

**PROPUESTA TÉCNICA Y FINANCIERA PARA LA CREACIÓN DE UNA  
MICROCENTRAL DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR  
DE GAS NATURAL**



**TRABAJO DE GRADO**

**LAURA JULIETH BOLAÑOS FERNÁNDEZ  
YOANA ANDREA VARGAS MOSQUERA**

**PhD. CARLOS FELIPE RENGIFO RODAS**

*Universidad del Cauca*  
**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones  
Departamento de Electrónica Instrumentación y Control**

**POPAYÁN  
2015**

**PROPUESTA TÉCNICA Y FINANCIERA PARA LA CREACIÓN DE UNA  
MICROCENTRAL DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR  
DE GAS NATURAL**



ANEXOS

**LAURA JULIETH BOLAÑOS FERNÁNDEZ  
YOANA ANDREA VARGAS MOSQUERA**

PhD. CARLOS FELIPE RENGIFO RODAS

*Universidad del Cauca*  
**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones  
Departamento de Electrónica Instrumentación y Control**

POPAYÁN  
2015

# Agradecimientos

Las autoras expresan sus agradecimientos:

A nuestros padres y familiares por su cariño, apoyo y alegría constante, que nos dan la fortaleza para seguir adelante en la consecución de nuestras metas.

A el Ingeniero Carlos Felipe Rengifo, director de este trabajo de grado, por su constante dedicación, orientación, enseñanza y apoyo.

A los Ingenieros José Hildebrando Castro y Luis Ángel Patiño, por sus valiosas orientaciones y enseñanzas. A nuestros amigos que con su compañía y apoyo han contribuido y acompañado nuestra etapa universitaria.

# Tabla de Contenido

Lista de figuras	V
Lista de tablas	V
Lista de acrónimos	IX
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción . . . . .	1
1.2. Objetivos . . . . .	2
1.2.1. Objetivo General . . . . .	2
1.2.2. Objetivos Específicos . . . . .	2
<b>2. Mapeo sistemático</b>	<b>3</b>
2.1. Introducción . . . . .	3
2.2. Proceso de mapeo sistemático . . . . .	3
2.2.1. Definición de la pregunta de investigación . . . . .	3
2.2.2. Ejecución de la búsqueda . . . . .	4
2.2.3. Análisis de documentos . . . . .	5
2.2.4. Palabras clave . . . . .	12
2.2.5. Extracción de datos . . . . .	13
2.3. Análisis comparativo y discusión . . . . .	14
2.4. Resumen mapeo sistemático . . . . .	15
<b>3. Generación de energía eléctrica</b>	<b>16</b>
3.1. Introducción . . . . .	16
3.2. Energía eléctrica . . . . .	16
3.3. Energías renovables . . . . .	17
3.3.1. Generación hidráulica . . . . .	17
3.3.2. Generación solar . . . . .	18
3.3.3. Generación eólica . . . . .	18
3.3.4. Generación geotérmica . . . . .	18
3.3.5. Generación mareomotriz . . . . .	18
3.4. Energías no renovables . . . . .	19
3.4.1. Generación nuclear . . . . .	19
3.4.2. Generación térmica . . . . .	19
3.5. Energía eléctrica a partir de gas natural . . . . .	20

3.5.1.	Motores de combustión interna a gas . . . . .	20
3.5.2.	Turbinas a gas . . . . .	21
3.6.	Elementos adicionales . . . . .	26
3.6.1.	Transformadores . . . . .	26
3.6.2.	Protecciones . . . . .	29
3.6.3.	Tablero de protección . . . . .	31
3.7.	Resumen generación de energía eléctrica . . . . .	31
<b>4.</b>	<b>Marco Regulatorio</b>	<b>32</b>
4.1.	Reglamentación para la conexión a un sistema de distribució . . . . .	32
4.1.1.	Resolución 070 de 1998 (CREG) . . . . .	32
4.1.2.	Resolución 106 de 2006 (CREG) . . . . .	37
4.2.	Reglamentación ambiental . . . . .	37
4.2.1.	Sistema de gestión ambiental NTC ISO 14001 . . . . .	37
4.2.2.	Contaminación auditiva . . . . .	38
4.2.3.	Protocolo de Kioto (Ministerio del Medio Ambiente) . . . . .	40
4.3.	Cargo por confiabilidad . . . . .	41
4.3.1.	Relación del cargo por confiabilidad con la viabilidad del proyecto . . . . .	41
4.4.	Resumen marco Regulatorio . . . . .	42
<b>5.</b>	<b>Microcentral de energía eléctrica a partir de gas natural</b>	<b>43</b>
5.1.	Criterios de inclusión . . . . .	44
5.1.1.	Microcentral con motores de combustión interna . . . . .	44
5.1.2.	Microcentral con microturbinas . . . . .	45
5.2.	Criterios de exclusión . . . . .	45
5.2.1.	Microcentral con motores de combustión interna . . . . .	45
5.2.2.	Microcentral con microturbinas . . . . .	48
5.2.3.	Combinaciones . . . . .	49
5.3.	Propuesta técnica para la microcentral . . . . .	52
5.4.	Resumen microcentral de energía eléctrica a partir de gas natural . . . . .	54
<b>6.</b>	<b>Estudio financiero</b>	<b>55</b>
6.1.	Análisis de costos de producción para la generación de energía eléctrica . . . . .	60
6.1.1.	Costo (kWh) generado por la microturbina C200 . . . . .	61
6.1.2.	Consumo de gas m <sup>3</sup> de la microturbina Capstone C200 . . . . .	61
6.1.3.	Comparación de costos . . . . .	62
6.1.4.	Resumen estudio financiero . . . . .	64
<b>7.</b>	<b>Conclusiones y trabajos futuros</b>	<b>65</b>
7.1.	Conclusiones . . . . .	65
7.2.	Trabajos Futuros . . . . .	66
<b>A.</b>	<b>Anexo I: Definiciones marco regulatorio</b>	<b>72</b>
<b>B.</b>	<b>Anexo II: Características técnicas de equipos</b>	<b>74</b>
B.1.	Motor de combustión interna caterpillar G3306 . . . . .	74
B.2.	Motor de combustión interna caterpillar G3406 . . . . .	75

B.3. Transformador trifásico 15(kV)[150 (kVA)] . . . . .	75
B.4. Transformador trifásico 15(kV)[112.5 (kVA)] . . . . .	76
B.5. Transformador trifásico 15(kV)[225 (kVA)] . . . . .	77
B.6. Contador multifuncional alfa 1800 . . . . .	77
B.7. Contador polifásico alfa 2 . . . . .	78
B.8. Contador de energía activa y reactiva EPQS . . . . .	78
B.9. Microturbinas Capstone C200 . . . . .	79
B.10. Transformador trifásico 15(kV)[250 (kVA)] . . . . .	80
B.11. Microturbina Turbec EA-T100(P) . . . . .	81
<b>C. Anexo II: Cromatografía del gas natural</b>	<b>83</b>
<b>D. Anexo III: Cotización del gas natural</b>	<b>84</b>
<b>E. Anexo IV: Cotización de la microturbina capstone C200</b>	<b>85</b>
<b>F. Anexo V: Cotización de transformador, protecciones y tablero</b>	<b>86</b>

# Lista de Figuras

2.1. Proceso de mapeo sistemático. . . . .	4
2.2. Esquema de Clasificación. . . . .	13
2.3. Diagrama de Burbujas. . . . .	14
2.4. Diagrama de Venn . . . . .	15
3.1. Energías Renovables. . . . .	17
3.2. Motores de ignición por chispa . . . . .	22
3.3. Ciclo simple . . . . .	22
3.4. Ciclo Stig . . . . .	23
3.5. Ciclo Combinado . . . . .	24
3.6. Componentes básicos de la microturbina. . . . .	24
3.7. Microturbina de un solo eje . . . . .	26
3.8. Microturbina de dos ejes . . . . .	27
3.9. Principio de funcionamiento de un transformador . . . . .	27
5.1. Disposición final de equipos . . . . .	53
6.1. Eficiencia vs temperatura ambiente . . . . .	60
6.2. Potencia vs temperatura ambiente. . . . .	61

# Lista de Tablas

2.1. Resultado de la búsqueda y documentos relevantes. . . . .	6
2.2. Artículos Seleccionados. . . . .	7
3.1. Comparación de las Tecnologías en Colombia . . . . .	20
4.1. Nivel de ruido maximo nacional . . . . .	39
4.2. Nivel de ruido maximo internacional . . . . .	40
5.1. Tipos de tecnologías de generación de energia electrica con Gas Natural . . . . .	44
5.2. Características técnicas . . . . .	46
5.3. Características técnicas . . . . .	46
5.4. Características generales del trifásico serie 15(kV) . . . . .	47
5.5. Características generales del trifásico serie 15(kV) . . . . .	47
5.6. Características generales del trifásico serie 15(kV) . . . . .	47
5.7. Características técnicas contador multifuncional . . . . .	47
5.8. Características técnicas contador multifuncional . . . . .	48
5.9. Características técnicas del contador de energía eléctrica trifásico EPQS . . . . .	48
5.10. Características técnicas . . . . .	49
5.11. Características de generales de la microturbina Turbec-T100(P) . . . . .	49
6.1. Lugar de emplazamiento . . . . .	55
6.2. Materiales para la construcción de la planta física . . . . .	56
6.3. Valor del precio del gas por m <sup>3</sup> . . . . .	56
6.4. Valor de la acometida del gas natural . . . . .	56
6.5. Valor de la microturbina Capstone C200 . . . . .	57
6.6. Generador-tablero de protecciones . . . . .	57
6.7. Tablero de protecciones . . . . .	57
6.8. Tablero de protecciones - Transformador . . . . .	57
6.9. Estructura Transformador . . . . .	58
6.10. Transformador trifásico serie 15(KV) fabricados por ABB . . . . .	58
6.11. Protecciones pararrayo y fusible . . . . .	58
6.12. Contador multifuncional . . . . .	58
6.13. Inversión microcentral Zona Norte . . . . .	59
6.14. Inversión microcentral zona Sur . . . . .	59
6.15. Valor de generación de energía eléctrica . . . . .	63
B.1. Características técnicas . . . . .	74



B.2. Especificaciones del motor . . . . .	74
B.3. Dimensiones del motor . . . . .	74
B.4. Especificaciones del motor . . . . .	75
B.5. Dimensiones del motor . . . . .	75
B.6. Características Generales del Trifásico serie 15(kV) . . . . .	75
B.7. Características Generales del Trifásico serie 15(kV) . . . . .	76
B.8. Características Generales del Trifásico serie 15(kV) . . . . .	77
B.9. Características técnicas contador multifuncional . . . . .	77
B.10. Características técnicas contador multifuncional . . . . .	78
B.11. Características técnicas contador multifuncional . . . . .	78
B.12. Rendimiento eléctrico . . . . .	79
B.13. Características del combustible . . . . .	79
B.14. Características de escape . . . . .	79
B.15. Nivel de sonido . . . . .	80
B.16. Dimensiones de la microturbina Capstone C200 . . . . .	80
B.17. Características Generales del Trifásico serie 15(kV) . . . . .	80
B.18. Características de generales de la microturbina Turbec-T100(P) . . . . .	81
B.19. Dimensiones de la microturbina Turbec-T100(P) . . . . .	81
B.20. Características de la microturbina Turbec-T100(P) . . . . .	81
B.21. Datos eléctricos de la microturbina Turbec-T100(P) . . . . .	81
B.22. Requisitos de combustible . . . . .	81

# Listas de Acrónimos

<b>A</b>	Amperios.
<b>ASIC</b>	Circuito Integrado para Aplicaciones Específicas.
<b>ASME</b>	Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos ( <i>American Society of Mechanical Engineers</i> ).
<b>BTU</b>	Unidad Térmica Británica ( <i>British Thermal Unit</i> ).
<b>CH4</b>	Metano.
<b>CI</b>	Encendido por Compresión( <i>Compression Ignition</i> ).
<b>CND</b>	Centro Nacional de Despacho.
<b>CREG</b>	Comisión de Regulación de Energía y Gas.
<b>CRD</b>	Centro Regional de Despacho.
<b>CT</b>	Transformador de Corriente.
<b>dBa</b>	decibelio A (indicador del riesgo auditivo).
<b>DOAJ</b>	Directorio de Revistas de Acceso Abierto ( <i>Directory of Open Access Journals</i> ).
<b>E</b>	Energía Activa.
<b>FEM</b>	Fuerza Electromotriz.
<b>GC</b>	Generación Centralizada.
<b>GD</b>	Generación Distribuida.
<b>Gm</b>	Generación de Energía Eléctrica.
<b>HCF</b>	Hidrouorocarbonos.
<b>ICMREE</b>	Instituto Chileno de Medicina Reproductiva.
<b>ICSSSM</b>	Conferencia Internacional sobre Sistemas de Servicios y Gestión de Servicios ( <i>International Conference on Service Systems and Service Management</i> ).
<b>IEEE</b>	Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica ( <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> ).
<b>Hz</b>	Hertzio.
<b>Kg</b>	kilogramo.
<b>kWh</b>	Kilovatio Hora.
<b>kPa</b>	Kilo pascals.
<b>kVA</b>	kilovoltiamperio.
<b>kW</b>	Kilovatio.
<b>m<sup>3</sup></b>	Metro Cúbico.
<b>MJ</b>	Megajulio.
<b>mm</b>	Milímetro.
<b>MW</b>	Megavatio.
<b>NESC</b>	Código Nacional de Seguridad Eléctrica ( <i>National Electric Safety Code</i> ).
<b>NTC</b>	Norma Técnica Colombiana.
<b>OR</b>	Operador de Red.
<b>PC</b>	Pie cúbico.
<b>PFC</b>	Peruorocarbonos.
<b>psig</b>	Libras por pulgadas cuadradas manometricas ( <i>pounds square inch gauge</i> ).
<b>PPMWD</b>	Partes por millón volumétrico seco ( <i>Parts Per Million Volumetric Dry</i> ).
<b>PT</b>	Transformador de Tensión.
<b>PTC</b>	Coefficiente de Temperatura Positivo ( <i>Positive Temperature Coefficient</i> ).

<b>Redalyc</b>	Red de Revistas Científicas de América Latina y El Caribe, España y Portugal.
<b>RMS</b>	Valor Cuadrático Medio.
<b>RPM</b>	Revoluciones por minuto.
<b>SDL</b>	Sistema de Distribución Local.
<b>SF6</b>	Hexafluoruro de Azufre.
<b>SI</b>	Encendido por Chispa( <i>Spark-Ignited</i> ).
<b>SIN</b>	Sistema Interconectado Nacional.
<b>STR</b>	Sistema de Transmisión Regional.
<b>UPME</b>	Unidad de Planeación Minero Energética.
<b>USD</b>	Dólar Estadounidense.
<b>VAC</b>	Voltaje de Corriente Alterna.
<b>V</b>	Voltio.

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Introducción

En la actualidad un mundo sin electricidad resultaría difícil para el ser humano, debido a que esta, se ha convertido en uno de los servicios públicos más necesarios dentro de su vida cotidiana. La electricidad se emplea en la iluminación tanto de lugares privados como públicos, en el funcionamiento de todos los aparatos electrodomésticos y en la fabricación de la mayor parte de las cosas que se utilizan, ya sea de manera directa o indirecta.

Dada la importancia de este servicio han surgido diferentes formas de generar energía eléctrica como la hidráulica, la térmica, la solar, la eólica, la nuclear entre otras, las cuales utilizan ya sea recursos renovables o no renovables dependiendo del tipo de generación, además para la producción de energía es necesario tener en cuenta la zona geográfica ya que determina que tan abundante es el recurso.

De acuerdo con las estadísticas arrojadas por la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) [1], el proceso de producción de energía eléctrica que ocupa el primer lugar en Colombia es la generación hidráulica, debido a que su fuente de producción es la más abundante. En los últimos años las fuentes hidráulicas se han visto afectada por fenómenos climáticos que han conllevado a la disminución del recurso provocando alzas en los precios del kilovatio hora (kWh), afectando tanto al productor como al consumidor, por tal motivo se busca otro recurso de interés como lo es el gas natural, que de acuerdo a las estadísticas mencionadas anteriormente ocupa el segundo lugar, causa, que conlleva al estudio de procesos de generación de energía eléctrica a partir de gas natural con la finalidad de evaluar la probabilidad de que éste ocupe el primer lugar.

Para hacerle un adecuado seguimiento a este proceso, se realizó un estudio técnico y financiero para la creación de una microcentral de generación de energía eléctrica a partir de gas natural, que contribuye de manera general a la determinación de si es o no posible de que dicha generación ocupe el primer lugar. Para ello el presente trabajo consta de siete capítulos:

El capítulo uno presenta una descripción general del trabajo de grado.

En el segundo capítulo se aplica la técnica de revisión sistemática, la cual es una metodología

que tiene como objetivo identificar y clasificar los trabajos de investigación disponibles de un tema en particular.

En el capítulo tres, se incluye el marco teórico de los procesos de generación de energía donde se encuentran equipos, ciclos termodinámicos y funcionamiento.

En el capítulo cuatro se estudian las normas y leyes que se deben cumplir para la creación de una microcentral de generación de energía eléctrica.

El capítulo cinco contiene los criterios de inclusión y exclusión de la técnica del análisis morfológico aplicada a la microcentral donde se detallan técnicamente los equipos a utilizar.

El capítulo seis describe la inversión inicial para la creación de la microcentral y se evalúa el costo de generación de la misma.

Por ultimo en el capítulo siete se encuentran las deducciones finales del trabajo de grado en general, incluidos los estudios para su posterior análisis.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo General**

Realizar una propuesta técnica y financiera para la creación de una microcentral de generación de energía eléctrica a partir de gas natural.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- 1) Realizar una revisión sistemática del estado del arte sobre generación de energía eléctrica a partir de gas natural utilizando la técnica descrita en el artículo Systematic Mapping Studies in Software Engineering.
- 2) Elaborar la propuesta técnica para la creación de la microcentral con base en los criterios de inclusión y de exclusión de un análisis morfológico.
- 3) Determinar la viabilidad financiera de la microcentral de generación de energía eléctrica a partir de gas natural en el Departamento del Cauca.

# Capítulo 2

## Mapeo sistemático

### 2.1. Introducción

En el campo de la investigación, se analizan problemas o situaciones que tienen como finalidad explorar diferentes alternativas o técnicas que contribuyan de manera significativa a su solución.

La técnica de mapeo sistemático es una de las diferentes alternativas de investigación [2], que a través de la ejecución de una serie de pasos permite profundizar un tema en particular enriqueciendo el conocimiento del investigador. Teniendo en cuenta lo anterior en el presente capítulo se aplica la revisión sistemática de generación de energía eléctrica a partir de gas natural.

### 2.2. Proceso de mapeo sistemático

Es una técnica de estudio que permite construir un esquema de clasificación y obtener una visión general de una área de investigación [2].

En el proceso del mapeo sistemático se realizan una serie de pasos que conllevan a unos resultados. Dichos pasos son: (i) la definición de las preguntas de investigación, (ii) ejecución de la búsqueda, (iii) análisis de documentos, (iv) palabras clave y (v) extracción de datos, por otra parte los resultados de cada paso son respectivamente: (i) el ámbito de revisión, (ii) documentos, (iii) documentos relevantes, (iv) esquema de clasificación y (v) el mapa sistemático como se muestra en la Figura 2.1

A continuación se detallan los pasos del proceso para un mejor entendimiento.

#### 2.2.1. Definición de la pregunta de investigación

Las preguntas de investigación deben ser concretas, claras y precisas, además ayudan al investigador a organizar los estudios, dándole relevancia, dirección, y coherencia durante el



Figura 2.1: Proceso de mapeo sistemático.

curso de la investigación, de igual forma estas señalan el problema al cual el investigador pretende darle respuesta [3].

Para el caso de estudio el mapeo sistemático sobre generación de energía eléctrica a partir de gas natural, consiste en la búsqueda de información sobre la opción más adecuada para elaborar una propuesta técnica y financiera que permita la realización del proyecto planteado. Para ello las preguntas de investigación se formularon tomando como referencia los objetivos planteados en el anteproyecto de grado.

1. **¿ Que documentos contribuyen al entendimiento del proceso de generación de energía eléctrica a partir de gas natural?**  
Esta pregunta permite tener una visión general del proceso en estudio tanto teórica como técnica.
2. **¿ Cuáles son los elementos constitutivos de una microcentral de generación de energía eléctrica a partir de gas natural?**  
Con esta pregunta se pretende identificar cada elemento de una microcentral y la respectiva relación entre equipos.
3. **¿ Es viable financieramente la generación de energía eléctrica a partir de gas natural?**  
Este interrogante permite identificar la viabilidad financiera para la creación de nuevas centrales logrando así, un beneficio para el productor al igual que el consumidor.

Como resultado del paso “ Definición de la pregunta de investigación ”, se obtuvo el ámbito de revisión, el cual centro y enfoco la búsqueda de documentos hacia las temáticas de generación de energía eléctrica a partir de gas natural, elementos constitutivos de una microcentral y/o análisis financiero.

### 2.2.2. Ejecución de la búsqueda

Cuando el tema de investigación está definido, se lleva a cabo la búsqueda de la documentación por medio de diferentes herramientas como bibliotecas digitales, repositorios de información científica, revistas científicas, las cuales por medio de palabras clave limitan la información de la temática a estudiar.

La recopilación de información debe ser exhaustiva y debe contar con una cantidad adecuada de documentos o referencias bibliográficas que generen la posibilidad de seleccionar el

material más importante para efectuar el proceso de investigación.

Para llevar a cabo la búsqueda que abarca el caso de estudio se utilizaron los buscadores de información científica como IEEE Xplore, Google Academic, DOAJ, RedalyC, Dialnet y Science Direct, en los cuales se utilizaron las palabras clave que ayudaron a su búsqueda como: “generación de energía”, “cogeneración”, “electric power and natural gas”, “cogeneration”, “thermoelectric- natural gas”, “natural gas and power electric generation” entre otras. Donde se obtuvieron documentos como artículos científicos, trabajos de grados, tesis doctorales y libros que contenían información acerca de la generación de energía eléctrica a partir de gas natural. De igual forma se tuvieron en cuenta los años de las publicaciones para incluir solo los resultados más recientes ya que la gran mayoría de los documentos encontrados databan de fechas anteriores al año 2000. La selección del periodo temporal de los estudios fue desde el año 2002 hasta el año 2014, sin olvidar que la mayor parte de los documentos encontrados en Google Academic presentaban un número significativo de coincidencias con los demás exploradores.

En la Tabla 2.1 se encuentran el número de documentos obtenidos.

### **2.2.3. Análisis de documentos**

Una vez recopilada la información, se procede a revisar los documentos para posteriormente clasificarlos por conceptos o asuntos concretos y ordenarlos en una secuencia cronológica.

En cuanto a la clasificación de documentos estos sirven como referencia para la base teórica del proyecto, para ello se realiza un análisis individual de cada escrito con el fin de llevar a cabo procesos de inclusión y exclusión, los cuales se usan para determinar los estudios que no son relevantes para responder a las preguntas de investigación planteadas previamente.

Acerca de los criterios de inclusión se toman como referencia todos aquellos trabajos que tratan de generación de energía eléctrica a partir de gas natural, en relación con el caso de estudio, el resumen menciona procesos de generación de energía eléctrica y/o análisis financieros donde el lector es capaz de deducir si el trabajo va a contribuir con el tema de investigación, igualmente las palabras clave como: generación, gas natural, entre otras ayudan a categorizar dichos documentos.

Sobre los criterios de exclusión se descartan los trabajos que no aporten significativamente a la investigación, para ello se realiza un análisis más detallado de los documentos seleccionados, revisando en profundidad el resumen, introducción y las conclusiones, las cuales definen si un estudio puede ser incluido o no en el trabajo final, en ellos se encuentran temas que contengan información acerca de generación de energía eléctrica pero que no están relacionados directamente con la implementación de gas natural durante el proceso, de igual forma muestran contenido que habla de la utilización de gas para el movimiento de motores dejando de lado la producción de energía eléctrica como tema principal de estudio.

En la Tabla 2.1 se presenta, los resultados de la búsqueda completa del número de documentos encontrados en cada buscador, los exploradores Science Direct, IEEE Xplore y Google Academic arrojaron un porcentaje de 39.82 % (1000), 31.85 % (800) y 23.89 % (600) respectivamente, luego se analizaron los documentos que por medio del título abordaban el tema de



manera más específica, se leyeron alrededor de 2500 títulos de los cuales se eligieron 414 estudios, seguidamente se clasificaron los documentos candidatos para la realización del estado del arte del proyecto, donde se escogieron en total 73 artículos que finalmente se redujeron en 35 estudios relevantes.

Una vez clasificados los documentos relevantes se hallaron coincidencias en las diferentes bibliotecas digitales con el buscador Google Academic, en donde fue más sencilla la extracción de la documentación con un total de 26 estudios para el análisis final de la generación de energía eléctrica a partir de gas natural. (Ver Tabla 2.2 )

Tabla 2.1: Resultado de la búsqueda y documentos relevantes.

<b>Buscadores</b>	<b>IEEE Xplore</b>	<b>Google Académico</b>	<b>DOAJ</b>	<b>RedalyC</b>	<b>Dialnet</b>	<b>Science Direct</b>
Resultados de la búsqueda	800	600	72	17	22	1000
Documentos analizados	100	50	40	10	14	200
Documentos candidatos	10	30	5	2	11	15
Documentos relevantes	3	22	2	0	1	7
Concidencia con Google Académico	2	0	0	0	0	7
Total trabajos relevantes	1	22	2	0	1	0

La Tabla 2.2 describe toda la información de referencia acerca de los estudios relevantes.

Tabla 2.2: Artículos Seleccionados.

Número de artículos	Autores	Año	Título del artículo	Revistas o Tesis
1.	P.A.Pilavachi.	2002	Mini-and micro-gas turbines for combined heat and power [4].	Applied Thermal Engineering.
2.	S. An, Q. Li, and T.W. Gedra.	2003	Natural Gas and Electricity Optimal Power Flow [5].	Applied Thermal Engineering.
3.	B.Zaporowski and R. Szczerbowski	2003	Energy analysis of technological systems of natural gas fired combined heat-and-power plants [6].	Applied Energy.
4.	M. Shahidehpour, Y. Fu and T. Wiedman.	2005	Impact of Natural Gas Infrastructure on Electric Power Systems [7].	Proceeding of the IEEE.
5.	L.A Barroso,T.J Hammons and H. Rudnick.	2005	Integrated Natural Gas-Electricity Resource Adequacy Planning In Latin America [8].	Oil, Gas and Energy Law Journal (OGEL).

6.	D. Feretic, Z.Tomsic.	2005	Probabilistic analysis of electrical energy costs comparing: production costs for gas, coal and nuclear power plants [9].	Energy Policy.
7.	E. Fernandes, M. V.A. Fonseca, and P. S. R. Alonso.	2005	Natural gas in Brazil's energy matrix: demand for 1995–2010 and usage factors [10].	Energy Policy.
8.	R. G. de Oliveira ,J.de Moraes Marreco.	2006	Natural gas power generation in Brazil: New window of opportunity? [11].	Energy Policy.
9.	P.Jaramillo,W.M.Griffin, H.S.Matthews.	2007	Comparative life-cycle Air Emissions of Coal,Domestic Natural Gas,LNG,and SNG for Electricity Generation [12].	Environmental science and technology.
10.	C.Espejo Marin,J.J.Capel Molina	2007	El Gas en la producción de Electricidad en España [13].	Nimbus: Revista de climatología, meteorología y paisaje.

11.	C.Lopez Lopez,M.V. Sanchez Quitian.	2007	Diagnóstico de las centrales termoeléctricas en Colombia y evaluación de alternativas tecnológicas para el cumplimiento de la norma de emisión de fuentes fijas [14].	Universidad de la Salle,Facultad de Ingenieria Ambiental y Sanitaria.
12.	J. Beér.	2007	High Efficiency Electric Power Generation;The Environmental Role [15].	Progress in Energy and Combustion Science.
13.	ZG. Sun.	2008	Energy efficiency and economic feasibility analysis of cogeneration system driven by gas engine [16].	Energy and Buildings.
14.	E. Fernandes, J. C. S De Oliveira, P. R De Oliveira.and P. S. R Alonso.	2008	Natural-gas-powered thermoelectricity as a reliability factor in the Brazilian electric sector [17].	Energy Policy.
15.	F. Ramiro Velasco	2009	Estudio de Viabilidad y Diseño de una Planta de Cogeneración para una Industria Cárnica [18].	Universidad Carlos III de Madrid Escuela Politécnica Superior.

16.	P. A. Pilavachi, S. D. Stephanidis and V.A Pappas	2009	Multi-criteria evaluation of hydrogen and natural gas fuelled power plant technologies [19].	Applied Thermal Engineering.
17.	R. S. Elias, M. I. M. Wahab, L.Fang.	2010	Managing financial risks for natural gas-fired power plants [20].	Service Systems and Service Management (ICSSSM).
18.	J.M.Blanco,F.Peña.	2011	Incremento en la Eficiencia en Centrales Termoelectricas por Aprovechamiento de los Gases de la Combustión [21].	Información Tecnológica.
19.	C.A.Nuñez Viveros,G.J.Gallego Hidalgo.	2011	Desarrollo de la Metodología y Evaluación de Proyectos Energéticos con Manejo de la Incertidumbre en Precios:Proyecto de Cogeneración de Energía Eléctrica con Base en Gas Natural para una Empresa de Santiago de Cali [22].	Universidad ICESI,Facultad de ciencias administrativas y económicas.

20.	M. Fernández Martín.	2011	Estudio De Viabilidad Técnico-Económico De Una Planta De Trigeneración Del Sector Lácteo [23].	Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Departamento de Ingeniería el Eléctrica.
21.	R. H.Sepulveda Sepulveda.	2011	Modelación de Centrales Térmicas de Ciclo Combinado Y Su Aplicación en el Problema de predespacho de Unidades [24].	Universidad Carlos III de Madrid Escuela Politécnica Superior ,Departamento de Ingeniería Eléctrica.
22.	S. Ahijón Aranda.	2011	Modelo Económico del Funcionamiento de una Central de Ciclo Combinado Análisis y Optimización de los regímenes de Funcionamiento [25].	Materials for Renewable Energy and Environment (ICMREE).
23.	Y.Jinning,X. Yali,L.Zheng,T.Yunfeg,H. Baohua.	2011	Heat-power-gas Capacity Of Natural Gas-fired Combined Cycle Cogeneration Power Plant [26].	Universidad Veracruzana, Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica.

24.	A. Ramírez Romero.	2011	Estudio Descriptivo y Analítico de una Planta de Ciclo Combinado [27].	Universidad Veracruzana, Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica.
25.	I.Lawrence.	2013	Analysis of Nigeria Power Generation Sustainability through Natural Gas Supply [28].	Journal of Innovative Reserch in Engineering and Sciencies.
26.	G.Mohan,S.Dahal,U. Kumar,A.Martin and H.Kayal.	2014	Development of Natural Gas Fired Combined Cycle Plan for Tri-Generation of Power,Cooling and Clean Water Using Waste Heat Recovery:Techno-Economic Analysis [29].	Energies.

#### 2.2.4. Palabras clave

Las palabras clave como por ejemplo casos de estudio, analisis, implementación, empresa, investigación, ambiente, costo de gas y kilovatiohora(kWh) del resumen de cada una de las publicaciones listadas en la Tabla 2.2, se utilizaron como base para la construcción del esquema de clasificación presentando en la Figura 2.2. En este se proponen tres dimensiones para la clasificación:

**Enfoque de investigación:** Indica si el documento se orienta a la validación de generación de energía eléctrica a partir de gas natural o a su evaluación. En un estudio de validación se busca el análisis de un tema investigativo sin ser llevado a la practica, en cambio, un estudio de evaluación aplica de forma práctica lo analizado.

**Ámbito de aplicación:** Indica hacia dónde va dirigido el documento, por ejemplo el sector industrial o el académico. En el sector industrial los estudios van enfocados hacia la aplicación y el lugar donde se podrían llevar a cabo los procesos industriales de generación de energía eléctrica, y el sector académico va dirigido hacia nuevas investigaciones o el desarrollo de

ideas que complementen estudios previos que necesitan la parte teórica para los marcos conceptuales de investigación.

**Medida evaluada:** Indica el aspecto de la generación con gas natural que se aborda en el documento. Este puede obedecer a uno de tres tipos, el precio del gas natural, el precio de la energía eléctrica o el impacto ambiental.

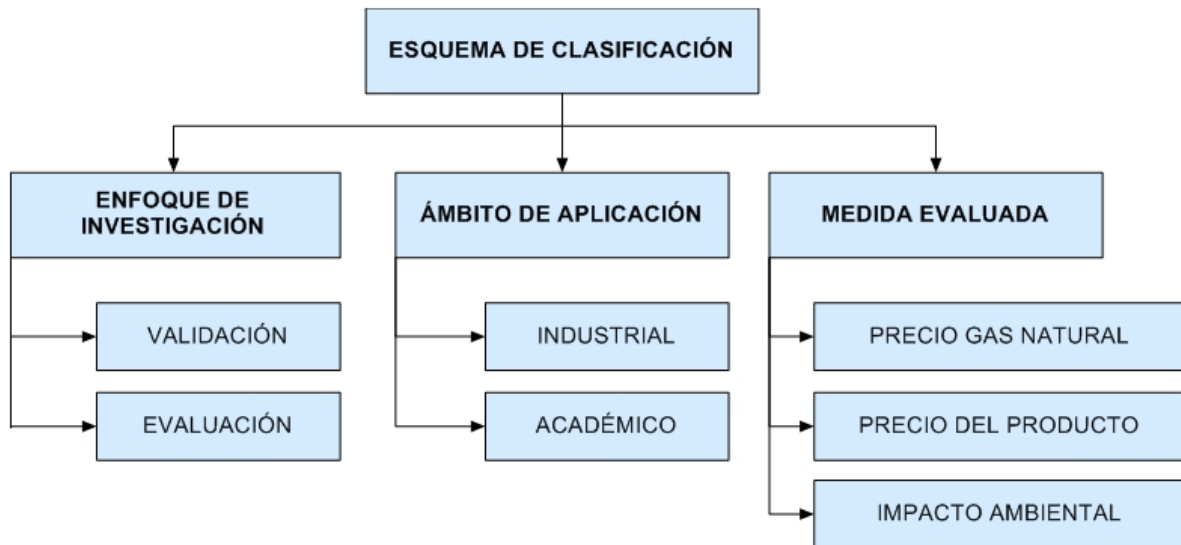


Figura 2.2: Esquema de Clasificación.

### 2.2.5. Extracción de datos

Seleccionado el esquema de clasificación donde se extrae la información y se organizan los documentos, el paso a seguir es la elaboración de un diagrama de dispersión en forma de burbujas que permite visualizar el entorno principal de la investigación.

Para el caso de estudio acerca de la generación de energía eléctrica a partir de gas natural, se elaboró un diagrama de burbujas donde el tamaño de cada burbuja depende del número de artículos tal como se ilustra en la Figura 2.3, donde el eje X representa las dimensiones del ámbito de aplicación y la medida evaluada. El ámbito de aplicación está categorizado por industrial y académico, mientras que la medida evaluada está constituida por tres categorías, precios del gas natural, precios del producto final y el impacto ambiental. Por último está la fase del enfoque de la investigación el cual se encuentra ubicado en el eje Y, presenta las categorías de validación y evaluación.

Según lo observado en la Figura 2.3 se puede concluir que hay una gran tendencia en el ámbito de aplicación para realizar artículos académicos que conlleven a una validación, sin embargo los industriales se encuentran divididos entre la validación y la evaluación. Por otro lado en la medida evaluada hay una relación estrecha entre los precios del gas y de producción mostrando una dependencia entre ellos.



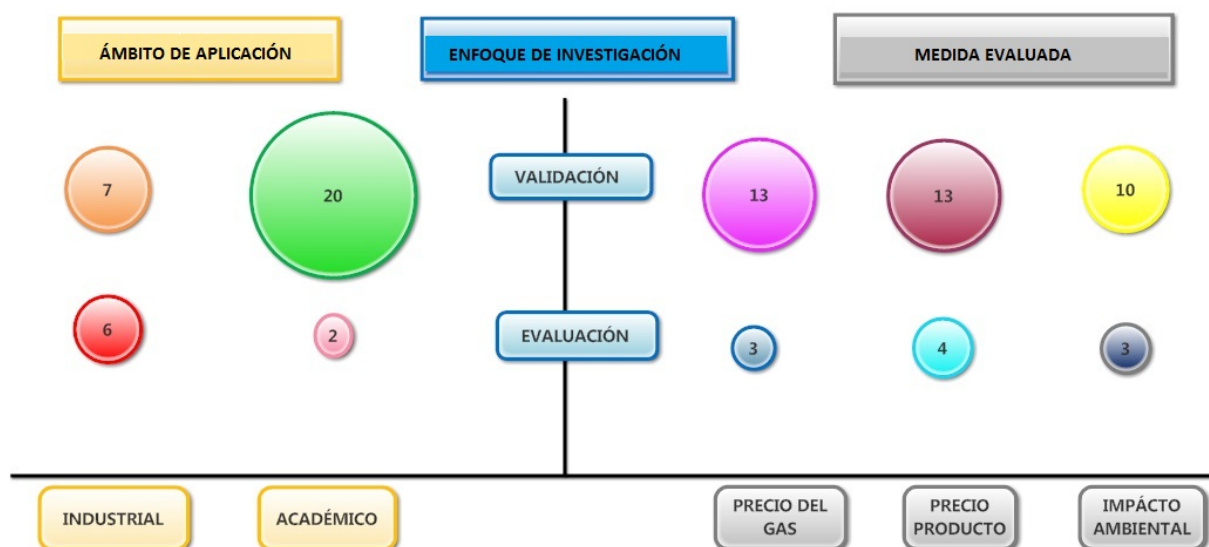


Figura 2.3: Diagrama de Burbujas.

Autores como: J.Beér, M.Fernández Martín, entre otros, proponen que el recurso natural a utilizar para la producción de energía eléctrica no debe ocasionar un deterioro en el medio ambiente [15].

### 2.3. Análisis comparativo y discusión

En esta parte se hace un estudio y un análisis a los artículos seleccionados, donde el objetivo principal es darle respuesta a las preguntas de investigación planteadas y ver el enfoque que el autor le da a cada documento.

De acuerdo a los resultados obtenidos los artículos que dan respuesta a la primera pregunta de investigación son 20, de los cuales 4 ([13], [14], [24] y [28]) solo abordan el tema de la generación de energía y los 16 restantes también dan respuesta a las otras dos preguntas investigativas. La mayoría de los estudios presentan un análisis teórico de cómo generar energía eléctrica a partir de gas natural, para ello se tienen en cuenta el funcionamiento de las centrales termoeléctricas donde se especifica la conversión de energía térmica en energía mecánica y esta a su vez en energía eléctrica.

Estas centrales hacen uso de procesos térmicos y de cogeneración, utilizando recursos naturales como el carbón, el petróleo, gas natural entre otros. Así mismo se realizan proyecciones futuras ([10] y [9]) de la utilidad de dicha fuente.

En algunos documentos ([12], [15] y [13]) los autores hacen comparaciones con diferentes combustibles, seleccionando el gas natural como la mejor opción para generar energía ya que reduce el impacto ambiental que estos emiten.

Para la segunda pregunta de investigación, responden a ella 14 artículos, donde solo uno

( [5]), hace referencia exclusivamente a dicha pregunta, los demás contribuyen con más de dos interrogantes. Los autores dan un enfoque acerca de la alta eficiencia obtenida de los diferentes tipos de turbinas para la generación de energía, en ellos se encuentran las turbinas a vapor en ciclo Rankine, turbinas a gas en ciclo simple, Stig y combinado.

Por último 17 artículos, dan respuesta a la tercera pregunta de investigación, donde solo 5 ( [9], [10], [11], [17] y [22]) contribuyen de manera específica con el tercer interrogante. Para el análisis propuesto los autores realizan proyecciones tanto del precio de la materia prima (gas natural) como del producto final (energía eléctrica), comparaciones del precio de combustibles, la inversión del capital y la recuperación del mismo. También existe una relación entre los precios del gas natural y la cantidad de los recursos naturales presentes en cada región.

Después de haber realizado el análisis a las preguntas planteadas, la Figura 2.4 indica la relación existente entre documentos e interrogantes por medio de un Diagrama de Venn.

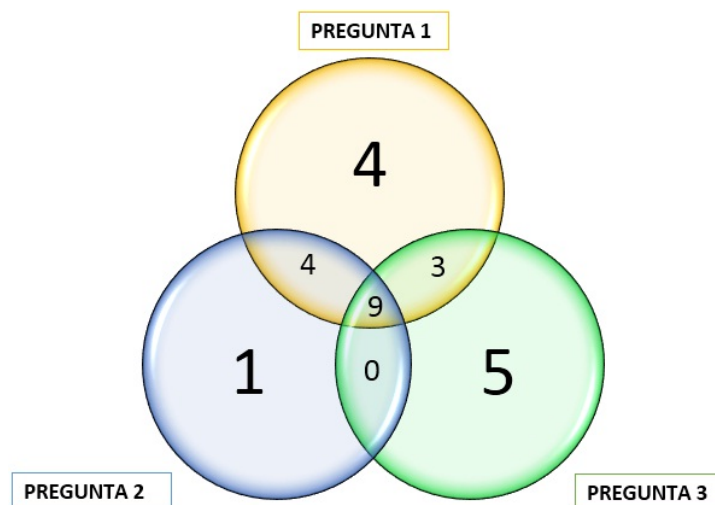


Figura 2.4: Diagrama de Venn

## 2.4. Resumen mapeo sistemático

En el capítulo dos, la técnica de mapeo sistemático fue aplicada para la generación de energía eléctrica a partir de gas natural, dio respuesta a las tres preguntas planteadas satisfactoriamente, donde permitió clasificar documentos, analizar con esquemas y diagramas las tendencias en el área investigativa tanto teórica como práctica.

# Capítulo 3

## Generación de energía eléctrica

### 3.1. Introducción

Colombia es un país que posee una gran variedad de recursos naturales debido a su diversidad topográfica [30], dichos recursos son aprovechados para satisfacer las necesidades básicas de la población como lo es la energía eléctrica.

Para hacer uso de la energía eléctrica existen una diversidad de procesos de generación que dependen de la disponibilidad del recurso utilizado, en el caso de Colombia las fuentes hídricas son las más utilizadas para la generación de energía eléctrica seguida por las termicas a gas, es por tal razón que el tercer capítulo contiene información general que abarca los procesos de generación, equipos utilizados y ciclos termodinámicos dentro de una central partiendo del punto de producción hasta la entrega final a la red.

### 3.2. Energía eléctrica

La energía eléctrica es originada por el movimiento de las cargas eléctricas dentro de los materiales conductores, estas producen diferentes efectos, luminoso, térmico y mecánico. Se podría definir como un bien no almacenable que lleva procesos de generación, transporte y consumo. La electricidad se transporta por medio de vías especializadas como cables aeros y tuberías subterráneas [31].

La energía eléctrica se ha convertido en un bien necesario de la vida cotidiana de las personas, para ello la humanidad ha encontrado múltiples formas de generarla, entre ellas se encuentran la producción de energía eólica, hidráulica, solar, nuclear, térmica entre otras, las cuales se encuentran dentro de dos grandes grupos de energías renovables y no renovables.

### 3.3. Energías renovables

La generación de energía basada en fuentes renovables utiliza fuentes naturales inagotables como el sol (energía solar), el viento (energía eólica), los ríos y corrientes de agua dulce (energía hidráulica), los mares y océanos (energía mareomotriz y undimotriz), y el calor de la tierra (energía geotérmica) [32]. Las energías renovables se clasifican en convencionales y no convencionales como se expone en la Figura 3.1. Debido a que la fuente de alimentación para la producción de energía es natural, la contaminación del medio ambiente es nula, ya que no produce emisiones tóxicas.

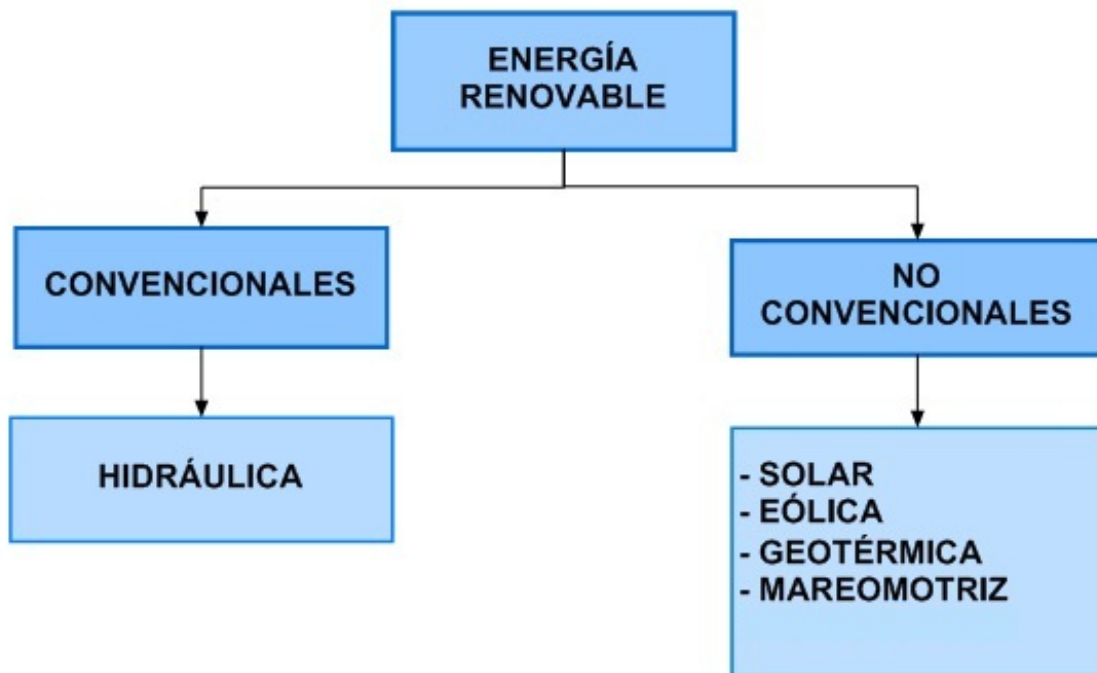


Figura 3.1: Energías Renovables.

A continuación se explicarán los tipos de generación de energía eléctrica más implementados en el mundo.

#### 3.3.1. Generación hidráulica

La generación hidráulica se basa específicamente en el aprovechamiento de la caída de agua desde cierta altura para producir energía, para ello se pueden utilizar fuentes hídricas naturales o presas las cuales controlan la cantidad de caudal dependiendo del clima del lugar en el cual este ubicada la central [33].

Para la generación de energía el caudal hídrico mueve una turbina, la cual transforma energía potencial en cinética y finalmente a energía eléctrica por medio de un generador.

En la actualidad la energía hidráulica es la más utilizada en el mundo, en su mayoría son grandes plantas hidroeléctricas. En Colombia se encuentran alrededor de un 70,41 % y con una potencia de 10919,8 (MW) [1].

### **3.3.2. Generación solar**

La generación solar se basa en el aprovechamiento de la radiación del sol donde por medio de un sistema específico se transforma en energía eléctrica. La producción de energía se realiza por medio del efecto fotovoltaico, el cual consiste en generar un voltaje en un material con características de semiconductor por medio de la captación de los rayos solares. Para tal proceso se utilizan paneles solares que son una agrupación de módulos fotovoltaicos unidos en serie o en paralelo.

### **3.3.3. Generación eólica**

La generación eólica es aquella que utiliza la fuerza del viento para la producción de energía por medio de aerogeneradores, estos mueven una turbina la cual transforma la energía cinética del viento en energía mecánica. El tamaño del molino y de las aspas empleadas para tal proceso son las encargadas de una mayor potencia dentro de la producción. Para garantizar el buen rendimiento de los aerogeneradores se realiza un estudio previo acerca del emplazamiento en donde se van a ubicar, se deben realizar mediciones del viento a diferentes alturas para determinar en qué posición se detecta una mayor velocidad al igual que la dirección del mismo [34].

De acuerdo con los datos obtenidos por el informe mensual de variables de generación y del mercado eléctrico colombiano – enero de 2015, la energía eólica tiene una potencia de 18,4(MW) abarcando un 0,12 % de la producción total del País [1].

### **3.3.4. Generación geotérmica**

La generación geotérmica es aquella que utiliza como fuente el calor producido en el interior de la tierra para producir energía eléctrica a partir de la perforación de pozos. Dicha generación utiliza el vapor geotérmico para hacer girar las turbinas de la central [35].

### **3.3.5. Generación mareomotriz**

La generación mareomotriz es la resultante del aprovechamiento de las mareas, es decir la diferencia de altura media de los mares. El proceso para generar energía, consiste en embalsar el agua del mar en bahías naturales, durante el ascenso y descenso de las mareas el agua pasa a través de una serie de turbinas hidráulicas que genera energía mecánica que a su vez produce energía eléctrica [35].

## 3.4. Energías no renovables

Las energías no renovables emplean como fuentes de alimentación los combustibles fósiles o nucleares, entre ellos se tienen, el carbón, petróleo, gas natural, plutonio y uranio. Estos combustibles se van agotando a medida que se utilizan en el proceso de generación. La utilización de estos produce un gran impacto ambiental debido a las emisiones tóxicas que generan, por tal razón se recomiendan combustibles que produzcan el menor riesgo ambiental.

### 3.4.1. Generación nuclear

La generación nuclear aprovecha los átomos de uranio para producir energía por medio de fisión o reacción nuclear (rotura o división de átomos), proceso que utiliza el calor generado para producir un vapor que finalmente moverá la turbina y el generador eléctrico [36].

Una central nuclear consta de cuatro partes, entre ellas se tiene:

- 1) Generador de calor: en el cual se producen las reacciones nucleares y la liberación de calor.
- 2) Generador de vapor: intercambiador en el que gracias al calor producido por el reactor se forma el vapor para accionar la turbina.
- 3) Generador de energía mecánica: turbina en la que se produce energía mecánica a partir de la energía contenida en el vapor
- 4) Generador de electricidad: lugar donde se produce la energía eléctrica a partir de la energía mecánica que finalmente se transmite a un alternador.

Debido a la complejidad de los procesos de fisión nuclear y que no se cuenta con personal especializado para llevarlos a cabo, Colombia no tiene plantas de generación nuclear en la actualidad.

### 3.4.2. Generación térmica

La generación térmica aprovecha la energía calorífica proveniente de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural) para la producción de energía eléctrica [37].

El proceso de transformación de energía lleva los siguientes pasos:

- 1) El combustible a utilizar se quema y la energía contenida en él se transforma en energía calorífica por medio de combustión.
- 2) La energía calorífica que absorbe el fluido de trabajo se convierte en energía mecánica al expansionarse en la turbina.
- 3) La energía mecánica es transformada en energía eléctrica a través del generador eléctrico.

En la actualidad la generación térmica en Colombia se lleva a cabo por medio de combustibles como el carbón y el gas natural con una participación del 10.86% de térmica a gas con

una potencia de 1684,4(MW) y de 7.56 % de térmica a carbón con una potencia de 1172,0 (MW) [1].

Tabla 3.1: Comparación de las Tecnologías en Colombia  
Tomado de: Informe mensual de variables de generación y del mercado eléctrico Colombiano [1].

<b>Capacidad por tecnología</b>		
<b>Tecnología</b>	<b>Potencia(MW)</b>	<b>Participacion( %)</b>
Hidráulica	10.919,8	70,41 %
Térmica Gas	1.684,4	10,86 %
Térmica Carbón	1.172,0	7,56 %
Líquidos	1.366,0	8,81 %
Gas Líquidos	276,0	1,78 %
Viento	18,4	0,12 %
Biomasa	72,3	0,47 %
<b>Total</b>	<b>15.508,8</b>	<b>100 %</b>

En la Tabla 3.1 se visualiza la clasificación de las diferentes tecnologías de generación de energía eléctrica en Colombia y la participación de cada una dentro del país .

### 3.5. Energía eléctrica a partir de gas natural

La generación de energía eléctrica a partir de gas natural es un proceso de energía no renovable, específicamente energía térmica. Para el proceso de generación de energía se implementa como combustible fósil, el gas natural, el cual es un recurso abundante en el país, es un componente no tóxico, incoloro e inodoro constituido por una mezcla de hidrocarburos como el metano (CH<sub>4</sub>) el cual se encuentra en un porcentaje del 70 % y el nitrógeno, dióxido de carbono y etanol en un 30 %. Este recurso es utilizado generalmente para generación de electricidad, como combustible vehicular, uso doméstico e industrial.

En relación con las tecnologías de generación de energía eléctrica a partir de gas natural se utilizan motores de combustión interna a gas o turbinas a gas.

#### 3.5.1. Motores de combustión interna a gas

Los motores de combustión interna también llamados motores reciprocantes o a pistón, requieren de un combustible, aire, compresión y una fuente de combustión para trabajar [38].

El principio de funcionamiento de los motores de combustión interna es el siguiente: Los gases se comprimen en el interior del cilindro, luego se produce una explosión lo cual empuja al pistón realizando trabajo. Los gases después de quemados son evacuados del cilindro y este vuelve a llenarse de mezcla de combustible. Todos estos procesos se repiten sucesivamente en el cilindro del motor, a esto se le llama ciclo de trabajo [39].

A continuación se nombran las características de los motores de combustión interna

- 1) Rango de potencias de 0.5 (kW) a 6.5 (MW)
- 2) Bajo costo de capital
- 3) Fácil instalación
- 4) Buena característica de seguimiento de la carga
- 5) Posibilidad de recuperación de calor
- 6) Pueden operar con diferentes combustibles como: gas natural, disel, biogas, etc
- 7) Eficiencia entre 25 y 45 %

Como el combustible a utilizar es el gas natural se implementan motores de ignición por chispa

#### **Motores de ignición por chispa:**

Los motores de ignición por chispa (SI: Spark-ignited), emplean el gas natural como combustible para la generación de energía eléctrica, por lo general el combustible entra en el cilindro ya mezclado con el aire. Al final de la compresión se dispone de una mezcla de aire y combustible más o menos homogénea. La combustión se inicia por una causa externa, generalmente una chispa eléctrica [40].

### **3.5.2. Turbinas a gas**

Las turbinas a gas son equipos capaces de transformar la energía química contenida en un combustible en energía mecánica, ya sea para su aprovechamiento energético o como fuerza de impulso de aviones, automóviles o barcos [41].

Las turbinas a gas para la generación de energía eléctrica emplean ciclos termodinámicos dependiendo de su aplicación, entre los cuales se encuentran Ciclo Brayton, Ciclo Stig y Ciclo Combinado.

#### **3.5.2.1. Turbinas a gas en Ciclo Simple o Ciclo Brayton**

Las turbinas a gas en ciclo simple contienen un compresor, una cámara de combustión, una turbina a gas y un generador presentando una eficiencia cercana al 39 % [14]. La Figura 3.3 muestra la ubicación de cada elemento dentro del ciclo.

#### **3.5.2.2. Turbinas a gas en Ciclo Stig**

Las turbinas a gas en ciclo Stig contienen un compresor, una cámara de combustión, una turbina a gas, un generador, una caldera de recuperación y una chimenea, donde los principios de funcionamiento son iguales al de la turbina a gas en ciclo simple. Estos procesos generan una eficiencia del 43 % [14]. La Figura 3.4 muestra el orden de los elementos dentro del ciclo.



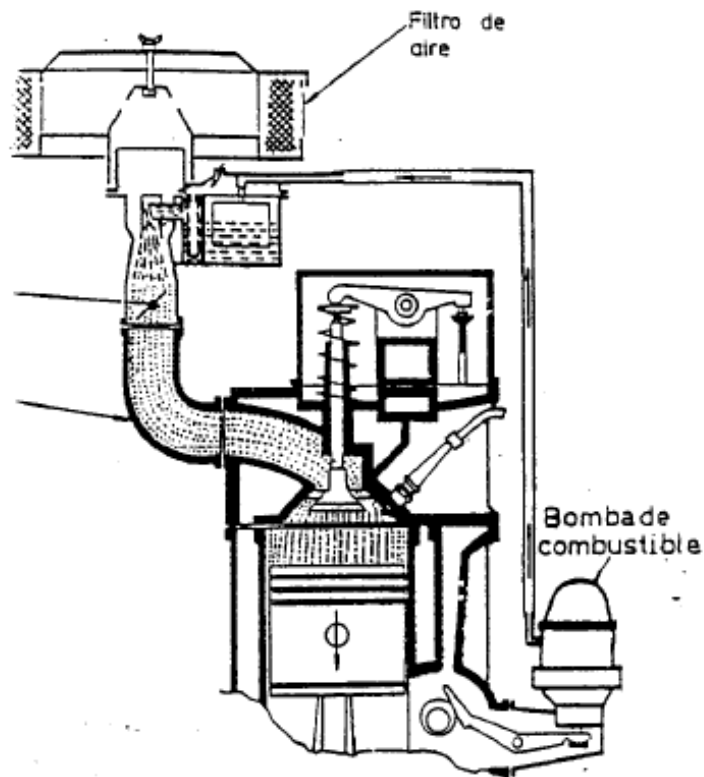


Figura 3.2: Motores de ignición por chispa.  
Tomado de: Motores térmicos [40].

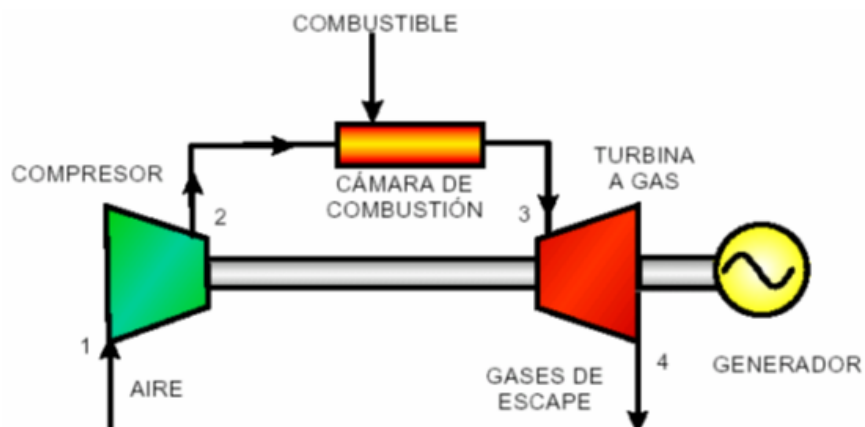


Figura 3.3: Ciclo Simple

Tomado de: Diagnóstico de las centrales termoeléctricas en Colombia y evaluación de alternativas tecnológicas para el cumplimiento de la norma de emisión de fuentes fijas [14].

### 3.5.2.3. Turbinas a gas en Ciclo Combinado

Las turbinas a gas en ciclo combinado, usan los dos ciclos de potencia el ciclo Brayton y el Rankine, el cual utiliza únicamente turbinas a vapor para la generación de energía. Dicho

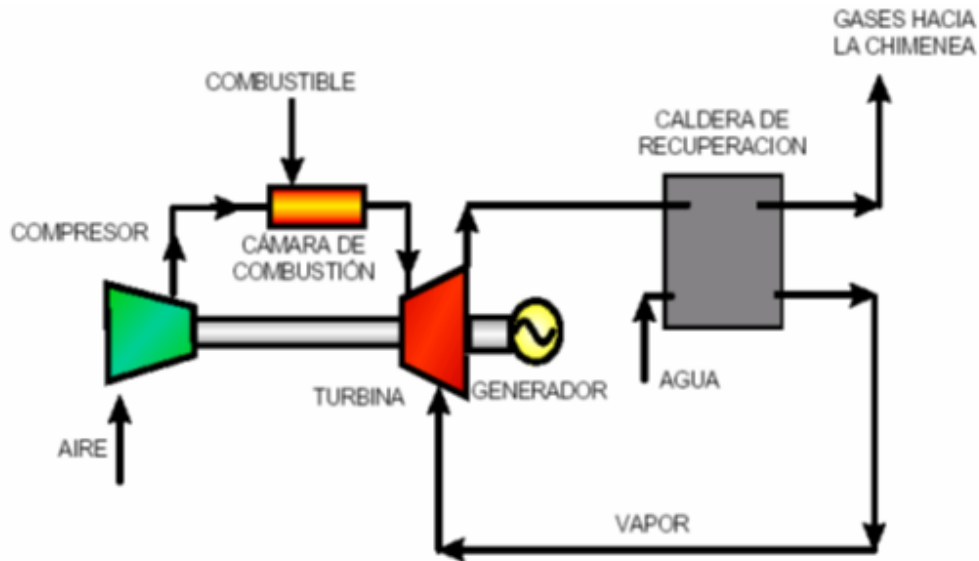


Figura 3.4: Ciclo Stig

Tomado de: Diagnóstico de las centrales termoeléctricas en Colombia y evaluación de alternativas tecnológicas para el cumplimiento de la norma de emisión de fuentes fijas [14].

proceso contiene un compresor, una cámara de combustión, una turbina a gas y de vapor, dos generadores, una caldera de recuperación, un condensador y una bomba, presentando una eficiencia del 60 % [14].

En la Figura 3.5 se presenta la disposición final de los equipos a utilizar en el ciclo combinado.

Las turbinas a gas son empleadas para procesos de generación a grande escala, sin embargo existen las microturbinas que son utilizadas para procesos de pequeña escala.

#### 3.5.2.4. Microturbinas

Las microturbinas son unidades compactas que contienen un compresor, recuperador o intercambiador de calor, una cámara de combustión, una turbina de gas y un generador eléctrico [42]. Dichos elementos son ilustrados en la Figura 3.6

El principio de funcionamiento de las microturbinas para el caso de centrales de pequeña magnitud utiliza el Ciclo Brayton cerrado o Regenerativo, el cual consiste en el uso de los gases emitidos por la turbina de gas con el fin de utilizarlos para el calentamiento del aire y beneficiar el rendimiento eléctrico y el consumo de combustible.

Enseguida se enumera los pasos para realizar el proceso de la generación de energía eléctrica aplicando el Ciclo Brayton Regenerativo.

- 1) Se extrae el aire de la atmósfera por medio del compresor, pasando previamente por un filtro.
- 2) En el compresor circula el aire del cual se aumenta su densidad, temperatura y presión.

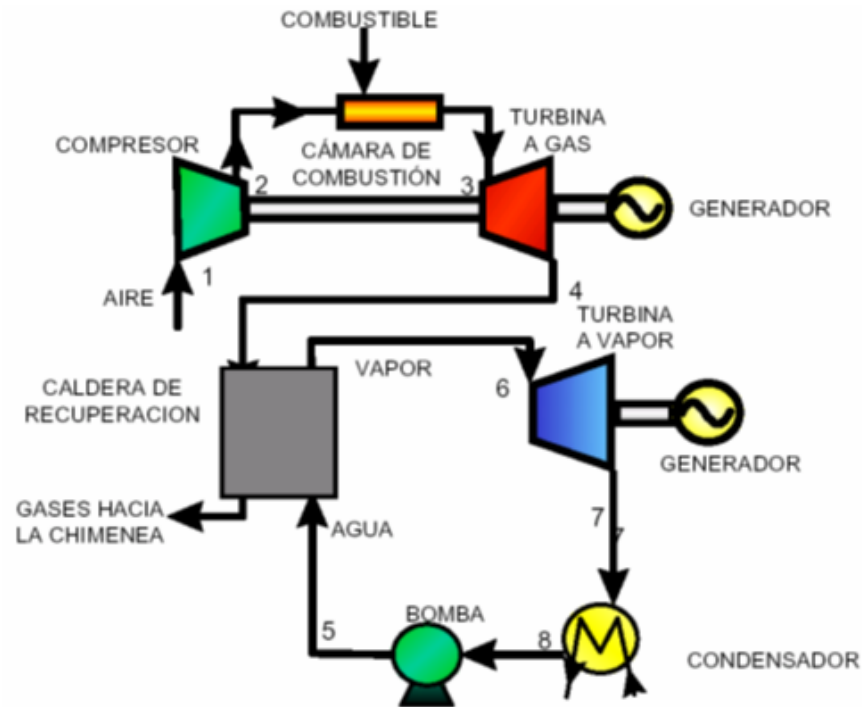


Figura 3.5: Ciclo Combinado

Tomado de: Diagnóstico de las centrales termoeléctricas en Colombia y evaluación de alternativas tecnológicas para el cumplimiento de la norma de emisión de fuentes fijas [14].

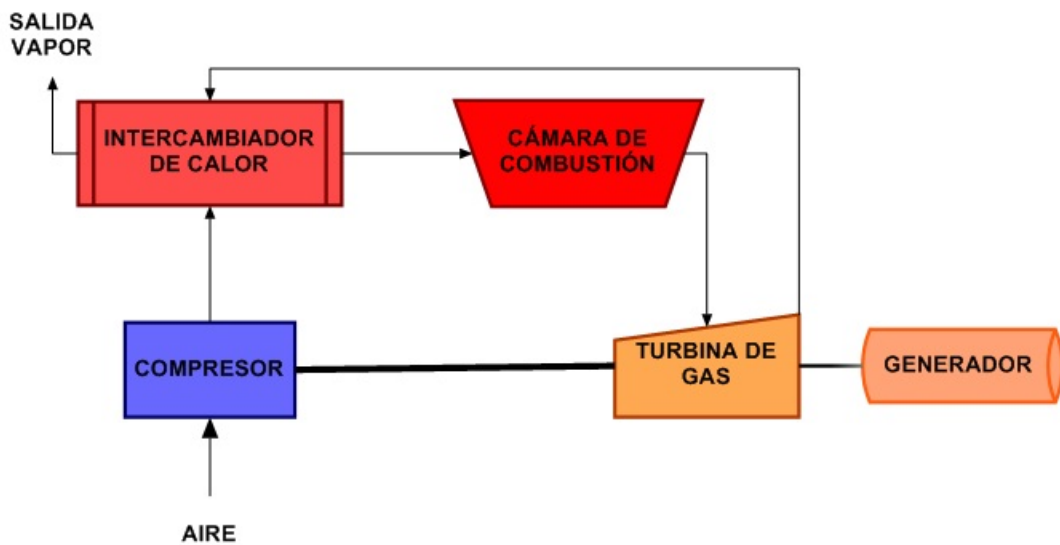


Figura 3.6: Componentes básicos de la microturbina.

- 3) Luego el aire comprimido se mezcla en la cámara de combustión con el gas natural, en donde al encontrarse en un medio a temperaturas altas reacciona químicamente con el oxígeno del aire, liberando su energía química que se convierte en energía térmica, el cual se manifiesta en un aumento de temperatura en los productos de combustión.

- 4) Estos productos de combustión son enviados a la turbina que se encarga de expandirlos disminuyendo su temperatura, presión y densidad, entregando trabajo, es decir que transforma la energía térmica en mecánica que sirve para accionar el generador eléctrico.
- 5) Los gases que se expulsan de la turbina, pasan a un intercambiador de calor el cual calienta el aire comprimido y así reduce el consumo de combustible dentro del proceso de generación de energía eléctrica.
- 6) Finalmente se expulsan los gases del combustible quemado a la atmósfera por medio de una chimenea [43].

Las características de la microturbina son las siguientes:

- 1) Rango de potencia 15(kW) a 300(kW)
- 2) Frecuencias de 1600 (Hz)
- 3) Mantenimiento mínimo
- 4) Poco espacio
- 5) Operan sin vibración
- 6) Diversidad de combustible
- 7) Reducción de emisiones contaminantes
- 8) Capacidad de producir a pequeña escala electricidad y calor
- 9) Tiene una parte móvil
- 10) Utiliza el aire como lubricante
- 11) Planta de poder en miniatura
- 12) Sincronización permanente
- 13) Facilidad para conectarse a la red de baja tensión
- 14) Trabajan a revoluciones entre 60.000 y 100.000 (R.P.M.)

Las microturbinas de acuerdo al número de ejes se clasifican en dos tipos: microturbina de un solo eje y de dos ejes.

**Microturbinas de un solo eje:** Son la evolución de los turbogeneradores de los automóviles, motores de pequeños aeroplanos entre otros. Estos constan de un compresor, turbina, alternador, recuperador y un generador [42].

En la Figura 3.7 se presenta el esquema de una microtrurbina de un solo eje, en la cual el combustibe(Gas Natural) entra en la cámara de combustión produciendo gases calientes que hacen que la turbina gire en su propio eje.

Las velocidades rotacionales se encuentran entre 60.000 y 100.000 (RPM)

**Microturbinas de dos ejes:** Como se ilustra en la Figura 3.8, las microturbinas de dos ejes son diseñadas para aplicaciones industriales, estas emplean una turbina que gira a

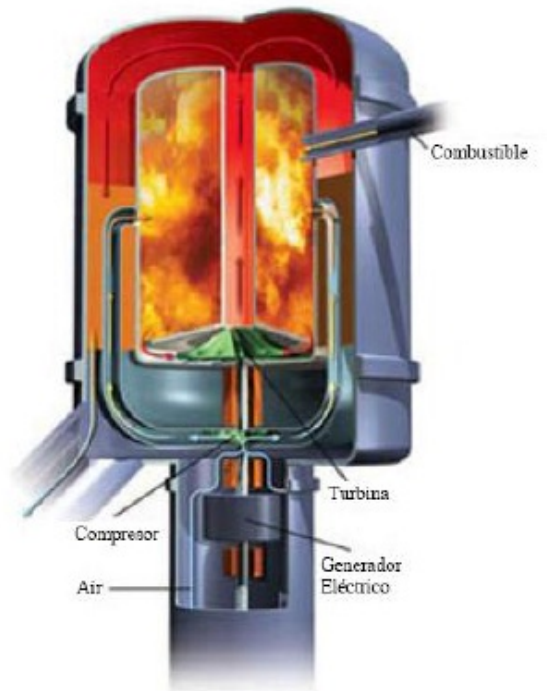


Figura 3.7: Microturbina de un solo eje.

Tomado de: Estudio de factibilidad para la implantación de generación distribuida en la zona norte costera del estado Anzoátegui [42]

3.600(RPM) y un generador convencional unido a una caja de engranajes reductora, sistemas presurizados de lubricación, una etapa de compresión y dos etapas de turbinas [42].

## 3.6. Elementos adicionales

Todo proceso de generación de energía eléctrica que desee comercializar su producto final, requiere de elementos adicionales como: Transformadores, tablero de protección y protecciones contra sobre voltajes y contra sobre corrientes, los cuales se encargaran de garantizar de que la energía entregada sea la adecuada.

### 3.6.1. Transformadores

Una vez terminado el proceso de generación, la energía eléctrica resultante tiene un nivel de tensión específico el cual se puede variar por medio de un transformador para su distribución final.

Los transformadores utilizados son máquinas eléctricas estáticas con dos devanados de corriente alterna arrollados sobre un núcleo magnético (ver Figura 3.9). El devanado por donde entra energía al transformador se denomina primario y el devanado por donde sale

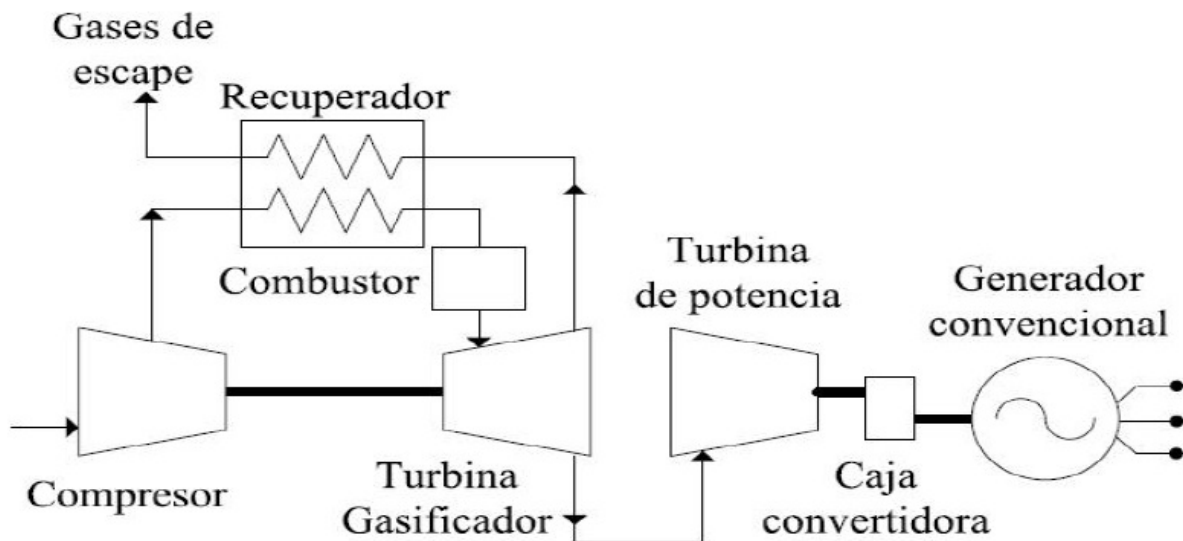


Figura 3.8: Microturbina de dos ejes.

Tomado de: Estudio de factibilidad para la implantación de generación distribuida en la zona norte costera del estado Anzoátegui [42]

energía hacia las cargas que son alimentadas por el transformador se denomina secundario. El devanado primario tiene  $N_1$  espiras y el secundario tiene  $N_2$  espiras.

Al conectar una tensión alterna  $V_1$  al primario, circula una corriente por el que genera un flujo alterno en el núcleo magnético este flujo magnético, en virtud de la ley de Faraday induce en el secundario una fuerza electromotriz (FEM) que da lugar a una tensión  $V_2$  en los bornes de este devanado. De esta manera se consigue transformar una tensión alterna de valor eficaz  $V_1$  en otro valor eficaz  $V_2$  y de la misma frecuencia [44].

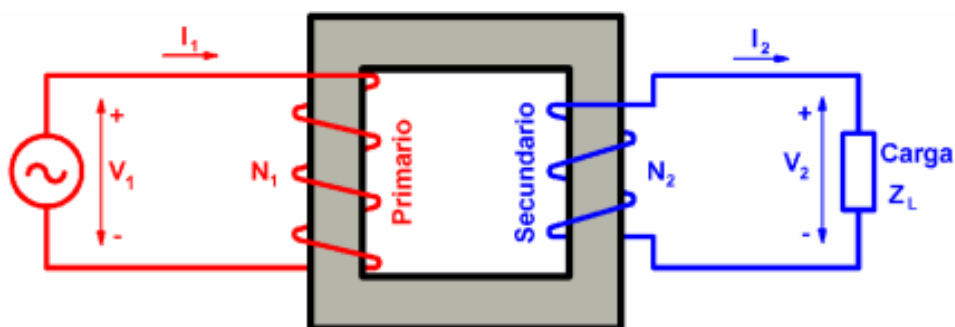


Figura 3.9: Principio de funcionamiento de un transformador.

Tomado de: Transformadores [44]

Los transformadores son muy utilizados debido a que permiten modificar la tensión de alimentación a valores mas bajos o altos. De esa manera se pueden manipular los circuitos sin riesgos para los usuarios.

Los transformadores pueden ser clasificados de diversas formas:

1) Según su uso o aplicación

La conexión de la red eléctrica partiendo desde la central generadora debe contar con distintos tipos de transformadores debido a que la tensión no es la misma para todos los puntos. Por ejemplo se tiene :

- T. Potencia (elevadores o reductores de voltajes)
- T. Distribución
- T. Medida.
- T. Aislamiento [45].

2) Según su sistema de refrigeración

El medio refrigerante debe ser buen conductor de calor y dieléctrico. De igual forma se tiene en cuenta la ubicación de los transformadores, estos pueden ser:

- T. Secos (tipo abierto o sellado).
- T. líquido (aceite mineral, líquidos de alto punto de ignición, etc) [45].

3) Según su número de fases

Un aspecto a tener en cuenta para esta clasificación es la salida del generador, para ello existen:

- T. Monofásicos(1 corriente y una tierra )
- T. Bifásicos (2 corrientes y una tierra)
- T. Trifásicos (3 corrientes y una tierra) [45].

### 3.6.1.1. Conexiones típicas de los transformadores

**Conexión Delta - Delta:** En esta conexión los devanados primario y secundario están conectados en delta, formando un circuito cerrado por la cual circula una corriente ficticia en el mismo sentido de las tres fases, los bobinados están conectados a dos hilos de la línea los cuales determinan la tensión aplicada de forma precisa [46].

**Conexión Delta-Estrella:** Las tres fases del devanado primario están conectadas en delta, mientras que el devanado secundario está en estrella. Esta configuración es empleada en sistemas de potencia y distribución para elevar voltajes de generación o de transmisión. También permite aislar las corrientes de falla a tierra entre los dos circuitos del primario y secundario [46].

**Conexión Estrella-Estrella:** Conexión utilizada en sistemas de alta tensión donde el voltaje de cada bobina es un 1.73 veces menor que el de la línea [46].

**Conexión Estrella-Delta:** Las tres fases del devanado primario están conectadas en estrella y la del secundario en delta, esta conexión se utiliza en las subestaciones receptoras para reducir el voltaje y en algunas ocasiones para la distribución rural [46].

### 3.6.2. Protecciones

Las redes de alta tensión necesitan de protecciones, las cuales permiten la limitación y prevención de las sobretensiones de la red, para ello se implementan diferentes medios y métodos como instalación de pararrayo, de pantallas, cierre controlado de interruptores, diseño de puesta a tierra, entre otras [47].

Existen dos tipos de protecciones: contra sobrevoltaje y sobrecorriente.

#### 3.6.2.1. Protección contra sobrevoltajes

Los sobrevoltajes o sobretensiones básicamente pueden ser de dos tipos:

- 1) Tensiones de origen externo o atmosférico.
- 2) Tensiones de origen interno.

#### Tensiones de origen atmosférico

Si los conductores de un circuito eléctrico de mayor voltaje se ponen en contacto con otro de menor voltaje, el mismo potencial aparecerá sobre ambos circuitos en el punto de contacto, si el circuito de menor voltaje no cuenta con un aterrizaje, este incrementara su potencial o podrá ocasionar una chispa. Pero si las líneas de menor tensión presentan un aterrizaje, grandes valores de corriente fluirán desde el sistema de mayor voltaje [48].

Teniendo en cuenta que las sobretensiones más comunes las originan los rayos, el dispositivo más utilizado para combatirlos es el pararrayo.

#### Pararrayo

El pararrayo es un dispositivo diseñado para proteger a los demás elementos de la red en contra de los rayos directos que podrían caer sobre estos. Tiene como objetivo principal asegurar las estructuras y / o a las personas que laboran en una estación o subestación reduciendo de forma significativa el riesgo de daño que este podría causar [48].

Como fenómeno eléctrico, el rayo puede presentar las mismas consecuencias que cualquier otra corriente que circule por un conductor eléctrico. El pararrayo esta compuesto por una o más puntas captadoras con un eje sobre el cual se soporta el sistema de conexión para el conductor de bajada. Sus inicios de implementación fueron en los sistemas comerciales de transmisión de energía para enviar a tierra las sobretensiones atmosféricas, posteriormente con el surgimiento de tensiones de operación cada vez más elevadas, se le comenzó a emplear para dirigir hacia tierra las sobretensiones internas [48].



## **Tensiones de origen interno**

Los sobrevoltajes originados dentro de las subestaciones son causados por diferentes eventos como: Cambios en la configuración o arreglo del circuito, fallas de la línea o por tensiones inducidas por el contacto de los rayos.

Para ayudar a proteger a la subestación de las sobretensiones internas mencionadas anteriormente se cuenta con varistores de alta potencia o pararrayos debido a que este es un varistor encapsulado en un recubrimiento aislante y dotado de un conjunto de elementos mecánicos que permiten su instalación en la red eléctrica [49].

### **3.6.2.2. Protección contra sobrecorrientes**

La condición de protección es que el dispositivo actúe, cortando la corriente de cortocircuito, antes de que la instalación resulte dañada por efecto térmico o electrodinámico

Para la protección contra los cortocircuitos se utilizan principalmente interruptores automáticos, fusibles y relés.

#### **Interruptor automático:**

El interruptor automático debe cortar la corriente de cortocircuito en un tiempo inferior a aquel que hace tomar al conductor una temperatura superior a su temperatura límite. Así en el cortocircuito el conductor no llegará a la temperatura máxima admisible. La intensidad de cortocircuito máxima debe ser menor que la intensidad que corresponde a la energía disipada admisible en el conductor [50].

#### **Fusibles:**

Los fusibles son elementos de protección que constan de alambre o cinta de una aleación de plomo y estaño con un bajo punto de fusión que se funde cuando se excede el límite para el cual fue diseñado, interrumpiendo el circuito. [50]

las características de los fusibles son las siguientes:

- 1) Combina el elemento sensor y de interrupción en una sola unidad.
- 2) Su operación depende de la magnitud y duración de la corriente que fluye a través de él.
- 3) Es un dispositivo monofásico. Sólo el fusible de la fase dañada operará, quedando las otras fases activas.
- 4) Después de haber operado debe cambiarse, ya sea las tres fases o sólo el elemento sensor de corriente que se fundió [51].

#### **Relés**

Los relés constan de un resorte o elemento de restitución, que será el encargado de reponer la posición de los contactos si la corriente por la bobina cae por debajo de un determinado valor.

En el momento que, por incremento de la intensidad, aumenta la fuerza del campo electromagnético generado en la bobina y supere la de un muelle antagonista que tiene el aparato,

se produce el disparo (desconexión) del interruptor automático o se desenclava un sistema de relojería que produce este disparo con un cierto retraso [52].

### **3.6.3. Tablero de protección**

También conocidos como centros de carga, consisten en dos o más interruptores automáticos y circuitos eléctricos. Se instalan cerca de los centros de carga, en lugares accesibles donde la apariencia del tablero no perjudique la decoración [50].

## **3.7. Resumen generación de energía eléctrica**

Con respecto al tema estudiado en capítulo tres, se puede concluir que las diferentes formas de generar energía eléctrica en Colombia indican que las centrales hidroeléctricas ocupan el primer lugar. La materia prima de estas centrales se han visto afectadas por los cambios climáticos y por la falta del manejo adecuado, esto ha llevado a la disminución del recurso. Por esta razón se analizaron alternativas para generar energía eléctrica haciendo uso de un recurso diferente como lo es el gas natural, para ello se estudiaron equipos, dispositivos y procesos que permitieron ver la estructura de una microcentral de energía eléctrica a partir de gas natural.

# Capítulo 4

## Marco Regulatorio

Para presentar la estructura final de la microcentral es necesario tener en cuenta dos aspectos muy importantes. En primer lugar se deberá cumplir con ciertas normas otorgadas por el Ministerio de Minas y Energía, el cual delega a la CREG para que genere el marco normativo que reglamente a los usuarios y agentes en el cumplimiento de las leyes asignadas. La CREG nació en el año 1994 mediante la ley 142, por la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y la ley 143 en la cual se establece el régimen para la generación, interconexión, transmisión, distribución y comercialización de electricidad en el territorio nacional. En segundo lugar se debe contar con la reglamentación ambiental, la cual se encarga de generar la normatividad necesaria para contribuir a la conservación del medio ambiente.

En el presente capítulo se cuenta con la descripción y el análisis de las normas que deberá cumplir la microcentral para los procesos de generación de energía eléctrica a partir de gas natural.

### **4.1. Reglamentación para la conexión a un sistema de distribución.**

#### **4.1.1. Resolución 070 de 1998 (CREG) [53].**

Esta resolución establece el reglamento de distribución de energía eléctrica del Sistema Interconectado Nacional (SIN), donde su objetivo principal es definir criterios para la planeación, expansión y operación de la transmisión regional o distribución local de energía eléctrica teniendo en cuenta su eficiencia y calidad.

La resolución 070 de 1998 toma definiciones consagradas en las leyes 142 (régimen de los servicios públicos domiciliarios) y 143 (régimen de electricidad) de 1994, de las cuales son de interés las mencionadas en el anexo 1, titulado "Definiciones Marco legal".

De acuerdo con las definiciones establecidas por la resolución la microcentral de generación de energía eléctrica a partir de gas natural es una planta menor y un usuario dentro de los

requerimientos del reglamento, por tal motivo son de gran interés los capítulos 4 “Condiciones de Conexión” y el capítulo 7 “Medida”, debido a que la propuesta hace referencia a un proceso solo de generación de energía eléctrica.

#### **4.1.1.1. Condiciones de conexión**

El capítulo 4 “Condiciones de Conexión” presenta los siguientes objetivos los cuales ayudan a la calidad, confiabilidad y seguridad del servicio de energía eléctrica:

- 1) Proporcionar un conjunto de requisitos técnicos mínimos y de procedimientos para la planeación, diseño, construcción y puesta en servicio de la conexión a la red, aplicable tanto a usuario existente como futuro.
- 2) Garantizar que las normas básicas para la conexión al Sistema de transmisión Regional (STR) y/o Sistema de Distribución Local (SDL) sean las mismas para todos los usuarios.
- 3) Asegurar y establecer que todos los Operadores de Red (OR) y los usuarios cumplan con las obligaciones y normas expuestas por el reglamento.
- 4) Establecer las obligaciones de los OR y los usuarios para ejecutar los estudios necesarios con relación a las modificaciones y esfuerzos requeridos para una conexión, para modificar una existente y para suscribir contratos de conexión.

A continuación se describen los criterios técnicos de diseño y procedimiento para la conexión de generación que se encuentran en el capítulo de 4 “Condiciones de Conexión”.

#### **Criterios técnicos de diseño**

En este ítem se fijan los principios y las normas que deben ser aplicadas en los STR y/o SDL por parte de los OR y usuarios, para su óptimo funcionamiento. Dentro del criterio se encuentran los siguientes referentes como:

- 1) Obras de infraestructura, estas se deben regir bajo los criterios y normas establecidas por las autoridades.
- 2) Distorsión de las ondas, en el cual para los diferentes niveles de tensión (Nivel I (tensión nominal menor a 1(kV), Nivel II (tensión nominal entre 1 y 30(kV), Nivel III (tensión nominal entre 30 y 62(kV), Nivel IV (tensión nominal mayor a 62(kV)) se basan en la norma IEEE 519, 1992.
- 3) Niveles de corriente de falla, la capacidad de corriente de falla de los equipos que se vayan a conectar a STR y/o SDL, deben ser superior al nivel máximo de corriente de falla calculado en el punto de conexión.
- 4) Compensación de consumos de energía reactiva, en la cual se debe verificar que el equipo de control esté dimensionado de forma adecuada y no afecte el STR ni el SDL que administra el OR.

## **Procedimiento para la conexión de generación**

La norma establece que en el caso de generador, planta menor, autogenerador o cogenerador que proyecte conectarse directamente a STR y/o SDL, debe regirse bajo las normas dispuestas en la resolución 025 de 1995 y la 106 de 2006 de la CREG.

### **1) Procedimiento para la solicitudes de conexión**

Para conectarse directamente a STR y/o SDL, o modificar una conexión existente, los generadores, plantas menores, autogeneradores o cogeneradores, deberán presentar ante el OR la información relacionada expuesta en el anexo 1 (sistema de información de la red de distribución) de la resolución 070 de 1998 de la CREG específicamente el literal 1.4.

### **2) Otros requisitos para solicitar la aprobación de una conexión**

Todo generador, planta menor, autogenerador o cogenerador, en la solicitud que presente ante el OR, deberá anexar copias de las licencias, permisos, y requisitos legales aplicables al tipo de conexión que sea exigido por las autoridades competentes, contando con personal calificado como un ingeniero electricista con matrícula profesional vigente, o una firma de ingeniería especializada en el tema.

### **3) Ejecución de las obras de conexión.**

Las obras de infraestructura pueden ser realizadas por el usuario o por el OR. En el caso de las instalaciones internas son responsabilidad del usuario y deberá cumplir las condiciones técnicas que aseguren que no afecten la seguridad del STR y/o SDL, ni de otros usuarios

Las redes del uso general que se requieran para la conexión del usuario son responsabilidad del OR. No obstante, en el caso en el que el OR presente limitaciones de tipo financiero que le impida la ejecución de las obras, estas serán realizadas por el usuario.

### **4) Contrato de conexión.**

Una vez se lleven a cabo las obras de conexión de un usuario, se debe realizar un contrato de conexión con el OR el cual se rige por las resoluciones 025 de 1995 y 106 de 2006 de la CREG.

### **5) Puesta en servicio de la conexión**

Para la puesta en servicio de la conexión se llevan a cabo: pruebas, coordinación de protecciones y los requisitos para la operación y puesta en servicio.

### **6) Pruebas**

La unidad generadora debe presentar un programa de pruebas donde debe incluir como mínimo: equipos a probar, fecha prevista para la prueba, normas que la rigen, tipo, procedimientos, formato, instrumentos y criterios de aceptación de prueba para la puesta en servicio al OR, con el fin de la aprobación del sistema.

Luego de realizar dichas pruebas la unidad generadora, planta menor, autogenerador o cogenerador deben enviar un informe al OR donde se incluya los protocolos de las prue-

bas efectuadas a los equipos y los resultados obtenidos en ella, debidamente certificados únicamente por un ingeniero electricista con matricula profesional vigente. Las pruebas deben coordinarse con el centro de control respectivo.

## 7) **Coordinación de protecciones**

Tanto los generadores, plantas menores, autogeneradores o cogeneradores como el OR están en la obligación de cumplir con las siguientes disposiciones, las cuales deberán ser consideradas durante la puesta en servicio y en la fase de operación:

El esquema de protecciones eléctricas asociado a las unidades generadoras conectadas directamente al STR y/o SDL, debe coordinarse con las protecciones del STR y/o SDL en la siguiente forma:

- 1) Las protecciones de las unidades de generación conectadas directamente al STR y/o SDL, deben cumplir con los tiempos de despeje fijados para fallas en el respectivo Sistema.
- 2) El ajuste de la(s) protección(es) eléctricas o los valores de operación no deben ser cambiados sin la autorización expresa del OR.
- 3) Para la protección de la unidad generadora, será necesario coordinar cualquier política de recierre especificada por el OR.
- 4) Las protecciones eléctricas de una unidad generadora, deberán actuar cuando se presente sobrecargas de secuencia negativa la cual crea una onda de flujo magnético que gira en oposición al rotor del generador.
- 5) Las protecciones eléctricas de las unidades generadoras deberán estar ajustadas para situaciones de deslastre automático de carga por baja frecuencia y/o baja tensión.
- 6) Toda unidad generadora deberá poseer un equipo de protección que la desconecte de la red del OR, en el momento en que se produzca una apertura por maniobra automática o manual del interruptor del circuito del STR y/o SDL.
- 7) La unidad generadora deberá contar con un sistema de detección de tensión a fin de no permitir el cierre del interruptor de interconexión cuando el circuito del OR esté desenergizado.

Los estudios y la coordinación de todas las protecciones eléctricas son responsabilidad del propietario de la unidad generadora que se conecte.

## 8) **Requisitos para la Operación y Puesta en Servicio**

Todas las unidades generadoras deben cumplir con las siguientes disposiciones:

- 1) La puesta en servicio de una unidad generadora no debe producir sobrecargas en los elementos de la red.
- 2) El operador de la unidad generadora será exclusivamente responsable por la sincronización de su unidad o subestación de potencia en el momento de su entrada en operación.
- 3) Una unidad de generación debe operar dentro del rango de frecuencia del SIN y no debe deformar las ondas de tensión y corriente del STR y/o SDL.

- 4) El proceso de entrada en operación de una unidad generadora deberá coordinarse con el centro de control correspondiente.
- 5) El control de voltaje de la unidad generadora se hará en coordinación con el respectivo centro de control

#### **4.1.1.2. Medida**

En esta subsección se tiene en cuenta las características técnicas, revisión, acceso, pruebas, registro y sellado de los equipos que se utilizan para la medida.

##### **Fronteras comerciales**

Para garantizar la seguridad de la instalación en conjunto con los aspectos económicos, es de gran importancia la implementación de un equipo de medida ubicado lo más cerca posible a un punto de conexión.

Cuando un usuario se conecta al sistema del OR debe conectar su equipo de medida en el nivel de alta tensión del transformador perteneciendo al nivel establecido, como consecuencia de ello el usuario debe encargarse del mantenimiento, instalaciones del transformador y equipos de desconexión en el lado de baja tensión.

##### **Características técnicas de los equipos de medida**

Dependiendo de la conexión de la red, los medidores podrán ser monofásicos, bifásicos o trifásicos

##### **1) Aplicación de las características técnicas de los equipos de medida**

Tomando como referencia lo expuesto en el Artículo 3 de la resolución 199 de 1997 de la CREG, la cual tiene como requisito indispensable la instalación de un equipo de medición para poder acceder al mercado competitivo de la compra y venta de energía eléctrica, de modo que permita determinar la energía transada hora a hora basándose en los requisitos del código de medida de la resolución 038 del 2014 de la CREG.

##### **2) Acceso a los equipos de medida**

La lectura de los medidores la puede efectuar tanto el OR como el usuario.

##### **3) Registro, pruebas y sellado de los equipos de medida**

###### **Procedimiento de registro**

El equipo de medida adquirido por el usuario debe presentar las siguientes características: nombre del fabricante, ficha técnica y número de serie.

###### **Pruebas de los equipos de medida**

Al momento de instalar un equipo de medida en el punto de medición dicho equipo deberá ser revisado, calibrado y programado por el comercializador o un tercero debidamente acreditado ante la autoridad nacional competente.

## **Sellado de los equipos de medida**

Los equipos de medida deberán contar con seguridad y protecciones contra interrupciones no autorizadas o inadvertidas, para ello deben tener sellos o sistemas similares que detecten interferencias en el equipo.

### **4) Revisiones de los equipos de medida**

El Comercializador puede realizar pruebas rutinarias para verificar el estado del equipo de medida, ya sea por iniciativa propia, o por petición del OR o del usuario.

En caso de fallas presentes en el equipo el usuario cuenta con siete (7) días hábiles no superior a treinta (30) días hábiles para la reparación o sustitución del mismo. Si el usuario solicita revisión y el equipo se encuentra en perfecto funcionamiento, este deberá cubrir los gastos del comercializador.

### **4.1.2. Resolución 106 de 2006 (CREG) [54].**

La resolución 106 de 2006 de la CREG, contiene los procedimientos generales para la asignación de puntos de conexión de generadores a los STN, STR o SDL.

Dicha resolución presenta aspectos de interés para los generadores los cuales deberán cumplir el proceso de conexión establecido en el anexo “ Procedimientos de asignación de puntos de conexión al STN, STR o SDL” del reglamento en gestión, además deberán realizar el contrato de conexión establecido en la resolución 025 de 1995 de la CREG con el cual se inicia el proceso de conexión y se termina con la puesta en servicio.

El contrato de conexión debe establecer los aspectos operacionales del sistema en condiciones normales y de emergencia, también las responsabilidades, condiciones técnicas de la operación y mantenimiento programado y correctivo, al igual que los derechos y condiciones de acceso a la instalación, entre otras.

## **4.2. Reglamentación ambiental**

En la actualidad el tema ambiental es de gran interés ya que se está enfocando a la población, empresas e industrias al cuidado y conservación del medio ambiente. Razón por la cual se estudian leyes y normas que contribuyan con el cuidado del mismo.

### **4.2.1. Sistema de gestión ambiental NTC ISO 14001 [55].**

Existen diversas normas que ayudan a evaluar sistemas de gestión ambiental, una de las más importantes es la norma técnica colombiana NTC ISO 14001:2004, la cual se encarga de definir los requisitos para que una organización identifique sus aspectos e impactos ambientales. Adicionalmente plantea objetivos para la mejora continua de sus actividades y lograr



la protección del medio ambiente, definiendo políticas ambientales y buscando generar mayor responsabilidad del hombre con el medio.

Para el proyecto a desarrollar bajo la aplicación de la norma NTC ISO14001:2004 se deben considerar requisitos legales aplicables a la gestión de residuos sólidos y líquidos peligrosos y a la gestión de emisiones atmosféricas. Desde la obra civil, montaje, puesta en marcha, calibración, operación y mantenimiento de la microcentral es necesario establecer una matriz de requisitos legales ambientales y definir los protocolos y controles operativos necesarios para garantizar la minimización de los impactos ambientales asociados a la actividad y proteger el ambiente.

## **4.2.2. Contaminación auditiva**

En Colombia existen normas que establecen límites en el nivel de ruido, Además se establece el tiempo máximo al que una persona puede someterse a un determinado nivel auditivo.

### **4.2.2.1. Límites de ruido permitidos por la reglamentación en Colombia**

La resolución 9321 de 1983 expedida por el Ministerio de Salud en la cual se dictan normas sobre Protección y conservación de la Audición de la Salud y el bienestar de las personas, a causa de la producción y emisión de ruidos y la resolución 1792 de 1990 expedida por el Ministerio de Salud, Trabajo y Seguridad Social en la cual se adoptan valores límites permisibles para la exposición ocupacional al ruido, son las encargadas de limitar los niveles auditivos permitidos en Colombia.

En la Tabla 4.1 se establecen los valores máximos de exposición a un nivel determinado de ruido.

Tabla 4.1: Nivel de ruido maximo nacional [56].

Exposición diaria (horas)	Nivel de ruido dBA
8	90
7-6	92
5-4	95
3	97
2	100
1	102
1/2	105
1/4	110
1/8	115

#### 4.2.2.2. Límites de ruido permitidos por la reglamentación Internacional

La normatividad internacional también ha establecido niveles auditivos expuestos por American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) resumidos en la Tabla 4.2

Tabla 4.2: Nivel de ruido maximo internacional [57].

Exposición diaria (horas)	Nivel de ruido dBA
24	80
16	82
8	85
4	88
2	91
1	94
1/2	97
1/4	100

### 4.2.3. Protocolo de Kioto (Ministerio del Medio Ambiente)

El protocolo de Kioto es un tratado internacional que se encuentra inscrito dentro del Convenio del Marco de la ONU que busca como objetivo principal la disminución de los gases del efecto de invernadero como el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxido nítrico (N<sub>2</sub>O), hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>). Por esta razón los países que participan en el proyecto se encargan de aprobar y utilizar prácticas adecuadas para la reducción de emisiones, una forma de llevarlo a cabo es utilizar estrategias para abordar problemas de las emisiones y cooperar para la preparación de los efectos del cambio climático. El protocolo de Kioto establece de forma obligatoria a los países desarrollados a presentar reducciones cuantificadas de emisiones de gases de efecto invernadero.

Para el inicio del proyecto a cada país participante se le exigió una disminución del 5% de los gases de efecto invernadero, teniendo en cuenta también las diferentes condiciones de cada nación. Colombia es un país que cuenta con una posición diferente en la negociación del protocolo de Kioto en comparación con un país desarrollado, este se debe encargar de apoyar el objetivo de la Convención, reafirmar el principio de responsabilidad común, y promover objetivos flexibles y de largo plazo de reducción de emisiones, entre otros.

### **4.3. Cargo por confiabilidad**

De acuerdo con la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), se define el Cargo por Confiabilidad como un mecanismo de mercado donde su objetivo es garantizar el suministro de energía contando con un ingreso o un pago fijo para los generadores en el caso de que la fuente de generación escasee. Este método se establece para evitar la fluctuación de los precios en la energía eléctrica generada, motivo por el cual la retribución que se les otorga a los generadores de energía eléctrica motiva el proceso de generación el cual es realizado por diferentes plantas capaces de atender la demanda energética.

Las empresas generadoras de energía eléctrica cuentan con el dinero de retribución que les otorga el cargo por confiabilidad una vez sus fuentes hídricas, en el caso de hidroeléctricas, disminuyan su caudal a causa de fenómenos naturales o como consecuencia de cualquier otro desastre. En el caso de las centrales térmicas esta retribución solo se hará en el momento que escasee el combustible fósil. En el año 2006 la CREG, expidió la resolución 071 en la cual se reglamentó la metodología para la remuneración del llamado Cargo por Confiabilidad. Este concepto hace alusión a la retribución que en condiciones de abastecimiento crítico concede a los generadores de energía eléctrica del sector mayorista la viabilidad en los recursos de dicha inversión, lo que permite establecer una demanda continua del producto [58].

En el mismo contexto regulatorio, se aportó el concepto de “Precio de Escasez” el cual es un valor definido y actualizado mensualmente por la CREG que determina el nivel del precio de bolsa a partir del cual se hacen exigibles las Obligaciones de Energía Firme, y constituye el precio máximo al que se remunera esta energía [59].

El criterio de aplicación de la remuneración del Cargo por Confiabilidad, en Colombia, tal como ha sido concebido en la resolución 071 de 2006 de la CREG y el documento 077 de 2014 de la misma entidad [60], requiere de la existencia de la condición de abastecimiento crítico, la cual tiene origen en razones de tipo económico o relacionadas con la escasez de recursos naturales. Esta situación, presenta como consecuencia que el precio de bolsa supera, al menos durante una hora del día, al Precio de Escasez, reflejando así una situación crítica de abastecimiento de electricidad [60].

#### **4.3.1. Relación del cargo por confiabilidad con la viabilidad del proyecto**

La condición de abastecimiento crítico es por su naturaleza una situación de contingencia. Es decir, que está sujeta a la posibilidad de que la condición ocurra o no ocurra [61]. Dentro de las técnicas disponibles en la formulación y evaluación de proyectos, las contingencias responden al tratamiento contable de situaciones de incertidumbre [62]. Su consideración en un proyecto se concreta en la construcción de escenarios con probabilidades de ocurrencia, dando como resultado una probable viabilidad por contingencia. Posteriormente, estos escenarios se consideran en los estudios económicos, ambientales y sociales de los proyectos, donde en la mayoría de los casos, el cálculo de los costos de oportunidad y de riesgo equiparan los beneficios obtenidos por los subsidios.

A través de la revisión del Marco Regulatorio, fue posible establecer que ante la eventualidad de presentarse las condiciones requeridas para la aplicación del cargo por confiabilidad, se presentaría en el análisis una situación de viabilidad por contingencia [62]. Es decir, que el proyecto sólo ganaría en viabilidad en la medida en que la situación de abastecimiento crítico se perpetuara o fuera relativamente constante en el Departamento del Cauca, lo cual es improbable o muy difícil de llevar a una prospectiva confiable. Por lo anterior, y en el marco regulatorio descrito en la sección 4.3 del presente proyecto, el cargo por confiabilidad no fue considerado en los cálculos del estudio financiero. Estudios futuros de ingeniería, apoyados por las disciplinas de la Formulación y Evaluación de Proyectos y la Economía Ambiental, podrán abordar la intención de valorar escenarios de ocurrencia de las condiciones que componen los requerimientos del cargo por confiabilidad. De otro modo, también es prudente recomendar la formulación de nuevas investigaciones orientadas al contexto donde la viabilidad del proyecto sea considerada únicamente en el marco regulatorio como opción de aprovechamiento de subsidios.

#### **4.4. Resumen marco Regulatorio**

Como conclusión general del capítulo del marco Regulatorio, se pudo analizar que hay normas que rigen tanto a generadores, cogeneradores, autogeneradores y plantas menores, donde se especifican las condiciones en las que se encuentran los equipos, conexiones, obligaciones, operaciones y protecciones que se deben tener ante cualquier falla, sin olvidar los cuidados al medio ambiente.

# Capítulo 5

## Microcentral de energía eléctrica a partir de gas natural

Para la elaboración de diferentes proyectos en los que se incluyan un número de equipos o procesos considerables, es necesario llevar a cabo una medida de selección en la que se incluyan las opciones más adecuadas y recomendables al momento de implementar el proyecto, es por ello que el presente capítulo cuenta con un análisis morfológico del cual se desencadenan criterios de inclusión y exclusión que determinan el montaje final de la microcentral para la generación de energía eléctrica a partir de gas natural.

Para el proceso de generación de energía eléctrica a partir de gas natural son necesarios los elementos indicados en la sección 3.5, razón por la cual se lleva a cabo un proceso de selección de los equipos más adecuados, ya que existe una variedad de opciones para cumplir a cabalidad con el objetivo de producción de energía eléctrica. Para encontrar la solución más adecuada de todos los elementos a utilizar en la microcentral se implementó la técnica del análisis morfológico [63] con una orientación hacia los sistemas tecnológicos del proyecto. La palabra morfología viene del griego (morfos) que significa forma y es una disciplina que se encarga del estudio de la disposición de las partes de un objeto y como estos deben ajustarse para crear la solución adecuada del problema.

El análisis morfológico es un método analítico que permite generar ideas en un trabajo exploratorio, el cual se distingue por su complejidad para desarrollarlo. Este método presenta tres etapas: el análisis, la combinación y la búsqueda.

Para cumplir con la primera etapa se deben realizar una serie de pasos:

- 1) Se debe escoger el problema a resolver, situación u objeto a mejorar.
- 2) Se deben analizar los atributos, estos pueden ser partes físicas, procesos, funciones, aspectos estéticos que componen al elemento.
- 3) Analizar las variables o posibles alternativas de cada atributo.

En la segunda etapa se realizan las combinaciones posibles de cada atributo. Teniendo en cuenta lo anterior se procede a realizar la tercera etapa donde se analizan dichas combinaciones y se escoge la mejor opción [63].

Posteriormente se aplica el análisis morfológico para los equipos de la microcentral, la cual hace parte de generación distribuida y se ubica en un rango de potencia de [15 a 300](kW) [64]. Tomando como referencia el rango anterior se procede a estudiar los equipos que se encuentren dentro de las potencias de salida entre [100 – 250] (kW), ya que presentan un buen nivel de potencia al momento de generar energía eléctrica.

Para llevar a cabo el proceso de generación de energía eléctrica a partir de gas natural se utilizan las siguientes tecnologías.

Tabla 5.1: Tipos de tecnologías de generación de energía eléctrica con gas natural [65].

Tecnología	Tamaño típico disponible
Turbinas a Gas de Ciclo Combinado	35-400(MW)
Motores de Combustión Interna	5(kW)-10(MW)
Turbinas de combustión	1-250(MW)
Microturbinas	35(kW)-1(MW)

Según lo observado en la Tabla 5.1 las turbinas a gas de ciclo combinado y las turbinas de combustión, presentan una potencia de salida de [35 - 400] (MW) y [1 -250] (MW) respectivamente, por tal razón no se incluirán en el estudio.

## 5.1. Criterios de inclusión

Según lo analizado en los capítulos anteriores, una microcentral para generación de energía eléctrica en el rango de los 100 a los 250( kW) a partir de gas natural, puede estar basado en uno de los dos sistemas: motores de combustión interna o microturbinas, de igual modo debe contar con equipos que presenten una puesta a tierra y sus respectivas protecciones como lo indica el reglamento 070 de 1998 de la CREG [53].

A continuación se listan los atributos para cada alternativa.

### 5.1.1. Microcentral con motores de combustión interna

Los elementos a utilizar para la microcentral son los siguientes:

- 1) Compresor

- 2) Motor de Combustión Interna
- 3) Intercambiador de Calor
- 4) Generador Eléctrico
- 5) Transformador
- 6) Elemento de Medida

### **5.1.2. Microcentral con microturbinas**

La microcentral esta conformada por los siguientes componentes:

- 1) Compresor
- 2) Microturbina
- 3) Intercambiador de Calor (recuperador)
- 4) Cámara de Combustion
- 5) Generador Eléctrico
- 6) Transformador
- 7) Elemento de Medida

## **5.2. Criterios de exclusión**

En los criterios de exclusión se estudian las diferentes posibilidades de equipos a utilizar en las alternativas mencionadas anteriormente para la creación de la microcentral de generación de energía eléctrica a partir de gas natural.

A continuacion se analizan los atributos para cada alternativa

### **5.2.1. Microcentral con motores de combustión interna**

Para cumplir a cabalidad con los requerimientos de potencia, se analizaron los elementos de manera individual, este estudio dió como resultado para el proceso de generación una opción compacta que incluye compresor, intercambiador de calor, generador eléctrico y motor de combustión interna. Los demas componentes como el transformador y el elemento de medida si presentaron mas opciones de forma individual.

En primera instancia se analizó solo el proceso de generación de energía eléctrica a partir de gas natural, para ello se encontraron las siguientes opciones:

- 1) **Motor de combustión interna modelo G3306:** Este motor perteneciente a la empresa CARTERPILLAR presenta las siguientes características (Ver anexo B, literal B.1), de las



cuales se seleccionaron las más relevantes para hacer su respectivo análisis indicadas en la Tabla 5.3.

Tabla 5.2: Características técnicas G3306 [66].

Potencia de salida (kW)	100
Potencia de salida (kVA)	125
Máxima eficiencia eléctrica	31.9 %
Frecuencia	50 o 60 (Hz)
Revoluciones por minuto(RPM)	1500 – 1800
Voltaje del generador	480 (V)
Fases del generador	3
Temperatura de gases	582°C

- 2) **Motor de combustión interna modelo G3406:** De igual modo que el modelo anterior, este es fabricado por la empresa CARTERPILLAR.

Tabla 5.3: Características técnicas G3406 [66].

Potencia de salida (kW)	150
Potencia de salida (kVA)	188
Máxima eficiencia eléctrica	37.3 %
Frecuencia	60 (Hz)
Revoluciones por minuto(RPM)	1800
Voltaje del generador	480 (V)
Fases del generador	3
Temperatura de gases	627°C

En segunda instancia se realizó la búsqueda de equipos que se encargarán del proceso de la transformación del voltaje entregado por el generador para elevarlo a 13200 (V) y llevarlo finalmente a la red eléctrica.

Para seleccionar el transformador adecuado se tienen en cuenta dos características, el número de fases del generador y la potencia de salida. De acuerdo a lo anterior se obtuvieron los siguientes resultados:

- 1) Transformador Trifásico serie 15(kV)

En las Tablas 5.3, 5.4 y 5.5 se evidencian las características mas significativas de dichos elemento. Para ampliar la información ver anexo B.

Tabla 5.4: Características generales del transformador Trifásico 150 (kVA)] [67].

Potencia Nominal	150 (kVA)
Voltaje primario	13200 (V)
Voltaje secundario en vacío	440 Y/254 (V)
Número de fases	3
Frecuencia	60 Hz

Tabla 5.5: Características generales del transformador Trifásico 112.5 (kVA)] [67].

Potencia Nominal	112.5 (kVA)
Voltaje primario	13200 (V)
Voltaje secundario en vacío	440 Y/254 (V)
Número de fases	3
Frecuencia	60 Hz

Tabla 5.6: Características generales del transformador Trifásico 225 (kVA)] [67].

Potencia Nominal	225 (kVA)
Voltaje primario	13200 (V)
Voltaje secundario en vacío	440 Y/254 (V)
Número de fases	3
Frecuencia	60 Hz

En tercera y ultima instancia se estudia el elemento de medida el cual se encargará de contabilizar la cantidad de energía generada por la microcentral.

Enseguida se listan los elementos de medida en los cuales se exponen algunos atributos que permiten un estudio adecuado:

- 1) Contador multifuncional Alfa 1800

Tabla 5.7: Características técnicas contador multifuncional A 1800 (Ver anexo B) [68].

Precisión	Energía Activa 0.2 % (IEC 62053-22) 0.5 % (IEC 62053-22) 1.0 % (IEC 62053-21)	Energia Reactiva 2.0 % (IEC 62053-23) La precisión actual es mejor al 0.5 %
Corriente nominal	1-10 (A)	5-120 (A)
Frecuencia nominal	50-60 (Hz)	

2) Medidor polifásicos Alfa 2

Tabla 5.8: Características técnicas medidor polifásicos Alfa 2 (Ver anexo B) [68].

precisión	Energía Activa	Energía Reactiva
	0.2 % (IEC 62053-22)	2.0 % (IEC 62053-23)
	0.5 % (IEC 62053-22)	
	1.0 % (IEC 62053-21)	
Corriente nominal	1-6(A)	15-120(A)
Frecuencia nominal	50-60 (Hz)	

3) Contador de energía eléctrica trifásico EPQS

Tabla 5.9: Características técnicas del contador EPQS (Ver anexo B) [68].

Precisión	Energía Activa	Energía Reactiva
	0.2 % (IEC 62053-22)	2.0 % (IEC 62053-23)
	0.5 % (IEC 62053-22)	
	1.0 % (IEC 62053-21)	
Corriente nominal	1-6(A)	20-120(A)
Frecuencia nominal	50 o 60 (Hz)	

### 5.2.2. Microcentral con microturbinas

Al aplicar el análisis morfológico donde se analizan las posibilidades que hay para cada elemento, no se encontraron turbinas a gas en el rango de [100-250](kW) ya que éstas son de gran tamaño, lo que llevo a la búsqueda de elementos que cumplan a cabalidad con el rango de potencia, las cuales dieron como resultado microturbinas que son elementos compactos.

Como primera medida para el proceso de generación, se escogieron dos opciones que se encuentran dentro del rango de potencia indicado como son: La Capstone C200 y la Turbe EA-T100.

- 1) **Microturbinas Capstone C200:** Estas microturbinas tiene un diseño compacto en el cual se incluyen elementos como el compresor, la microturbina, el intercambiador de calor, la camara de combustión y el generador eléctrico. De igual forma que se analizó la microcentral con motores de combustión interna solo se tendrán en cuentas las características mas sobresalientes de cada equipo.

Las microturbinas Capstone vienen con diseños establecidos dependiendo de la potencia de salida requerida por la central de producción de energía.

Tabla 5.10: Características técnicas microturbina capstone C200 [69].

Potencia de salida (kW)	200
Potencia de salida (kVA)	250
Máxima eficiencia eléctrica	33 %
Frecuencia	50/60 (Hz) (operación de conexión de rejilla), 10/60 (Hz) (operación independiente)
Revoluciones por minuto(RPM)	3600
Voltaje del generador	400-480 (V)
Fases del generador	3 y 4 hilos
Temperatura de gases	280°C

- 2) **Microturbina Turbec EA-T100(P)**: Es un sistema modular diseñado para generar energía y calor con alta eficiencia y bajas emisiones, además tiene varios módulos que pueden ser utilizados en un gran número de aplicaciones.

La Tabla 5.11 detalla algunas de las características técnicas.

Tabla 5.11: Características de generales de la microturbina Turbec-T100(P) [70].

Potencia de salida (kW)	100
Potencia de salida (kVA)	125
Máxima eficiencia eléctrica	30 %
Frecuencia	50/60 (Hz)
Revoluciones por minuto(RPM)	3600
Voltaje del generador	400 (V)
Fases del generador	3 y 4 hilos
Temperatura de gases	270°C

En segunda medida se estudia la manera de como elevar el voltaje de salida del generador, donde el elemento más apropiado para dicha función es el transformador. De acuerdo a las potencias de los elementos seleccionados en la microcentral con microturbinas, los tres transformadores mencionados en la subsección 5.2.1 se acoplan a las características de la microcentral en gestión.

Como última medida se encuentran los equipos encargados de realizar la medición, cuya función es la misma para cualquier alternativa de la microcentral, para ello se tienen en cuenta los contadores alfa 1800, alfa 2 y EPQS.

### 5.2.3. Combinaciones

Los equipos mencionados anteriormente hacen parte de las opciones adecuadas para la creación de una microcentral de generación de energía eléctrica a partir de gas natural.

Se toman como referencia las características principales de los equipos para llevar a cabo las combinaciones y su respectivo análisis, donde al realizar un estudio detallado de los equipos de medida, se pudo determinar que presentaban características muy similares cumpliendo con la misma funcionalidad, motivo por el cual se escogió el contador multifuncional alfa 1800 como el elemento adecuado para realizar la medición, ya que este es un producto con alta precisión y es utilizado en diversas aplicaciones.

En cuanto a las características del motor de combustión interna G3306 se presenta el siguiente análisis:

El elemento en mención presenta una eficiencia eléctrica alrededor del 31.9% y una potencia de 100(kW), valor requerido para establecer la cantidad de energía producida durante una hora.

La siguiente ecuación indica la producción energética en (kWh)

$$Produccion\ Energetica = Potencia(kW) * (Tiempo(Horas)) = (kWh)$$

Para este caso la producción energética es de 100(kWh)

Otros aspectos considerables para tener en cuenta son:

- 1) La temperatura de salida de los gases es de 582 °C, por esta razón la eficiencia eléctrica se verá afectada al no garantizar la utilización de las altas temperaturas emitidas lo que generaría una pérdida en la entrega del producto final al usuario.
- 2) La estabilidad de la corriente esta dado por el número de revoluciones por minuto del generador lo cual indica que el valor de 1800 (RPM) es bajo en comparación con las microturbinas.

Teniendo en cuenta que en la alternativa de la microcentral con motor de combustión interna se presentaron tres opciones de transformador se lleva a cabo la siguiente relación.

Transformador trifásico	Motor G3306
150 (kVA)	La potencia de salida del generador del motor es de 100 kilovatio y su equivalente en (kVA) es de 125, razón por la cual se toma un transformador de 150(kVA) lo que podría garantizar la estabilidad de la potencia que entra el transformador ya que esta no varía.
112.5 (kVA)	Tomando como referencia la potencia de salida del motor y teniendo en cuenta las pérdidas que se generan en la transformación se pueden afectar los valores de salida del transformador. En este caso el valor en kVA del transformador es menor de 125 (kVA) valor que no satisface el requerimiento de potencia.
225 (kVA)	Para este caso la potencia en kVA del transformador es demasiado alta, motivo por el cual no es atractivo para el proceso de transformación.

Algo similar ocurre con el motor G3406 debido a que presenta características similares, sin embargo existen algunas diferencias como la potencia de salida la cual es de 150 (kW) con una producción de 150 (kWh), una eficiencia de 37.3 % y una temperatura de 627 °C, valor que al no ser utilizado podría generar pérdida en la eficiencia eléctrica.

A continuación se describe la relación entre el motor G3406 y los transformadores de potencia.

Transformador trifásico	Motor G3406
150 (kVA)	Para este caso la potencia en (kVA) es de 187.5, relacionándolo con el transformador de 150 (kVA) se puede resaltar que se presenta una diferencia que no afectaría en gran dimensión la transformación.
112.5 (kVA)	Realizando la comparación entre las potencias en (kVA) tanto del generador como del transformador, se puede apreciar que el transformador no se acoplaría satisfactoriamente al requerimiento.
225 (kVA)	para esta combinación, el transformador puede resultar como una opción adecuada.

De la misma manera que se analizaron los motores de combustión interna, se procede a desarrollar el estudio detallado de las microturbinas.

La microturbina Capstone C200 tiene una eficiencia eléctrica de 33% y una potencia de salida de 200(kW), con una cantidad de energía producida en el periodo de una hora de 200 (kWh). Además presenta una buena estabilidad eléctrica debido a la alta velocidad rotacional de generador.

Por lo que se refiere a la temperatura el valor es de 280 °C lo que no presenta tanto riesgo al medio ambiente.

Para determinar cual es la mejor combinación entre la microturbina C200 y los transformadores se realiza el siguiente análisis.

Transformador trifásico	Microturbina C200
150 (kVA)	Teniendo en cuenta que la potencia de salida de la C200 es de 200 (kW) lo que representaría una potencia nominal de 250 (kVA) y que este representa uno de los requisitos más importantes al momento de seleccionar el transformador, se puede deducir que para ésta situación no se podría satisfacer correctamente la transformación del voltaje.
225 (kVA)	En el momento de hacer la transformación del voltaje utilizando ésta combinación, es posible concluir que este transformador se acopla satisfactoriamente a las características de la microturbina.

Acercas de las características de la microturbina Turbec EA-T100(P) se puede concluir que el

valor de la temperatura de salida de gases de 270 °C indica que el impacto que la generación de energía eléctrica a partir de gas natural le produce al medio es mínima lo que garantiza un mejor rendimiento del equipo analizado, de igual forma en el generador se cuenta con una velocidad rotacional de 3600 (RPM) lo que garantiza estabilidad en la corriente generada.

En vista de que la potencia de la microturbina es la misma que la del motor de combustión interna G3306 y que este valor es elemental al momento de elegir el transformador, se opta por tomar las mismas especificaciones de las combinaciones realizadas entre el motor G3306 y los transformadores seleccionados.

### 5.3. Propuesta técnica para la microcentral

Tomando como referencia las características y combinaciones realizadas previamente, es posible establecer la selección final de los equipos necesarios y específicos para la creación de la microcentral de generación de energía eléctrica a partir de gas natural.

La mejor alternativa es la microcentral con microturbinas, específicamente la combinación Capstone C200 y el transformador trifásico serie 15(kV) de potencia nominal de 225(kVA), ya que presenta un buen nivel de potencia, eficiencia y excelente estabilidad de la corriente generada por el número elevado de revoluciones del generador, características que se ven reflejadas en la cantidad de energía producida por hora. Además las emisiones generadas son bajas lo que ayuda considerablemente a la conservación y protección del medio ambiente, un aspecto muy importante al momento de la implementación de cualquier tipo de central de generación de energía eléctrica.

A continuación se listan los elementos de la propuesta técnica para la creación de una microcentral de generación de energía eléctrica a partir de gas natural.

- 1) Microturbina Capstone C200.
- 2) Transformador trifásico serie 15(kV)[225 kVA].
- 3) Elemento de Medida(Contador multifuncional Alfa 1800)

Cabe resaltar que toda microcentral de generación de energía eléctrica debe contar con elementos de protección que garanticen el buen funcionamiento y la entrega satisfactoria del producto final, para ello se cuenta con un tablero de protecciones ubicado entre el generador y el transformador el cual es diseñado por un ingeniero eléctrico, también se cuenta con un pararrayo y un fusible que dependen de los valores de los equipos seleccionados.

para determinar el valor de la protección de sobrecorriente se aplica la siguiente fórmula:

$P(VA) = [I(Amp)] * (V(Volts))$  de donde se despeja el valor de la corriente.

$$I = \frac{P}{V} = \frac{225000(VA)}{13200(V)} = 17,04(Amp)$$

Como el valor obtenido no es comercial, se cuenta con una protección de sobrecorrientes de (20) Amp.

Para la protección del parrayo a una tensión de 13200(V) se emplea un valor comercial de 12(kV).

Para llevar a cabo la propuesta técnica de la microcentral se necesitan de diferentes elementos para la construcción de la planta física, la estructura del transformador, conectores y equipos. Los elementos mencionados anteriormente se ilustran en la Figura 5.1 con su respectiva ubicación dentro de la microcentral de generación de energía eléctrica a partir de gas natural.

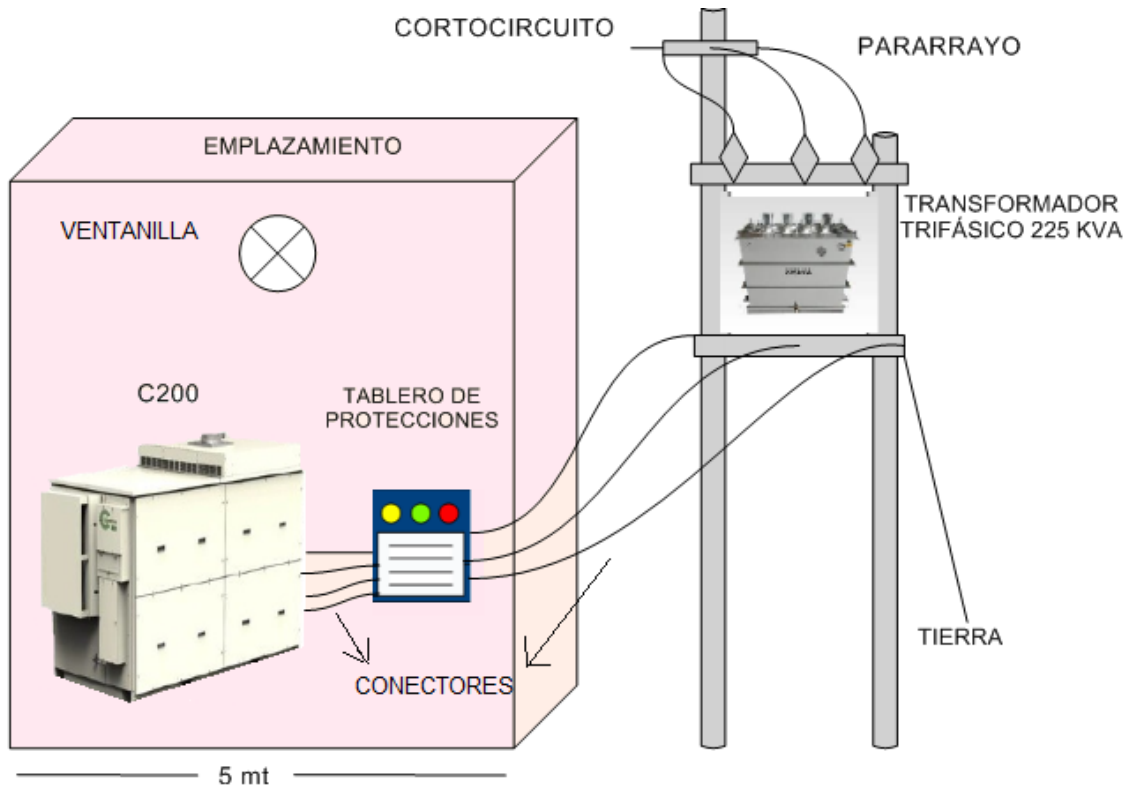


Figura 5.1: Disposición final de equipos

En cuanto al combustible a utilizar (gas natural) la empresa encargada de la distribución de la materia prima en la región del Cauca, es la empresa Alcanos de Colombia S.A E.S.P con una instalación principal en Neiva (Huila), la cual cuenta con una sede en la ciudad de Popayán (Cauca).



## **5.4. Resumen microcentral de energía eléctrica a partir de gas natural**

El análisis morfológico permitió elaborar la propuesta técnica para la creación de una microcentral de generación de energía eléctrica a partir de gas natural, ya que es el estudio más adecuado al momento de realizar procesos de selección, el cual le permite al investigador escoger los equipos y procedimientos más relevantes dentro de la investigación para cumplir a cabalidad con los requerimientos indicados de operación.

# Capítulo 6

## Estudio financiero

Para todo proyecto en donde se realice una propuesta técnica, es necesario el análisis financiero donde se deben detallar, comparar y analizar los costos para la creación del mismo, con el fin de determinar si dicha propuesta es viable. Es por esta razón que el capítulo 6 presenta un análisis detallado de los costos de creación y producción de la microcentral de generación de energía eléctrica a partir del gas natural.

Para la presentación final de la propuesta, se tienen en cuenta en el análisis financiero el lugar de emplazamiento, equipos, materiales para la construcción, mano de obra y suministro del gas natural.

Como primera medida se analiza el emplazamiento (ver Tabla 6.1), en la se detalla el precio del lote para dos zonas de la ciudad de Popayán. Dicho emplazamiento, el cual debido a las dimensiones de la microturbina se necesita un lugar con 5 metros de largo, 5 de ancho y con una altura de 6 metros para la instalación de la Capstone C200 y el tablero de protecciones.

Tabla 6.1: Lugar de emplazamiento

<b>Emplazamiento</b>	
<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>
Lote sin construcción (Zona Norte)	\$30.000.000
Lote sin construcción (Zona Sur)	\$15.000.000

En la Tabla 6.2, se listan los elementos que son necesarios para llevar a cabo la construcción de la planta física del emplazamiento con sus respectivos precios.

Tabla 6.2: Materiales para la construcción de la planta física

<b>Construcción planta física</b>	
<b>Edificio(emplazamiento)</b>	<b>Valor</b>
Explanación del lugar (7) x (7)	\$ 350.000
Zapatas (m <sup>2</sup> ) + excavación	\$ 460.000
Columnas [(25) x (25) x (6)] mt = (24) mt lineales	\$ 1.920.000
Viga carga de amarre = (60) mt lineales	\$ 4.800.000
Columnetas (12) cm x 6 (mt) = 30 (mt) lineales	\$ 1.260.000
Loza interior [(5) x (5) x(30)] cm de espesor	\$ 3.825.000
Anden exterior (1) mt de ancho x (24) mt lineales	\$ 1.632.000
Loza techo, perlines, bloquelon (7)x (7) mt <sup>2</sup>	\$ 6.272.000
Levantamiento de muros en ladrillo + sogá (120 mt)	\$ 5.040.000
Ventana de ventilación (60) cm de ancho x (8) mt de largo	\$ 840.000
Portón tipo reja (3) mt de ancho x (2.50) mt de alto	\$ 2.175.000
Instalación eléctrica recinto (extractor 25 pulgadas, 4 lámparas de 125 (W), 3 tomas dobles, tablero)	\$ 1.080.000
<b>Total + IVA incluido + mano de obra</b>	<b>\$ 29.654.000</b>

En segunda instancia se realiza la cotización de la acometida del gas natural. (Ver anexo D). Donde la Tabla 6.3 indica el valor del precio del gas natural por metro cúbico de acuerdo al consumo y la Tabla 6.4 se especifica el costo de la instalación del gas natural.

Tabla 6.3: Valor del precio del gas por m<sup>3</sup>

<b>Precio del gas natural</b>	
<b>Metros<sup>3</sup></b>	<b>Valor(pesos)</b>
0-1.000	1.505,36
1.000-10.000	1.426,72
10.000-30.000	1.407,62
mayor de 30.000	1.329,45

Tabla 6.4: Valor de la acometida del gas natural

<b>Acometida gas natural</b>		
<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
Medidor American Metter AL-1000, válvula de bola, sistema de filtración, regulación, tubería, accesorios y manómetro.	1	\$ 8.331.206
Mano de obra no incluida		
<b>Total</b>		<b>\$ 8.331.206</b>

En tercera y última instancia se requieren los precios de los equipos que se necesitan en la generación de energía eléctrica a partir de gas natural. (Ver anexo 3 y 4). La Tabla 6.5 contiene el valor de la microturbina Capstone C200.

Tabla 6.5: Valor de la microturbina Capstone C200

Microturbina Capstone C200		
	Valor Dólar(USD)	Valor pesos colombianos(\$)
Microturbina C200	333.200,00	820.842.000
<b>Total</b>		<b>820.842.000</b>

La Tabla 6.6, contiene los elementos necesarios para la conexión entre el generador y el tablero de protecciones.

Tabla 6.6: Generador-tablero de protecciones

Accesorios Generador - Tablero			
Descripción	Cantidad	Vr. Unit	Vr. Total
Conector tipo pala 2/0	8	\$ 5.000	\$ 40.000
Cable cobre THW 2/0	4	\$ 20.000	\$ 80.000
Misceláneos	6L		\$ 20.000
Mano de obra y transporte			\$ 20.000
<b>Total Generador-Tablero</b>			<b>\$ 160.000</b>

El costo del diseño de tablero de protecciones se encuentra detallado en la Tabla 6.7.

Tabla 6.7: Tablero de protecciones

Tablero de protecciones (Lamina Cr 18, acabado en pintura electrostática RAL 7032)			
Descripción	Cantidad	Vr. Unit	Vr. Total
Tablero Regulable ABB 280-400			
Barraje 3F-5H para 475 Amp			
Analizador de Red			
Mano de obra y transporte			\$500.000
<b>Total del Tablero</b>			<b>\$ 5.500.000</b>

En la Tabla 6.8, se visualiza los elementos para llevar a cabo la conexión entre el tablero de protecciones y transformador.

Tabla 6.8: Tablero de protecciones - Transformador.(ver anexo F)

Accesorios del tablero - transformador			
Descripción	Cantidad	Vr. Unit	Vr. Total
Conector tipo pala para 2/0	8	\$ 5.000	\$ 40.000
Cable cobre THW 2/0	40	\$ 20.000	\$ 800.000
Misceláneos	6L		\$ 20.000
Mano de obra y transporte			\$ 50.000
<b>Total Tablero</b>			<b>\$ 910.000</b>

En las Tablas 6.9 y 6.10, se detallan los materiales para construcción de la estructura del transformador y el costo del transformador trifásico 225 (kVA) respectivamente.

Tabla 6.9: Estructura Transformador

Estructura del transformador			
Descripción	Cantidad	Vr. Unit	Vr. Total
Poste de concreto 12 MTS *750 KG	2	\$ 750.000	\$ 1.500.000
Crucetas metálicas de 2.40 MTS	2	\$ 150.000	\$ 300.000
Diagonal recta de 1.10 MTS	4	\$ 18.000	\$ 72.000
Collarín Doble de 6-7	4	\$ 18.000	\$ 72.000
Cable retenida de 1/4 -súper GR	10	\$ 1.300	\$ 13.000
Aterrizaje completo	1	\$ 1.200.000	\$ 1.200.000
Mano de obra y transporte			\$ 1.000.000
<b>Total estructura para transformador</b>			<b>\$ 4.157.000</b>

Tabla 6.10: Transformador trifásico serie 15(kV) fabricados por ABB.(ver anexo 4)

Transformador trifásico		
Descripción	Porcentaje	Vr. Total
Transformador Trifásico 225(kVA)		\$ 26.655.000
Descuento	4 %	\$ 1.066.200
IVA	16 %	\$ 4.264.800
<b>Total Transformador</b>		<b>\$ 31.986.000</b>

Dado que toda red necesita de protecciones, la Tabla 6.11 describe el costo del pararrayo y el fusible.

Tabla 6.11: Protecciones pararrayo y fusible.Ver (anexo F)

Protecciones	
Descripción	Vr. Total
Pararrayo de 12 (kV)	\$ 95.000
Fusible de (17-20 Amp)	\$ 8.000
<b>Total de pararrayo y fusible</b>	<b>\$ 103.000</b>

Por ultimo el costo del contador de multifuncional se encuentra detallado en la Tabla 6.12.

Tabla 6.12: Contador multifuncional

Medidor	
Descripción	Vr. Total
Contador Multifuncional	\$ 2.000.000
<b>Total contador multifuncional</b>	<b>\$ 2.000.000</b>

Una vez se tienen los valores monetarios de los equipos a utilizar y del lugar, se realiza la sumatoria general de la inversión de la planta física para la microcentral, para ello se tiene en cuenta dos zonas en la ciudad de Popayán.

Las Tablas 6.13 y 6.14 muestran la inversión inicial de la microcentral para la zona norte y zona sur respectivamente.

Tabla 6.13: Inversión microcentral Zona Norte

<b>Microcentral zona norte</b>	
<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>
Lote	\$ 30.000.000
Emplazamiento	\$ 29.654.000
Acometida	\$ 8.331.206
Microturbina Capstone C200	\$ 820.842.000
Generador-Tablero	\$ 5.500.000
Tablero -Transformador	\$ 910.000
Estructura Transformador	\$ 4.157.000
Transformador trifásico serie 15(kV)	\$ 31.986.000
Protecciones	\$ 103.000
Contador Multifuncional	\$ 2.000.000
<b>Total</b>	<b>\$ 933.483.206</b>

Tabla 6.14: Inversión microcentral zona Sur

<b>Microcentral zona sur</b>	
<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>
Lote	\$ 15.000.000
Emplazamiento	\$ 29.654.000
Acometida	\$ 8.331.206
Microturbina Capstone C200	\$ 820.842.000
Generador-Tablero	\$ 5.500.000
Tablero -Transformador	\$ 910.000
Estructura Transformador	\$ 4.157.000
Transformador trifásico serie 15(kV)	\$ 31.986.000
Protecciones	\$ 103.000
Contador Multifuncional	\$ 2.000.000
<b>Total</b>	<b>\$ 918.483.206</b>

La inversión inicial de la planta para la microcentral de generación de energía eléctrica a partir de Gas Natural en la ciudad de Popayán en la zona Norte, es de novecientos treinta y tres millones cuatrocientos ochenta y tres mil doscientos seis pesos (\$ 933.483.206) y para la zona Sur es de novecientos dieciocho millones cuatrocientos ochenta y tres mil doscientos seis pesos (\$ 918.483.206).

# 6.1. Análisis de costos de producción para la generación de energía eléctrica

Dentro del proceso del análisis financiero para la propuesta de la creación de una microcentral de generación de energía eléctrica, es necesario presentar los costos de producción del (kWh) para realizar un estudio más detallado del tiempo empleado para recuperar la inversión inicial que se hace de la planta. Por tal motivo se llevan a cabo los cálculos de la potencia real generada de la microturbina en la ciudad de Popayán contando con las características ambientales del lugar seleccionado.

La eficiencia y producción de energía eléctrica varían según las condiciones ambientales de temperatura y presión del aire del lugar del emplazamiento [71], por ello se realizará el estudio correspondiente para determinar cuál es la potencia generada en la ciudad de Popayán ubicada en el Departamento del Cauca.

El dato de temperatura de la Ciudad de Popayán (Cauca) es de 19°C (66.20°F)

En la Figura 6.1 se toman tres variables entre las cuales se encuentran, en el eje X la temperatura ambiente en °F , en el eje Y se encuentran la potencia en (kW) y la eficiencia en %.

Para el primer análisis de las anteriores variables, son de interés la temperatura ambiente y la eficiencia, en la cual se determina el valor de la eficiencia eléctrica para la temperatura correspondiente a la ciudad de Popayán. Para dicho valor de 66.20°F se presenta una eficiencia de aproximadamente 33 %.

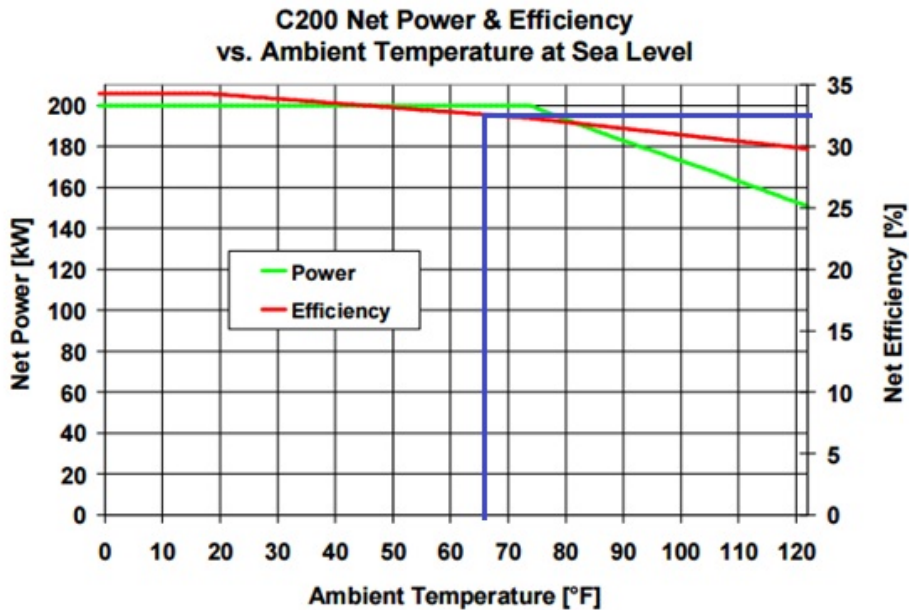


Figura 6.1: Eficiencia vs temperatura ambiente Tomado de: Capstone Corporation [69].

Para el segundo análisis se relacionan las variables de temperatura ambiente y potencia, las cuales indican que la microturbina Capstone C200 para la temperatura de 19°C (66.20°F),

conserva el mismo valor de potencia de 200(kW) expuesto en la ficha técnica de Capstone Turbine Corporation como se muestra en la Figura 6.2.

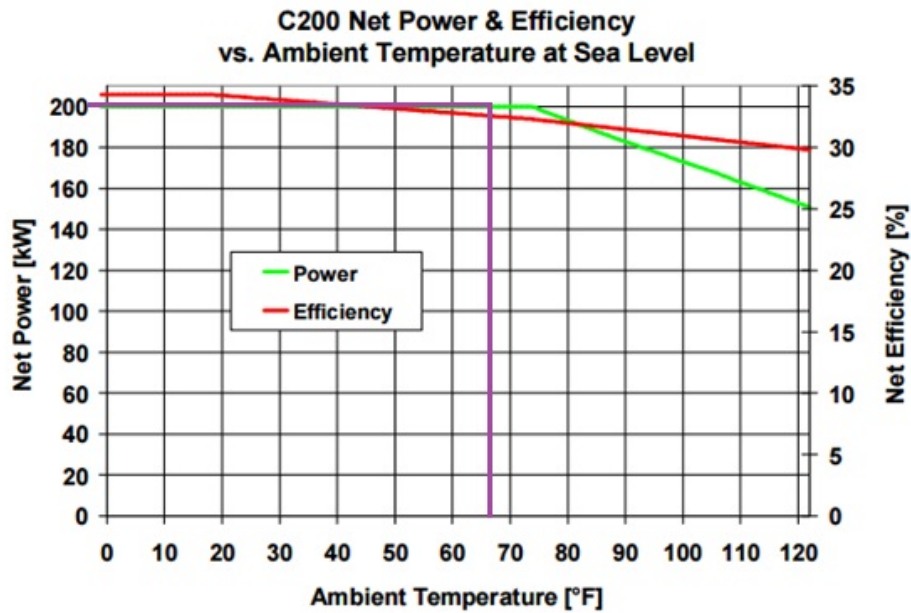


Figura 6.2: Potencia vs temperatura ambiente.

### 6.1.1. Costo (kWh) generado por la microturbina C200

Para el cálculo del costo de la cantidad de energía generada durante una hora se utiliza la siguiente formula.

$$\text{Costo (kWh) Capstone C200} = \left( \frac{\text{Consumo } m^3 \text{ de } \left(\frac{\text{gas}}{\text{hora}}\right) * \text{Costo del } m^3 \text{ de gas}}{\text{Energía eléctrica generada por hora}} \right)$$

De acuerdo con la formula anterior se necesitan los valores del consumo de gas natural de la microturbina C200, el costo del gas y la cantidad de energía producida. Para ello es de gran importancia determinar dichos valores para su respectivo análisis.

### 6.1.2. Consumo de gas m<sup>3</sup> de la microturbina Capstone C200

$$\text{Gas consumido por Capstone C200} = \left( \frac{\text{Energía del flujo del combustible}}{\text{Poder calorífico del gas utilizado}} \right)$$

El dato de la energía del flujo del combustible de la Capstone C200 es de 2,400 (MJ/hr) o 2,280,000 (BTU/hr), valor que se encuentra en el anexo B titulado características técnicas



de los equipos, y el poder calorífico del gas utilizado en el Cauca, es de 1.144.7161 (MBTU/KPC). (Ver anexo B.9) Como el consumo del gas natural en la microturbina Capstone C200 está dado por las unidades de (m<sup>3</sup>/hr) es necesario realizar las respectivas conversiones.

$$1 \text{ PC} = 0.02831685(\text{m}^3)$$

$$1 \text{ BTU} = 1055,1 \text{ J}$$

$$\text{Poder calorifico del Gas Natural Alcanos} = 1144.7161(\text{MBTU}/\text{KPC}) = 1144716.1(\text{BTU}/\text{KPC})$$

Ahora remplazando en la formula anterior se tiene:

$$\text{Gas consumido por Capstone C200} = \left( \frac{2,280,000(\frac{\text{BTU}}{\text{hr}})}{1144716,1(\frac{\text{BTU}}{\text{KPC}})} \right)$$

$$\text{Gas consumido por Capstone C200} = 1,991760228 \left( \frac{\text{KPC}}{\text{hr}} \right) = 1991,760228 \left( \frac{\text{PC}}{\text{hr}} \right)$$

$$\text{Gas consumido por Capstone C200} = \frac{1991,760228(\frac{\text{PC}}{\text{hr}})}{35,315(\frac{\text{PC}}{\text{m}^3})} = 56,40 \left( \frac{\text{m}^3}{\text{hr}} \right)$$

El valor del gas consumido por la microturbina C200 es de 56,4003( $\frac{\text{m}^3}{\text{hr}}$ ).

El valor consumido por la microturbina por un mes es de 40608( $\frac{\text{m}^3}{\text{mes}}$ )

De acuerdo con el valor del consumo de la microturbina por mes, el costo del m<sup>3</sup> del gas natural (alcanos de Colombia S.A E.S.P) correspondiente a ese valor es de \$ 1329.45 que se encuentra en la Tabla 6.3.

La cantidad de energía eléctrica producida por la C200 = 200(kWh).

Una vez se obtienen todos los datos, se procede a calcular el costo del (kWh) en la microcentral de generación de energía eléctrica a partir de gas natural.

$$\text{Costo (kWh) Capstone C200} = \frac{56,4003(\frac{\text{m}^3}{\text{hr}}) * \$ 1329,45(\frac{1}{\text{m}^3 \text{ de gas}})}{200(\text{kWh})} = \$ 374,90(\text{kWh})$$

El costo del (kWh) en la microcentral asociado únicamente al consumo del gas es de trecientos setenta y cuatro pesos con noventa centavos (\$ 374.90).

### 6.1.3. Comparación entre costos del (kWh) generado por la microturbina C200 y por empresas generadoras de energía eléctrica en el Cauca

Para los operadores de red en la ciudad de Popayán, el costo unitario de prestación del servicio de energía eléctrica se expresa en (kWh) y esta definido por la siguiente fórmula:

$$CUv = Gm + Tm + Dn + Cv + PR + Rm \quad [72].$$

Donde:

CUv: Es el resultado de la sumatoria de todos los componentes, es lo equivalente a el valor del costo unitario de prestación de servicio.

Gm: Valor pagado por la compra de la energía (Costo por generación).

Tm: Valor pagado por el uso del STN (costo de transporte).

Dn: El costo por el uso del sistema de distribución, que está compuesto por conductores, transformadores, postes y demás elementos utilizados para llevar la energía eléctrica desde el STN hasta los usuarios finales.

Cv: El valor de la comercialización de la energía eléctrica.

PR: Costo por pérdidas técnicas que se dan en el proceso de Generación y Transporte.

Rm: Los costos por restricciones y otros servicios asociados con generación.

De los componentes anteriores, es de interés el costo por generación (Gm) debido a que el trabajo de grado solo se enfoca en el proceso de producción sin considerar el transporte y distribución del producto final.

La Tabla 6.15 muestra los costos de generación de energía eléctrica de la compañía encargada de suministrar el servicio de energía eléctrica a la ciudad de Popayán en el estrato 3 y el de la microturbina C200.

Tabla 6.15: Valor de generación de energía eléctrica

	Costo(kWh)
Microcentral	\$ 374.90
Energética	\$ 158

Según los datos arrojados en la Tabla 6.15 el costo del (kWh) de la microcentral es dos (2) veces mayor que el costo de las empresas generadoras, motivo por el cual no se evidencia rentabilidad al momento del proceso de generación de energía eléctrica.

Como se puede observar al realizar los cálculos con el valor correspondiente de  $m^3$ , los costos del (kWh) producidos por la microturbina C200 son elevados lo que lleva a deducir que el costo del  $m^3$  de gas natural suministrado por la empresa Alcanos de Colombia S.A E.S.P. es alto en la ciudad de Popayán. Cabe resaltar que la microturbina Capstone C200 consume una cantidad considerable de gas durante el periodo de una hora. De las anteriores apreciaciones se concluye que la propuesta técnica y financiera para la creación de una microcentral de generación de energía eléctrica a partir de gas natural no es viable.

Sin embargo, se analizaron dos escenarios para determinar la posible viabilidad del proyecto. En primer lugar se calculó el valor del metro cúbico de gas natural a una potencia de 200(kWh) tomando el costo de generación igual a la de las empresas generadoras del Cauca, de donde se obtuvo el siguiente resultado:

$$\$158 = \frac{56,4003\left(\frac{m^3}{hr}\right) * X\left(\frac{1}{m^3 \text{ de gas}}\right)}{200(kWh)}$$

$$X\left(\frac{1}{m^3 \text{ de gas}}\right) = 560,28$$

Este valor es dos veces menor que el precio mínimo del metro cúbico de gas natural suministrado por la empresa Alcanos de Occidente S.A.S E.S.P, valor que indica que la propuesta técnica y financiera permanecería sin viabilidad ya que a este precio la empresa encargada de la distribución de gas no resulta beneficiada.

En segundo lugar se busca el consumo mínimo de gas natural que la microturbina necesitaría para mejorar su eficiencia.

$$\$158 = \frac{X * 1329,45\left(\frac{1}{m^3 \text{ de gas}}\right)}{200(kWh)}$$

$$X\left(\frac{m^3}{hr}\right) = 23,76$$

Dado lo anterior al duplicar la eficiencia de la microturbina se reduciría el consumo del gas natural de la microcentral y se haría viable el proyecto.

#### **6.1.4. Resumen estudio financiero**

En el capítulo titulado estudio financiero se determinó la viabilidad de la propuesta planteada por medio de comparaciones de precios del (kWh) generado por la microcentral y por empresas generadoras del Cauca. Además se analizó la inversión inicial donde se pudo concluir que los costos eran muy altos para no obtener beneficios financieros.

# Capítulo 7

## Conclusiones y trabajos futuros

### 7.1. Conclusiones

A continuación se presentan las conclusiones a las que se llegó al finalizar el trabajo de grado.

- 1) La revisión sistemática para la creación de una microcentral para la generación de energía eléctrica a partir de gas natural, aportó a la investigación un número significativo de documentos que abarcaron de manera general el estado del arte del proyecto.
- 2) De acuerdo con el proceso de mapeo sistemático de generación de energía eléctrica a partir de gas natural existe una gran tendencia en la realización de artículos académicos con enfoque hacia la investigación y muy pocos hacia la implementación, esta situación se da a causa de que el precio del combustible a utilizar (gas natural) es alto en comparación con otros recursos como el agua.
- 3) El análisis morfológico dentro del proyecto, es una de las metodologías más adecuadas al momento de realizar un proceso de selección de equipos o en su defecto de procesos, el cual ayuda al investigador a realizar estudios concretos de las diferentes opciones para dar solución al problema planteado.
- 4) De acuerdo con lo establecido en el documento CREG 077 de 2015, el cargo por confiabilidad no es ni un monto fijo ni un valor que pueda ser conocido de antemano, sino que depende de factores con altos niveles de incertidumbre como el precio en bolsa de la energía y el precio de escasez. Por tal razón, la viabilidad por contingencia, solo puede analizarse en términos de escenarios a los cuales se les asignan probabilidades de ocurrencia.
- 5) Como resultado de las combinaciones del análisis morfológico, la opción C200 y el transformador trifásico serie 15(kV) son la mejor elección para la creación de una microcentral de generación de energía eléctrica a partir de gas natural, debido a que sus características técnicas se acoplan satisfactoriamente con los requisitos propuestos.
- 6) Dentro del marco regulatorio para la generación de energía eléctrica en el país, es necesario e indispensable cumplir a cabalidad con las normas requeridas por el estado debido a que

estas determinan si el sistema puede o no funcionar dentro de un territorio sin infringir la ley.

- 7) La propuesta técnica y financiera para la creación de una microcentral de generación de energía eléctrica a partir de gas natural, no es viable económicamente por varios factores entre los cuales se encuentra: En primer lugar, el costo del gas natural el cual va a aumentar según la proyección realizada por la UPME, indicando que en el 2017 se debe abastecer al país de este combustible [73]. En segundo lugar, el alto consumo de gas por parte de la microturbina Capstone C200 y finalmente el valor del (kWh) generado por la microcentral ya que es dos veces más alto que el producido por la empresa encargada del servicio de energía eléctrica en el Departamento del Cauca.

## **7.2. Trabajos Futuros**

Los resultados presentados en este trabajo de grado permiten plantear algunos trabajos futuros que contribuyan al desarrollo de la propuesta técnica y financiera para la creación de una microcentral de energía eléctrica a partir de gas natural, para ello se propone:

- 1) Realizar un analisis financiero con diferentes combustibles para determinar la viabilidad del proyecto en el departamento del Cauca.
- 2) Analizar la propuesta técnica y financiera para una microcentral de generación de energía eléctrica a partir de gas natural a nivel nacional.

# Bibliografía

- [1] “Informe mensual de variables de generación y del mercado eléctrico colombiano,” Unidad de Planeación Minero Energética, Tech. Rep., Marzo 2015. [Online]. Available: <http://www1.upme.gov.co/>
- [2] K. Petersen, R. Feldt, S. Mujtaba, and M. Mattsson, “Systematic mapping studies in software engineering,” in *12th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering*, vol. 17, no. 1, 2008.
- [3] J. L. Abreu, C. Parra González, and E. H. Molina Arenas, “El rol de las preguntas de investigación en el método científico.” *Revista Daena (International Journal of Good Conscience)*, vol. 7, no. 1, 2012.
- [4] P. Pilavachi, “Mini-and micro-gas turbines for combined heat and power,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 22, no. 18, pp. 2003–2014, 2002.
- [5] S. An, Q. Li, and T. W. Gedra, “Natural gas and electricity optimal power flow,” in *Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2003 IEEE PES*, vol. 1. IEEE, 2003, pp. 138–143.
- [6] B. Zaporowski and R. Szczerbowski, “Energy analysis of technological systems of natural gas fired combined heat-and-power plants,” *Applied Energy*, vol. 75, no. 1, pp. 43–50, 2003.
- [7] M. Shahidehpour, Y. Fu, and T. Wiedman, “Impact of natural gas infrastructure on electric power systems,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 93, no. 5, pp. 1042–1056, 2005.
- [8] L. Barroso, T. Hammons, and H. Rudnick, “Integrated natural gas-electricity resource adequacy planning in latin america,” *Oil, Gas & Energy Law Journal (OGEL)*, vol. 3, no. 2, 2005.
- [9] D. Feretic and Z. Tomsic, “Probabilistic analysis of electrical energy costs comparing: production costs for gas, coal and nuclear power plants,” *Energy Policy*, vol. 33, no. 1, pp. 5–13, 2005.
- [10] E. Fernandes, M. V. c. d. A. Fonseca, and P. S. R. Alonso, “Natural gas in brazil’s energy matrix: demand for 1995–2010 and usage factors,” *Energy policy*, vol. 33, no. 3, pp. 365–386, 2005.
- [11] R. G. de Oliveira and J. de Moraes Marreco, “Natural gas power generation in brazil: New window of opportunity?” *Energy Policy*, vol. 34, no. 15, pp. 2361–2372, 2006.

- [12] P. Jaramillo, W. M. Griffin, and H. S. Matthews, “Comparative life-cycle air emissions of coal, domestic natural gas, lng, and sng for electricity generation,” *Environmental Science & Technology*, vol. 41, no. 17, pp. 6290–6296, 2007.
- [13] C. E. Marín and J. J. C. Molina, “El gas en la producción de electricidad en españa,” *Nimbus: Revista de climatología, meteorología y paisaje*, no. 19, pp. 71–98, 2007.
- [14] C. Lopez Lopez, “Diagnostico de las centrales termoelectricas en colombia y evaluacion de alternativas tecnologicas para el cumplimiento de la norma de emision de fuentes fijas,” 2011.
- [15] J. M. Beér, “High efficiency electric power generation: The environmental role,” *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 33, no. 2, pp. 107–134, 2007.
- [16] Z.-G. Sun, “Energy efficiency and economic feasibility analysis of cogeneration system driven by gas engine,” *Energy and Buildings*, vol. 40, no. 2, pp. 126–130, 2008.
- [17] E. Fernandes, J. De Oliveira, P. De Oliveira, and P. Alonso, “Natural-gas-powered thermoelectricity as a reliability factor in the brazilian electric sector,” *Energy Policy*, vol. 36, no. 3, pp. 999–1018, 2008.
- [18] F. Ramiro Velasco, “Estudio de viabilidad y diseño de una planta de cogeneración para industria cárnica,” 2009.
- [19] P. A. Pilavachi, S. D. Stephanidis, V. A. Pappas, and N. H. Afgan, “Multi-criteria evaluation of hydrogen and natural gas fuelled power plant technologies,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 29, no. 11, pp. 2228–2234, 2009.
- [20] R. Elias, M. Wahab, and L. Fang, “Managing financial risks for natural gas-fired power plants,” in *7th International Conference on Service Systems and Service Management (ICSSSM)*. IEEE, 2010, pp. 1–6.
- [21] J. M. Blanco and F. Peña, “Incremento de la eficiencia en centrales termoeléctricas por aprovechamiento de los gases de la combustión,” *Información tecnológica*, vol. 22, no. 4, pp. 15–22, 2011.
- [22] G. Gallego and C. Núñez, “Desarrollo de la metodología y evaluación de proyectos energéticos con manejo de la incertidumbre en precios: proyecto de cogeneración de energía eléctrica con base en gas natural para una empresa de santiago de cali,” Ph.D. dissertation, Tesis de grado. Cali: Universidad Icesi, 2011.
- [23] M. Fernández Martín *et al.*, “Estudio de viabilidad técnico-económico de una plata de trigeneración del sector lácteo,” 2011.
- [24] R. H. Sepúlveda Sepúlveda, “Modelación de centrales térmicas de ciclo combinado y su aplicación en el problema de predespacho de unidades,” 2011.
- [25] S. Ahijón Aranda, “Modelo económico del funcionamiento de una central de ciclo combinado: análisis y optimización de los regímenes de funcionamiento,” 2011.
- [26] Y. Jinning, X. Yali, L. Zheng, T. Yunfeng, and H. Baohua, “Heat-power-gas capacity of natural gas-fired combined cycle cogeneration power plant,” in *Materials for Renewable*

- Energy & Environment (ICMREE)*, 2011 International Conference on, vol. 1. IEEE, 2011, pp. 919–922.
- [27] A.-d.-J. Romero-Ramírez, “Estudio descriptivo y analítico de una planta de ciclo combinado,” Master’s thesis, Universidad Veracruzana, 2011.
- [28] I. Lawrence, “Analysis of nigerian power generation sustainability through natural gas supply.” *Journal of Innovative Reserch in Engineering and Sciencies.*, 2013.
- [29] G. Mohan, S. Dahal, U. Kumar, A. Martin, and H. Kayal, “Development of natural gas fired combined cycle plan for tri-generation of power, cooling and clean water using waste heat recovery: techno-economic analysis.” *Energies.*, 2014.
- [30] I. Tobasura Acuña, “Una visión integral de la biodiversidad en colombia,” agosto 2006. [Online]. Available: <http://lunazul.ucaldas.edu.co/>
- [31] A. Abur, F. L. Alvarado, C. A. Bel, C. Cañizares, J. C. Pidre, A. J. C. Navarro, A. F. Otero, F. G. García, J. G. Mayordomo, A. G. Expósito *et al.*, *Análisis y operación de sistemas de energía eléctrica*. McGraw-Hill, 2002.
- [32] S. Bragg-Sitton, R. Boardman, M. Ruth, O. Zinaman, and C. Forsberg, “Rethinking the future grid: Integrated nuclear renewable energy systems,” 2014.
- [33] J. Santamarta Flórez, “Las energías renovables son el futuro,” Febrero 2010. [Online]. Available: <http://www.nodo50.org/worldwatch>
- [34] I. Irena, “Renewable energy technologies: Cost analysis series,” *Concentrating solar power*, 2012.
- [35] C. M. Carmen, “Energías renovables y energías oceánica,” Master’s thesis, Escuela técnica superior de ingeniería, 2009.
- [36] G. A. García, “Curso básico de ciencia y tecnología nuclear,” Jovenes Nucleares, Tech. Rep., 2008.
- [37] F. D. Inmaculada and A. R. Robles Diaz, “Centrales de generación de energía eléctrica,” Universidad de cantabria, Tech. Rep., 2008.
- [38] F. Gonzalez, “Tecnologías de generación distribuida: costos y eficiencia,” *System*, 2004.
- [39] O. Romero *et al.*, “Estudio de factibilidad para la implantación de generación distribuída en la zona norte costera del estado anzoátegui,” 2009.
- [40] A. Melgar Bachiller, “Motores térmicos,” Universidad de Valladolid, Tech. Rep., 2000.
- [41] N. Fernandes, Endez Castaño, “Especial turbinas de gas,” Septiembre 2011. [Online]. Available: <http://www.energiza.org/>
- [42] A. C. Romero Obelmejias, “Estudio de factibilidad para la implantación de generación distribuida en la zona norte costera del estado anzoátegui.” Master’s thesis, Universidad de Oriente, 2009.
- [43] A. G. McDonald and H. Magande, *Introduction to thermo-fluids systems design*. John Wiley & Sons, 2012.



- [44] R. P. Miguel Angel, "Transformadores," Master's thesis, Universidad de Cantabria, 2012.
- [45] G. E. Harper, *Fundamentos de instalaciones eléctricas de mediana y alta tensión*. Editorial Limusa, 2006.
- [46] E. A. Cruz and J. Vargas, "Pruebas principales a un transformador de distribución para su puesta en servicio," Master's thesis, Instituto Politécnico Nacional (Escuela superior de ingeniería mecánica y eléctrica), 2008.
- [47] J. Martínez Velasco, "Coordinación de aislamiento en redes eléctricas de alta tensión," 2008.
- [48] H. García Gonzalez, "Protecciones contra sobretensiones de una subestación eléctrica en 400(kv) localizada en la planta de hylsa," Master's thesis, Universidad Autonoma de Nuevo Leon, 2000.
- [49] D. Fernández Hevia, *Introducción a los varistores: sus propiedades y aplicación*, Universidad de Las palmas de Gran Canaria Std., mayo 2010.
- [50] A. E. Ortiz Diaz, "Proyecto de instalaciones electricas residenciales," Master's thesis, Universidad Veracruzana, 2010.
- [51] Edwin Oswaldo , Segovia Albarrasín, "Coordinación de protecciones en el alimentador de distribución cerro 8," Master's thesis, Universidad Técnica José Antonio Echeverría de Cotopaxi, 2010.
- [52] F. Hernández, "Diseño y ajustes de protecciones en una subestación de alta tensión," Master's thesis, Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI), 2008.
- [53] C. de Regulación de Energía y Gas, "El reglamento de distribución de energía eléctrica, como parte del reglamento de operación del sistema interconectado nacional," Mayo 28 1998. [Online]. Available: <http://www.creg.gov.co/>
- [54] L. C. de Regulación de Energía y Gas, "Procedimientos generales para la asignación de puntos de conexión de generadores a los sistema de transmisión nacional, sistemas de transmisión regional o sistemas de distribución local." 2006. [Online]. Available: <http://www.creg.gov.co/>
- [55] N. T. Colombiana, "Sistemas de gestión ambiental," 2004.
- [56] "Resolución número 001792 de 1990," Ministerio de Trabajo , Seguridad Social y de Salud, Tech. Rep., 1990.
- [57] E. C. de Ingeniería, "Nivel de ruido," Tech. Rep., 2007.
- [58] "Comisión de regulación de energía y gas," Tech. Rep., Septiembre 2015. [Online]. Available: <http://www.creg.gov.co/>
- [59] "Análisis de precio de escasez. documento para discusión.(creg 047)," La Comisión de Regulación de Energía y Gas, Tech. Rep., 2007.
- [60] "Comisión de regulación de energía y gas," Tech. Rep., Octubre 2014. [Online]. Available: <http://www.creg.gov.co/>

- [61] V. Zeithaml, P. Varadarajan, and C. P. Zeithaml, "The contingency approach: Its foundations and relevance to theory building and research in marketing," *European Journal of Marketing*, vol. 22, no. 7, pp. 37 – 64, 2013.
- [62] K. Carrier. (2012) Contingency: Are You Covered ? Project Management Institute.
- [63] T. Ritchey, "General morphological analysis a general method for non-quantified modelling," 2002.
- [64] A. Rodríguez Hernández. (2009, Noviembre) La generación distribuida y su posible integración al sistema interconectado nacional. CREG.
- [65] F. Gonzalez Longatt, "Tecnologías empleadas en generación distribuida," 2008.
- [66] Caterpillar, "Gas engine generator set," 2014.
- [67] Interelectricas, "Características técnicas de los transformadores trifásicos serie 15kv fabricados por abb," 2015.
- [68] Elster, "Medidor electrónico trifásico multitarifa," 2015. [Online]. Available: <http://www.elster.com.ar/>
- [69] C. T. Corporation, "C200 & c200-chp microturbine natural gas," 2015.
- [70] A. Energia, "Ae-t100 micro turbine natural gas," 2015.
- [71] E. C. Heat and P. Partnership, *Catalog of CHP technologies*, Std., 2015.
- [72] C. de Regulación de Energía y Gas, "Fórmula tarifaria general que permite a los comercializadores minoristas de electricidad establecer los costos de prestación del servicio a usuarios regulados en el sistema interconectado nacional," Diciembre 21 2007. [Online]. Available: <http://www.creg.gov.co/>
- [73] Ó. Ahumada Rojas, "El gas importado también se usaría para atender hogares," Abril 2015. [Online]. Available: <http://www.eltiempo.com/>
- [74] I. R. Gallego, *Medidor electrónico polifásico*, Elster medidores S.A, 2015.
- [75] E. gama electronica Ltda, *contador de energia electrica trifasico estatico para energia reactiva y activa EPQS*, 2015.

# Anexos A

## Anexo I: Definiciones marco regulatorio

**Código de Redes:** Conjunto de reglas, normas, estándares y procedimientos técnicos expedido por la Comisión de Regulación de Energía y Gas a los cuales deben someterse las empresas de servicios públicos del sector eléctrico y otras personas que usen el Sistema de Transmisión Nacional, de acuerdo con lo establecido en la Ley 143 de 1994.

**Comercializador:** Persona cuya actividad principal es la comercialización de energía eléctrica.

**Centro Nacional de Despacho (CND):** Es la dependencia encargada de la planeación, supervisión y control de la operación integrada de los recursos de generación, interconexión y transmisión del Sistema Interconectado Nacional. El CND también está encargado de dar las instrucciones a los Centros Regionales de Despacho para coordinar las maniobras de las instalaciones con el fin de tener una operación segura, confiable y ceñida al Reglamento de Operación y a todos los acuerdos del Consejo Nacional de Operación.

**Centro Regional de Despacho (CRD):** Es un centro de supervisión y control de la operación de las redes, subestaciones y centrales de generación localizadas en una misma región, cuya función es la de coordinar la operación y maniobra de esas instalaciones con sujeción, en lo pertinente, a las instrucciones impartidas por el Centro Nacional de Despacho, en desarrollo de las previsiones contenidas en el Reglamento de Operación, con el fin de asegurar una operación segura y confiable del Sistema Interconectado Nacional.

**Equipo de Medida:** En relación con un punto de conexión lo conforman todos los transformadores de medida, medidores y el cableado necesario para ese punto de conexión.

**Generador:** Persona natural o jurídica que produce energía eléctrica, que tiene por lo menos una central o unidad generadora conectada al SIN.

**Niveles de Tensión:** Los sistemas de Transmisión Regional y/o Distribución Local se clasifican por niveles, en función de la tensión nominal de operación, según la siguiente definición:

Nivel IV: Sistemas con tensión nominal mayor o igual a 62 (kV)

Nivel III: Sistemas con tensión nominal mayor o igual a 30 (kV) y menor de 62 (kV)

Nivel II: Sistemas con tensión nominal mayor o igual a 1 (kV) y menor de 30 (kV)

Nivel I: Sistemas con tensión nominal menor a 1 (kV).

**Sistema de Distribución Local (SDL):** Sistema de transmisión de energía eléctrica compuesto por redes de distribución municipales o distritales; conformado por el conjunto de líneas y subestaciones, con sus equipos asociados, que operan a tensiones menores de 220 kV que no pertenecen a un sistema de transmisión regional por estar dedicadas al servicio de un sistema de distribución municipal, distrital o local.

**Sistema Interconectado Nacional (SIN):** Es el sistema compuesto por los siguientes elementos conectados entre sí: las plantas y equipos de generación, la red de interconexión nacional, las redes regionales e interregionales de transmisión, las redes de distribución, y las cargas eléctricas de los Usuarios.

**Sistema de Transmisión Nacional (STN):** Es el sistema interconectado de transmisión de energía eléctrica compuesto por el conjunto de líneas, con sus correspondientes módulos de conexión, que operan a tensiones iguales o superiores a 220 kV.

**Sistema de Transmisión Regional (STR):** Sistema interconectado de transmisión de energía eléctrica compuesto por redes regionales o interregionales de transmisión; Conformado por el conjunto de líneas y subestaciones con sus equipos asociados, que operan a tensiones menores de 220 kV y que no pertenecen a un sistema de distribución local.

**Operador de Red de STR's y/o SDL's (OR):** Es la persona encargada de la planeación de la expansión y de las inversiones, operación y mantenimiento de todo o parte de un STR o SDL; los activos pueden ser de su propiedad o de terceros. Para todos los propósitos son las empresas que tienen Cargos por Uso de los STR's y/o SDL's aprobados por la CREG. El OR siempre debe ser una Empresa de Servicios Públicos.

**Planta Menor:** Es toda planta y/o unidad de generación con capacidad efectiva inferior a 20 MW. Se excluyen de esta definición los Autogeneradores o Cogeneradores.

**Usuario:** Persona que utilice o pretenda utilizar, o esté conectado o pretenda conectarse a un STR o SDL.

## Anexos B

### Anexo II: Características técnicas de equipos

#### B.1. Motor de combustión interna caterpillar G3306

Tabla B.1: Características técnicas [66].

Potencia de salida	100 (kW)
Valor nominal continuo máximo	143 (kW)
Tipo de combustible	gas natural, biogás
Máxima eficiencia eléctrica	31.9 %
Valor nominal de energía de reserva máxima	160
Frecuencia	50 o 60 (Hz)
Revoluciones por minuto(RPM)	1500 – 1800
Voltaje	480 (V)
Generador	3 fases
Emisión de gases	671 pies <sup>3</sup> /min
Temperatura de gases	582°C

Tabla B.2: Especificaciones del motor [66].

Modelo del motor	G3306
Calibre	121.0 (mm)
Cilindrada Valor	10.5 (L)
Carrera	152.0 (mm)

Tabla B.3: Dimensiones del motor [66].

Longitud	3200.0 (mm)
Anchura	1329.0 (mm)
Altura	1729.0 (mm)

## B.2. Motor de combustión interna caterpillar G3406

Potencia de salida	150 (kW)
Valor nominal continuo máximo	188 (kW)
Tipo de combustible	gas natural, biogás
Máxima eficiencia eléctrica	37.3 %
Frecuencia	50 o 60 (Hz)
Revoluciones por minuto(RPM)	1800
Voltaje	480 (V)
Generador	3 fases
Temperatura de gases	682°C

Tabla B.4: Especificaciones del motor [66].

Modelo del motor	G3406
Calibre	137 (mm)
Cilindrada Valor	14.6 (L)
Carrera	164 (mm)

Tabla B.5: Dimensiones del motor [66].

Longitud	4074 (mm)
Anchura	1306 (mm)
Altura	2131 (mm)

## B.3. Transformador trifásico 15(kV)[150 (kVA)]

Tabla B.6: Características Generales del Trifásico serie 15(kV) [67].

Potencia Nominal	150 (kVA)
Tipo	Poste
Normas de fabricación y pruebas	ANSI/ICONTEC
Medio refrigeración	Aceite
Voltaje primario	13200 (V)
Voltaje secundario en vacío	440 Y/254 (V)
Número de fases:	3
Material de los devanados AT/BT	Cu
Frecuencia	60 Hz
Grupo de conexión	Dyn5
Nivel de aislamiento de los devanados de AT	95 (kV)
Nivel de aislamiento de los devanados de BT	30 (kV)
Número de aisladores de baja tensión	4
Numero de aisladores de alta tensión	3
Aumento de temperatura promedio de los devanados	85 °C
Material	Acero estándar
Dimensiones	1450x1200x1200(mm)
Peso neto estimador	620 (kg)

#### B.4. Transformador trifásico 15(kV)[112.5 (kVA)]

Tabla B.7: Características Generales del Trifásico serie 15(kV) [67].

Potencia Nominal	112.5 (kVA)
Tipo	Poste
Normas de fabricación y pruebas	ANSI/ICONTEC
Medio refrigeración	Aceite
Voltaje primario	13200 (V)
Voltaje secundario en vacío	440 Y/254 (V)
Número de fases:	3
Material de los devanados AT/BT	Cu
Frecuencia	60 Hz
Grupo de conexión	Dyn5
Nivel de aislamiento de los devanados de AT	95 (kV)
Nivel de aislamiento de los devanados de BT	30 (kV)
Número de aisladores de baja tensión	4
Numero de aisladores de alta tensión	3
Aumento de temperatura promedio de los devanados	85 °C
Material	Acero estándar
Dimensiones	1350x900x950(mm)
Peso neto estimador	500 (kg)

## B.5. Transformador trifásico 15(kV)[225 (kVA)]

Tabla B.8: Características Generales del Trifásico serie 15(kV) [67].

Potencia Nominal	225 (kVA)
Tipo	Poste
Normas de fabricación y pruebas	ANSI/ICONTEC
Medio refrigeración	Aceite
Voltaje primario	13200 (V)
Voltaje secundario en vacío	440 Y/254 (V)
Número de fases:	3
Material de los devanados AT/BT	Cu
Frecuencia	60 Hz
Grupo de conexión	Dyn5
Nivel de aislamiento de los devanados de AT	95 (kV)
Nivel de aislamiento de los devanados de BT	30 (kV)
Número de aisladores de baja tensión	4
Numero de aisladores de alta tensión	3
Aumento de temperatura promedio de los devanados	85 °C
Material	Acero estándar
Dimesiones	1450x1000x1000(mm)
Peso neto estimador	930 (kg)

## B.6. Contador multifuncional alfa 1800

Tabla B.9: Características técnicas contador multifuncional [68]



Precisión	Energía Activa 0.2 % (IEC 62053-22) 0.5 % (IEC 62053-22) 1.0 % (IEC 62053-21)	Energía Reactiva 2.0 % (IEC 62053-23) La precisión actual es mejor al 0.5 %
Corriente máxima	continua a 10 (A) temporal(0.5 segundos) al 2000 % de la corriente maxima del medidor	
Corriente nominal	1-10 (A)	5-120 (A)
Corriente de arranque	conexion indirecta 1 (mA)	conexion directa 40 (mA)
Tensión máxima	continuo hasta 528 (VAC)	
Rango de tensión	58-415 (V)	46-528 (V)
Frecuencia	nominal: 50-60 (Hz)	
Rango de temperatura	-40 °C + 85 °C (en el interior de la cubierta del medidor) -40 °C + 60 °C (en el exterior)	
Rango de humedad	0 %-100 %	
Consumo de la fuente de poder	menores a 3 (W)	

## B.7. Contador polifásico alfa 2

Tabla B.10: Características técnicas contador polifásico [74]

Frecuencia	50 0 60 Hz
Rango de tensiones de fase	50.8 a 310
Corriente nominal	2.5 A
Corriente de arranque	0.2
Tensión nominal	380 / 220 / 110
Frecuencia	nominal: 50-60 (Hz)
Rango de temperatura	-40 °C + 55 °C (en el interior de la cubierta del medidor)
Rango de humedad	0 %-100 %

## B.8. Contador de energia activa y reactiva EPQS

Tabla B.11: Características técnicas Contador de energia activa y reactiva EPQS [75]

Precisión	Energía Activa 0.2 % (IEC 62053-22) 0.5 % (IEC 62053-22) 1.0 % (IEC 62053-21)	Energía Reactiva 2.0 % (IEC 62053-23)
Corriente de arranque	0.001	conexion directa 0.004
Rango de tensión	58-415 (V)	46-528 (V)
Frecuencia	nominal: 50-60 (Hz)	
Rango de temperatura	-40 °C + 60 °C (en el interior de la cubierta del medidor)	
Rango de humedad	0 %-100 %	

## B.9. Microturbinas Capstone C200

Tabla B.12: Rendimiento eléctrico. [69]

Potencia de salida Nominal	200(kW)
Rango Nominal de voltaje de operacion	400– 480 (VAC)
Rango nominal de frecuencia de operacion	50/60 (Hz) (operación de conexión de rejilla), 10/60 (Hz) (operación independiente)
Máxima corriente de salida	290 RMS – 400 (V) 240 RMS - 480 (V) 310 RMS (operación independiente)
Eficiencia eléctrica	33 %
Conexión de la salida de voltaje	3 fases – 4 hilos
Revoluciones del generador	3.600 (RPM)

Tabla B.13: Características del combustible [69].

Gas natural	30.7 – 47.5 MJ/ m <sup>3</sup> (825 – 1,275 BTU/scf)
Presión de entrada	517 – 552 kPa (75 -80 psig)
Flujo de combustible	2,400 MJ/hr (2,280,000 BTU/hr)
Tasa neta de calor	10.9 MJ/kWh (10,300 BTU/kWh)

Tabla B.14: Características de escape [69].

Emisiones de NOx - 15 % O2	9 ppmvd (18 mg/m <sup>3</sup> )
NOx / Salida Eléctrica	0.14 g/bhp-hr (0.4 lb/MWhe)
Escape de flujo de Gas	1.3 kg/s (2.9 lbm/s)
Temperatura de escape de gas	280°C (535°F)
Escape de Energía	1,420 MJ/h (1,350,000 BTU/h)

Tabla B.15: Nivel de sonido [69].

Emisiones acústicas a plena carga de energía nominal	10 m (33 pies) 65 dBA
--	-----------------------

Tabla B.16: Dimensiones de la microturbina Capstone C200 [69].

Alto	2.5 (m)
Ancho	1.7 (m)
Profundo	3.7 (m)
Peso	2776 kg(conectado a la red) 3413 kg (modo dual)

## B.10. Transformador trifásico 15(kV)[250 (kVA)]

Tabla B.17: Características Generales del Trifásico serie 15(kV) [67].

Potencia Nominal	225 (kVA)
Tipo	Poste
Normas de fabricación y pruebas	ANSI/ICONTEC
Medio refrigeración	Aceite
Voltaje primario	13200 (V)
Voltaje secundario en vacío	440Y/254 (V)
Número de fases:	3
Material de los devanados AT/BT	Cu
Frecuencia	60 Hz
Grupo de conexión	Dyn5
Nivel de aislamiento de los devanados de AT	95 (kV)
Nivel de aislamiento de los devanados de BT	30 (kV)
Número de aisladores de baja tensión	4
Numero de aisladores de alta tensión	3
Aumento de temperatura promedio de los devanados	85 °C
Material	Acero estándar
Dimesiones	1150x700x900 (mm)
Peso neto estimador	930 (kg)

## B.11. Microturbina Turbec EA-T100(P)

Tabla B.18: Características de generales de la microturbina Turbec-T100(P) [70].

Combustible	Gas Natural(Metano)
Salida electrica	100(kW)
Eficiencia eléctrica	30 %
Eficiencia total de cogeneración	80 %
Consumo de combustible	333(kW)
Conexión de la salida de voltaje	3 fases – 4 hilos
Flujo de gas de escape	0,80 kg / s
temperatura del gas de escape	270 °C
Potencia de sonido	85,4 (dBA)
Revoluciones del generador	3.600(RPM)

Tabla B.19: Dimensiones de la microturbina Turbec-T100(P) [70].

Alto	1.810 (mm)
Ancho	900 (mm)
Profundo	2.770 (mm)
Peso	2250/2750 (kg)

Tabla B.20: Características de la microturbina Turbec-T100(P) [70].

Tipo de compresor	centrífugo, una sola etapa
Tipo Turbina	Radial, de una sola etapa
Presión en la cámara de combustión	4,5 (bar)
Temperatura de entrada de la turbina	(TIT) 950 °C
Número de ejes	1 (un solo eje)
consumo de aceite de lubricación	≤3l / 6000 EOH
Velocidad de rotación nominal	70.000 (RPM)

Tabla B.21: Datos eléctricos de la microturbina Turbec-T100(P) [70].

Frecuencia de salida	50 (Hz) o 60 (Hz) bajo demanda
Tensión de salida	400 (VAC), tres fases

Tabla B.22: Requisitos de combustible [70].

Presión requerida	(0.02/0.500 bar demanda)
Temperatura requerida	(0-60) °C
Valor calorífico inferior	PCI 38 MJ / kg

# Anexos C

## Anexo II: Cromatografía del gas natural



Por último, esta prestadora en aras de resolver sus dudas con respecto a las propiedades del gas combustible, le allegamos la Cromatografía actualizada, de la siguiente manera:

CROMATOGRAFIAS ESPECIFICAS A APLICAR PARA MAYO DE 2015

PROPIEDAD	UNIDAD	IBAGUE	MARQUITA		PINOS			Guaduas
			Ranles, Grandot y Fusa	Dorada	Oriente Antioqueño	Neva*	Cauca	
PODER CALORIFICO	BTU / PC	1144.71613	1144.7161	1144.7161	1246.3194	1136.4942	1144.7161	1214.0000
NITROGENO	%	0.7074064	0.707406	0.707408	1.162010	0.637617	0.7074	0.140000
CO2	%	1.8151871	1.815187	1.815187	0.834863	1.738918	1.8151	0.660000
METANO	%	82.8358210	82.835821	82.835821	92.087258	83.539983	82.8358	97.870000
ETANO	%	9.8445784	9.844578	9.844578	3.636879	3.358247	9.8446	1.060000
PROPANO	%	3.5527981	3.552798	3.552798	0.562611	3.385935	3.5628	0.150000
I-BUTANO	%	0.5197477	0.519748	0.519748	1.262443	0.463194	0.5197	0.060000
N-BUTANO	%	0.5302771	0.530277	0.530277	0.206918	0.496261	0.5303	0.080000
I-PENTANO	%	0.1193756	0.119376	0.119376	0.191178	0.105812	0.1194	0.030000
N-PENTANO	%	0.0483126	0.048313	0.048313	0.036403	0.045668	0.0483	0.010000
6+ O HEXANO	%	0.0264939	0.026494	0.026494	0.027428	0.029015	0.0265	0.000000
HEPTANO	%	0.0000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.0000	0.000000
OCTANO	%	0.0000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.0000	0.000000
GRAV ESPEC.		0.6773613	0.677361	0.677361	0.617410	0.671355	0.6774	0.693900

Datos obtenidos por el método AGA 8. <http://www.mpslv.com/AGA8CalcIn.asp> a una Temp de 15.5568 C y presión de 1.011008 bar.

\* El poder calorífico indicado en esta cromatografía para este nodo se toma como referente únicamente. El volumen a facturar atiende las instrucciones dadas en comunicado del 22 de Septiembre de 2012.



NEVA, HUILA, COLOMBIA CRA 9 NO. 7-25 - PBX: (093) 8714416 - FAX: (038) 8721695 | LÍNEA GRATUITA ATENCIÓN DE EMERGENCIAS 018000 91 8808 Y LÍNEA 164  
www.alcanoscorp.com NIT: 891.191.577-4 | LÍNEA GRATUITA ATENCIÓN AL USUARIO 018000 96-4141

# Anexos D

## Anexo III: Cotización del gas natural



nos permitimos mencionarles que el cargo fijo es de \$1.329,45, contribución del 8,9% y valores del m3 los cuales son variables, discriminados de la siguiente manera:

Metro3	Valor (Pesos)
0 – 1.000	1.505,36
1.000 – 10.000	1.426,72
10.000 – 30.000	1.407,06
Mayor 30.000	1.329,45

Así mismo, adjuntamos el prepuesto emitido con respecto al Derecho de Conexión en donde precisamos que no está incluido el valor de mano de obra y materiales.

DERECHOS DE CONEXIÓN Y MEDICIÓN					
ITEM	CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	VR. UNITARIO	VR. TOTAL
1	DERECHO DE CONEXIÓN Y MEDICIÓN	GLO	1	\$ 8.331.205	\$ 8.331.205
	Medidor American Metter AL-1000 ;alula de bola sistema de filtración regulación tuberías accesorios y manómetro				
<b>TOTAL CONEXIÓN Y MEDICIÓN</b>					<b>\$ 8.331.205</b>
INSTALACIÓN INTERNA					
ITEM	CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	VR. UNITARIO	VR. TOTAL
1	INSTALACIÓN INTERNA	GLO	1	\$	-
					\$ -
IVA (16% DE LA U)					\$ -
<b>TOTAL INTERNA</b>					<b>\$ -</b>
<b>COSTO TOTAL INSTALACIÓN</b>					<b>\$ 8.331.205</b>

NEVA, HUILA, COLOMBIA CRA 9 NO. 7-25 - PBX: (098) 8714416 - FAX: (098) 8721655 | LINEA GRATUITA ATENCIÓN DE EMERGENCIAS 016000 91 8808 Y LINEA 164  
www.alcanosesp.com | NT: 801.101.5774 | LINEA GRATUITA ATENCIÓN AL USU/RO: 018000 95 4141



# Anexos E

## Anexo IV: Cotización de la microturbina capstone C200



### QUOTATION

PROJECT		U. POPAYÁN		Quote Information			
BUYER		U. POPAYÁN ATN.		Date	14/04/2015		
				Quote Number	2015-0109		
				Valid until	14/05/2015		
EQUIPMENT							
Item	Reference	Description	Nominal Capacity	Qty	Unit Price	Total Value	
110	200R-HG4-BU00	C200,HPNG,GC,INDPKG,UL	200 KW	1	285.431,00	285.431,00	
					USD	285.431,00	
Main equipment characteristics							
Fuel	Natural Gas	Mode of Operation	Grid Connect	Certifications	UL		
Working pressure	75-80 psi	Type of enclosure	Industrial Package	Emissions	Standard		
CONTROLS							
Item	Reference	Description	Qty	Unit Price	Total Value		
					USD	-	
ACCESSORIES FOR MICROTURBINE CONNECTION AND OPERATION							
Yes/No	Reference	Qty	Yes/No	Reference	Qty	Total Value	
No	Emergency Stop Switch	-	No	Customer Witness Test	-	-	
No	CRMS Software User Edition	-	Yes	Engine Manufacturing report	1	-	
Yes	Moxa Serial to Ethernet	1	Yes	User's Manual	1	-	
No	Multipac:able	-	Yes	Backflow dampers	-	-	
					USD	1.810,00	
					USD	287.241,00	
The discounts apply only to the ExWorks value and not to the DDP value of					IVA	16%	45.959,00
					USD	333.200,00	
FPP (Factory Protection Plan)							
Remarks:							
For options A and C the buyer will have to train an operator in order to perform the maintenance to the equipment. If the buyer doesn't have qualified personnel to develop these labors, those would be realized by the distributor's personnel and charged according to the Capstone's Maintenance Flat Rate Schedule							
Description of the FPP Contracts							
A	Parts only during 5 years or 39.999 hours (whichever occurs first)						
B	Parts and labor during 5 years or 39.999 hours (whichever occurs first)						
C	Parts only during 9 years or 79.999 hours (whichever occurs first). Includes the overhaul at 48.000 hours						
D	Parts and labor during 9 years or 79.999 hours (whichever occurs first). Includes the overhaul at 48.000 hours						

#### REMARKS:

The fuel must be kept dry and clean before entering the Microturbine

CII 7 39 215 of 604 Cra 18 85A 14  
T 31 11854 T 6366244  
Medellin Bogotá

contacto@supernova-es.com

www.supernova-es.com



## **Anexos F**

### **Anexo V: Cotización de transformador, protecciones y tablero**



**TODOELECTRICO**  
**José Hildebrando Castro Z.**

Ingeniería eléctrica – Montaje, diseño e Interventoría de redes eléctricas  
de alta, media, baja tensión y domiciliarias - Venta de materiales eléctricos

NIT 10.539.393-0

**INVITACION COTIZACION ELECTRICOS No. VRI-2015-033**

**OFERENTE**

**JOSE HILDEBRANDO CASTRO ZUÑIGA**  
**NIT 10539393-0**

**CALLE 10 NORTE # 6A -82 POPAYAN**

**TELEFONO 8236333-3183774072**

Calle 10 Norte No 6 A 82 PRADOS DEL NORTE  
Teléfono: 8203737- Telefax 8236333  
Popayán – Colombia.



**TODOELECTRICO**  
**José Hildebrando Castro Z.**  
Ingeniería eléctrica – Montaje, diseño e Interventoría de redes eléctricas  
de alta, media, baja tensión y domiciliarias - Venta de materiales eléctricos

NIT 10.539.393-0

Popayán, mayo 11 de 2.015

Señorita  
**JOHANA VARGAS**  
**LAURA BOLAÑOS**  
**UNICAUCA**

**Asunto: OFERTA COMPLEMENTARIOS GENERADOR**

Cordial Saludo

De acuerdo a sus requerimientos, me permito presentar propuesta eléctrica detalla para los accesorios complementarios al generador, de acuerdo a las siguientes consideraciones:

Valor total de la oferta: TRECE MILLONES CUATROCIENTOS SEIS MIL QUINIENTOS SEIS PESOS (\$ 13.406.506)

Cualquier inquietud, con gusto le atenderé.

  
**JOSE HILDEBRANDO CASTRO ZUÑIGA**  
Gerente

Calle 10 Norte No 6 A 82 PRADOS DEL NORTE  
Teléfono: 8203737- Telefax 8236333  
Popayán – Colombia.



**TODOELECTRICO**  
**José Hildebrando Castro Z.**

Ingeniería eléctrica – Montaje, diseño e Interventoría de redes eléctricas de alta, media, baja tensión y domiciliarias - Venta de materiales eléctricos

NIT 10.539.393-0

<b>Accesorios Generador - Tablero</b>			
Descripción	Cantidad	Vr. Unit	Vr. Total
Conector tipo pala 2/0	8	\$ 5.000	\$ 40.000
Cable cobre THW 2/0	4	\$ 20.000	\$ 80.000
Miscelaneos	GL		\$ 20.000
Mano de obra y transporte			\$ 20.000
<b>Total Generador-Tablero</b>			<b>\$ 160.000</b>
<b>Tablero(Lamina Cr 18,acabado en pintura electrostatica RAL 7032</b>			
Tablero Regulable ABB 280-400			
Barraje 3F-5H para 475 Amp			
Analizador de Red			
Mano de obra y transporte			\$ 500.000
<b>Total Tablero</b>			<b>\$ 5.500.000</b>
<b>Tablero-Transformador</b>			
Conector tipo pala para 2/0	8	\$ 5.000	\$ 40.000
Cable cobre THW 2/0	40	\$ 20.000	\$ 800.000
Miscelaneos	GL		\$ 20.000
Mano de obra y transporte			\$ 50.000
<b>Total Tablero</b>			<b>\$ 910.000</b>
<b>Estructura Transformador</b>			
Poste de concreto 12 MTS *750 KG	2	\$ 750.000	\$ 1.500.000
Crucetas metalicas de 2.40 MTS	2	\$ 150.000	\$ 300.000
Diagonal recta de 1.10 MTS	4	\$ 18.000	\$ 72.000
Collarin Doble de 6-7	4	\$ 18.000	\$ 72.000
Cable retenida de 1/4 -super GR	10	\$ 1.300	\$ 13.000
Aterrizaje completo	1	\$ 1.200.000	\$ 1.200.000
Mano de obra y transporte			\$ 1.000.000
<b>Total estructura para transformador</b>			<b>\$ 4.157.000</b>
<b>Transformador Trifásico serie 15(KV) fabricados por ABB</b>			
Transformador Trifásico 225(KVA)			\$ 26.655.000
Descuento	4%		\$ 1.066.200
Iva	16%		\$ 4.264.800
<b>Total Transformador</b>			<b>\$ 31.986.000</b>
<b>Parrayo y Fusible</b>			
Parrayo de 12 (KV)			\$ 95.000
Fusible de (17-20 Amp)			\$ 8.000
<b>Total de parrayo y fusible</b>			<b>\$ 103.000</b>

Calle 10 Norte No 6 A 82 PRADOS DEL NORTE  
 Teléfono: 8203737- Telefax 8236333  
 Popayán – Colombia.



**TODOELECTRICO**

**José Hildebrando Castro Z.**

Ingeniería eléctrica – Montaje, diseño e Interventoría de redes eléctricas de alta, media, baja tensión y domiciliarias - Venta de materiales eléctricos

NIT 10.539.393-0

<b>Contador Multifuncional</b>			
Contador Multifuncional			\$ 2.000.000
<b>Total de contador</b>			<b>\$ 2.000.000</b>
Subtotal presupuesto			\$ 44.816.000
Administracion	10%		\$ 4.481.600
Imprevisto	10%		\$ 4.481.600
Utilida	5%		\$ 2.240.800
Iva	16%		\$ 358.528
<b>Total presupuesto</b>			<b>\$ 56.378.528</b>

Calle 10 Norte No 6 A 82 PRADOS DEL NORTE  
 Teléfono: 8203737- Telefax 8236333  
 Popayán – Colombia.