este motor diesel para hacerlo funcionar con una mezcla del 70% biogás 30% diesel, como se menciona en.¹¹⁴

¹¹⁴ "Generación de energía eléctrica a partir de biogás", Universidad de Costa Rica, Tesis de Maestría en Ingeniería Eléctrica, Costa Rica, 2007

Como el motor tendría un consumo de solo el 30% de diesel en el caudal y 70% de lo reemplaza el biogás; se generaría un ahorro del 70% en el uso del diesel siendo una alternativa llamativa para la generación de electricidad. Complementando el precio de la compra del diesel con la venta de abono orgánico útil para uso agrícola.

Como segunda opción se analiza la propuesta de lo que implica el usar solo el biogás para generar electricidad esto requeriría un moto generador que utilice solo el biogás como combustible principal, para este estudio se tiene en cuenta según, el equivalente a 1m^3 de gas metano (no Biogás) equivale a 9.47 KWh. Para determinar el poder energético del Biogás se multiplica el equivalente mencionado anteriormente por el porcentaje existente del Metano en el Biogás, para este caso 82%. La cantidad de energía que se produce en la planta de Metanización se determina por: la multiplicación entre el volumen de biogás producido en el día por la equivalencia de 1m^3 de metano en energía (9.47 KWh), el porcentaje de presencia de metano en el Biogás y la eficiencia del motor. Como resultado se obtiene en la GEC se obtiene 410.16 KWh. La eficiencia del motor se la establece en 38% dada por el fabricante del generador; se elige dos motogeneradores CATERPILLAR de 177 KW/221KVA, para cumplir con la expectativa de generación.

4.3.9 Análisis de factibilidad económica para los casos propuestos:

4.3.9.1 Metanización y desgasificación. Factibilidad Económica Planta de Metanización GEC: La inversión que se debe realizar para plantear un proyecto de este tipo, es la calculada en la Tabla 25, en ella solo se tiene en cuenta el capital necesario para la construcción y los equipos a usar. Más no contempla los costos operacionales ni de mantenimiento que se producen por la puesta en marcha del proyecto de generación de energía.

De acuerdo a la factibilidad técnica que se mostró anteriormente, se destaca el ahorro del 70% del consumo del diesel en el motor generador gracias al reemplazo de este combustible por Biogás. Los resultados mostrados en¹¹⁵ muestran que es factible su aplicación y los resultados expuestos sobre la disminución en el consumo de diesel es impórtate de igual manera los ahorros en consto de combustible.

El proyecto propone reemplazar en cierta medida el consumo de energía proveniente de la red eléctrica por la generada por medio del proceso de Metanización, con ello lograrían reducir el tipo el tipo de tarifa de electricidad, que

¹¹⁵ THEMELIS N.J., KIM Y.H., BRADY M.K. (2002): "Renergy recovery from New York City solid wastes". Waste Management and Research, 20: 223-233. Estados Unidos.

a consideración de los autores es muy alta por tratarse de una granja de producción ganadera y los equipos de ordeño demanda una cantidad considerable de energía.

Tabla 25. Inversión para el desarrollo de una planta de Metanización

Precio de construcción	\$ 7,500,000
Precio biodigestor	\$ 56,000,000
Precio agitadores automáticos	\$ 1,200,000
Precio cámara de homogenización	\$ 9,000,000
Precio cámara de adecuación biogás	\$ 13,400,000
Sistema de extracción y filtrado	\$ 5,200,000
Sistema de medición y control	\$ 1,800,000
Moto generador Diesel	\$ 120,000,000
Sincronizador de línea	\$ 15,700,000
Tractor	\$ 12,000,000
Subtotal	\$ 241,800,000
Ingeniería y supervisión 10%	\$ 24,180,000.0
Imprevistos 10%	\$ 24,180,000.0
TOTAL	\$ 290,160,000

Los costos de operación según los autores de¹¹⁶ serán referenciados solo en el consumo de Diesel, por practicidad se analizan los precios en un mercado mayorista, bajando el costo del litro de Diesel. Las ventajas de comprarlo en mercado mayoristas y en grandes proporciones es la capacidad de almacenar el combustible lo que evita aumentar el precio por kWh, a causa de los aumentos periódicos en el mercado colombiano de los hidrocarburos, de esta forma se tendría un precio fijo, por un largo tiempo y un consumo muy reducido con respecto al funcionamiento normal gracias la mezcla biogás-diesel.

Para este proyecto se consulta el precio de diesel en el mercado mayorista en¹¹⁷.

Se calcula el litro de diesel con en un valor de 1,637.5 \$/L. Se muestra la función de consumo para un generador Diesel, esta muestra ser una función cuadrática que expresa el consumo de combustible (L/h) en función de la potencia de salida (KW) tal como se indica en (7).

¹¹⁶ Generación de energía eléctrica a partir de biogás. Op. Cit., p. 110

¹¹⁷ Ajuste de Gasolina y A.C.P.M, anuncio el Gobierno, <http://www.portafolio.co/economia/ajuste-150-gasolina-y-acpm-anuncio-el-gobierno.>, 1 de Abril de 2011.

$$F \left[\frac{L}{h} \right] = a_i \left[\frac{L}{h} \right] + b_i \left[\frac{L}{KW h} \right] P [KW] + c_i \left[\frac{L}{KW^2 h} \right] P^2 [KW^2] \quad (7)$$

En la ecuación (7), se muestran las unidades de la ecuación, y de los coeficientes a_i , b_i y c_i que son propios de cada motor; para el generador propuesto se consultó el manual de especificaciones técnicas del equipo y no se encontraron los coeficientes por lo que se trabaja con los datos de consumo de combustible (L/h) en los cuatro estados del motor a 1/2, 1/4, 3/4 y carga completa. Para obtener los coeficientes, se utilizó el método de regresión cuadrática para encontrar los coeficientes por medio de la función *polyfit* de Matlab. Donde F es la función de consumo y P la potencia generada.

Los resultados son los siguientes:

$$F = 4.66699 - 0.0232P + 0.0005P^2 \quad (8)$$

Con la ecuación (7) se puede obtener la función costo de generación dado en \$/h (9)¹¹⁸ (Función usada en el algoritmo desarrollado para despacho económico) a esta ecuación se multiplica el precio del litro de diesel por cada coeficiente.

$$C \left[\frac{\$}{h} \right] = a_i \left[\frac{\$}{h} \right] + b_i \left[\frac{\$}{KW h} \right] P [KW] + c_i \left[\frac{\$}{KW^2 h} \right] P^2 [KW^2] \quad (9)$$

Al multiplicar el precio del litro de diesel (\$/L) de 1678.5\$/L con la ecuación (7) las unidades cambiarán y se obtendrá la función de costo C (\$/h) del generador que determina el costo que implica generar determinadas unidades de potencia P medida en KW. La función de costo se describe en (10).

$$C = 7,647 - 37.99P + 0.8187 P^2 \quad (10)$$

La factibilidad económica de producción energética en la misma GEC usando un moto generador de Biogás CATERPILLAR que reemplaza el moto generador CUMMINGS seleccionado en la Tabla 25. El reemplazo de la moto generador implica una inversión de \$380'000,000. Para determinar la función de costo de este generador se aplica el proceso anterior, basados en los datos técnicos de consumo del generador provisto por GECOLSA. La función de costo de consumo y generación van dados por (11) y (12).

¹¹⁸ Datasheet Gas Generator Set, CATERPILLAR G3520C , GECOLSA, 2009

$$F = 33.409 + 0.0318P + 0.0007P^2 \quad (11)$$

$$C = 529.2 + 4.7805P + 0.0111P^2 \quad (12)$$

La función de costo se obtiene al multiplicar (11) por el precio de compra de biogás 15.84\$/m³, este valor de precio de referencia se obtiene gracias a¹¹⁹ por el ejemplo de una planta de Metanización de iguales dimensiones.

4.3.9.2 Factibilidad económica desgasificación del relleno sanitario ANTANAS. La inversión que se debe realizar para plantear un proyecto de este tipo, es la calculada en la Tabla 26, en ella solo se tiene en cuenta el capital necesario para la construcción y los equipos a usar. Más no contempla los costos operacionales ni de mantenimiento que se producen por la puesta en marcha del proyecto de generación de energía.

Tabla 26. Inversión para el desarrollo de una planta de generación con Biogás.

Sistema de transporte (tubería)	\$ 105,000,000
Sistema de extracción y filtrado	\$ 300,000,000
Sistema de medición y control	\$ 1,800,000
Moto generador biogás	\$ 1,200,000,000
Sincronizador de línea	\$ 15,700,000
Subtotal	\$ 1,622,500,000
Ingeniería y supervisión	\$ 162,250,000.0
Imprevistos	\$ 162,250,000.0
Total	\$ 1,947,000,000

De acuerdo a la factibilidad técnica analizada en el numeral 4.3.1 se demuestra la posibilidad de generar electricidad en un buen nivel de potencia (superior a los 800KW) gracias a un gran caudal biogás y a tener un sistema de retención y cubrimiento efectivo en el relleno sanitario. Aunque en la Tabla 26 se establece los precios para los sistemas de transporte, extracción y filtrado además del sistema de monitoreo y control. Estos no se asumen ya que son del tipo ilustrativo para este caso en particular porque están instalados y puestos en marcha actualmente junto con el sistema de quema de biogás. El sistema generador de biogás se instalara al lado de la estación de recolección y extracción de biogás y será la parte central del proyecto junto con el sistema de monitoreo y control planteado en el Capítulo tres 3.

¹¹⁹ Walsh, J.; Roos, C.; Smith, M.; Harper, S.; Wilkins, A. 1988. Handbook on biogas utilization. USA. Environment, Health and Safety division Georgia Tech Research Institute. p. 133.

Para el análisis de costos de operación se tiene en cuenta el valor pagado por m³/h de biogás y otros deberes de pago planteados en el contrato entre la administración del relleno sanitario y la empresa generadora. Como los datos provistos por EMAS S.A E.S.P fueron limitados y ante la imposibilidad de determinar el precio pagado por m³ de biogás, se optó incluir un precio de m³ de biogás propuesto en la experiencia internacional, según el Methane Outreach Programme patrocinado por el USAID¹²⁰ señala que el pago por el biogás a los propietarios esta entre el 10 y 30 por ciento de las ganancias obtenidas por proyectos MDL, lo que equivale a US\$0.35/mmBtu, aplicado la conversión monetaria y de unidades pertinente de milímetro de Britich Thermal Unit (mmBtu) a m³ se obtiene un precio de 11.65\$/m³, ante una tasa representativa de cambio de \$1865.11 pesos por dólar, consultados el 1 de abril de 2011.

Para determinar la función de consumo, de costo y de costo marginal se realizara el mismo procedimiento de la factibilidad económica de una Metanización. Aunque en este caso se trabaja con un moto generador a biogás de acuerdo a¹²¹ y¹²², la función de consumo se aplica a cualquier unidad generadora que trabaje con combustible. Para asegurar que esto se consultó con GECOLSA distribuidor de CATERPILLAR en Colombia, quien reafirmó que un moto generador a biogás en su comportamiento de trabajo y consumo son muy parecidos a un moto generador Diesel por lo tanto la función de costo muestra ser una función cuadrática que expresa el consumo de combustible para este caso biogás (m³/h) en función de la potencia de salida (KW) tal como se indica en 13.

$$F \left[\frac{m^3}{h} \right] = a_i \left[\frac{m^3}{h} \right] + b_i \left[\frac{m^3}{KW h} \right] P [KW] + c_i \left[\frac{m^3}{KW^2 h} \right] P^2 [KW^2] \quad (13)$$

Para nuestro estudio la función de consumo será:

$$F = 319.98 - 0.0612P + 0.0002P^2 \quad (14)$$

La función de costos, basados en (4.9) será:

$$C = 3,727.8 - 0.713P + 0.0023P^2 \quad (15)$$

¹²⁰ Estudio de pre-factibilidad para la recuperación de biogás y producción de energía relleno sanitario Queretaro, Mexico, 2009

¹²¹ Faisal A. Mohamed, microgrid Modelling and Online Management, Ph D Thesis, Helsinki University of Technology Control Engineering, Enero 2008.

¹²² J. Grainger, W. Stevenson, "Power Systems Analysis," McGraw-Hill, 1994

4.4 ENERGÍA GEOTÉRMICA

En general, la palabra geotermia se refiere a la energía térmica natural existente en el interior de la tierra. En la práctica se le denomina así al estudio y utilización de la energía térmica que transportada a través de la roca y/o fluidos, se desplaza desde el interior de la corteza terrestre hacia los niveles superficiales de la misma, dando origen a los sistemas geotérmicos. La corteza no está formada por una sola estructura, sino que consta de varias partes llamadas placas tectónicas, las cuales están en constante movimiento relativo a velocidades de unos cuantos centímetros por año. El origen de los sistemas geotérmicos está relacionado con el movimiento de las placas oceánicas y continentales, las cuales al chocar o separarse constituyen regiones geológicamente activas en las cuales se presentan los fenómenos de subducción de placas o de debilidad cortical. En el primer caso, la colisión e introducción de una placa por debajo de otra produce elevadas temperaturas, formándose magma que puede llegar a la superficie para crear volcanes.

En el segundo caso, al existir placas con movimientos divergentes, el magma del manto puede llegar cerca de la superficie originando vulcanismo.¹²³ Además, las capas rocosas porosas y las capas rocosas impermeables atrapan agua, vapor de agua a altas temperaturas y presión impidiendo que éstos salgan a la superficie. Si se combinan estas condiciones se produce un yacimiento geotérmico. Para poder extraer esta energía es necesaria la presencia de yacimientos de agua cerca de estas zonas calientes. El agua subterránea, al ser calentada, forma sistemas convectivos que transportan hacia arriba el calor de las profundidades; si además se da la condición de tener estratos de roca porosa o fracturada, limitadas por rocas impermeables, se obtiene un "Reservorio Geotérmico", el que puede o no manifestarse en superficie. La explotación de esta fuente de energía, también se puede realizar perforando el suelo y extrayendo el agua caliente. Si su temperatura es suficientemente alta, el agua saldrá en forma de vapor y se podrá aprovechar para accionar una turbina. Esto posibilita la producción de electricidad a bajo costo y de forma permanente durante un periodo prolongado de tiempo¹²⁴.

Los recursos geotérmicos pueden ser: vapor, agua caliente, rocas secas calientes, rocas geopresionadas, es decir rocas porosas que contienen una mezcla de agua y gases a elevada presión y temperatura y rocas fundidas (magma). Por razones económicas los fluidos con temperaturas inferiores a 150 °C se destinan a usos térmicos directos y cuando la temperatura es superior a la producción de energía eléctrica.

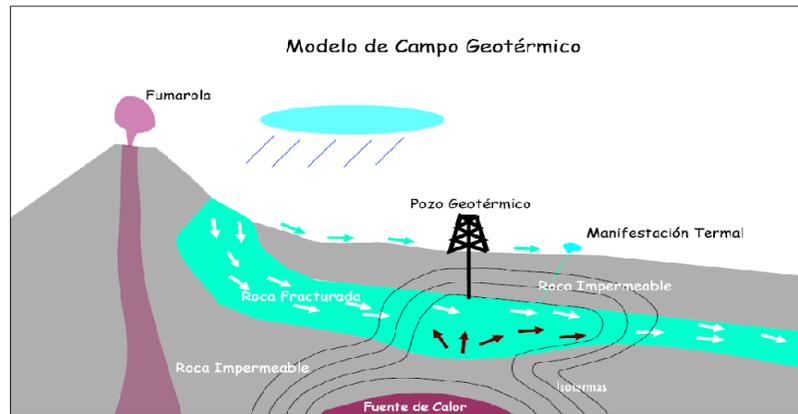
¹²³ Alonso, F. R. (1993). Sistemas Geotérmicos de Roca Seca y Caliente: una Fuente de Energía no Convencional. Tesis de Maestría Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F.

¹²⁴ Marcos Alejandro Badra, Energía Geotérmica en la producción de electricidad, Argentina.

4.4.1 Campos geotérmicos. Los campos geotérmicos son aquellas zonas limitadas de la corteza terrestre en las cuales existe un flujo anormal de calor que produce el calentamiento de las aguas contenidas en los estratos de rocas permeables. Están cubiertos por una capa rocosa impermeable que impide el escape de fluido caliente (Figura 31).

4.4.2 Generación de energía. Uno de los usos más importantes de los fluidos geotérmicos es la producción de Energía Eléctrica. La elección del ciclo para la conversión de la energía contenida en el agua y vapor en energía eléctrica depende de sus condiciones físico-químicas, de las características del campo y de la potencia eléctrica generable.

Figura 31. Modelo de campo geotérmico



La eficiencia de las plantas geotérmicas, esto es, la fracción del calor contenido en el fluido que es transformado en electricidad, oscila entre 10 y 17%. La baja eficiencia se debe al hecho de que los fluidos geotérmicos tienen temperaturas relativamente bajas si se compara con el vapor producido en las calderas de las plantas de energía térmica convencional. No obstante, el costo del calor es competitivo comparado con otros combustibles, pero debe considerarse como una ventaja la mínima contaminación que asociada a su explotación. El dimensionamiento y diseño de una central geotérmica es un aspecto de suma importancia, pues de él dependerá el costo del kWh producido.

El costo del KW instalado disminuye al aumentar las dimensiones de la instalación, pero se debe tener en cuenta que una central más grande requiere de un número más elevado de pozos, mayores gastos, fundamentalmente para la construcción de las líneas de vapor, y mantenimiento de la central más dificultoso. Existen centrales geotérmicas de poca potencia (2-3.5MW), de costo relativamente bajo y de rápida instalación que se adaptan particularmente a las fases iniciales de la explotación de un campo. El tamaño apropiado de la planta

dependerá de la productividad de los pozos y de la potencia total estimada del recurso. Es usual la construcción de plantas en módulos de 40-50MW cuando la producción por pozo es de 4-5 MW.

Existen diversos ciclos de generación de energía geotérmica, pero se pueden clasificar en dos grandes grupos, ciclos a contrapresión y ciclos con condensador. Fuera de esta clasificación se hallan los denominados ciclos binarios.

Ciclos a contrapresión: Es el más simple y económico de todos los ciclos geotérmicos. El vapor seco del pozo, o previa separación de agua si es vapor húmedo, se envía a la turbina y luego se descarga a la atmósfera. Su rendimiento es bajo, el consumo varía entre 20 y 30 kg de vapor/ kWh, principalmente por el hecho de que la turbina descarga directamente a la atmósfera, pero se adapta bien para plantas de pequeña capacidad o cuando el contenido de gases no condensables en el vapor es superior al 10 %, esto último se debe al elevado consumo de energía que se necesita para extraer estos gases del condensador en un ciclo a condensación.

Ciclos con condensador: En estos ciclos, el vapor, luego de pasar por la turbina, es descargado a un condensador, a una presión de aproximadamente 0,1 atm, aumentando de esta manera el salto de presión entre la entrada y la salida de la turbina.

El rendimiento es más elevado, prácticamente el doble del que se obtiene en una central a contrapresión; el consumo es de aproximadamente 7-10 kg de vapor/kWh. La condensación se produce con un fluido frío, que proporciona la torre de enfriamiento, este absorbe el calor de condensación y luego se retorna a la torre donde se enfría nuevamente. Como se mencionó anteriormente una de las dificultades más serias que afectan el rendimiento del ciclo está dada por la concentración de gases incondensables en el vapor. Cuando ésta es elevada, el costo de la remoción de gas del condensador justifica el uso de centrales sin la etapa de condensación.

Un ciclo con dos etapas de separación produce entre 20-30 % más energía que un ciclo con una etapa. No obstante, este aumento en la performance del ciclo debe ser evaluado frente al costo adicional que implica el ingreso de vapor secundario en la turbina. El costo de las líneas de vapor y válvulas de control requeridas pueden exceder la ventajas obtenidas con el aumento del rendimiento en la turbina.

Ciclos Binarios: Estos ciclos se utilizan en los casos en que se dispone de agua a una temperatura de 80 a 150°C. El agua caliente se envía a un evaporador para evaporar y sobrecalentar un fluido secundario de bajo punto de ebullición, tal como isobutano, y es posteriormente reinyectada en un pozo cercano. El fluido secundario evaporado se expande entonces en la turbina y se descarga luego a

un condensador desde donde, en estado líquido, es bombeado para reiniciar el ciclo.

Estos ciclos tienen la ventaja de utilizar fluidos geotérmicos de más baja temperatura, aún aquellos químicamente desfavorables o que tienen altas proporciones de gases incondensables. Los inconvenientes tales como corrosión o incrustación, se reducen al intercambiador de calor. Tienen la ventaja, además, de admitir mezclas de agua/vapor sin previa separación. Sin embargo, tienen las desventajas de requerir de un fluido secundario muy volátil y el uso de bombas que absorben una cantidad importante de la energía generada. En cuanto al costo, éste debería ser más elevado, dado que son más complejas; sin embargo, por su versatilidad se las construye en serie y no bajo pedido, pudiéndose las adquirir en el mercado a un costo relativamente bajo.¹²⁵

4.4.3 Potencial en Colombia. Colombia un país con una gran variedad de fuentes de energía y que no ha explotado de una manera sistemática la geotermia, sin embargo se han hecho algunos esfuerzos por desarrollarla desde hace aproximadamente 30 años. No fue sino hasta la crisis energética de la década de los 90's, cuando se vio la necesidad de explorar fuentes de energía alternativas.

En 1997 fue perforado el primer pozo geotérmico en las Nereidas; en ese mismo año, Ingeominas, (Instituto de investigación e información geocientífica) emprendió una exploración geotérmica del volcán, comenzando con geología, vulcanología y geoquímica. Esos estudios preliminares indicaron la posibilidad de un yacimiento que opera a unas temperaturas entre 200-250° en un estrato maduro del volcán. A partir de la información recolectada y procesada por Ingeominas, de las características de los yacimientos termales y datos de temperatura en pozos petroleros, se construyó el mapa geotérmico de Colombia¹²⁶. Este mapa se constituye en una herramienta de ayuda para determinar el potencial de utilización tanto directa como indirectamente de los recursos geotérmicos, tanto para los entes gubernamentales como para los privados. Por ahora se le han dado usos directos a los recursos geotérmicos (principalmente para actividades como nadar o bañarse).

4.4.3.1 Mapa de fuentes termales. Colombia tiene cerca de 300 yacimientos de fuentes termales¹²⁷, los cuales se muestran en la Figura 32, la mayoría (cerca de 100) están localizados en el volcán Cerro-Bravo, la caracterización química está

¹²⁵ Energía Geotérmica-J.L. SIERRA, G. PEDRO. 1998 Argentina.

¹²⁶ Formulación de un programa básico de normalización para aplicaciones de energías alternativas y difusión. Utilización de la Energía Geotérmica documento descriptivo, UPME, versión 00, Bogotá, D.C., Marzo de 2003.

¹²⁷ Forero, 1958, CHEC y ENEL, 1968, OLADE et al., 1982, CHEC, 1983, OLADE 1987, Arcila, 1985 and Garzón, 1997).

disponible para aproximadamente 180 yacimientos y sus aspectos destacables se presentan en la Figura 32.

También en la Tabla 27, se puede observar el Inventario de Yacimiento de Aguas Termales reportados en Colombia, en la cual se puede encontrar índices de temperaturas geoquímicas más altas, destacando las temperaturas existentes en el volcán azufral ubicado en el departamento de Nariño.

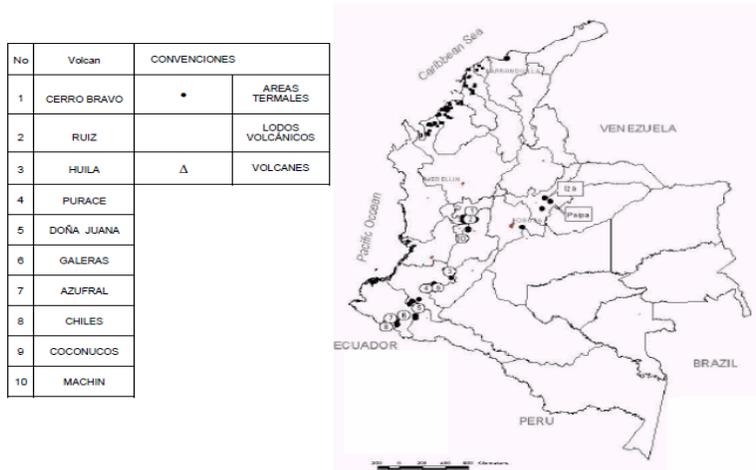
4.4.4 Datos de energía geotérmica registrados en el departamento de Nariño.

Basados en los estudios realizados a nivel nacional realizados por las entidades UPME e INGEOMINAS, Nariño es un departamento que presenta un alto potencial geotérmico debido a la presencia de cuatro volcanes con capacidad geotérmica, entre ellos se encuentran el Volcán Azufral, Galeras, Chiles y Doña Juana. Basados en estudios realizados en la región por diferentes entidades interesadas en esta fuente de energía se encontró que se han empezado estudios de prefactibilidad en los volcanes Azufral y Chiles.

Tabla 27. Inventario de Yacimiento de Aguas Termales en Colombia

PARAMETROS	Nº	Temperaturas Geoquímicas mas altas	PARÁMETROS	Nº	Temperaturas Geoquímicas mas altas
			Localizado en:		
áreas termales	298		Cundinamarca- Boyacá		
caracterización química	178		Nevado del Ruiz		240-260
Clasificación (anion Dominante 50>%)			Hulla		180
aguas cloradas neutras	17		PURACE		220
Bicarbonato	102		DOÑA JUANA		200
sulfato	37		AZUFRAL		230-250
mezclado en proporciones similares	22		Temperatura superficial		
Aguas sulfatadas	24		<30°C	112	
presunción de contribución magmática	8		30-50°C	115	
Presunción de contribución de fluidos profundos	29		50-70°C	43	
			70-95°C	15	

Figura. 32 Mapa de Áreas Geotérmicas en Colombia



El estudio de prefactibilidad abarca un área entre 500 y 2000Km². En esta fase se pretende lograr una evaluación preliminar del recurso y, eventualmente, ubicar los sitios para la perforación de pozos exploratorios profundos. Los estudios geológicos, hidrogeológicos y geoquímicos se orientan a la determinación de la presencia y origen de la anomalía térmica, las características del reservorio y de la formación rocosa superior¹²⁸.

- **Proyecto geotérmico de Volcán Azufral.** A partir del año 2001 se iniciaron los estudios en el volcán Azufral, con el fin de determinar su capacidad para generar energía eléctrica.¹²⁹ Estos estudios los vino realizando Ingeominas en cooperación con el gobierno del Japón.

En el tiempo reciente (2800 a 3800 años) el Volcán Azufral ha tenido varias erupciones volcánicas de tipo pliniano. Estas erupciones en su fase inicial fueron caracterizadas por eyecciones magmáticas de pumitas y flujos piroclásticos; esta fase inicial fue seguida por varias explosiones freatomagmáticas debido a la interacción del agua con el magma y eyecciones de material lítico alterado, una clara indicación de la existencia de un acuífero sobre la cámara magmática.

Basados en las características de la alteración del material lítico y la alteración de lava con el material sedimentario (secuencia argilítica y material silíceo) la temperatura del reservorio geotérmico se ha estimado en 250° C o más.

¹²⁸ Energía Geotérmica-J.L. SIERRA, G. PEDRO. 1998 Argentina.

¹²⁹ Francisco Giovanni Melo. Conociendo Nuestro Esquema de Ordenamiento Territorial. Municipio de Mallama. Febrero 2003.

Además de las rocas con alteración hidrotermal se han encontrado minerales típicos de ambientes hidrotermales con estratificación vertical correspondientes a un incremento en la temperatura hacia las zonas más profundas. En particular, volcanitas con típica alteración mineral de zonas argilíticas y filíticas con algunas intercalaciones sedimentarias, también son encontradas rocas que corresponden a zonas filíticas y filíticas – propilíticas. Este hecho indica que el sustrato del Azufral tiene al menos una correspondencia con la caldera y esta sobre una secuencia volcánica una secuencia volcano-sedimentaria, en cuyo interior se tiene establecido un sistema hidrotermal de alta temperatura. La interpretación geológica indica que la zona argilítica – propilítica y propilítica son rocas fracturadas por el tectonismo activo que actúan como el reservorio geotérmico.

En síntesis, las características relevantes del campo geotérmico del Azufral son:

Persistente actividad volcánica con eventos recientes; (II) Evolución magmática completa, andesitas ariolitas (contenido de SiO_2 de 60 a 71%), (III) la existencia de cráteres de explosión freática en el interior de la caldera, (IV) continua actividad fumarólica y varias manifestaciones de agua termal, (V) la evidente existencia de un reservorio de alta entalpia (de los productos líticos hidrotermalizados) y, (VI) un basamento conformado por roca terciarias. Todas estas características corresponden verdaderamente a un promisorio y gran campo geotérmico¹³⁰.

- **Pre factibilidad:** En esta etapa se llevan a cabo estudios que permiten determinar si existe calor suficiente que pueda ser utilizado y en donde está, para poder generar energía eléctrica en un futuro. Se necesitan estudios en geología, geofísica, geoquímica y ambientales, también se necesitan estudios sociológicos para saber cómo es posible beneficiar a las comunidades de la zona con un futuro desarrollo geotérmico. Los estudios a realizar no afectan al medio ambiente; ya que no se hacen perforaciones o pozos, ni se construyen caminos, ni se cortan árboles, tampoco se afectan los nacimientos de agua ni las fuentes termales. Solamente se hacen mediciones sobre el terreno para interpretar las características internas de la tierra y se toman muestras de agua, rocas y gases del volcán y sus alrededores, que se llevan a un laboratorio para ser analizadas y saber si existe un potencial geotérmico utilizable. Lastimosamente este proyecto fue frustrado debido a la exigencia exagerada de los cabildos indígenas cercanos al Volcán Azufral y grupos al margen de la ley. Por esta razón no se pudo terminar con la primera fase del proyecto y no se pudo estimar el potencial de generación eléctrica.

¹³⁰ *Ibíd.*, p.121.

Actualmente Ingeominas está avanzando en estos estudios y tienen como objetivo determinar el potencial geotérmico del volcán Azufra, pero todos estos resultados serán expuestos hasta el año 2012.

- **Proyecto OLADE/CEPAL/GTZ Estudio para la evaluación del entorno del proyecto geotérmico binacional “Tufiño-Chiles-Cerro Negro”.** En agosto de 1993, los gobiernos de Colombia y Ecuador suscribieron un Acuerdo para Generación Eléctrica por Geotermia, con el que se formalizó la creación del Proyecto Geotérmico Binacional "Tufiño-Chiles- Cerro Negro".¹³¹

El área de interés geotérmico está ubicada en el ámbito de la Cordillera Occidental, en la frontera entre Colombia (Departamento de Nariño) y Ecuador (Provincia del Carchi), alrededor de los volcanes Chiles (4,730m) y Cerro Negro (4,470m) y cerca de la parroquia de Tufiño (3,000habitantes). La línea fronteriza colombo-ecuatoriana pasa por las cumbres de ambos volcanes y divide longitudinalmente en dos mitades a la zona de interés geotérmico.

Con el apoyo financiero del Gobierno de Italia, la OLADE (la Organización Latinoamericana de Energía) conjuntamente con ICEL (Instituto Colombiano de Energía Eléctrica) e INECEL (Instituto Ecuatoriano de Electrificación) acordaron la realización del Estudio de Prefactibilidad que se desarrolló entre 1986 y 1987, a cargo de la firma consultora *Aquater*. El estudio de prefactibilidad de *Aquater* (1987) definió dos posibles horizontes productores de fluidos geotérmicos:

- a) Reservorio profundo, emplazado cerca de los 2.000 m de profundidad, con temperaturas superiores a los 200 °C;
- b) Reservorio somero, a una profundidad de 500 a 1.000 m, con temperaturas de alrededor de 150° C.

El reservorio profundo y de mayor temperatura es, entonces, el principal objetivo para la exploración y desarrollo del recurso geotérmico. Las condiciones técnico-económicas de una central geotermoeléctrica dependen de las características del yacimiento, verificadas por perforaciones. Por consiguiente, con el actual grado de información, se puede adelantar que, si la composición química del fluido y las propiedades físicas del yacimiento concuerdan con las que existen en la mayoría de los campos geotérmicos en explotación, el desarrollo más económico del proyecto consistiría en una central del tipo vapor directo a condensación. El estudio de prefactibilidad

¹³¹ Manlio F. Coviello. PROYECTO OLADE/CEPAL/GTZ Estudio para la Evaluación del Entorno del Proyecto Geotérmico Binacional “Tufiño-Chiles-Cerro Negro”. Junio 23 de 2000.

determinó que el límite de interés económico se ubica entre 10 y 30MW, razón por la que tomó como alternativa las potencias de 15 y 30MW.

4.4.5 Análisis de factibilidad:

4.4.5.1 Factibilidad técnica. El estudio de prefactibilidad del proyecto TCCN (Tufiño-Chiles-Cerro Negro) – llevado a cabo por Aquater/OLADE a finales de los años ochenta - determinó que el límite de interés económico del proyecto se ubica entre 10 y 30MW, razón por la que tomó como alternativa las potencias de 15 y 30MW. No obstante, en vista de la necesidad de compatibilizar la realidad del actual entorno en el que debería incursionar el proyecto - en un momento particular, caracterizado por una profunda reestructuración de las condiciones del mercado eléctrico - habría que asignarle el carácter de un *desarrollo pionero*, para que cumpla un papel fundamental para la incorporación de la geotermia en los mercados energéticos de los dos países (particularmente en el del Ecuador). Por lo tanto, parecería prudente definir como objetivo más viable la instalación de una central de 15MW, y diferir la opción de 30MW¹³². Las características básicas de la central consideradas para el análisis económico, son las siguientes:

Tipo: Vapor Directo con Condensación

Potencia: 15MW

Potencia Neta: 13.7MW

Factor de Planta: 0.85

Energía Primaria: 102GWh/año

El estudio de prefactibilidad estima que, para definir el número de pozos y esbozar un presupuesto para el desarrollo del campo, son razonablemente aplicables las siguientes hipótesis:

Productividad promedio de los pozos: 5MW

Porcentaje de éxito en la perforación: 70%

Nº de Pozos de producción iniciales: 4

Nº de Pozos de reinyección: 2

Total de pozos necesarios: 6

Nº de Pozos no utilizables: 1

Total de pozos a perforarse: 7

Nº de Pozos en la Fase de Factibilidad: 5

Nº de Pozos en la Fase de Desarrollo: 2

En las centrales geotermoeléctricas, es típica una disponibilidad del orden de 7,500 horas/año; por lo tanto, tiene un buen grado de sustento seleccionar un factor de planta de 0.85, una vez que se descuenta un 8% por mantenimiento programado, un 4% por paradas no previstas y un 3% por reducción temporal de

¹³² *Ibíd.*, p.122.

carga. La vida útil de la planta se la estima prudentemente en 25 años, que es un valor inferior a la vida real del campo y de la propia central, según los datos históricos de varias plantas en operación alrededor del mundo.

4.4.5.2 Factibilidad económica. En la Tabla 28 se presenta un resumen de las inversiones de una central geotermoeléctrica de 15MW instalada en el área geotérmica TCCN. Es importante notar el importante peso económico de los estudios complementarios y de factibilidad (i.e. la inversión de riesgo) en el costo total del proyecto (aproximadamente un 25%), hecho principalmente responsable del reducido interés en el proyecto de parte de la inversión privada.

Se puede concluir que la implementación de una planta geotérmica trae consigo mayores beneficios que otro tipo de generación, se pueden observar beneficios ambientales y económicos; comparando costos por KWh generado, las plantas geotérmicas son más económicas que las hidroeléctricas, termoeléctricas, combustibles fósiles, etc. Además su impacto ambiental es mucho menor.

Se pueden distinguir los tipos de hidroeléctricas teniendo en cuenta a las características donde se ubiquen. Según el emplazamiento de la central hidroeléctrica se realiza la siguiente clasificación general: Centrales de agua fluyente, Centrales de pie de presa y Centrales en canal de riego o de abastecimiento.

4.5 PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS (PCH)

4.5.1 Aspectos económicos y factibilidad técnica. Los factores que se deben tener en cuenta en los costos de inversión e implementación de una central hidroeléctrica son el terreno, el acceso, el tipo de instalación, el tamaño, la potencia y el punto de conexión en la primera fase de proyecto, después viene la fase de ejecución y por último, la fase de funcionamiento. Los costes de la fase de ejecución dependen de la potencia a instalar ya que será proporcional al volumen de la obra, el equipo, grupo turbogenerador, sistema eléctrico y de control¹³³.

¹³³ Manuales de energía Renovables Mini centrales hidroeléctricas, instituto para la diversificación y ahorro de la energía, Adriana castro Madrid 2006

Tabla 28. Inversión de una central Geotermoeléctrica de 15MW.

RESUMEN DE INVERSIONES Y COSTOS DE OPERACION Y MANTENIMIENTO DE UNA CENTRAL GEOTERMICA DE 15 MW, EN EL ÁREA DEL PROYECTO BINACIONAL (en miles de US\$)

FASE	CAMPO DE VAPOR	CENTRAL	TOTAL
1. Estudio de Prefactibilidad	500		500
2. Estudio de Factibilidad	8,870	500	9,370
2.1 Perforac. Pozos Explorator. (4)	7200		7200
2.2 Expropiaciones de Terrenos	50		50
2.3 Construcción de Plataformas	100		100
2.4 Ampliación carreteras acceso	300		300
2.5 Cabezales de Valvulas/pozos	300		300
2.6 Separador portatil	120		120
2.7 Ingeniería y Administración	800	500	1,300
3. Desarrollo del Campo	5170	0	5,170
3.1 Perforación pozos producción (2)	3600		3600
3.2 Carreteras y Plataformas	90		90
3.3 Cabezal	210		210
3.4 Sistema Separación/transporte	900		900
3.5 Separadores (3)	370		370
4. Construcción de la Central	170	16300	16470
4.1 Obras Civiles		1900	1900
4.2 Equipos electromecánico		12000	12000
4.3 Estudios ambientales	70		70
4.4 Ingeniería y Administración		1400	1400
4.5 Gastos de Constitución	100		100
4.6 Línea de transmisión (15 km)		3000	3000
SUBTOTAL (1+2+3+4)	14,710	18800	33,510
Imprevistos (10%)	1471	1880	3351
TOTAL INVERSIONES	16,181	20680	36861

Tabla 29. Clasificación de PCH según potencia instalada. OLADE

POTENCIA (KW) TIPO	
0 – 50	Micro central
50 – 500	Mini central
500 – 5000	Pequeña Central

Tabla 30. Clasificación de PCH según potencia instalada ISA.

TIPOS	POTENCIA (MW)
Micro centrales	menores a 0.1
Mini centrales	de 0.1 a 1
PCH	de 1 a 10

A continuación se muestra una propuesta dada por el Instituto para la diversificación y ahorro de la energía sobre la distribución porcentual de la inversión en una pequeña central hidroeléctrica:

Grupo Turbogenerador 30 %
 Equipos eléctricos, control, regulación 22 %
 Ingeniería y dirección de obra 8%
 Obra Civil 40 %

La última fase es la puesta en funcionamiento de la central, que implica costes de explotación, mantenimiento y reparación. Hay que tener en cuenta que esto incluye costes de personal, materiales de repuestos, fungibles, seguros, impuestos, tasas y gravámenes, además de los costes generales derivados de la organización y administración. El cálculo de estos costes se realiza anualmente y depende de múltiples factores como el tipo de equipo instalado, el grado de automatismo y el índice de averías. Se puede estimar que estos gastos son del orden del 2 al 5% de la inversión a realizar.¹³⁴

Para realizar una estimación del coste de generación eléctrica con energía hidroeléctrica hemos considerado las mismas hipótesis que en los casos tipo. Con estos datos se obtiene el coste de generación del kWh hidroeléctrico a lo largo de la vida operativa de la instalación.

En la Tabla 31, se muestran los rangos en los que se encuentra el coste de generación anual del kWh hidroeléctrico para los proyectos de centrales menores de 10 MW y centrales entre 10 y 50 MW:

Tabla 31. Rango de costo de la generación eléctrica

Coste de generación (cent €/kWh)	4,5 - 6,1	4,1 - 5,6
----------------------------------	-----------	-----------

Se puede considerar como rentables, de forma aproximada, aquellos aprovechamientos que tiene valores comprendidos en los siguientes intervalos: Período de retorno: 8 – 12 años Índice de energía: 40 – 70 cent€/kWh. Índice de potencia: 1.500 – 2.000 €/kW

La instalación de pequeñas centrales hidroeléctricas son posibles debido a la hidrografía del Departamento de Nariño por la cantidad de vertientes, las más importantes son: la vertiente del Pacífico, que comprende los ríos Patía, Guátara, Mayo, Juanambú, Pasto, Iscuandé, Mira y Mataje, y la vertiente Amazónica formada por los ríos Guamuez, Churuyaco, San Miguel, Patascoy, Afiladores y Lora. Únicamente 5 ríos son utilizados actualmente para la generación eléctrica lo que significa que se puede aprovechar las vertientes faltantes para la implementación de PCH, a pesar de que la inversión es alta como se lo mencionó anteriormente el costo beneficio es muy alto y el precio por kWh es bajo en comparación a otras generadoras renovables, se debe tener en cuenta los costos ambientales.

¹³⁴ Ibíd., p.125.

El esquema metodológico seguido en la determinación del costo de generación, se pueden distinguir dos grandes grupos de costos dependiendo de los períodos en que son causados, los costos preoperativos y los costos operativos. Los primeros corresponden básicamente a inversiones realizadas una sola vez antes de entrar en operación el proyecto, y los segundos corresponden a costos periódicos, fijos o variables, que garantizan la operación de la central y con los cuales se obtienen el precio en pesos del KWh, los costos que se deben tener en cuenta para el análisis de la factibilidad son indicados en el Anexo E brindado por La Unidad de Planeación Minero- Energética.

Para determinar la potencia generada dependiendo del caudal de la vertiente que se puede determinar por:¹³⁵

$$Q \left(\frac{m^3}{s} \right) = \frac{P(KW)}{Hn(m) \cdot 8} \quad (16)$$

Dónde: Q es el caudal de diseño en m³/s
P es la capacidad instalada en kW

Hn es el salto neto en metros y el factor 8 involucra la aceleración de la gravedad 9.8 m/s² y las eficiencias el grupo generador.

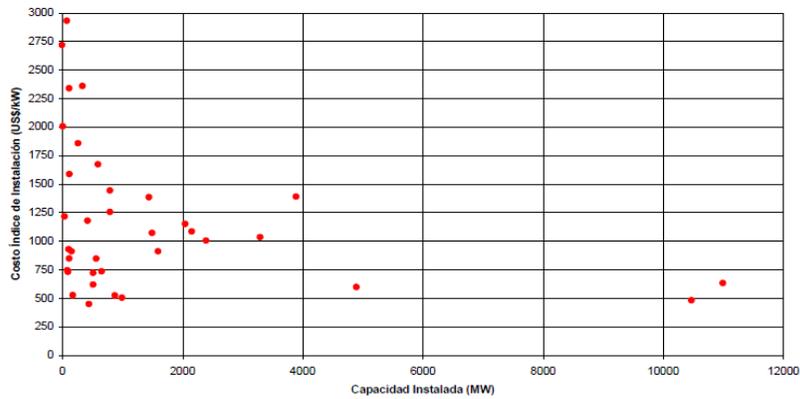
En las PCHs se usa 10 ha esta medida corresponde a los requerimientos de espacios para el emplazamiento de las obras civiles y la inundación producida por la presa. La Figura 33, nos indica la relación entre la capacidad instalada y el costo índice de instalación de plantas hidroeléctricas, esta gráfica fue tomada de La Unidad de Planeación Minero- Energética y puede servir de referencia para posibles instalaciones futuras en el Departamento de Nariño.

4.5.1.1 Costos operativos. Operación y mantenimiento (OM) Componente fija: Corresponde a los costos de funcionamiento de la empresa de generación, expresados en forma global (US\$/kW año). Se calcula tomando como referencia las ecuaciones encontradas por Charles T. Wong (Wong 1990), con los respectivos ajustes de moneda y actualizaciones. De acuerdo con la referencia citada, el costo para PCHs se supone en valores de USD 11.0/kW-año con base en algunas referencias de empresas nacionales de generación. Además de los anteriores costos de mantenimiento y operación de la central se utilizan los siguientes costos de mantenimiento de otras obras y equipos:¹³⁶

¹³⁵ Unidad de planeación Minero-Energética, costos indicativos de generación eléctrica en Colombia

¹³⁶ *Ibíd.*, p. 127.

Figura 33. Costo índice de instalación en función de la capacidad. Ministro de minas y energía. Colombia.



Mantenimiento de líneas eléctricas: Se definió como un 2.0% del costo de las líneas eléctricas, mantenimiento de vías: Se definió como un 3.0% del costo de las vías.

Mantenimiento de Conducciones: Se definió como un 1.5% del costo de las conducciones.

La función de costos de la PCH Julio Bravo se determinan de acuerdo a los datos de CEDENAR S.A. E.S.P, que se muestran en el Anexo G, se realiza regresión cuadrática a estos datos para obtener el mejor valor de la regresión (igual a 1) y se obtiene lo siguiente:

$$C = 20055 - 0.646P + 0.0042P^2 \quad (17)$$

5. SIMULACIÓN Y CONTROL DE DESPACHO ECONÓMICO EN UNA MICROGRID DE LA CIUDAD DE PASTO

El problema de despacho económico radica en determinar la combinación óptima de salidas de potencia de todas las unidades de generación, de tal manera que se satisfice la demanda de las cargas mientras se mantienen los mínimos costos de operación. Para solucionar el problema de despacho se han desarrollado diferentes metodologías por ejemplo los multiagent systems (MAS) estudiados en los campos de la inteligencia artificial. Un MAS es un sistema computacional en el que muchos agentes interactúan o trabajan juntos para alcanzar una meta. De acuerdo con¹³⁷, un agente es una entidad física o virtual que esencialmente tiene las siguientes propiedades.

- Agentes viven y actúan en un ambiente dado.
- Agentes están disponibles para sentir su ambiente local, e interactúan con otros agentes en su ambiente local.
- Agentes intentan alcanzar metas particulares o realizar tareas particulares.
- Los agentes son capaces de responder de manera oportuna a los cambios que se producen en ellos en función de su capacidad de aprendizaje.

La tecnología MAS brinda la oportunidad de calcular y optimizar muchos problemas complicados. Los agentes en MAS actúan de manera colectiva como sociedad y colaboran para alcanzar sus propias metas individuales, así como el objetivo común.

El problema de despacho económico dentro de una microgrid, es el despacho de los generadores distribuidos en un alimentador de distribución para proporcionar soporte de tensión. Este despacho debe considerar los aspectos económicos y técnicos de los generadores que determinen la mejor solución para reducir costo de operación, aumentar la eficiencia de los generadores y reducir las pérdidas en líneas de transmisión. Para encontrar los puntos óptimos de operación en diferentes escenarios se han utilizado diferentes metodologías. Entre las principales se pueden destacar la programación evolutiva¹³⁸, algoritmos genéticos¹³⁹ y Particle Swarm Optimization (PSO)¹⁴⁰. Muchos de los nuevos métodos de búsqueda estocástica y heurística se han desarrollado para los problemas de

¹³⁷ M. Wooldridge. An Introduction to multiagent systems. John Wiley and Sons Ltd. Febrero 2002.

¹³⁸ S. Quintero, C. Coello, Una introducción a la computación evolutiva y algunas de sus aplicaciones en Economía y Finanzas, 2008.

¹³⁹ D. Goldberg, Genetics Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison Wesley, 1989.

¹⁴⁰ J. Kennedy and R. Eberhart, Particle swarm optimization, in Proc. IEEE Int. Conf. Neural Netw., vol. 4, Nov. 1995, pp. 1942–1948.

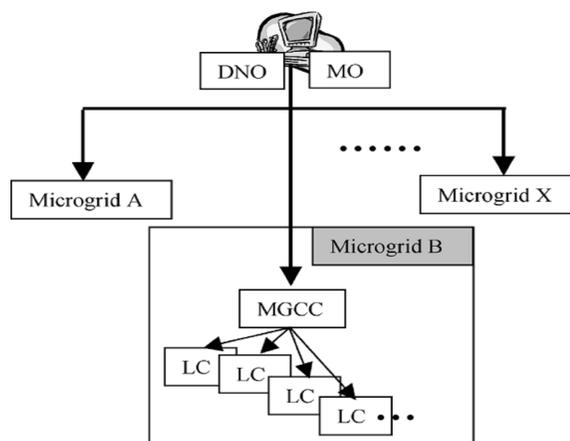
optimización como flujos de potencia óptimos¹⁴¹, economía y finanzas¹⁴², ubicación óptima de generadores distribuidos¹⁴³, entre otros.

Para dar solución al problema de despacho económico de los tres GDs en la microgrid de la ciudad de Pasto se propone el uso de un sistema multiagente y sus resultados serán analizados posteriormente.

5.1 ESTRUCTURA DEL SISTEMA

Con el fin de analizar el comportamiento de los generadores distribuidos en una red de distribución, y cuyo despacho es llevado a cabo por un MAS se plantea el siguiente esquema de control descentralizado y jerárquico¹⁴⁴, porque la microgrid es descentralizada y no depende en todo momento de la energía suministrada por el operador de la red de distribución ya que posee GDs. Además se realiza el control de despacho a nivel de la microgrid siguiendo los aspectos que se explican a continuación.

Figura 34. Niveles de control del entorno de una microgrid.



¹⁴¹ P. E. Oñate Yumbla. "Solucion del problema de flujos de potencia óptimos con restricciones de seguridad por un optimizador de partículas modificado". Phd. Tesis. Centro de investigación y estudios avanzados del I.P.N. Unidad Guadalajara, México, Febrero 2008.

¹⁴² L. V. Santana Quintero. C. A. Coello Coello "Una introducción a la computación evolutiva y algunas aplicaciones a economía y finanzas". Grupo de computación evolutiva. Universidad Pablo Olavide. Sevilla. Diciembre 2006.

¹⁴³ K. Witchit, O. Weerakorn. "Optimal Placement of Distributed Generation Using Particle Swarm Optimization". Sripatum University. Bangkok Thailand. 2006.

¹⁴⁴ Aris L. Dimeas. Operation of a Multiagent System for microgrid Control. Student Member, IEEE, and Nikos D. Hatziargyriou, Senior Member, IEEE.

En este esquema de control se destacan tres niveles de control:

- Operador de la red de distribución (DNO) y del Operador del Mercado (MO) a nivel de la Media Tensión.
- Controlador central de la microgrid (MGCC).
- Controladores locales (LC), los que podrían ser controladores de micro fuentes o controladores de carga.

El operador de la red de distribución (DNO) es el responsable de la operación técnica en una zona de media y baja tensión en donde se puede encontrar más de una microgrid. Además, uno o más MO son responsables de la operación de mercado de la zona. Estas dos entidades no pertenecen a la microgrid, pero hacen parte de la red de distribución. El DNO se refiere a las funciones operativas del sistema y el MO de las funciones del mercado.

Cabe señalar que, a pesar de la autonomía de funcionamiento de la microgrid, esta aparece como una unidad controlada, inteligente en coordinación con el DNO.¹⁴⁵

La interfaz principal entre el DNS/MO y la microgrid es el controlador central de la microgrid (MGCC). El MGCC es el responsable principal de la optimización del funcionamiento de la microgrid, o alternativamente, este simplemente coordina los controladores locales (LC).

Los LC controlan los generadores distribuidos y algunas de las cargas locales. Dependiendo del modo de operación, tienen cierto nivel de inteligencia, con el fin de tomar decisiones a nivel local. Por ejemplo para el control de tensión, el LC no necesita de la coordinación del MGCC y todos los cálculos necesarios se realizan a nivel local.

Una vez se establezca la comunicación entre los LC y el MGCC, estos pueden tomar decisiones de despacho económico en el que cada generador distribuido modifique su despacho de energía dependiendo del costo de generación y de la demanda de las cargas, esta tarea se realiza basándose en algoritmos multiagentes como PSO.

5.2 ALGORITMO MULTIAGENTE: PARTICLE SWARM OPTIMIZATION (PSO)

La optimización matemática se aplica a una amplia gama de campos, como la gestión de operaciones, las finanzas, la economía, el marketing, la ingeniería, la planificación estratégica, toma de decisiones y teoría de juegos, entre otras.

¹⁴⁵ *Ibíd.*, p.130.

Muchas veces ocurre que los problemas son demasiado confusos, para resolverse por los métodos analíticos y numéricos clásicos de optimización. En estos casos, se necesita crear estrategias que ayuden a encontrar una buena solución, lo que a menudo se denomina estocástica. Generalmente, todos estos métodos caen dentro de la denominada optimización global, que se basan en métodos probabilísticos que evitan ser atrapados en óptimos locales.¹⁴⁶ Por eso se requieren diferentes técnicas de optimización como las heurísticas y meta heurísticas.

Un método heurístico es un procedimiento para resolver un problema de optimización bien definido mediante una aproximación intuitiva, en la que la estructura del problema se utiliza de forma inteligente para obtener una buena solución. Con el propósito de obtener mejores resultados que los alcanzados por los métodos heurísticos tradicionales surgen los denominados procedimientos metaheurísticos (de búsqueda compleja). Los procedimientos metaheurísticos son una clase de métodos aproximados que están diseñados para resolver problemas difíciles y complejos de optimización combinatoria, en los que los métodos heurísticos clásicos no son eficientes en tiempo de cálculo. Los algoritmos meta heurísticos proporcionan un marco general para crear nuevos algoritmos híbridos combinando diferentes conceptos derivados de la inteligencia artificial, la evolución biológica y los mecanismos estadísticos.¹⁴⁷

La investigación justifica el uso de algoritmos metaheurísticos para solucionar el problema del despacho económico basados en las siguientes razones:

- Uno de los principales objetivos de cualquier Ingeniería es el uso de métodos exactos y heurísticos para optimizar funciones objetivo. La optimización de estos problemas parte de un conjunto de datos y una serie de condiciones y limitaciones que dificultan la utilización de métodos exactos. La dificultad se presenta principalmente por la alta complejidad de los cálculos y la duración de éstos, en algunas ocasiones el tiempo de resolución está limitado¹⁴⁸.
- Los problemas de despacho económico busca distribuir la demanda total entre las unidades generadoras disponibles de tal manera que el costo total de operación sea mínimo, hacer esto no es sencillo porque se deben respetar ciertos límites de calidad y seguridad en el sistema, además, hay que tomar en cuenta el comportamiento de la demanda, es decir, su variación en tiempo.

¹⁴⁶ K. Mahadevan, P. S. Kannan, S. Kannan. "Particle Swarm Optimization for Economic Dispatch of Generating Units with Valve-Point Loading." , Journal of Energy & Environment. pag. 49 – 61, Mayo. 2005

¹⁴⁷ Dorigo, M. and T. Stützle, eds. The Ant Colony Optimization Metaheuristic: Algorithms, Applications and Advances, in Metaheuristics Handbook. International Series in Operations Research and Management Science, ed. F. Glover and G. Kochenberger. 2001, Kluwer Academic Publishers.

¹⁴⁸ Gonzales Gómez M. Sistema de generación eléctrica con pila de combustible de óxido sólido alimentado con residuos forestales y su optimización mediante algoritmos basados en nubes de partículas, Tesis Doctoral, 2009.

Esto para prever posibles cambios tanto en precios de combustibles como cambios en los flujos de agua para el caso de la PCH. Para lograr esto es necesario conocer el comportamiento o forma de funcionamiento de los diferentes tipos de generadores que se tienen a disposición, para ello se utilizan diferentes curvas que han sido proporcionadas por el diseñador o hechas basados en datos de operación, estas funciones no siempre serán lineales y su complejidad dependen de las características propias. Así el uso de métodos analíticos presenta limitaciones graves en funciones no lineales o funciones con múltiples óptimos locales. Como resultado se obtienen la no convergencia o la inclusión en ciclos¹⁴⁹. Aunque el despacho económico puede ser resuelto por métodos analíticos estos brindan buenas soluciones más no necesariamente las óptimas. La técnica PSO puede generar soluciones de alta calidad, en tiempo de cálculo más cortos y tiene características de convergencia más estables que otros métodos estocásticos¹⁵⁰.

- Una estrategia metaheurística tiene la característica de ser de alto nivel que usa diferentes métodos heurísticos para explorar una solución óptima o casi óptima en espacios de búsqueda de gran tamaño. La metaheurística debe identificar rápidamente las regiones prometedoras del espacio de búsqueda global, y no malgastar tiempo en regiones que hayan sido exploradas y/o no contiene soluciones de alta calidad.
- Fue de gran interés para la investigación abordar los algoritmos metaheurísticos porque constituyen una de las áreas de investigación más activas en el ámbito de los problemas de optimización y búsqueda. Siendo lo anterior material de motivación para lograr excelentes resultados

Algunos ejemplos de algoritmos meta heurísticos para solucionar problemas de optimización son: búsqueda Tabú, SA (simuleted annealing), GRASP, algoritmos genéticos, optimización mediante mallas dinámicas o dynamic mesh optimization (MDO), optimización basada en enjambre de partículas o Particle Swarm Optimization (PSO), optimización basada en colonias de hormigas, etc.

5.2.1 Algoritmos metaheurísticos y estocásticos para optimización:

- **Algoritmo Genético (AG):** es una técnica estocástica de optimización cuyo método de búsqueda imita algunos fenómenos naturales tales como la herencia genética y la lucha por la supervivencia. El funcionamiento de un algoritmo genético comienza generando la población inicial, ésta constituye la primera generación de individuos; también puede utilizarse como población inicial, un conjunto de individuos que representen soluciones aproximadas al problema, obtenidas por algún otro método de búsqueda. Cuando se tiene la

¹⁴⁹ Gonzales Gómez M. Op. Cit., p.132.

¹⁵⁰ Ibíd., p.133

población inicial, se evalúan todos los individuos por medio de la función de aptitud y se le asigna, a cada uno, su valor de fenotipo; luego, utilizando un método de selección, se construyen las parejas de individuos que van a reproducirse; la cantidad de parejas es determinada por el diseñador del algoritmo genético. Después de tener las parejas de individuos, se realiza la reproducción utilizando un operador de cruce; esto permite obtener un nuevo grupo de individuos, con diferentes características a los actuales.

Los hijos de cada pareja pueden ser obtenidos de la aplicación de uno o varios operadores de cruce; la cantidad de hijos la determina el criterio del diseñador del algoritmo genético; generalmente se obtienen dos hijos de cada pareja y se aplica un operador de cruce, cambiando el orden de los padres, al aplicar el operador, para obtener cada hijo.

Después de la reproducción, se determina aleatoriamente, utilizando la probabilidad de mutación, si se aplica el operador mutación a cada uno de los hijos de las parejas. Cuando se han aplicado los operadores genéticos, los hijos de las parejas pueden sustituir a la población actual completa o a una parte de ella; también se puede evaluar a los nuevos individuos con la función de aptitud y que los mejores sean los que sustituyan a los peores de la población actual.

Esta nueva población, formada por hijos de la población anterior y talvez por los mejores individuos de dicha población, constituye la segunda generación de individuos; todos los individuos de esta nueva población son evaluados para determinar si alguno soluciona el problema, en caso de no existir dicho individuo, se repite todo el proceso anterior sobre la nueva población, hasta que un individuo solucione el problema.

- **Programación evolutiva (PE).** Fue introducida por Lawrence J. Fogel en 1960. Son una estrategia de optimización estocástica similar a los AGs, pero hacen un énfasis específico en los operadores genéticos tal y como se observan en la naturaleza y en la estructura de datos que utilizan se adapta al problema. Por esto, a diferencia de los AGs, los PEs no son restrictivos en cuanto a la representación del problema. Mientras en los AGs se hace necesaria una codificación de las soluciones del problema; en los PEs, tal representación se hace de forma directa'. Asimilando la inteligencia como un comportamiento adaptativo. La Programación Evolutiva enfatiza los nexos de comportamiento entre padres e hijos, en vez de buscar emular operadores genéticos específicos como en el caso de los Algoritmos Genéticos.¹⁵¹

¹⁵¹ Santana Quintero, L. V. y Coello Coello, C. A. (2008) Una introducción a la computación evolutiva y algunas de sus aplicaciones en Economía y Finanzas.

- **Particle swarm optimization (PSO).** Es un novedoso método de optimización desarrollado por Eberhart y Kennedy. Es un algoritmo meta- heurístico enfocado a resolver problemas complejos de optimización. Por esta razón ha sido utilizado exitosamente con el fin de solucionar problemas de despacho¹⁵² y se trata de una técnica de búsqueda multiagente que traza su evolución de forma similar a una bandada de pájaros en busca de alimento. Utiliza una serie de partículas que constituyen un enjambre, donde cada partícula atraviesa el espacio multidimensional en busca del mínimo o máximo global de una función objetivo determinada. Durante el “vuelo”, cada partícula ajusta su posición de acuerdo a su propia experiencia, y la experiencia de las partículas vecinas, haciendo uso de la mejor posición encontrada por sí misma y las partículas a su alrededor. La dirección enjambre de una partícula se define por el conjunto de partículas vecinas de la partícula y su experiencia de la historia.

En PSO X y V expresan las coordenadas de la partícula (posición) y su correspondiente velocidad de vuelo, respectivamente en un espacio de búsqueda. La mejor posición previa de una partícula es grabada y representada como $PBest$ y el índice de la mejor partícula entre todas las partículas está representado como $GBest$. Para asegurar la convergencia de PSO, los autores en¹⁵³ indicaron que el uso de una contracción de la función de parámetros de peso podría ser necesario. PSO es uno de los métodos más utilizados en ciertos problemas de optimización global gracias a su capacidad de adaptación a diferentes restricciones y la facilidad de modificar su estructura. Una de las variaciones es la utilización de técnicas de secuencia caótica denominándose Improved particle swarm optimization (IPSO).¹⁵⁴ La aplicación de secuencias caóticas en los parámetros de peso de búsqueda en PSO es una estrategia eficiente para mejorar la capacidad de búsqueda global y escapar de los mínimos locales.

Muchos de los problemas de optimización en sistemas de energía incluyen complejas características con limitaciones de igualdad y desigualdad.¹⁵⁵ El despacho económico ED por sus siglas en inglés, es uno de los problemas de mayor dificultad a ser resueltos en la operación de un sistema de energía. El primer objetivo del ED es determinar la combinación óptima de salida de energía de todas las unidades generadoras que me garanticen la demanda

¹⁵² K. Mahadevan, P. S. Kannan, S. Kannan. “Particle Swarm Optimization for Economic Dispatch of Generating Units with Valve-Point Loading.”, Journal of Energy & Environment. pag. 49 – 61, Mayo. 2005.

¹⁵³ R.C.Eberhart and Y. Shi, “Comparing inertia weights and constriction factors in particle swarm optimization,” in Proc. Congr. Evol. Comput., 2000, pp. 84–88.

¹⁵⁴ J. Park, Y. Jeong, H. Kim J. Shin, “An Improved Particle Swarm Optimization for Economic Dispatch with Valve-Point Effect”, Dept. of Electrical Engineering, Konkuk University, Seoul, Korea, International Journal of Innovations in Energy Systems and Power, Vol. 1, no. 1 (November 2006).

¹⁵⁵ K. Y. Lee and M. A. El-Sharkawi (Editors), Modern Heuristic Optimization Techniques with Applications to Power Systems, IEEE Power Engineering Society (02TP160), 2002.

solicitada de las cargas con el mínimo costo de operación mientras se satisfacen los límites de igualdad y desigualdad.

- **Las principales ventajas del algoritmo PSO.** Concepto simple y fácil de aplicación, la robustez en el control de parámetros, y la eficiencia computacional en comparación con otros algoritmos matemáticos y técnicas de optimización heurística.¹⁵⁶ PSO puede ser fácilmente aplicado a problemas de optimización no lineal y no continua.

5.3 UN ACERCAMIENTO A LA MINIMIZACIÓN DE LA GENERACIÓN DE ENERGÍA

5.3.1 Problema del despacho económico. La minimización de los costos operativos es de suma importancia para el sistema de energía ya que procura obtener mayores beneficios en retorno del capital invertido. El precio de la energía eléctrica en Colombia es un factor de presión en las compañías de energía porque este precio es fijado por organismos reguladores y no determinado por cada compañía de energía de acuerdo a sus capacidades y características propias de operación.

Al maximizar la eficiencia, no solo se minimiza el costo del kWh generado, también implica la reducción del precio de compra a la empresa comercializadora de energía y de igual manera puede llegar a influir al consumidor final (usuarios). Otro escenario que se puede describir al maximizar la eficiencia es la reducción del costo de mantenimiento y la cantidad de materia prima de generación.¹⁵⁷

La operación económica involucra dos situaciones, la primera es el despacho económico, que coordina la generación de la energía en cada unidad del sistema involucrado, teniendo en cuenta el mínimo costo de producción y reducción de los insumos. La segunda parte es el mínimo costo de transmisión de la energía, la cual está relacionada con las pérdidas por líneas de transmisión. De acuerdo a lo anterior, los problemas de minimización de costos de generación dependen de cómo se monitoriza la demanda de la red, por lo que se propone un sistema de administración de energía inteligente basado en la monitorización de la generación y de la demanda de la red.¹⁵⁸

5.3.2 Despacho económico. El despacho económico se basa en la minimización de la función objetivo que se define como la suma de las funciones de costos de

¹⁵⁶ J. B. Park, K. S. Lee, J. R. Shin, and K. Y. Lee, "A particle swarm optimization for economic dispatch with nonsmooth cost functions," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 20, No. 1, pp. 34-42, Feb. 2005

¹⁵⁷ Faisal A. Mohamed, microgrid Modelling And Online Management, Ph D Thesis, Helsinki University of Technology Control Engineering, Enero 2008.

¹⁵⁸ S. Chakraborty and M.G. Simoes. "PV-microgrid operational cost minimization by neural forecasting and heuristic optimization". IEEE Industry Applications Conference (IAS), October 2008

generación de energía (costo de la producción de una unidad de kWh) de los generadores a utilizar. Esta función se caracteriza como una función no lineal, lo que significa que encontrar los valores óptimos tiene una dificultad elevada y que una solución dada por programación lineal de los métodos de control comunes no brindaría los resultados óptimos deseados. Las funciones de costo total y de cada una de las unidades están dadas por:¹⁵⁹

$$F_T = \sum_{i=1}^N F_i(P_i) \quad (18)$$

$$F_i(P_i) = a_i + b_i P_i + c_i P_i^2 \quad (19)$$

Donde

F_T costo de generación total \$/h
 $F_i(P_i)$ costo de generación del generador i \$/h
 a_i, b_i, c_i coeficientes del generador i , (\$/h, \$/kWh, \$/kW²h)
 P_i potencia generada kW.
 N número de generadores

La ecuación 18 es la función objetivo que se debe minimizar. Esta representa la suma de todas las funciones de costo de generación involucradas en el proceso. Los coeficientes de la función de costo determinan el costo de acuerdo a la potencia generada.

5.3.2.1 Determinación de límites de igualdad. Los límites de igualdad determinan el balance de la red, teniendo en cuenta la demanda total de la red, la cantidad de energía despachada y las pérdidas por líneas de transmisión.

$$\sum_{i=1}^N P_i = P_D + P_{LOSS} \quad (20)$$

Siendo P_D la demanda total de las cargas, en la presente investigación se tomará los perfiles de consumo hora para este dato. Como el principio de la generación distribuida permite que los generadores se ubiquen lo más cerca a la carga las pérdidas por líneas de transmisión P_{LOSS} se consideran nulas.

¹⁵⁹ H. Saadat, Power System Analysis, Milwaukee, 2001, p. 267-313.

5.3.2.2 Determinación de los límites de desigualdad. Se establecen por los límites de generación en sus valores mínimos y máximos para el generador i estas restricciones están dadas por:

$$P_{i,min} < P_i < P_{i,max} \quad (21)$$

Dónde:

$P_{i,min}$ Potencia mínima generada del generador i

$P_{i,max}$ Potencia máxima generada del generador i

P_i Potencia generada kW.

5.4 METODOLOGÍAS DE OPTIMIZACIÓN PARA PROBLEMAS DE DESPACHO ECONOMICO

Los métodos de optimización presentados anteriormente, algoritmos genéticos y programación evolutiva son utilizados como estrategias para optimización de problemas en despacho económico. En la investigación se analizara el algoritmo PSO por presentar uno de los mejores resultados en comparación de los anteriores métodos.

PSO es un algoritmo basado en el comportamiento de los individuos de un enjambre. El algoritmo PSO busca en paralelo usando un grupo de individuos similar a otras técnicas de optimización heurística basadas en inteligencia artificial. Cada individuo corresponde a una solución candidata del problema.

En un espacio físico de búsqueda n -dimensional, la posición y velocidad del individuo i son representados como los vectores $X_i = (X_{i1}, \dots, X_{in})$ y $V_i = (V_{i1}, \dots, V_{in})$ en el algoritmo PSO. Donde $Pbest_i = (X^{Pbest}_{i1}, \dots, X^{Pbest}_{in})$ y $Gbest = (X^{Gbest}_1, \dots, X^{Gbest}_n)$ son la mejor posición del individuo i y la mejor posición de los individuos vecinos que conforman el enjambre, respectivamente. Usando la información, la velocidad actual (22) del individuo i se modifica bajo la siguiente ecuación en el algoritmo PSO:

$$V_i^{k+1} = \omega V_i^k + c_1 rand_1 (Pbest_i^k - X_i^k) + c_2 rand_2 (Gbest^k - X_i^k) \quad (22)$$

Dónde:

V_i^k velocidad del individuo i en la iteración k

ω Parámetro de peso de inercia

c_1, c_2 coeficientes de aceleración

$rand_1$ número aleatorios entre 0 y 1

$rand_2$ número aleatorios entre 0 y 1

X_i^k posición del individuo i en la iteración k

$Pbest_i^k$ mejor posición del individuo i hasta la iteración k

$Gbest^k$ mejor posición del grupo hasta la iteración k

En el proceso de actualización de velocidad, los valores de los parámetros tales como ω , c_1 , y c_2 se deben determinar. En general, el peso ω se fija de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\omega = \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{Iter_{\max}} iter \quad (23)$$

Donde

ω_{\max} Máximo peso inicial

ω_{\min} Mínimo peso final

$Iter_{\max}$ número de iteración máximo

$iter$ número de iteración presente

El peso inercial ω ayuda a encontrar más rápido la convergencia del sistema, ayuda a determinar el área de búsqueda. Los valores tomados para la simulación son 0.9 a 0.1 para ω_{\max} y ω_{\min} respectivamente. En el peso inercial máximo las partículas buscan los óptimos locales en áreas grandes y a medida que disminuye el área encuentran óptimos globales.¹⁶⁰ Las constantes de aceleración c_1 y c_2 , modifican la dirección de las partículas y son conocidas como los parámetros cognitivos y sociales de las partículas respectivamente. En otras palabras son constantes que determinan la confianza de las posiciones individuales y grupales de las partículas.¹⁶¹ Los dos números aleatorios $rand1$ y $rand2$ son llamadas variables de distribución uniforme, estas aseguran que las partículas tengan un buen cubrimiento del espacio dentro de sus límites y así evitar atascarse en óptimos locales.

Cada individuo se mueve de la posición presente a la siguiente una vez modificada la velocidad en (22) usando la siguiente ecuación:

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1} \quad (24)$$

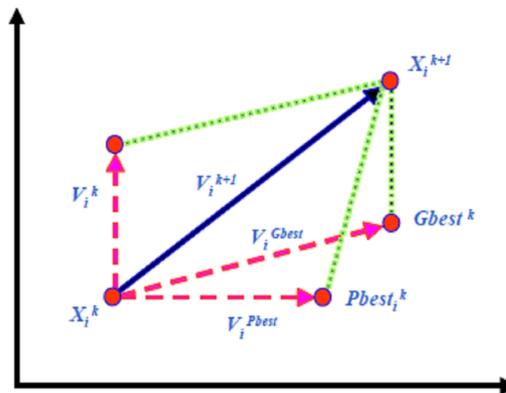
La Figura 35 indica el concepto del mecanismo de búsqueda de PSO usando la velocidad y posición modificada del individuo i basados en (22) y (24) si los valores de ω , c_1 , c_2 , $rand1$, $rand2$ son 1.

¹⁶⁰ Particle Swarm Optimization for Resource Allocation in UAV Cooperative Control Jose B. Cruz, Jr, Genshe Chen, Dongxu Li and Xu Wang Department of Electrical Engineering The Ohio State University Columbus.

¹⁶¹ A COPMARISON OF PARTICLE SWARM OPTIMIZATION AND THE GENETIC ALGORITHM Rania Hassan* Babak Cohanim† Olivier de Weck, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 02139

La partícula que se encuentra en X_i^k se ubica en X_i^{k+1} teniendo en cuenta la mejor posición global $Gbest$ y personal $Pbest$, la velocidad de la partícula para ubicarse en la nueva posición depende de estos valores.¹⁶²

Figura 35. Concepto de modificación de un punto de búsqueda por PSO



- **Secuencia caótica para parámetros de peso.** Uno de los más simples sistemas dinámicos que exhibe un comportamiento caótico es un iterador llamado el mapa logístico, cuya ecuación se describe como sigue:

$$f_k = \mu \cdot f_{k-1} \cdot (1 - f_{k-1}) \quad (25)$$

Donde μ es un parámetro de control y tiene un valor real en el intervalo [0-4]. A pesar de la aparente sencillez de la ecuación, la solución presenta una rica variedad de comportamientos. El comportamiento del sistema representado por (25) ha cambiado mucho con la variación de μ . El valor de μ se determina si f se estabiliza en un tamaño constante, que oscile entre una secuencia limitada de tamaños, o se comporte de manera caótica en un patrón impredecible. También el valor del sistema es sensible a valores iniciales de f [14, 15]. La ecuación (25) es determinística, indicando la dinámica caótica.

$$\mu = 4 \text{ y } f_0 \in \{0, 0.25, 0.50, 0.75, 1.0\}.$$

¹⁶² J. Park, Y. Jeong, H. Kim J. Shin, "An Improved Particle Swarm Optimization for Economic Dispatch with Valve-Point Effect", Dept. of Electrical Engineering, Konkuk University, Seoul, Korea, International Journal of Innovations in Energy Systems and Power, Vol. 1, no. 1 (November 2006).

Uno de los mayores inconvenientes del PSO es la convergencia prematura, especialmente durante la manipulación de problemas con más óptimos locales y limitaciones pesadas. El nuevo peso se define multiplicando las ecuaciones (25) y (23) con el fin de mejorar la capacidad de búsqueda global de la siguiente manera:

$$\omega_{new} = \omega f \quad (26)$$

5.4.1 Implementación de algoritmo IPSO para problemas de despacho económico. Creando posición y velocidad inicial de individuos. En el proceso de inicialización, un conjunto de individuos se crea aleatoriamente. La estructura de un individuo para problemas de ED se compone de un conjunto de elementos que representan las potencias a ser generadas por cada unidad. La posición del individuo i en la iteración 0 puede ser representada como el vector $X_i^0 = (P_{i1}, \dots, P_{in})$ donde N es el número de generadores en el problema de ED, P_{i1} es la potencia en la posición 1 y P_{in} es la potencia en el i ésimo generador. La velocidad del individuo i en la posición 0 $V_i^0 = (V_{i1}, \dots, V_{in})$ corresponde a la cantidad de generación actual que cubre todos los generadores, donde V_{i1} es la velocidad inicial del generador 1 y V_{in} es la velocidad del i ésimo generador.

Es muy importante crear un grupo de individuos que satisfagan los límites de igualdad (20) y los límites de desigualdad (21). Esto es, la suma de los elementos del individuo i ($\sum_{j=1}^N P_{ij}$) debe ser igual a la demanda total del sistema (P_D) y el elemento creado en aleatorio j del individuo i (P_{ij}) debe estar localizado dentro de sus límites. Infortunadamente, la posición creada de un individuo no siempre garantiza satisfacer las condiciones de desigualdad. Si un elemento de un individuo viola estas condiciones de desigualdad, la posición del individuo se fija a su mínimo o máximo punto así:

$$P_{ij}^k = \begin{cases} P_{ij}^k & \text{si} & P_{ij}^k \leq P_{ij,max} \\ P_{ij,min} & \text{si} & P_{ij}^k < P_{ij,min} \\ P_{ij,max} & \text{si} & P_{ij,max} > P_{ij,max} \end{cases} \quad (27)$$

Aunque este método produce la posición de cada individuo satisfaciendo las restricciones de desigualdad (21), el problema de la restricción de igualdad sigue sin resolver. Es necesario desarrollar una nueva estrategia de manera que la suma de todos los elementos de un individuo sean igual a la demanda total del sistema. Para esto se realiza el siguiente procedimiento:¹⁶³

¹⁶³ Ibíd., p.139.

Establecer $j = 1$.

Seleccionar un elemento (generador) del individuo i al azar y almacenar en una matriz de índice $A(n)$ que es una matriz de indexación.

Crear el valor del elemento (la salida de generación) de forma aleatoria satisfaciendo la restricción de desigualdad.

Si $j = n-1$ entonces pasar al paso 5, de lo contrario si $j = j + 1$ ir al paso 2.

El valor del último elemento del individuo i es determinado por la resta $\sum_{j=1}^{n-1} P_{ij}$. Si el valor está dentro de su límite pasar al paso 8, de lo contrario ajustar el valor usando la ecuación (27).

Establecer $l = 1$.

Reajustar el valor del elemento l en la matriz de índice $A(n)$ con el valor que satisface la condición de igualdad (es decir, $P_{ij} = \sum_{j=1}^n P_{ij}$). Si el valor está dentro de su límite continúe con al paso 8, de lo contrario, cambie el valor del elemento l utilizando (27). Establezca $l = l + 1$, y vaya al paso 7. Si $l = n + 1$, vaya al Paso 6.

Detener el proceso de inicialización.

Después de crear la posición inicial de cada individuo, la velocidad de cada individuo es creada al azar. La siguiente estrategia se utiliza en la creación de la velocidad inicial

$$(P_{ij,\min} - \varepsilon) - P_{ij}^0 \leq V_{ij} \leq (P_{ij,\max} + \varepsilon) - P_{ij}^0 \quad (28)$$

Donde ε es un número pequeño real positivo, $P_{ij,\min}$ es la potencia de salida mínima del generador j del individuo i , $P_{ij,\max}$ es la potencia de salida máxima del generador j del individuo i y P_{ij}^0 es la potencia de salida inicial del generador j del individuo i . La velocidad del elemento j del individuo i se genera de forma aleatoria dentro de los límites. La primera $Pbest_i$ del individuo i se establece como la posición inicial del individuo i y la inicial $Gbest$ se determina como la posición del individuo con el mínimo costo de la ecuación (18). Generándose una matriz de j elementos e i individuos.

Modificación de la velocidad. Para modificar la posición de cada individuo, es necesario calcular la velocidad de cada individuo en la siguiente etapa que se obtiene de (22). En este proceso, la nueva función de peso con (26) que se emplea para mejorar la capacidad de búsqueda global.

Modificación de la posición considerando limitaciones. La posición de cada individuo es modificado por (24). Dado que la posición resultante del individuo no garantiza satisfacer las restricciones de desigualdad debido a la sobre/baja velocidad, la posición modificada de un individuo se ajusta por (27). Al mismo tiempo es necesario satisfacer la restricción de igualdad (20). Para resolver el problema de la restricción de igualdad, sin intervenir en el proceso dinámico inherente en el algoritmo de PSO, se propone el siguiente procedimiento heurístico:

Establecer $j = 1$.

Seleccionar un elemento (generador) del individuo i al azar y almacenar en una matriz de índice $A(n)$.

Modificar el valor del elemento j con (24) y (27).

Si $j = n-1$ pasar al paso 5, de otro modo si $j = j + 1$ seguir con el paso 2.

El valor del último elemento del individuo i es determinado por la resta $\sum_{j=1}^{n-1} P_{ij}$ de P_D . Si el valor no está dentro de su límite ajústelo utilizando 29 y vaya al paso 6, de lo contrario vaya al paso 8.

Establecer $l = 1$.

Ajustar el valor del elemento l en la matriz de índice $A(n)$ al valor que satisface la condición de igualdad (por ejemplo, $P_D - \sum_{j=1}^n P_{ij}$). Si el valor está dentro de su límite a continuación vaya al paso 8, de lo contrario, cambie el valor del elemento l usando (26). Establezca $l = l + 1$, y vaya al paso 7, si $l = n + 1$, vaya al Paso 6.

Detenga el procedimiento de modificación.

De este procedimiento se obtiene un vector de un individuo y j elementos, que representan j generadores por individuo.

La Actualización de P_{best} de cada individuo en la iteración $k + 1$ se actualiza de la siguiente manera:

$$P_{best}_i^{k+1} = \begin{cases} X_i^{k+1} & \text{si } TC_i^{k+1} < TC_i^k \\ P_{best}_i^k & \text{en cualquier caso} \end{cases} \quad (29)$$

Dónde TC_i es la función objetivo evaluado en la posición de individuo i . Además, $Gbest$ en la iteración $k + 1$ se establece como la mejor posición evaluada entre los $Pbest_i^{k+1}$.

El Criterio de Parada tiene el propósito de IPSO es terminado si el número de iteraciones es igual a un valor predeterminado, máxima iteración.

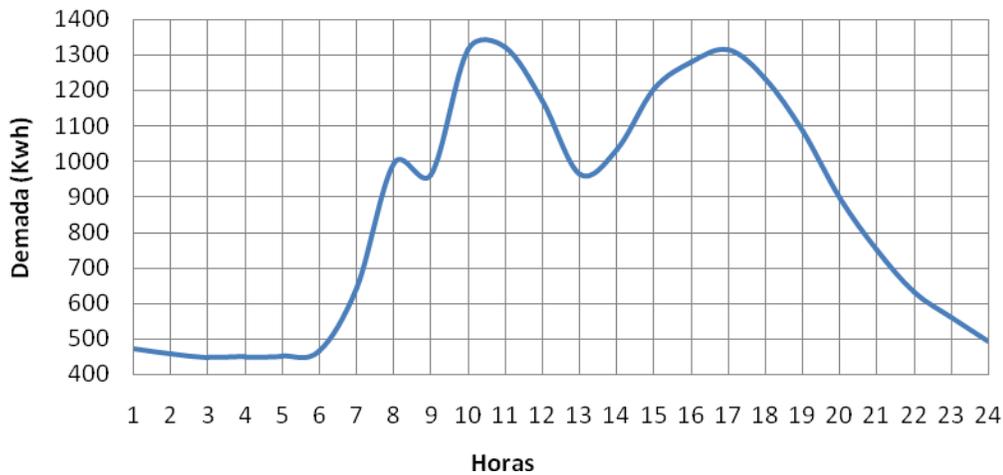
5.5 CASO DE ESTUDIO, SIMULACIÓN, COMPARACIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Una vez planteado el algoritmo de optimización multiagente IPSO, es necesario implementar este algoritmo dentro de una microgrid para analizar los beneficios técnicos y económicos para la red de distribución, cargas y centros de generación.

La microgrid propuesta hace parte de la subestación Pasto y está conformada por 8 cargas reales de tipo industrial, las cuales fueron principalmente escogidas debido a la energía demandada, distancia e interconexión entre ellas. En la microgrid se ubicaron 3 generadores distribuidos teniendo en cuenta la energía presente en los nodos de la red. Los 3 generadores son: PCH Julio Bravo, un generador por metanización y el generador de desgasificación del relleno sanitario. En la Figura 36, se indica la ubicación de las cargas y de los generadores y en la Tabla 32, se muestra la producción de los generadores.

La demanda del sistema que muestra la Figura 37, es el resultado de la suma del consumo horario promedio de las ocho cargas multiplicado por una constante de 2.5 puesto que los GDs a simular tienen una potencia que triplica el valor de la demanda pico, con esto no se desperdiciara potencia generada. En esta demanda se destaca como hora pico las 11 de la mañana. Cabe anotar que la demanda máxima de energía del sistema es muy próxima a la generación nominal producida por los tres GD y que la demanda mínima es un poco mayor que la capacidad mínima de generación de los tres GD.

Figura 37. Demanda horaria del sistema



5.5.1 Simulación y comparación de resultados. Con el fin de comprobar la eficiencia del algoritmo PSO propuesto y basándonos en los casos de estudio analizados, se realizan comparaciones de resultados obtenidos por la presente investigación UDENARPSO con IPSO. El caso de estudio consiste de tres generadores y una demanda fija del sistema. Este sistema de prueba busca determinar los valores de despacho de energía para cada uno de los GD que garanticen el mínimo costo de operación y la máxima eficiencia, mientras satisfacen límites de igualdad y desigualdad del sistema. Los valores del sistema prueba son los siguientes:

Número de partículas = 50;

Número máximo de iteraciones = 10000;

Parámetros de peso de inercia $\omega_{max} = 0.9$, $\omega_{min} = 0.4$;

Coeficientes de aceleración $c1 = 2$, $c2 = 1$.

Parámetros de control de secuencias caóticas $\mu = 4$;

Valor inicial de f es un número aleatorio entre $[0,1]$ excepto para 0, 0.25, 0.5, 0.75 y 1.

Demanda total del sistema = 850.

La ecuación de la función objetivo del sistema de prueba es la siguiente:

$$F_i(P_i) = a_i + b_i P_i + c_i P_i^2 + |e_i \sin(f_i(P_{i,min} - P_i))|$$

Los datos de los generadores y sus características como la potencia mínima y máxima generada, los coeficientes de costo de cada uno de ellos, son los expresados en la Tabla 33.¹⁶⁴

Tabla 33. Características y coeficientes de costo de los 3 generadores

Unit	a_i (\$/h)	b_i (\$/MWh)	c_i (\$/MW ² h)	e_i (\$/h)	f_i (rad/MW)	P_{min} (MW)	P_{max} (MW)
1	561	7.92	0.001562	300	0.0315	100	600
2	310	7.85	0.001940	200	0.0420	100	400
3	78	7.97	0.004820	150	0.0630	50	200

La comparación se realiza con el fin de determinar que la propuesta del algoritmo UDENARPSO presentada en este trabajo, fue adaptada adecuadamente y es una solución práctica y aproximada a los resultados mostrados en¹⁶⁵. Como se mostrará más adelante, la escogencia de este algoritmo entre muchos algoritmos de optimización y búsqueda estocástica, se debe a sus excelentes resultados, poco gasto computacional, eficiencia y simplicidad del código. En el Anexo J (a) se indica el proceso de inicialización mientras que el J (b) muestra la modificación de velocidad y posición.

El algoritmo PSO se muestra en el Anexo J que se implementó en Matlab versión 7.8, las modificaciones y propuestas realizadas en esta investigación al código IPSO original se enumeran a continuación llamando al algoritmo resultante UDENARPSO.

- Fue de vital importancia la etapa de inicialización, en la cual se forman los individuos y los elementos que componen cada uno de ellos (generadores). Estos deben cumplir con los límites de igualdad (20) y desigualdad (21). Según el algoritmo original, se debe realizar una comparación de cada elemento de acuerdo con las condiciones en la expresión (27). El aporte radica en la modificación de (27) por medio de la comparación utilizando límites abiertos ($< y >$), el cual obliga a buscar rangos más adecuados que completen los límites de igualdad (20). La ventaja de usar límites abiertos es que UDENARPSO busca posiciones de inicialización dispersas entre los límites de desigualdad de cada individuo, evitando que la etapa de inicialización tome valores máximos y mínimos ya que estos valores limitan el área de búsqueda.

¹⁶⁴ An Improved Particle Swarm Optimization for Economic Dispatch with Valve-Point Effect. Op. Cit. p. 139.

¹⁶⁵ *Ibíd.*, p.145

Al usar límites cerrados, los individuos no se ubicaban en posiciones dispersas y su aporte a la búsqueda global no influye de manera destacable por lo que no se halla en todas las pruebas el óptimo local. La principal ventaja del uso de los límites abiertos fue obtener una buena inicialización de los elementos, con ellos la modificación de velocidad y posición se da por garantizada debido a la existencia evidente de mejores posiciones grupales e individuales.

- La modificación de la ecuación de velocidad con un factor de peso w_{new} en el elemento 3, no permite obtener un óptimo global rápidamente. Al modificar el peso w_{new} en cada uno de los elementos, el óptimo global es encontrado en menores iteraciones, porque la función de secuencia caótica (25) obliga al elemento a aprender de forma más estricta a medida que disminuye su valor. Al final se obtiene una posición del elemento que respeta los límites de igualdad y desigualdad.
- Los autores en¹⁷² modifican la velocidad y posición para los 50 individuos propuestos en una sola iteración hasta cumplir con el límite máximo de iteraciones establecidas como $Iter_{max} = 10,000$ veces, en el UDENARPSO cada individuo por separado es iterado 10,000 veces hasta que haya un óptimo global. El aporte en primera medida itera 10,000 cada individuo por separado hasta que halle un óptimo global, cuando este se encuentre pasa al siguiente individuo. En el transcurso de la investigación se encontró que el algoritmo determinaba el óptimo global en 250 iteraciones, garantizando una búsqueda más exhaustiva. El número de individuos se determinó a 100 aumentando la posibilidad de encontrar un óptimo global entre los individuos, de esta forma se garantiza que se va a encontrar la mejor respuesta.
- Basados en¹⁷³ los autores utilizan el factor de constricción, que es una constante que reemplaza la función de peso ω ; como elemento que modifica la dirección y velocidad de la partícula en la iteración $k+1$. Como resultado se obtiene una modificación de la fórmula (22) a la forma:

$$V_i^{k+1} = K [V_i^k + c_1 rand_1 (Pbest_i^k - X_i^k) + c_2 rand_2 (Gbest^k - X_i^k)] \quad (30)$$

Donde K , es una constante establecida como 0.729, y es el resultado de usar (31), con c_1 y c_2 en valores de 2.05 cada uno. Estos datos son analizados y propuestos por los autores en¹⁷³ como valores establecidos para obtener sus resultados para compararlos con IPSO.

$$K = \frac{2}{|2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}|} \quad (31)$$

Donde $\varphi = c_1 + c_2$ y este valor debe ser mayor a 4. Esta modificación se implementa en UDENARPSO puesto que en las conclusiones los autores de ¹⁷³ reportan un mejor comportamiento en comparación con algoritmo IPSO. Para analizar resultados el algoritmo se puso a prueba con dos propuestas Anexo K y L:

La primera prueba se realiza multiplicando la fórmula de velocidad (32) con el factor de constricción, se cambió en el algoritmo propuesto la ecuación (22) por (32). Los resultados se muestran en el Anexo K, y estos se comparan con nuestra propuesta (UDENARPSO).

$$V_i^{k+1} = K [\omega V_i^k + c_1 rand_1 (Pbest_i^k - X_i^k) + c_2 rand_2 (Gbest^k - X_i^k)] \quad (32)$$

En la segunda prueba se utilizó la ecuación (30) en lugar de (22) sin factor de peso ω . Los resultados se muestran en el Anexo K, y se compara este método con nuestra propuesta (UDENARPSO).

5.5.2 Resultados de las pruebas. Los resultados del caso de estudio usando IPSO se muestran en la Tabla 34. En esta referencia, los datos son comparados con los resultados de un algoritmo genético (GA) y de una programación evolutiva (EP). Los resultados de la investigación de ¹⁶⁶ se muestran en la Tabla 36. Se obtienen los mismos resultados en el valor de los costos (\$/h), de generación total y los valores de generación de cada generador.

Como se destaca en la Tabla 35, con el algoritmo propuesto en esta investigación, se obtiene los mismos resultados que en IPSO, propuesto en ¹⁶⁷. Esto muestra que las modificaciones realizadas no afectan los resultados originales del método y el nuevo algoritmo puede ser utilizado para resolver adecuadamente el problema de despacho con GDs y en un entorno de microgrid. En la Tabla 36 tomada de ¹⁶⁸ se muestra el mínimo valor encontrado, el máximo encontrado y la desviación estándar; se enfatiza el hecho en el cual encontraron el peor resultado para IPSO como 8810.15\$/h haciendo la comparación con CFPSO (Constriction Factor PSO). Mientras que el peor resultado obtenido por nuestra propuesta se obtiene en 8234.0828\$/h, lo cual es destacable.

¹⁶⁶ S. Y. Lim, M. Montakhab, H. Nouri, Economic Dispatch of Power System Using Particle Swarm Optimization with Constriction Factor, Bristol Institute of Technology, University of The West of England, Bristol, 2009.

¹⁶⁷ *Ibid.*, p.147

¹⁶⁸ *Ibid.*, p.147

Tabla 34. Resultados obtenidos IPSO y su comparación con otros algoritmos

Generador	GA (MW)	EP (MW)	IPSO (MW)
1	300.00	300.26	300.27
2	400.00	400.00	400.00
3	150.00	149.74	149.73
TP (MW)	850.00	850.00	850.00
TC(\$/h)	8237.60	8234.07	8234.07

Tabla 35. Resultados obtenidos en la presente investigación.

G1 (MW)	G2 (MW)	G3 (MW)	DEMANDA (MW)	COSTOS (\$/h)
300.3362	399.9307	149.7331	850.00	8234.07

Tabla 36. Resultados encontrados al comparar CFPSO e IPSO ¹⁸². (STD: Desviación estándar.)

	Costo (\$)			STD
	Mínimo	Media	Máximo	
IPSO	8234,07	8319,9	8810,15	145,42
CFPSO	8234,07	8258,45	8739,79	76,12

Al analizar el Anexo K y L, se encontró la comparación entre los resultados de la propuesta y las modificaciones analizadas en este trabajo con el fin de mejorar los resultados. Con base en estos datos se puede inferir que UDENARPSO obtiene los mejores resultados tanto en el mínimo valor encontrado, el máximo valor encontrado y desviación estándar. Una menor STD significa que la variación entre ejecución y ejecución son muy pequeñas.

Otro aspecto importante a considerar es el comportamiento sobre los límites de generación total, máximo y mínimo; como se muestra en ¹⁶⁹, el límite superior en demanda es de 1.200 MW (restricción respetada tanto en el algoritmo general como en el propuesto). Sin embargo en los límites inferiores de 250 MW, el algoritmo IPSO falla. Los autores en ¹⁷⁰ muestran que para que el algoritmo funcione adecuadamente, es necesario ejecutarlo en un mínimo de 50 unidades por encima del mínimo de los datos de los generadores, mientras que en el algoritmo propuesto UDENARPSO el mínimo de generación es de 2 unidades por

¹⁶⁹ S. Y. Lim, M. Montakhab, H. Nouri, Op. cit., p.147.

¹⁷⁰ *Ibid.*, p.147

encima del mínimo de los datos de los generadores. Es importante mencionar que existe un alto gasto computacional cuando se realiza la prueba usando la mínima generación con el algoritmo propuesto, por lo que se recomienda que la evaluación sobre estos puntos se den por lo menos dos unidades por encima del mínimo y 50 unidades por encima del mínimo para el IPSO original.

Tanto el algoritmo IPSO como el propuesto respetan los límites de cada generador tanto mínimos como máximos, evitando posibles daños técnicos en ellos por sobre/bajo funcionamiento. En caso que la demanda de la red supere los límites de generación o al contrario se encuentren muy por debajo de ellos se proponen las siguientes estrategias.

- Para valores por debajo de los límites de los generadores se propone, que se revise si el valor de la demanda es mayor que el del mínimo del menor de los generadores. Si es así, se desconecta la mayor unidad de las mínimas generaciones, y se asegura que la suma de las unidades restantes den un resultado mayor al de la demanda solicitada.
- Si la demanda tiene el valor igual al mínimo de la unidad con menor valor, se desconectan las unidades que sean mayores a la mencionada anteriormente.
- Si la demanda es mucho menor al valor de la unidad con el mínimo más pequeño, en esta situación no se puede dar despacho puesto que no habría generador físicamente disponible que cumpla con ese requerimiento de demanda.

Las anteriores propuestas se plantean para los casos de la Tabla 37

Tabla 37. Demostración de posibles situaciones

	GEN 1 (MW)	GEN 2 (MW)	GEN 3 (MW)	DEMANDA (MW)
1	100.00	100.00	50.00	120.00
	100.00	100.00	50.00	80.00
2	100.00	100.00	50.00	50.00
3	100.00	100.00	50.00	30.00

La Tabla 37 muestra la estrategia planteada anteriormente y la solución ante dicho caso. Por ejemplo ante una demanda de 120 MW, se desconecta una unidad (en amarillo) como la suma de las unidades restantes (en verde) es mayor a 120 MW se continúa con el despacho, lo mismo ocurre en la estrategia 3. Para valores iguales al mínimo de la unidad con menor valor (tercera estrategia) se continúa el

despacho puesto que la unidad aun tolera dicho valor. Para valores muy por debajo al mínimo se desconectan todas las unidades y no se da despacho.

5.5.3 Comparación de algoritmos heurísticos de acuerdo con los resultados. Para realizar una comparación entre los métodos heurísticos propuestos por algunos autores consultados que buscan una solución al problema del despacho económico por medio de algoritmos heurísticos, se destaca el uso del Particle Swarm Optimization, como la solución que alcanzo los mejores resultados entre los documentos investigados. En los autores mencionados anteriormente, se emplea EP, AG y PSO, para despacho económico y se realiza una comparación con PSO.

Caso 1

Para realizar esta comparación la eficiencia de un algoritmo PSO se toma un sistema IEEE 30 bus con seis unidades de generación. Los resultados obtenidos por ¹⁷¹ que usa EP se comparan con los obtenidos por el autor en ¹⁷² usando PSO. Los resultados se muestran en la Tabla 38 La simulación se realizó en un PC Pentium III 500MHz de procesador. Y el código fue realizado en MATLAB 6.0. Los datos de los generadores, características y límites de generación se encuentran en la Tabla 38¹⁷³.

Tabla 38. Comparación entre PSO y EP.

	Valley load duration		Peak load duration	
	EP [13]	PSO	EP [13]	PSO
P ₁ (MW)	199.007	171.3896	250	250.617
P ₂ (MW)	50.852	59.8113	124.982	120.247
P ₃ (MW)	15	20.0557	36.24	36.003
P ₄ (MW)	10	15.2631	70	69.8827
P ₅ (MW)	10	13.5524	60	59.8698
P ₆ (MW)	12	14.6535	58.447	61.1606
P ₁ (MW)	13.659	11.3257	32.869	30.9809
Fuel Cost (\$/h)	819.8466	817.1211	2144.451	2132.9
CPU time (min)	3.16	0.8	5.24	1.2

Resultados del caso 1

La variación del costo (\$/h) versus el número de iteraciones para los dos casos de demanda ¹⁷⁴ ocurre en la iteración 100. Como se observa en la Tabla 38 en el periodo pico de carga los niveles de generación en el generador 1 son cercanos para ambos casos (EP y PSO). Sin embargo, tienen diferencias marcadas en el periodo de baja carga. Como PSO y EP son métodos de búsqueda y optimización estocástica y heurística, estos deben iniciar su búsqueda de una población inicial

¹⁷¹ L. L. Lai, 'Intelligent system applications in power engineering – evolutionary programming and neural networks,' John Wiley and Sons, Inc., New York, 1998.

¹⁷² K. Mahadevan, P. S. Kannan, S. Kannan. Particle Swarm Optimization for Economic Dispatch of Generating Units with Valve-Point Loading. , Journal of Energy & Environment. pag. 49 – 61, May. 2005.

¹⁷³ L. L. Lai, Op. cit., p.150.

¹⁷⁴ Ibíd., p.150

al azar. La calidad o sensibilidad de la búsqueda la dan por ejemplo los factores como el factor de escalamiento en EP, las constantes de aceleramiento de PSO (c_1 y c_2) y la función de peso (ω). Además de depender del número de iteraciones en que se realice la búsqueda. Para el caso 1 se tomaron 100 iteraciones y no se tuvo demasiada variación en el costo del combustible (\$/h) después de correr el algoritmo 10 veces.

Al analizar la Tabla 39 en el valor del precio del combustible (\$/h) se nota que el PSO obtuvo mejores resultados que EP. Determina que PSO es un algoritmo de optimización y búsqueda eficiente y funcional.

Tabla 39. Parámetros y Características de los 6 generadores.

Generator	Unit 1	Unit 2	Unit 3	Unit 4	Unit 5	Unit 6
Bus	1	2	5	8	11	13
P_{\max} (MW)	250	160	10	70	60	80
P_{\min} (MW)	50	20	15	10	10	12
a (MBtu)	0	0	0	0	0	0
b (MBtu/MW)	2.0	1.75	1.0	3.25	3.0	3.0
c (MBtu/MW ²)	0.00375	0.0175	0.0625	0.0834	0.025	0.025
e (MBtu)	15	10	10	5	5	5
f (rad/MW)	0.06283	0.08976	0.14784	0.20944	0.25133	0.1848

Caso 2

Este caso se analiza la comparación de resultados entre AG, EP, IEP (improved EP) y MPSO (Modified Pso), para solucionar el despacho económico de tres generadores con límites de generación. Los autores usan MPSO y toman en comparación los resultados obtenidos por los anteriores algoritmos mencionados. El MPSO, es una modificación del algoritmo propuesto por Kennedy y Eberhart en 1995,¹⁷⁵ usando una estrategia que busca reducir el tiempo de convergencia en el resultado final de reducción de costo.

La estrategia propuesta por los autores, se basa en ajustar el espacio de búsqueda a la solución requerida, basada en la distancia y posición de $Gbest_i$ (siendo la posición la capacidad de generación) con respecto a sus límites máximos y mínimos de generación, el proceso se explica en (33)

$$\begin{aligned}
 P_{j\max}^{k+1} &= P_{j\max}^k - \left(P_{j\max}^k - Gbest_j^k \right) \times \Delta \\
 P_{j\min}^{k+1} &= P_{j\min}^k + \left(P_{j\min}^k - Gbest_j^k \right) \times \Delta.
 \end{aligned}
 \tag{33}$$

¹⁷⁵ J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," in Proc. IEEE Int. Conf. Neural Netw., vol. 4, Nov. 1995, pp. 1942–1948.

Dónde:

$P_{j\max}^{k+1}$ Posición o generación máxima en la iteración $k+1$.

$P_{j\min}^{k+1}$ Posición o generación mínima en la iteración $k+1$.

$P_{j\max}^k$ Posición o generación máxima en la iteración.

$P_{j\min}^k$ Posición o generación mínima en la iteración k .

$Gbest_j^k$ Mejor posición o generación de los individuos en la iteración k .

Δ Número entre 0.8 y 0.01 que determina el espaciamiento entre los individuos.

El caso propuesto por los autores, establecen el despacho de tres generadores con sus límites y coeficientes de generación, como se indica más adelante. En la Tabla 40 se muestran los resultados obtenidos siendo los resultados de GA, IEP y EP analizados previamente en¹⁷⁶ respectivamente. Las características de los generadores son las que muestra la Tabla 40.

Tabla 40. Comparación de generación y costo total para el caso planteado

Unit	GA	IEP	EP	MPSO
1 (MW)	300.00	300.00	300.26	300.27
2 (MW)	400.00	400.00	400.00	400.00
3 (MW)	150.00	149.77	149.74	149.73
TP (MW)	850.00	850.00	850.00	850.00
TC (\$/h)	8237.60	8234.09	8234.07	8234.07

Resultados caso 2

Los autores mencionan la importancia del gasto computacional, siendo el de IEP y de EP considerable según lo mencionado en las conclusiones ya que necesita más de 10.000 iteraciones para encontrar un óptimo global. Mientras que MPSO muestra una gran superioridad ya que con 100 iteraciones es suficientes para tener un óptimo global. Con respecto a los AG muestra MPSO una superioridad destacable ya que sobrepasa por un buen número el costo encontrado en AG. Aunque es importante mencionar que MPSO fue evaluado en sus límites máximos y mínimos de demanda, a pesar de que en los límites de 1.200 MW encontró el resultado en los límites mínimos se encontraron problemas y retardos significativos.

¹⁷⁶ . T. Yang, P. C. Yang, and C. L. Huang, "Evolutionary programming based economic dispatch for units with nonsmooth fuel cost functions," IEEE Trans. Power Syst., vol. 11, no. 1, pp. 112–118, Feb. 1996.

5.5.4. Análisis de resultados en la microgrid propuesta:

5.5.4.1 Funciones de consumo y costo de los generadores. Para obtener las funciones de consumo y costo de cada generador se realiza el análisis económico propuesto por ¹⁷⁷ realizado anteriormente en el capítulo 4. A continuación se presentan las funciones de consumo de cada unidad. Donde F_i representa la función de consumo del generador i y P_i la potencia generada. Las funciones de consumo se determinan de acuerdo al combustible o insumo a utilizar y se analizarán más adelante.

Unidad Generadora de Metanización.

$$F_1 = 4.6699 - 0.0232P_1 + 0.0005 P_1^2 \quad (34)$$

Unidad Generadora de Desgasificación del Relleno Sanitario ANTANAS.

$$F_2 = 319.98 - 0.061P_2 + 0.002P_2^2 \quad (35)$$

PCH Julio Bravo

$$F_3 = 20704 - 0.0308P_3 + 0.003P_3^2 \quad (36)$$

El algoritmo propuesto trabaja con las funciones de costo de cada unidad y dado el hecho en que cada función depende del valor de combustible o el precio del insumo (caudal de agua, biogás, diesel) a usar, los coeficientes de la función de costo varían por cada precio a evaluar. En el numeral 5.5.1 se muestran diferentes casos donde se varían los precios de los insumos.

- **Pequeña Central Hidroeléctrica PCH.** Teniendo en cuenta, una pequeña central hidroeléctrica de tipo central fluyente con capacidad de 5 MW tiene unos costos de operación y mantenimiento de 595'350.000 \$/año. En Julio Bravo, la capacidad máxima de generación es de 1,5 MW, y los costos de operación y mantenimiento son aproximados al promedio brindado por. ¹⁷⁸

Tabla 41. Datos de costos para cada tipo de hidroeléctricas

Planta	Potencia (MW)	Costo de operación y mantenimiento (\$/año)	Costo de operación y mantenimiento (\$/h)
Central fluyente	5	595'350.000	68.909
Julio Bravo	1.5	178'605.000	20.671

¹⁷⁷ J. Grainger, W. Stevenson, "Power Systems Analysis," McGraw-Hill, 1994

¹⁷⁸ J. Rico. Manuales de energía Renovables Mini centrales hidroeléctricas, instituto para la diversificación y ahorro de la energía, Adriana castro Madrid 2006.

Las Centrales Hidroeléctricas de Nariño CEDENAR S.A. E.S.P, pactaron un contrato de \$ 18'000.000 mensuales a una empresa contratista por mantenimiento y operación de la PCH Julio Bravo. El costo por estos servicios es de 25.000 \$/h.

Para la determinación de la función de costo necesaria para el algoritmo de control propuesto, se tiene en cuenta los anteriores resultados.

- **Desgasificación del relleno sanitario ANTANAS** teniendo en cuenta ¹⁷⁹ los costos de operación y mantenimiento para la generación eléctrica a partir de desechos sólidos, son:

Tabla 42. Datos de costos para una planta de desgasificación en el relleno sanitario ANATANAS

Planta	Potencia (MW)	Costo de operación y mantenimiento (\$/año)	Costo de operación y mantenimiento (\$/h)
Generación eléctrica con residuos sólidos	5	907'335.000	105.015
Desgasificación ANTANAS	1	181'467.000	21.003

- **Metanización** teniendo en cuenta los costos de operación y mantenimiento para la generación eléctrica a partir de residuos orgánicos e industriales agrícolas, generados por el estiércol de ganado en la granja experimental de COORPOICA, son:

Tabla 43. Costos para una planta de metanización.

Planta	Potencia (MW)	Costo de operación y mantenimiento (\$/año)	Costo de operación y mantenimiento (\$/h)
Generación eléctrica con residuos agrícolas	5	907'335.000	105.015
Metanización COORPOICA	0.350	63'513.450	7.351

5.5.4.2 Simulación. Ejecutando el algoritmo propuesto se toman 4 valores de demanda (la demanda pico, la mínima, y dos valores intermedios), estos se presentan en la Figura 37. Se proponen cinco casos de estudio para evaluar la incidencia de los costos de operación, mantenimiento y costos de los insumos.

Caso 1

Para el caso 1 se evalúa el comportamiento de los generadores bajo determinadas condiciones de precio que modifican las funciones de consumo:

¹⁷⁹ *Ibíd.*, p.153

- Los costos de la PCH van a contemplar el precio del uso de caudal cuyo valor se debe pagar a COORPONARIÑO que es de 1,11\$/m³ de agua más el pago de los costos de mantenimiento, explicados en la Tabla 44.
- Los costos del generador del relleno contemplan el valor de cada m³ de biogás extraído, pagado a EMAS S.A. E.S.P. por BIONERSIS con valor de 11,65\$/m³ más los costos de mantenimiento Tabla 45.
- La planta de Metanización trabajará con un generador biogás-diesel, como se explica en el Capítulo 4, esta unidad tendrá en cuenta los precios del diesel (1678,5\$/l) más los costos de mantenimiento Tabla 43.

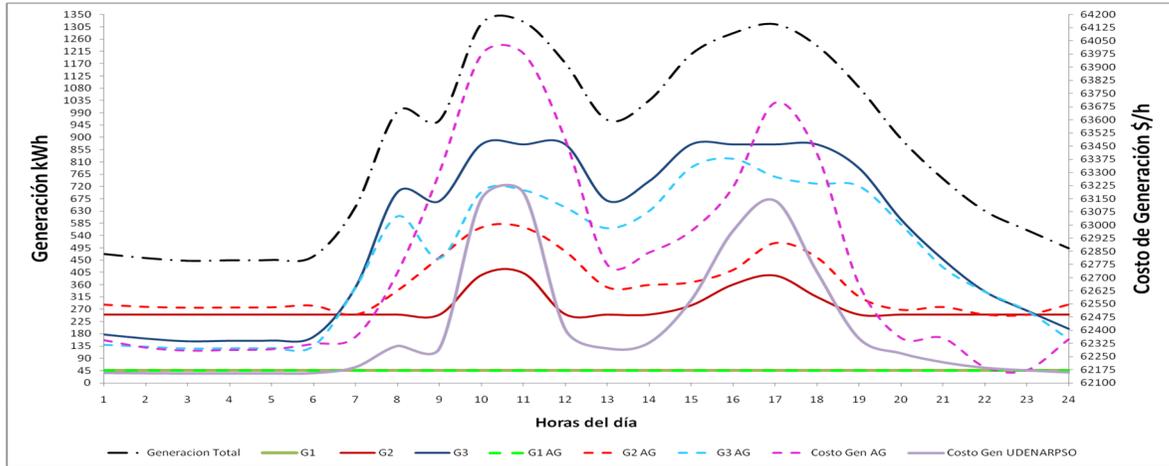
Tabla 44. Costos de insumos, operación y mantenimiento. Caso 1

CASO 1	Insumo	Costo insumo	Costo O y M
Metanización	Diesel	1.678,50	7.351
Desgasificación	Biogás	11,65	21.003
PCH	Caudal de Agua	1,11	20.671

Tabla 45. Características de los GDs y coeficientes de costo Caso 1

Coeficientes	a (\$/h)	b (\$/kWh)	c (\$/kW2h)	PMIN (kW)	PMAX (kW)
G1	9.239,312	123,705	0,0671	45	180
G2	22.082,978	4,9838	0,0002	250	1.000
G3	23.858,000	0,0308	0,0003	100	875

Figura 38. Resultados del Caso 1



Los resultados obtenidos de optimización de despacho económico por el algoritmo UDENARPSO afirman que la PCH es la GD más económica obligándola a generar la potencia faltante demandada, es decir la planta ubicada en el relleno y la de Metanización generan su mínima capacidad. Cuando la suma de la mínima capacidad generada por metanización, desgasificación y máxima capacidad de la PCH no abastece la demanda, es necesario que la segunda más barata apoye la demanda faltante.

Caso 2

Para el caso 2 se trata de ajustar el precio del diesel usado en la planta de metanización a un valor cercano al biogás 11, 65 \$/m³, puesto que este valor no puede ser comparado con el de los insumos utilizados por el generador de desgasificación y la PCH que son muchísimo menores. Se mantienen los valores del costo de mantenimiento y operación del mismo expuestos en el caso 1. Los dos generadores restantes no se modifican y se tiene los siguientes resultados.

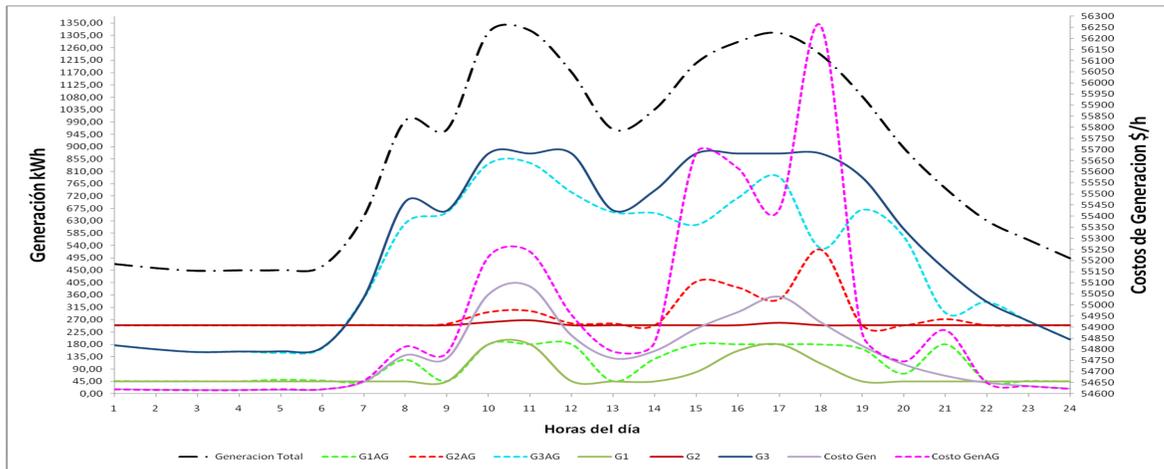
Tabla 46. Costos de insumos, operación y mantenimiento. Caso 2

CASO 2	Insumo	Costo insumo	Costo O y M
Metanización	Diesel	11,65	7.351
Desgasificación	Biogás	11,65	21.003
PCH	Caudal de Agua	1,11	20.671

Tabla 47. Características de los GDs y coeficientes de costo Caso 2

Coeficientes	a (\$/h)	b (\$/kWh)	c (\$/kW2h)	PMIN (kW)	PMAX (kW)
G1	7.364,106	0,8586	0,00046	45	180
G2	22.082,978	4,9838	0,00023	250	1.000
G3	23.858,000	0,0308	0,0003	100	875

Figura 39. Resultados del Caso 2



El algoritmo determina la PCH como la más barata de las generaciones, pero entra en funcionamiento la planta de metanización y desgasificación en altas demandas. Esta opción es improbable en la vida real ya que el precio del diesel es muy alto por ser derivado del petróleo pero se realizó para analizar el algoritmo de optimización.

Caso 3

Para el caso 3, se tiene en cuenta el costo de mantenimiento y operación que paga CEDENAR S.A. E.S.P por la PCH Julio Bravo, el aumento de \$5.000 se realiza para encontrar un cambio en los coeficientes del generador 3 y así evaluar el comportamiento del algoritmo propuesto. Se mantiene el valor de costo del Diesel explicado anteriormente y el costo del relleno permanece igual.

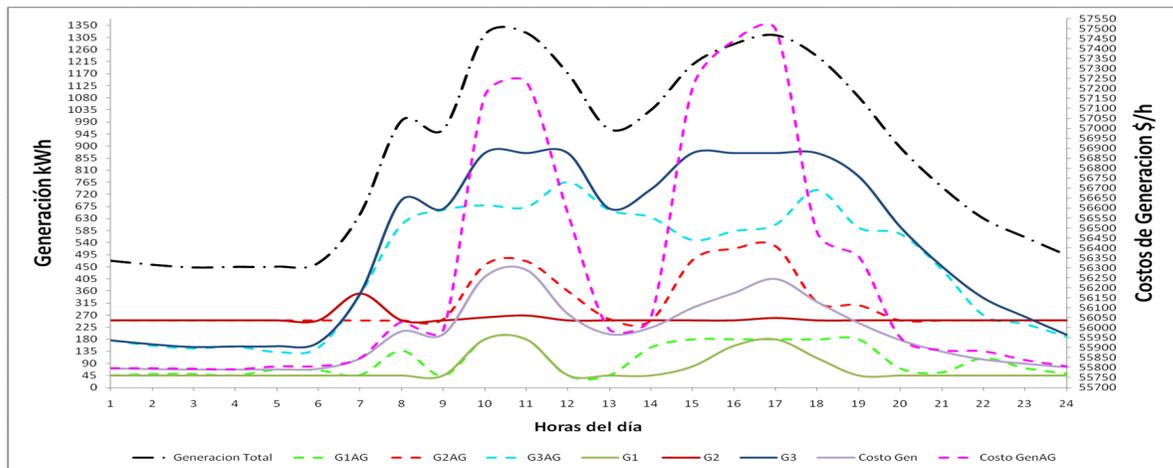
Tabla 48. Costos de insumos, operación y mantenimiento. Caso 3

CASO 3	Insumo	Costo insumo	Costo O y M
Metanización	Diesel	11,65	7.351
Desgasificación	Biogás	11,65	21.003
PCH	Caudal de Agua	1,11	25.000

Tabla 49. Características de los GDs y coeficientes de costo Caso 3

Coeficientes	a (\$/h)	b (\$/kWh)	c (\$/kW2h)	PMIN (kW)	PMAX (kW)
G1	7.364,106	0,8586	0,00046	45	180
G2	22.082,978	4,9838	0,00023	250	1.000
G3	25.012,000	0,1800	0,0002	100	875

Figura 40. Resultados del Caso 3



Las GD generan equilibradamente debido a que sus costos son similares. En la PCH se realiza un cambio mínimo en los costos de operación y mantenimiento. Para la generación mínima los costos operativos son de \$20.000 y en la máxima son de \$25,000, obteniendo una diferencia de \$5.000. En el caso de máxima demanda se puede analizar que la Metanización es la generación más barata del mercado, seguida por desgasificación y por último la PCH.

Caso 4

Para el caso 4 se trabaja con los coeficientes anteriores del generador 2 y 3, mientras que el generador 1 modifica su precio a tal como se lo presenta en el caso 1.

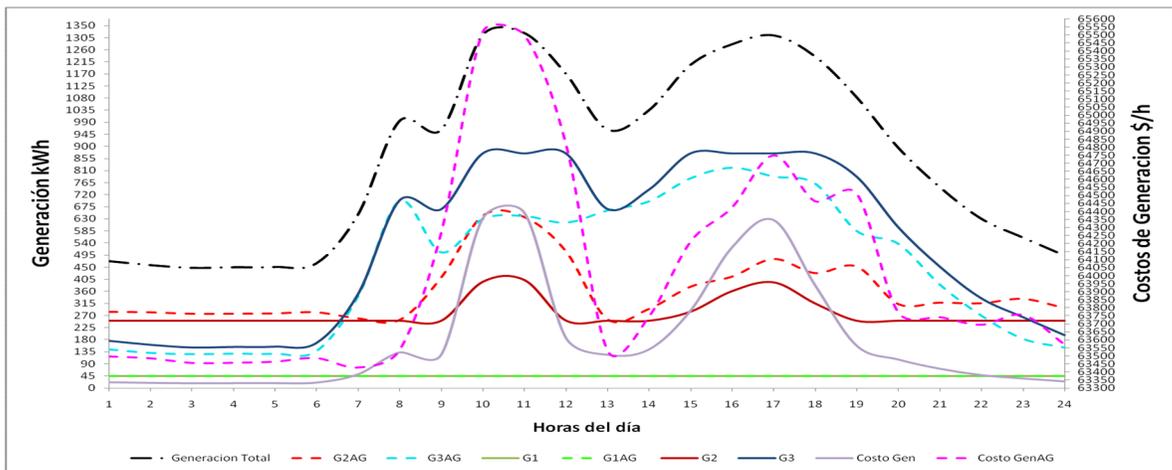
Tabla 50. Costos de insumos, operación y mantenimiento. Caso 4

CASO 4	Insumo	Costo insumo	Costo O y M
Metanización	Diesel	1.678,50	7.351
Desgasificación	Biogás	11,65	21.003
PCH	Caudal de Agua	1,11	25.000

Tabla 51. Características de los GDs y coeficientes de costo Caso 4

Coeficientes	a (\$/h)	b (\$/kWh)	c (\$/kW2h)	PMIN (kW)	PMAX (kW)
G1	9.239,312	123,705	0,0671	45	180
G2	22.082,978	4,9838	0,00023	250	1.000
G3	25.012,000	0,1800	0,0002	100	875

Figura 41. Resultados del Caso 4



La planta de Metanización es la más costosa debido al uso de diesel, la planta del relleno es más barata en comparación con la PCH, por lo que esta genera más potencia.

Caso 5

Para el caso 5 se trabaja con la segunda opción que se tiene para la planta de metanización, dos generadores a biogás capaces de generar una potencia de 350 kWh, cuya función de consumo es (5.6). Este caso se presenta con el fin de determinar el comportamiento de la planta de metanización en el algoritmo propuesto, se tiene en cuenta el precio de compra de biogás de $15.86\$/m^3$ como un referente tomado de la Tabla 52 más el costo de mantenimiento y operación para este tipo de plantas como se muestra en la misma tabla. Los coeficientes del generador 2 y 3 se los toma como en el ejemplo anterior.

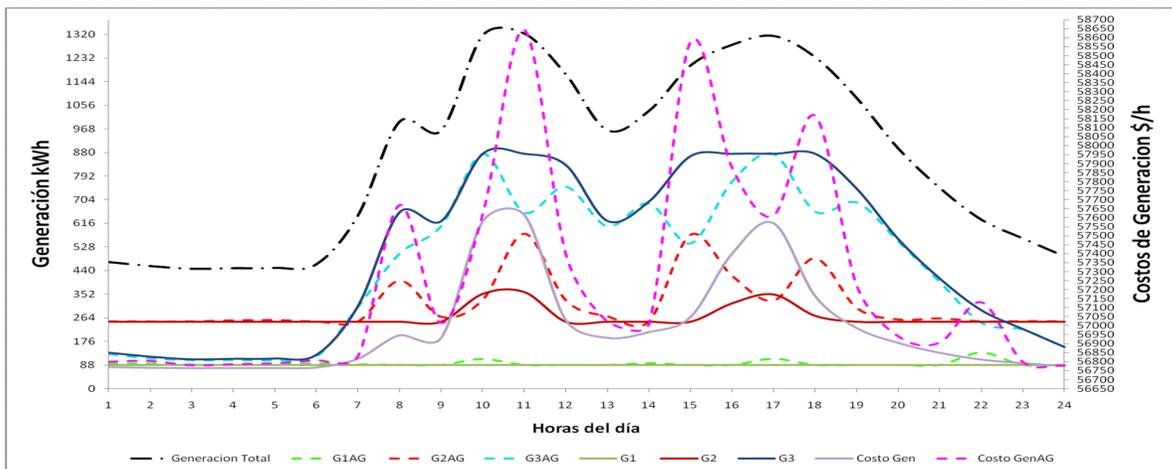
Tabla 52. Costos de insumos, operación y mantenimiento. Caso 5

CASO 5	Insumo	Costo insumo	Costo O y M
Metanización	Biogás	15,84	7.351
Desgasificación	Biogás	11,65	21.003
PCH	Caudal de Agua	1,11	25.000

Tabla 53. Características de los GDs y coeficientes de costo Caso 5

Coefficientes	a (\$/h)	b (\$/kWh)	c (\$/kW2h)	PMIN (kW)	PMAX (kW)
G1	7.880,198	4,780	0,011	88	350
G2	22.082,978	4,983	0,00023	250	1.000
G3	25.012,000	0,1800	0,0002	100	875

Figura 42. Resultados del Caso 5.



A pesar del cambio en la función de costo de la generadora de metanización, esta planta se mantiene esta planta en su mínimo y la planta de desgasificación entrega mayor potencia por ser la más barata.

Caso 6

Para el caso 6 se tienen en cuenta que el generador 2 y 3 tiene los mismos coeficientes que en el caso 1, mientras que el generador 1 expresa los coeficientes del caso anterior. Todo esto con el fin de evaluar el comportamiento del nuevo generador, ante una situación de precios más bajos como lo da la generación proveniente de PCH.

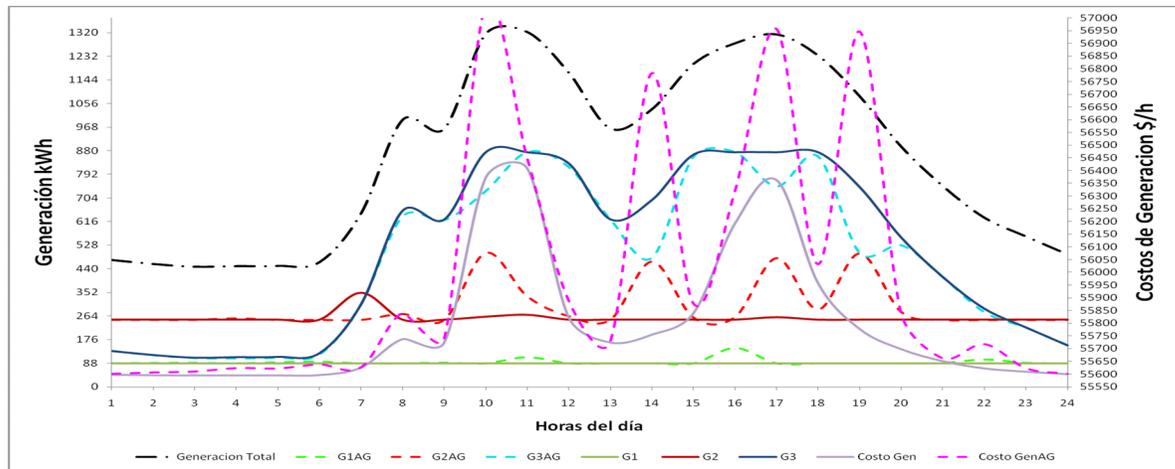
Tabla 54. Costos de insumos, operación y mantenimiento. Caso 6

CASO 6	Insumo	Costo insumo	Costo O y M
Metanización	Biogás	15,84	7.351
Desgasificación	Biogás	11,65	21.003
PCH	Caudal de Agua	1,11	20.671

Tabla 55. Características de los GDs y coeficientes de costo Caso 6

Coeficientes	a (\$/h)	b (\$/kWh)	c (\$/kW ² h)	PMIN (kW)	PMAX (kW)
G1	7.880,198	4,780	0,011	88	350
G2	22.082,978	4,983	0,00023	250	1.000
G3	23.858,000	0,0308	0,0003	100	875

Figura 43. Características de los generadores y coeficientes de costo para el Caso 6.



A pesar del cambio en la función de costo de la generadora de metanización se mantiene esta planta en su mínimo y la hidroeléctrica entrega mayor potencia por ser la más barata.

Comparación Algoritmo Genético Vs UDENARPSO

En la Figura 43 se presenta los resultados obtenidos hora a hora al minimizar la función de costo de generación del sistema teniendo en cuenta la demanda horaria de las 8 cargas de la microgrid, por medio de los algoritmos UDENARPSO y Algoritmo Genético. Para dicha comparación se tiene en cuenta el caso 1 de simulación y con esto se concluye que UDENARPSO determina mejores resultados en la minimización de la función objetivo.

El caso 1 se considera el principal por el manejo de datos reales en precios de insumos para la generación y cuyos resultados ayudarían a evaluar los beneficios económicos del despacho. Para usar algoritmos genéticos se realiza la simulación de AG en el toolbox de Matlab, OPTIMTOOL que por medio de una interfaz gráfica de usuario (GUI) se selecciona un método de solución para la optimización y así obtener en el caso particular de la investigación, la minimización de la función de costo de generación, que es la suma total de la función de costo de cada generador (suma de las ecuaciones 34, 35 y 36).

Para iniciar con el proceso de simulación, la función objetivo se adapta a un archivo .m debido a su complejidad, por ser una ecuación no lineal de varias variables. El toolbox, OPTIMTOOL necesita que la función objetivo este dentro de un archivo .m (extensión para una función en Matlab) cuando esta no sea lineal. Luego se ejecuta el GUI (OPTIMTOOL), haciendo uso del prefijo @ y el nombre

con el que se lo guardo (OBJFUN) para este caso. El contenido de la función en Matlab se explica a continuación.

```
function ft = objfun(x)

a1=15189;

a2=24731;

a3=23858;

b1=-38.9410;

b2=-0.7106;

b3=0.0308;

c1=0.8392;

c2=0.0023;

c3=0.0003;

f1= a1 + b1.*x(1)+c1.*(x(1)).^2;

f2= a2 + b2.*x(2)+c2.*(x(2)).^2;

f3= a3 + b3.*x(3)+c3.*(x(3)).^2;

ft = f1 + f2 + f3;
```

La función objetivo a analizar consta de tres variables $x(1)$, $x(2)$ y $x(3)$ debido al uso de tres generadores en la microgrid propuesta. La solución que se pretende encontrar es la salida de potencia que cada unidad debe generar y que nos represente el mínimo costo.

Debido a que esta función es de tipo no lineal, el algoritmo genético solicita en OPTIMTOOL restricciones. Las restricciones son de dos tipos: lineales de igualdad y de desigualdad. Por último solicita los límites inferiores y superiores en los cuales las variables o unidades de generación van a trabajar.

Al trabajar AG solo se tuvo en cuenta la restricción de igualdad y ésta debe ser representada de la siguiente manera:

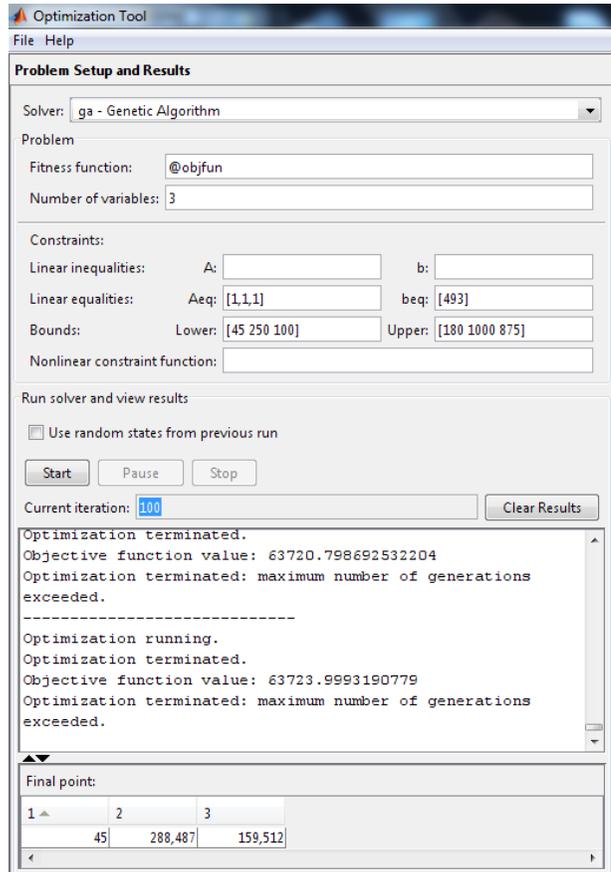
Restricciones de igualdad: $P1+P2+P3=Demanda$.

En Optimtool: Aeq= [1,1,1], Beq[“Valor De La Demanda (Kwh)”]

Los límites de generación mínimos y máximos de cada generador se expresan así:
 $45 < P1 < 180$, $250 < P2 < 1000$, $100 < P3 < 875$.

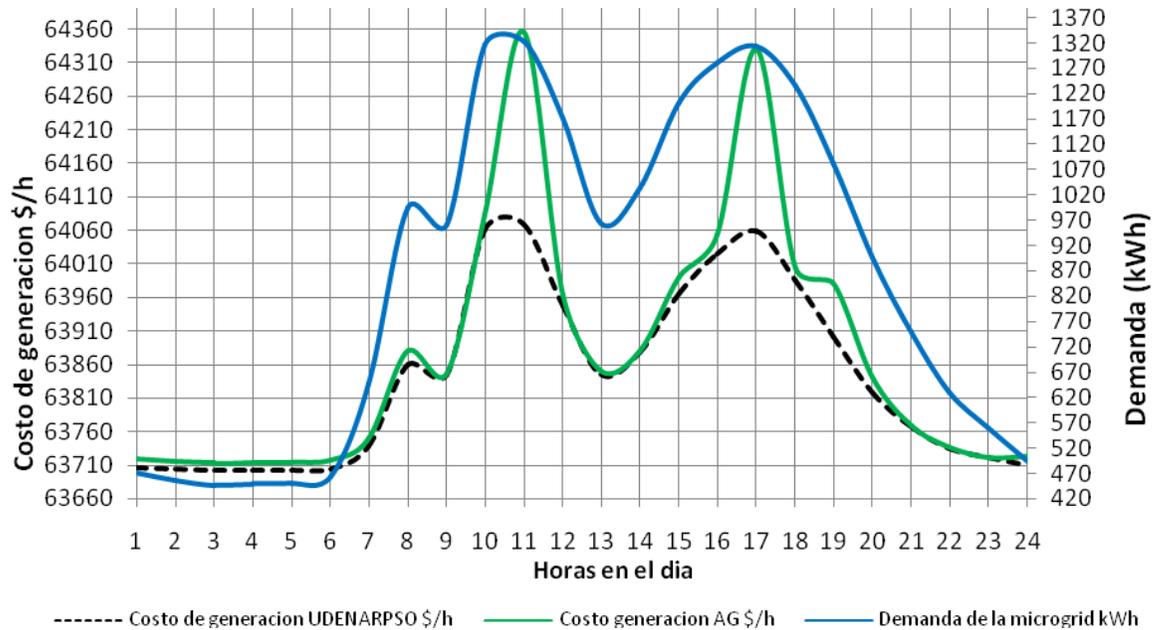
En Optimtool: Lower= [45,250,100], Upper=[180,1000,875]

Figura 44. Algoritmo Genético en OPTIMTOOL DE Matlab



En la figura 44, siguiente se muestran los resultados obtenidos por AG y se puede inferir el destacado desempeño de UDENARPSO frente AG en relación a la minimización de costos de generación. Las diferencias no solo se hayan en valores altos de demanda (horas pico) sino en valores pequeños de la misma, las diferencias aunque pequeñas ya sea por unidades o por cifras decimales existen y UDENARPSO tiene la ventaja.

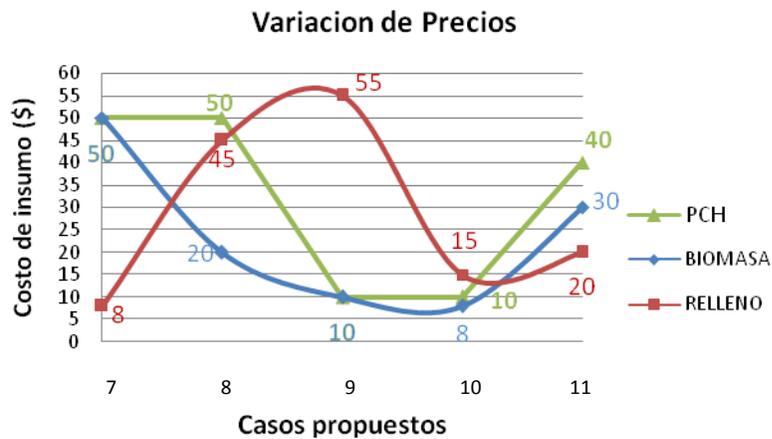
Figura 45. Resultados Caso 1: UDENARPSO vs. AG



Variación de precios de los insumos en los GDS

Con el fin de observar el comportamiento del algoritmo UDENARPSO cuando este es expuesto a distintas situaciones, se modificaron las funciones de costo de cada uno de los generadores. La función de costo me determina el grado de participación que tiene cada GD en suplir la demanda de las cargas, por esta razón se determinaron los siguientes valores aleatorios.

Figura 46. Variación de precios de los insumos en los GDS



Los coeficientes para cada una de las generadoras se representan teniendo en cuenta las variaciones de costos en combustible o caudal, representando 5 cambios (Figura 46).

Tabla 56. Coeficientes de cada uno de los GDs en los casos propuestos con variación de precio en combustible.

CASO	METANIZACION			RELLENO ANTANAS			PCH		
	a (\$/h)	b (\$/kWh)	c (\$/kW ² h)	a (\$/h)	b (\$/kWh)	c (\$/kW ² h)	a (\$/h)	b (\$/kWh)	c (\$/kW ² h)
7	56,25	3,685	0,002	741,616	3,4224	0,00016	592,63	7,6563	0,0049
8	22,5	1,474	0,0008	4.171	19,251	0,0009	592,63	7,6563	0,0049
9	11,25	0,737	0,0004	5.098	23,529	0,0011	60,348	2,1614	0,0005
10	9	0,5896	0,00032	1.390,53	6,417	0,0003	60,348	2,1614	0,0005
11	33,75	2,211	0,002	1.854,04	8,556	0,0004	2.224	8,851	0,001

Caso 7

Tabla 57. Resultados caso 7

RESULTADOS 7					
METANIZACION (kW)	RELLENO (kW)	PCH (kW)	COSTOS \$/h	DEMANDA (kW)	HORA
45,000	302,000	100,000	4197,530	447	3
51,609	596,391	100,000	4485,320	748	21
64,541	798,459	100,000	4860,230	963	13
180,000	1000,000	143,000	6294,170	1.323	11

Caso 8

Tabla 58. Resultados caso 8

RESULTADOS 8					
METANIZACION (kW)	RELLENO (kW)	PCH (kW)	COSTOS \$/h	DEMANDA (kW)	HORA
97,000	250,000	100,000	15.740,30	447	3
180,000	468,000	100,000	16.535,10	748	21
180,000	650,169	132,831	18.157,10	963	13
180,000	777,076	365,924	21.793,2	1323	11

Caso 9

Tabla 59. Resultados caso 9

RESULTADOS 9					
METANIZACION (kW)	RELLENO (kW)	PCH (kW)	COSTOS \$/h	DEMANDA (kW)	HORA
97,000	250,000	100,000	17.796,00	447	3
180,000	252,181	315,819	18.367,40	748	21
180,000	253,154	529,846	18.841,20	963	13
180,000	268,000	875,000	19.646,70	1323	11

Caso 10

Tabla 60. Resultados caso 10

RESULTADOS 10					
METANIZACION (kW)	RELLENO (kW)	PCH (kW)	COSTOS \$/h	DEMANDA (kW)	HORA
96,614	250,386	100,000	5.096,00	447	3
180,000	468,000	100,000	5.443,59	748	21
180,000	551,343	231,657	5.928,29	963	13
180,000	602,751	540,229	6.845,64	1323	11

Caso 11

Tabla 61. Resultados caso 11

RESULTADOS 11					
METANIZACION (kW)	RELLENO (kW)	PCH (kW)	COSTOS \$/h	DEMANDA (kW)	HORA
59,105	287,895	100,000	9.650,62	447	3
113,834	534,166	100,000	10.264,20	748	21
167,874	695,126	100,000	11.050,30	963	13
180,000	1000,000	143,000	13.191,50	1323	11

De acuerdo a los resultados de los casos 7 a 11 para una propuesta de variación de precios se concluye la eficiencia del algoritmo propuesto en el cual es capaz de decidir que generador es más económico y cual obtener mayor provecho mientras se restringe el uso del más costoso, todo con el fin de reducir los costos de generación.

Un aspecto a destacar es el uso de PSO no solo para evaluar el despacho económico también podría determinar que generador es más conveniente basado en su función de consumo y costo ante una situación en particular demanda.

6. CONCLUSIONES

El sistema eléctrico actual solo presenta medida remota en cargas especiales. Debido a esto, la red no tiene control total sobre posibles fraudes que se puedan presentar. Los fraudes en las redes de distribución representan una cuantiosa suma de dinero para las empresas encargadas de la comercialización. La tecnología Smart Grid permite la detección de fraudes y de esta manera, las empresas comercializadoras recuperarían la inversión inicial en este tipo de innovación y obtendrían rentabilidad económica futura.

El sistema de comunicaciones es de vital importancia dentro de una microgrid ya que a través de este se realiza el monitoreo de dispositivos y recolección de datos, necesarios para tomar decisiones de control. Para obtener una solución fiable es necesario implementar un sistema que se acople a la cantidad de información a transmitir, la tecnología existente, los costos de implementación, el entorno geográfico y al manejo de un lenguaje de comunicación estandarizado.

La generación distribuida no se ha difundido a gran escala alrededor del mundo por ser una idea relativamente nueva, y si la tecnología de comunicaciones, control y ubicación adecuada no se implementa adecuadamente se teme que se produzcan sobre tensiones, desfases y desestabilización en la red de distribución, pero gracias a la labor de Smart Grid se lograrían controlar este tipo de percances. A pesar de que las GD necesitan una fuerte inversión en capital para instalación y el sistema de telecontrol, aportan beneficios económicos, sociales y ambientales.

La implementación de generadores distribuidos en lugares cercanos a la ciudad de Pasto representarían beneficios económicos para las empresas que implementen estos sistemas, beneficios ambientales a la comunidad y beneficios sociales-económicos por la disminución del pago de energía en la carga. CEDENAR S.A. E.S.P suministra únicamente el 18% del consumo de la ciudad de Pasto y por ende existe la posibilidad de la implementación de generación distribuida a cargo de la empresa de distribución y comercialización. Esto representa una factibilidad técnica y económica en la región. La aplicación de tecnologías de generación distribuida a corto plazo podría estar orientada principalmente hacia las zonas no interconectadas rurales e industriales.

El departamento de Nariño es considerado nacionalmente como un departamento con gran potencial de energías renovables. De esta investigación se obtienen que las energías en geotermia, mareomotriz, solar, metanización, desgasificación y pequeñas centrales hidroeléctricas son viables en algunos sectores de la región. En geotermia se tiene el volcán Azufral y el volcán Chiles-Cerro Negro, en mareomotriz se usa la zona costera, en fotovoltaica se presenta buena radiación

solar en algunas zonas y las PCH se pueden ubicar cerca de la gran cantidad de vertientes que no se han aprovechado hasta el momento.

La generación de energía a partir de biomasa, es factible tanto en metanización como en desgasificación. El uso de ellas como energías renovables tiene las siguientes ventajas medioambientales: la generación de electricidad por medio de la metanización y el control de las emisiones provenientes de GEC evitan la emisión a la atmosfera de 129 kg de CH₄ o 2.709 toneladas de CO₂ diarios, reduciendo el impacto ambiental si se usa el estiércol como abono. El proceso de desgasificación del relleno sanitario en la actualidad controla las emisiones a la atmosfera por medio de la quema de biogás. Al tener este solo una presencia del 51% en él, se deja de emitir 133 kg de CH₄ por hora a la atmosfera. Con estos resultados, la generación y venta de energía en el relleno sanitario implicaría la obtención de ingresos adicionales para la empresa. La creación de la microgrid es un proyecto de pequeña escala, aceptado dentro del Protocolo de Kyoto como actividades que mejoran la eficiencia de energía y la reducción en el consumo tanto de suministro y/o demanda hasta de un máximo de 15GW/h al año. Esto representa un equivalente en bonos de carbono de 0.8KgCO₂/KWh (su pago es de 6US\$/KgCO₂). De esta forma se recibirían ingresos adicionales y se contribuye a las reducir el impacto ambiental causado por el sector energético en Colombia.

En las pruebas hechas al algoritmo propuesto, la inicialización de la posición dispersa de las partículas genera la aparición de un mínimo global muy alejado al encontrado en¹⁸⁰, además cada vez que se ejecuta el algoritmo los resultados varían. En cambio con una adecuada inicialización de los valores se garantiza obtener los resultados esperados. Esto se muestra con la obtención de resultados similares en diferentes ejecuciones con condiciones iniciales favorables, teniendo mínimas variaciones posibles (en la tercera cifra decimal).

Además se observó que con condiciones iniciales de las partículas muy diferentes en relación al óptimo, se obtienen mínimos locales muy alejados a los propuestos por el caso de prueba J, Park . Estos mínimos locales hacen que el algoritmo no converja en todas sus pruebas el mínimo costo. Para solucionar este problema se restringió la ubicación de un número mayor de partículas en una región más propicia de inicialización y se obtuvo los mínimos costos en todas las pruebas. Esto también influye en la convergencia del algoritmo en un tiempo menor y con menor número de iteraciones.

La exigencia de la búsqueda para determinar la posición optima es determinada por las constantes de aceleramiento de PSO (c_1 y c_2) y la función de peso (ω). Al ser estas conocidas como los parámetros cognitivos y sociales que determinan la

¹⁸⁰ J. Park, Y. Jeong, H. Kim J. Shin, An Improved Particle Swarm Optimization for Economic Dispatch with Valve-Point Effect, *International Journal of Innovations in Energy Systems and Power*, Vol. 1, no. 1 (November 2006).

convergencia de la partícula individual y grupal, se modificaron sus valores con el fin de que el algoritmo sea exigente y halle el mejor resultado. Se utilizó el valor aconsejado de acuerdo a R Hassam PSO vs GA ya que éste garantiza que el PSO encuentre el mínimo global.

Gracias a la simulación del flujo de potencia en PSAT, es posible determinar las pérdidas de potencia en las líneas de transmisión. Se simuló el flujo de potencia en la microgrid teniendo y sin tener en cuenta los generadores distribuidos en la hora pico de demanda y con los valores óptimos de generación obtenidos por IPSO. Los resultados conseguidos apoyan el uso de GDs ya que las pérdidas en las líneas de transmisión se redujeron un 18.35% en comparación con la microgrid sin GDs.

7. RECOMENDACIONES

Promover escenarios y premiar la innovación debe ser prioridad en las instituciones universitarias fomentando a las próximas generaciones a que investiguen y crezcan académicamente.

Seguir el estudio en el campo de telecomunicación y telecontrol con la creación de medidores inteligentes capaces de transmitir información remota.

Invertir en investigación, desarrollo e innovación (I+D+i) ya que en Colombia es insuficiente, y como consecuencia gran parte de los productos y servicios desarrollados en Colombia se basan en fórmulas elaboradas por terceros en otros países. Por esta razón, muchos de los bienes y servicios ofrecidos por los colombianos no son lo suficientemente sofisticados para conquistar mercados en países desarrollados. La inversión en I+D+i en Colombia por parte de empresas es significativamente inferior a EE.UU. (15% vs. 8%), y no existe un esfuerzo por parte de la industria para fortalecer la I+D+i. Por lo que se recomienda la inversión para el desarrollo de propuestas propias en Smart Grid adecuadas a la región siguiendo los estándares de calidad propuestos internacionalmente.

Ampliar la investigación de la energía solar en cálculos con radiación ultravioleta debido a los últimos avances en la construcción de paneles para esta tecnología. Significando para la región de Nariño una alta generación debido a sus índices de radiación especialmente en Cumbal y Pasto.

Tratar de incorporar en el mercado energético la respuesta a la demanda y crear mercados flexibles, existiendo no solo un precio fijo para la compra de electricidad sino que este se adecue al consumo que se presente hora a hora. De esta forma se incorpora un uso eficiente de la energía al moderarse su uso por parte de los consumidores cuando los precios de la electricidad sean costosos. Al aplicarse se reduce el consumo de energía, la factura, se ayuda al medio ambiente y se evitaría apagones y daños causados por sobrecargas, reduciendo el costo de mantenimiento y hasta evitando la reposición de los mismos.

BIBLIOGRAFIA

A. Castro, Manuales de energía Renovables: Mini centrales hidroeléctricas, Instituto Para La Diversificación Y Ahorro De La Energía, Madrid 2006.

A. Vojdani, "Integration challenges of the smart grid— Enterprise integration of DR and meter data," in Proc. IEEE Electrical Power System Conf. (EPEC'08), Vancouver, Canada, Oct. 2008, p. 21.

Ahmed M.A. Haidar, Ibrahim A. Ahmed, Norazila Jaalam, An Intelligent Approach for Cost Minimization of Power Generation, International Journal of Soft Computing, 2010, Vol. 5, Page No.: 52-55.

AL Dimeas and ND Hatziargyriou. Operation of a multiagent system for microgrid control. *IEEE Transactions on Power Systems*, 20(3):1447-1455, 2005.

Alonso, F. R. (1993). Sistemas Geotérmicos de Roca Seca y Caliente: una Fuente de

Atlas de Radiación Solar de Colombia, INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIO AMBIENTALES. 2005.

Atlas de Radiación Solar de Colombia. Ministerio de Minas y Energía, UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA. 2005.

C. Duque, E. Marmolejo y M. Rueda de Torres, Análisis De Prospectiva De La Generación Distribuida (GD) En El Sector Eléctrico Colombiano, Universidad de los Andes, 2010.

C. J. Taquez Molina, Evaluación Del Potencial De Producción De Biogás A Partir De Residuos Animales En La Granja Experimental Obonuco Municipio De Pasto, Tesis Pregrado, Universidad Mariana, 2010.

CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA ELECTRICO COLOMBIANO, Gerencia Centro Nacional de Despacho, Seminario Introducción a la Operación del SIN y a la Administración del Mercado, 2009, XM.com.co

D. Miranda Perez, Estado y Desarrollo de la Tecnología Smart Grid en Colombia, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Mecánica y Control, Ingeniería Eléctrica, 2008.

D. Oñate Arresti, Diseño de una instalación solar fotovoltaica, Junio 2006.

Dorigo, M. and T. Stützle, The Ant Colony Optimization Metaheuristic: Algorithms, Applications and Advances, in *Metaheuristics Handbook. International Series in Operations Research and Management Science*, Kluwer Academic Publishers, 2001.

Energía de la biomasa, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. España 2009.

Estudio De Pre-Factibilidad Para La Recuperacion De Biogas Y Produccion De Energia Relleno Sanitario Queretaro, Mexico, 2009.

Expertos en mercado. Características Del Sistema Eléctrico Colombiano, Gerencia Centro Nacional de Despacho, Seminario Introducción a la Operación del SIN y a la Administración del Mercado, 2009. Colombia.

F. A. Mohamed, microgrid Modelling And Online Management, Ph D Thesis, Helsinki University of Technology Control Engineering, Enero 2008.

Formulación de un programa básico de normalización para aplicaciones de energías alternativas y difusión. Utilización de la Energía Geotérmica documento descriptivo, UPME, versión 00, Bogotá, D.C., Marzo de 2003.

G. Cosme Núñez, Sistemas Fotovoltaicos Interconectados a la Red Eléctrica, Universidad Interamericana, Nov. 1 de 2007.

H. Farhangi, "The Path Of Smart Grid", *IEEE Power Energy Mag*, Enero 2010.

H. Saadat, *Power System Analysis*, McGraw Hill: 1999. p. 267-313.

IEC 60870-5-104 Telecontrol equipment and systems – Part 5-104: Transmission protocols – Network access for IEC 60870-5-101 using standard transport profiles, 2006.

IEC 61850, *Communication Networks and Systems in Substations*.

IEEE 1547_3, *Guide for Monitoring, Information Exchange, and Control of Distributed Resources Interconnected with Electric Power Systems*, 2007.

Interconexión Eléctrica S.A. (ISA). Transporte de energía eléctrica en Colombia. Módulo 3, Características de la transmisión.

J, M Arvizu, J, F, Huacuz, "Biogás de rellenos sanitarios para producción de electricidad", 2009

J. A. Sánchez Wevar, *Análisis y Estudio de Redes GPRS*, Valdivia 2005.

J. B. Park, K. S. Lee, J. R. Shin, and K. Y. Lee, A particle swarm optimization for economic dispatch with nonsmooth cost functions, *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 20, No. 1, pp. 34-42, Feb. 2005.

J. C Carmona, D. M Bolívar, L. A Giraldo. El gas metano en la producción ganadera y alternativas para medir sus emisiones y aminorar su impacto a nivel ambiental y productivo (en línea). *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias* 18(1): 49-63. Tomado de <http://kogi.udea.edu.co/revista/18/18-1-6.pdf>.

J. Hughes Revenue Metering Standards. Implementation: American National Standards Institute (ANSI) C1. Communications Implementation and Testbed Development Fostering Interoperability between Products that Implement Open Standards for Metering Systems. Final Report, December 2004.

J. Kennedy and R. Eberhart, Particle swarm optimization, in *Proc. IEEE Int. Conf. Neural Netw.*, vol. 4, Nov. 1995, pp. 1942–1948.

J. Park, Y. Jeong, H. Kim J. Shin, An Improved Particle Swarm Optimization for Economic Dispatch with Valve-Point Effect, *International Journal of Innovations in Energy Systems and Power*, Vol. 1, no. 1 (November 2006).

J. Rico, Manuales de energía Renovables: Energía de la Biomasa, Instituto Para La Diversificación Y Ahorro De La Energía, Madrid 2006

K. Mahadevan, P. S. Kannan, S. Kannan. Particle Swarm Optimization for Economic Dispatch of Generating Units with Valve-Point Loading. *Journal of Energy & Environment*. pag. 49 – 61, May. 2005.

K. Y. Lee and M. A. El-Sharkawi (Editors), Modern Heuristic Optimization Techniques with Applications to Power Systems, *IEEE Power Engineering Society* (02TP160), 2002.

L. D. RAMÍREZ RODRÍGUEZ, Generación De Energía Eléctrica A Partir De Biogás, Universidad De Costa Rica, Tesis de Maestría en Ingeniería Eléctrica, Costa Rica, 2007.

M. T. Miranda García-Cuevas, Componentes de una instalación solar fotovoltaica, Universidad de Extremadura. España 2006.

Manual de Energías renovables. Energía eólica. IDA y ministerio de minas y comercio. España. Clemente Alvares. Madrid 2006.

Mayas Porras Ignacio. PLC (Power Line Communication), Redes de Datos y Servicios Multimedia Domésticos., Mayo de 2004.

Ministerio de Comercio, Industria y Turismo, Sector Energía Eléctrica, Bienes y Servicios Conexos, Bogotá, Mayo 15 de 2009.

Ministerio de Minas y Energía. Atlas de Viento y Energía Eólica. UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA U P M E. IDEAM, CENICAFE, CAR, SENAMI y MRI.

P. Daigle, La Tecnología Moderna se da cita con los Medidores de Energía, Analog Divices Publications, Product Marketing And Publisity, Wilmington, Massachusetts,2001

R. Bustamante Miller, C. Viteri Mera, Modelo De Simulación De Una Red HSDPA en NS-2., Abril 2010

R. C. Eberhart and Y. Shi, Comparing Inertia Weights And Constriction Factors In Particle Swarm Optimization, in *Proc. Congr. Evol. Comput.*, 2000, pp. 84–88.
R. Gerwen, S. Jaarsma, R. Wilhite, Smart Metering, Distributed Generation Magazine, KEMA,2006.

R. Hassan, B. Cohanin, O. de Weck, A Copmarison Of Particle Swarm Optimization And The Genetic Algorithm, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 02139

R. L. Guillermo, Y. Nuñez, A. Jimenez. Estudio y evaluación del recurso eólico en Colombia para su aprovechamiento como fuente de energía eléctrica. 2007. Colombia

S. Chakraborty and M.G. Simoes, PV-microgrid operational cost minimization by neural forecasting and heuristic optimization, *IEEE Industry Applications Conference* , October 2008.

S. Y. Lim, M. Montakhab, H. Nouri, Economic Dispatch of Power System Using Particle Swarm Optimization with Constriction Factor, Bristol Institute of Technology, University of The West of England, Bristol, 2009.

S.M González, Producción Y Recuperación Del Biogás En Vertederos Controlados De Residuos Sólidos Urbanos: Análisis De Variables Y Modelización, Tesis Doctoral, Departamento De Ingeniería Química Y Tecnología Del Medio Ambiente, Universidad de Guijón, España, 2008.

Sistemas de Automatización de Subestaciones con IEDS IEC 61850: Comunicaciones, Topologías. R. Vignoni, R. Pellizzoni, L.Funes. Facultad de Ingeniería-UNLP, Transener S.A./Transba S.A. Argentina, Mayo de 2009.

Testing and Exploring Vulnerabilities of the Applications Implementing IEC 60870-5-104 Protocol. Zi Bin, Cheah. Master Thesis. Stockholm, Sweden 2008.

Unidad de planeación Minero-Energética, costos indicativos de generación eléctrica en Colombia

V. Ludwig, Manual del Usuario: Modelo Colombiano de Biogás, Landfill Methane Outreach Program, Agencia para la Protección del Ambiente (U.S. EPA), Washington, D.C., 2009.

Walsh, J.; Roos, C.; Smith, M.; Harper, S.; Wilkins, A. 1988. Handbook on biogas utilization. USA. Environment, Health and Safety division Georgia Tech Research Institute. 133 p.

William F. Hagy and Chris Humes Sistemas Eólicos Pequeños para Generación de Electricidad. Una guía para consumidores en los EE.UU. Departamento de Energía, EE.UU. Energía Eficiencia y Energía Renovable.

ANEXOS

Anexo A. SUBESTACIONES DE CEDENAR EN NARIÑO

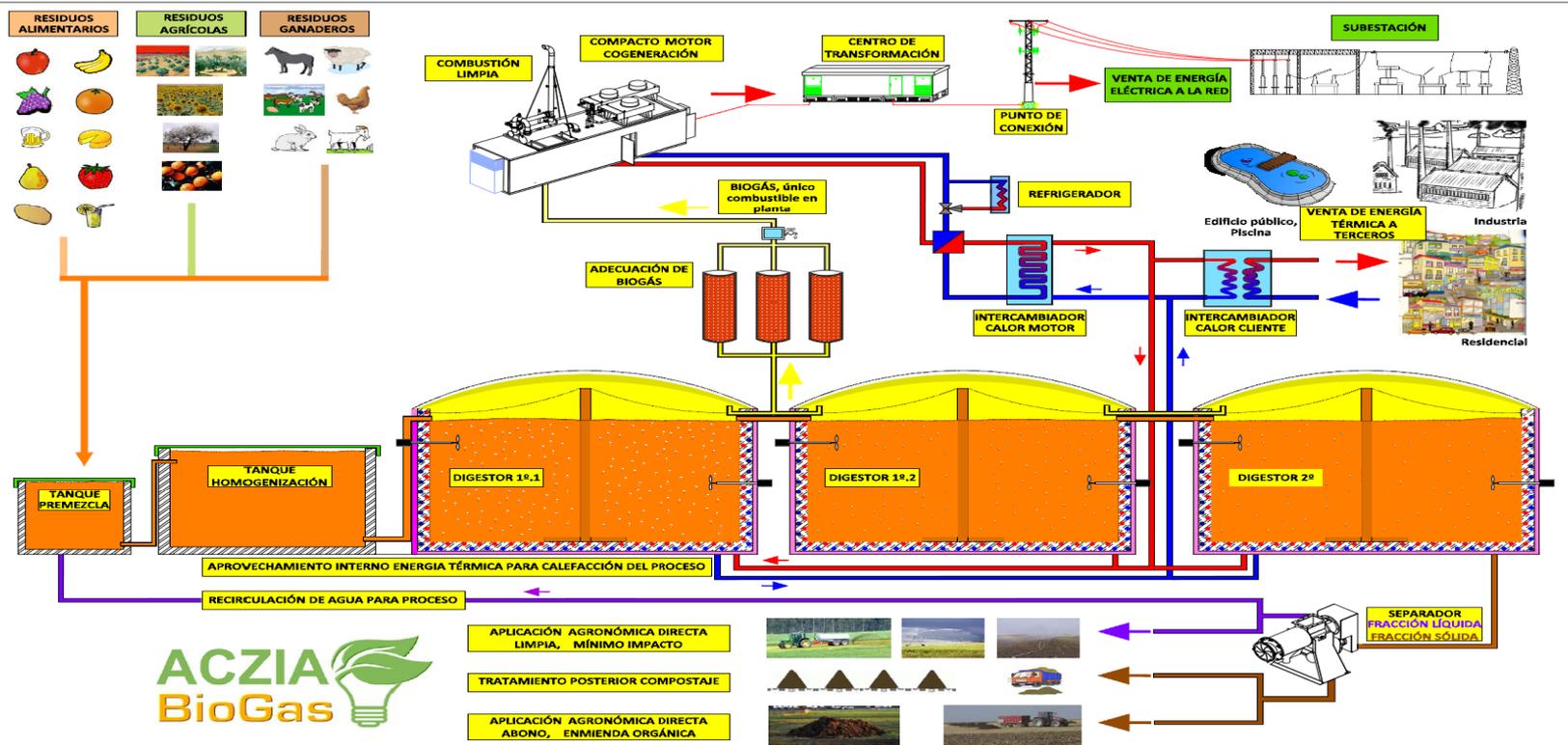
<i>SUBESTACIONES NIVEL 4 – 115kV</i>	<i>SUBESTACIONES RURALES NIVEL 3 - 34.5 kV</i>				
	ZONA PACIFICO	ZONA NORTE	ZONA SUR	ZONA CENTRO	ZONA OCCIDENTE
Sub. Pasto	Sub. Piedrancha	Sub. Taminango	Sub. Imues	Sub. Tangua	Sub. Sandoná
Sub. Jamondino	Sub. Ricaurte	Sub. Policarpa	Sub. Sapuyes	Sub. El Encano	Sub. Ancuya
Sub. Catambuco	Sub. Altaquer	Sub. San José	Sub. Tuquerres	Sub. Río Bobo	Sub. Samaniego
Sub. Panamericana	Sub. Llorente	Sub. La Unión	Sub. Pupiales	Sub. Julio Bravo	Sub. El Tambo
Sub. Río Mayo	Sub. Tangareal	Sub. La Cruz	Sub. Casafría		Sub. Nariño
Sub. Junín	Sub. Barbacoas	Sub. Chachagüi	Sub. Córdoba		
Sub. Buchely	Sub. Tumaco	Sub. Remolino	Sub. Cumbal		

Anexo C. TABLA PROVISTA POR BIONERSIS, DATOS DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

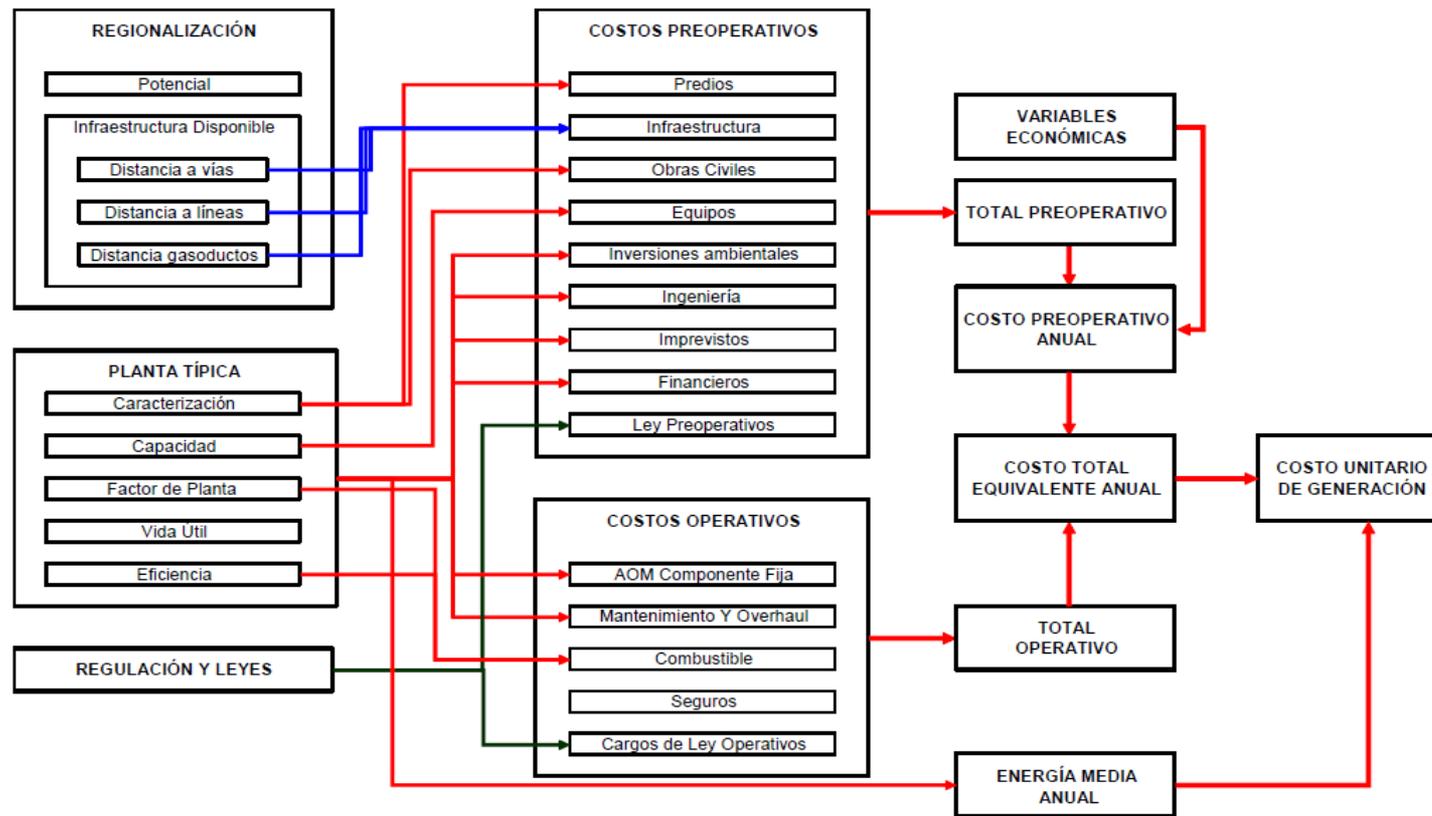
PROYECCION GENERACION DE BIOGAS									
MES	HORAS DE FUNCIONAMIENTO	DISPONIBILIDAD (%)	CHAFONEDOC (%)	FLUO PROMEDIO ECUADO (m³/h)	VOLUMENICA (Nm³)	FLUO PROMEDIO POTENCIAL (m³/h)	CAPACIDAD INSTALADA m³/h	PROGRAMADO/EJECUTADO/POTENCIAL	PROGRAMADO/EJECUTADO/INSTALADA
NOVIEMBRE(3-3)	754	937	5,15	47,5	33708,62	78	50	6%	9%
DIEMBRE	702	92	54	44	32127,59	78	50	9%	9%
ENERO	705	922	5,63	40,9	31189,75	88	50	98%	98%
FEBRO	69	925	4,82	42,7	32504,5	88	50	98%	98%
MARZO	735	957	4,05	41,7	38589,06	88	50	92%	92%
ABRIL	937	10	5,74	49,2	38881,5	88	50	98%	98%
MAYO	754	985	5,66	51,2	38619,7	88	50	10%	10%
VOLUMENICA (Nm³)	44417	62,76	3,704	330,73	239044,80	591600	35000	99%	99%

Anexo D. PLANTA DE BIOGÁS ILUSTRATIVA ACZIA BIOGAS

PLANTA DE BIOGÁS AGROINDUSTRIAL PARA LA VALORIZACIÓN DE SUBPRODUCTOS AGROALIMENTARIOS Y GANADEROS



Anexo E. TABLA DE COSTOS REQUERIDOS PARA EL ANÁLISIS DE LA FACTIBILIDAD ECONÓMICA



Anexo F. HOJA DE ALIMENTACIÓN DE DATOS, CON RESPECTO A LOS DATOS PROVISTOS POR EMAS S.A. PASTO

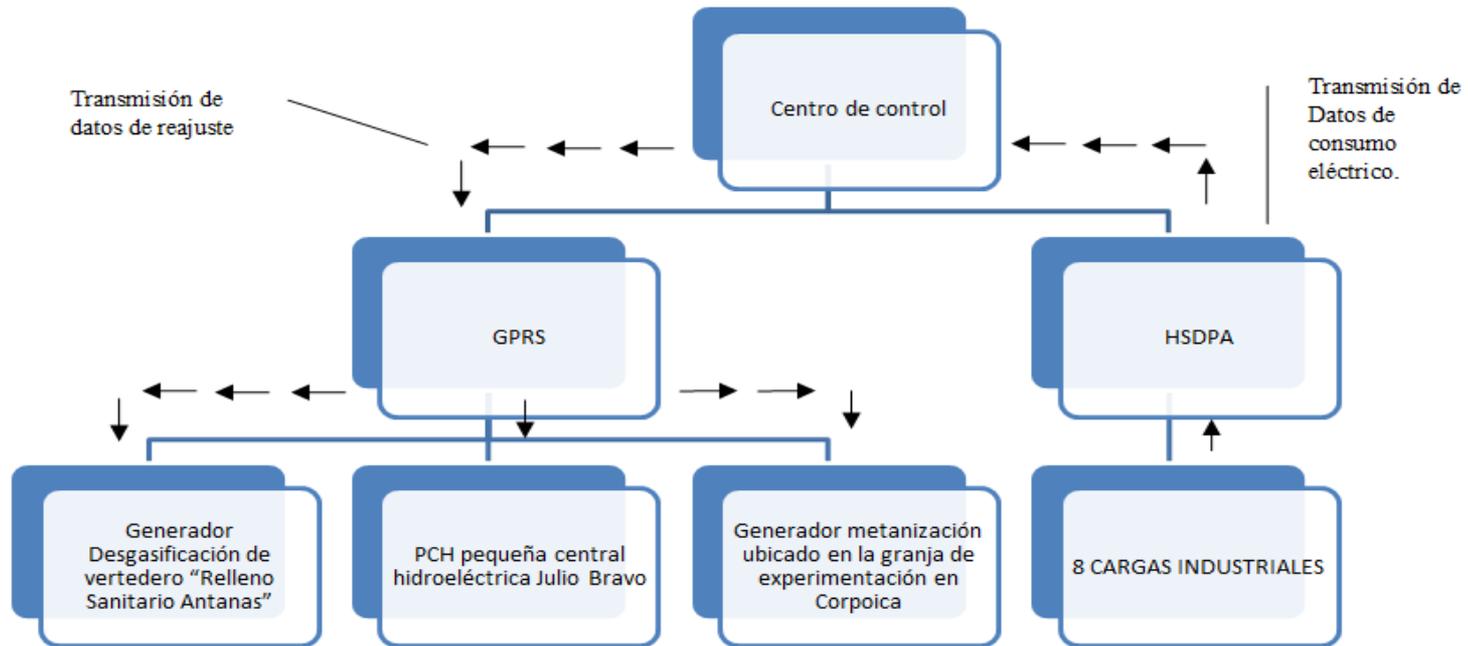
		Modelo Colombiano de Biogás de Rellenos Sanitarios v.1 Fecha: Septiembre 2010 Desarrollado por SCS Engineers, para la Agencia de Protección al Ambiente de los EE.UU.											
PROYECCIONES DE GENERACIÓN Y RECUPERACIÓN DE BIOGÁS DE RELLENOS SANITARIOS ANTANAS PASTO, Nariño, Colombia													
Año	Disposición (Mg/yr)	Disposición Acumulada (Mg)	Generación de Biogás			Eficiencia del Sistema de Captura (%)	Recuperación de Biogás Estimada			Capacidad Máxima de la Planta de Electricidad* (MW)	Línea Base del Flujo de Biogás (m3/hr)	Reducción de Emisión Estimadas**	
			(m ³ /hr)	(cfm)	(mmBtu/hr)		(m ³ /hr)	(cfm)	(mmBtu/hr)			(tonnes CH ₄ /yr)	(tonnes CO ₂ eq/yr)
2001	23,460	23,460	0	0	0.0	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
2002	26,980	50,440	66	39	1.2	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
2003	31,030	81,470	125	74	2.2	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
2004	35,680	117,150	181	107	3.2	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
2005	41,030	158,180	236	139	4.2	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
2006	47,180	205,360	293	173	5.2	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
2007	54,260	259,620	354	208	6.3	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
2008	62,400	322,020	421	248	7.5	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
2009	71,760	393,780	495	291	8.8	93%	460	271	8.2	0.8	0	1,442	30,292
2010	88,508	482,288	578	340	10.3	93%	537	316	9.6	0.9	0	1,685	35,379
2011	101,780	584,068	689	405	12.3	93%	640	377	11.4	1.1	0	2,008	42,175
2012	117,050	701,118	811	477	14.5	93%	754	444	13.5	1.2	0	2,365	49,655
2013	134,610	835,728	947	558	16.9	93%	881	518	15.7	1.5	0	2,763	58,013
2014	154,800	990,528	1,101	648	19.7	93%	1,024	603	18.3	1.7	0	3,212	67,445
2015	178,020	1,168,548	1,276	751	22.8	93%	1,187	699	21.2	2.0	0	3,722	78,157
2016	204,720	1,373,268	1,476	868	26.4	93%	1,372	808	24.5	2.3	0	4,304	90,375
2017	235,430	1,608,698	1,704	1,003	30.4	93%	1,584	933	28.3	2.6	0	4,969	104,349
2018	270,740	1,879,438	1,965	1,157	35.1	93%	1,828	1,076	32.7	3.0	0	5,731	120,360
2019	311,250	2,190,788	2,285	1,333	40.5	93%	2,106	1,240	37.6	3.5	0	6,606	138,725
2020	358,050	2,548,838	2,609	1,536	46.6	93%	2,427	1,428	43.4	4.0	0	7,610	159,809
2021	411,760	2,960,598	3,005	1,768	53.7	93%	2,794	1,645	49.9	4.6	0	8,763	184,026
2022	473,520	3,434,118	3,459	2,036	61.8	93%	3,217	1,893	57.5	5.3	0	10,088	211,852
2023	544,550	3,978,668	3,981	2,343	71.1	93%	3,702	2,179	66.2	6.1	0	11,611	243,831
2024	626,230	4,604,898	4,581	2,696	81.9	93%	4,261	2,508	76.1	7.0	0	13,361	280,590
2025	720,160	5,325,058	5,271	3,103	94.2	93%	4,902	2,885	87.6	8.1	0	15,374	322,848
2026	828,180	6,153,238	6,064	3,569	108.4	93%	5,640	3,320	100.8	9.3	0	17,687	371,432
2027	952,410	7,105,648	6,976	4,106	124.7	93%	6,488	3,819	115.9	10.7	0	20,347	427,291
2028	1,095,270	8,200,918	8,025	4,723	143.4	93%	7,463	4,393	133.4	12.3	0	23,406	491,520
2029	1,259,560	9,460,478	9,231	5,433	165.0	93%	8,585	5,053	153.4	14.2	0	26,923	565,375
2030	1,448,490	10,908,968	10,618	6,249	189.7	93%	9,874	5,812	176.4	16.3	0	30,967	650,299

PARAMETROS del MODELO					NOTAS				
Contenido de Metano en el Biogás: 50%					* La capacidad máxima de la planta de electricidad asume que el índice de calor bruto es de 10,800 Btus por kW-hr (nhv).				
Factor de Corrección de Metano (MCF): 1.0									
Categoría de Residuos:	Degradación Rápida	Degradación Moderadamente Rápida	Degradación Moderadamente Lenta	Degradación Lenta	**Reducción de emisiones no toman en cuenta la generación de electricidad o las emisiones del proyecto. La reducción de emisiones es calculada usando una densidad de metano de 0.0007168 Mg/m ³ a temperatura estándar.				
Índice de generación de CH ₄ (K):	0,260	0,120	0,048	0,024					
Potencial de generación de CH ₄ (Lo) (m ³ /Mg):	70	103	161	200					

Anexo G. COSTOS A PAGAR POR CEDENAR S.A. E.S.P. POR EL USO DEL CAUDAL DE RIO PASTO PARA LA PEQUEÑA CENTRAL HIDROELÉCTRICA JULIO BRAVO

ENERGÍA (MW/H)	KWh	POTENCIA (KW)	CAUDAL (M3/s)	CAUDAL (LPS)	TUA (\$)	VOLUMEN (M3/MES)	Fop	VALOR A PAGAR (\$)	VALOR HORA
622,263	836,375	836,375	0,65397998	653,979983	1,15	1751619,99	0,1	201436,298	270,747713
698,889	939,367	1040,013393	0,81320931	813,209315	1,15	1967315,97	0,1	226241,337	336,668656
766,322	1030,003	1030,002688	0,80538173	805,381725	1,15	2157134,41	0,1	248070,457	333,428034
865,939	1163,897	1202,693056	0,94041212	940,412116	1,15	2437548,21	0,1	280318,044	389,330616
862,549	1159,340	1159,340054	0,90651345	906,513452	1,15	2428005,63	0,1	279220,647	375,296569
829,445	1114,845	1152,006944	0,90077953	900,779533	1,15	2334820,55	0,1	268504,363	372,922727
757,579	1018,251	1018,251344	0,79619309	796,193091	1,15	2132523,57	0,1	245240,211	329,62394
881,019	1184,165	1184,165323	0,92592487	925,924875	1,15	2479997,19	0,1	285199,676	383,332898
796,199	1070,160	1105,831944	0,86467429	864,674286	1,15	2241235,75	0,1	257742,111	357,975154
846,510	1137,782	1137,782258	0,88965694	889,656938	1,15	2382857,14	0,1	274028,571	368,317972
645,261	867,286	896,1958333	0,70075521	700,755206	1,15	1816357,49	0,1	208881,112	290,112655
486,603	654,036	654,0362903	0,51140534	511,405341	1,15	1369748,06	0,1	157521,027	211,721811

Anexo H. ESTRUCTURA PROPUESTA DE MEDIOS DE COMUNICACIÓN Y FLUJO DE INFORMACIÓN EN LA MICROGRID PASTO.



Anexo I. EJEMPLO DE UNA LECTURA AUTOMÁTICA, MÍNIMOS Y MÁXIMOS BENEFICIOS CON EL MEDIDOR INTELIGENTE O SMART METER

