

**“ESTUDIO DE PRE-FACTIBILIDAD PARA LA GENERACIÓN ELÉCTRICA A  
PARTIR DE ENERGÍA GEOMAGMÁTICA EN EL CAMPO DE PRODUCCIÓN  
APIAY”**

Diego Fabián Parra Pabón

Pablo Enrique Prada Mantilla

Enrique Javier Rueda Becarías

**MONOGRAFÍA DE GRADO**

Germán Oliveros

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BUCARAMANGA

FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECÁNICAS

ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE RECURSOS ENERGÉTICOS

BUCARAMANGA

2011

**Nota de Aceptación**

---

---

---

---

---

**Firma de Jurado**

---

**Firma de Jurado**

**Bucaramanga, Junio de 2011**

***A mis Padres por su fiel apoyo en toda mi etapa académica y por su apreciado ejemplo a seguir.***

***A Dios por darme la vida.***

**Pablo Prada.**

***A mis padres por ser la razón de mis esfuerzos. A mi esposa por su apoyo incondicional.***

**Diego F. Parra P.**

***A Dios, a mis padres y a mi esposa, por que todo lo que he alcanzado ha sido motivado por ellos.***

**Enrique J. Rueda B.**

## **AGRADECIMIENTOS**

Damos un inmenso agradecimiento al cuerpo docente y administrativo de la UNAB y en especial al de la facultad de Ingenierías Físico Mecánicas, sin ellos éste logro no hubiese sido posible.

De manera muy atenta agradecemos al Dr. Germán Oliveros, director y tutor del presente trabajo, por su total apoyo y sabio consejo.

## CONTENIDO

<b>1. RESUMEN</b>	9
<b>2. INTRODUCCIÓN</b>	10
2.1. Descripción del proyecto a evaluar	12
<b>3. DESCRIPCIÓN DE LA TECNOLOGÍA GEOMAGMÁTICA COMO FUENTE ALTERNATIVA DE ENERGÍA</b>	13
3.1 Ventajas de la energía geomagnética	18
3.2. Ingeniería del proyecto	18
3.2.1 Partes del tubo de poder (PowerTube A1)	20
3.2.1.1 Ascensor térmico	21
3.2.1.2 Intercambiador térmico	21
3.2.1.3 Turbo generador	23
3.2.1.4 Súper condensador acústico	24
3.2.2 Vista general del sistema	25
3.2.3 Corazón del sistema Power Tube	25
3.2.4 Logros de la ingeniería geomagnética	26

3.2.4.1. Estabilidad tecnológica de la generación geomagnética.	27
<b>4. SELECCIÓN TÉCNICA DE LOCALIZACIÓN DE LA PLANTA DE GENERACIÓN GEOMAGMÁTICA Y ANÁLISIS TERMODINÁMICO</b>	<b>28</b>
<b>5. PARÁMETROS DEL PROYECTO</b>	<b>38</b>
5.1 Costos de inversión del proyecto.	38
5.2 Capacidad de generación de la planta geomagnética.	39
5.3 Implementación de tecnología de última generación (Power Tube).	39
5.4 Producción anual en Kwh.	39
5.5 Costos de producción.	41
5.6 Proyección de los valores del Kwh a 15 años.	42
5.7 Evaluación del acceso a la red de interconexión.	44
<b>6. INVERSIÓN DEL PROYECTO.</b>	<b>47</b>
6.1 Contratación de personal especializado.	47
6.2 Contratación de vehículos y estudio de suelos.	48
6.3 Gestión de permisos y gastos legales (ambientales, sociales,	

de grupos protegidos.)	49
6.4 Socialización con las comunidades de la región	50
6.5 Asignación del terreno para el desarrollo del proyecto	51
6.6 Construcción de campamento y locaciones	52
6.7 Costos de perforación	54
6.8 Instalación del tubo de potencia (Power Tube)	55
6.9 Infraestructura eléctrica	57
6.10 Pruebas de los equipos	62
<b>7. DIAGRAMA DE DESARROLLO DEL PROYECTO</b>	<b>63</b>
<b>8. EVALUACIÓN FINANCIERA</b>	<b>64</b>
8.0 Evaluación preliminar sin proyecto – con proyecto	64
8.1. Con proyecto: Flujo de Fondos, VPN, TIR	67
8.2. Análisis de sensibilidades (inversión, ingresos y egresos)	69
8.2.1 Análisis de sensibilidad uni-variable: inversión	70
8.2.2 Análisis de sensibilidad uni-variable: ingresos	73
8.2.3. Análisis de sensibilidad uni-variable: Egresos	75
8.2.4. Análisis de sensibilidad multivariable-variable	

Pesimista.	80
8.2.5. Análisis de sensibilidad multivariable-variable	
Optimista.	81
8.2.6. Análisis de escenario de falla tecnológica A y B	82
8.3. Factibilidad	85
<b>9. CONCLUSIONES</b>	<b>87</b>
<b>10. BIBLIOGRAFÍA Y CIBERGRAFIA</b>	<b>91</b>
<b>11. ANEXOS</b>	<b>100</b>
11.1 Anexo 1. Costos actuales por pago de electricidad (sin proyecto)	
11.1 Anexo 2. Flujo de fondos escenario base y sensibilidades	
11.1 Anexo 3. Sin proyecto Vs con proyecto	
11.4 Anexo 4. Flujo de fondos escenario fallo tecnológico A.	
11.5 Anexo 5. Flujo de fondos escenario fallo tecnológico B.	
11.6 Anexo 6. Características y demanda energía de pozos Apiay	
11.7 Anexo 7. Costos Infraestructura eléctrica	

## 1. RESUMEN

El presente proyecto evaluará la pre-factibilidad financiera de implementar la generación eléctrica a partir de energía geomagnética<sup>1</sup> en un campo petrolero colombiano, con el fin de suplir los requerimientos eléctricos con autogeneración manteniendo la interconexión a la red y de esta forma disminuir costos por compra de energía, evitar la generación por medio de combustibles fósiles y apalancar la iniciativa de ECOPETROL S.A en el uso de energías alternativas.

En el proceso se describirá la tecnología geomagnética como fuente alternativa de Energía, se realizarán los estudios de factibilidad financiera por medio de indicadores como flujo de fondos, VPN, TIR, para finalmente mediante un análisis de sensibilidades llegar a conclusiones prácticas para ECOPETROL S.A.

---

<sup>1</sup> GeomagneticTechnology[En línea], disponible en: [http://wn.com/Geomagnetic\\_Technology](http://wn.com/Geomagnetic_Technology)

## 2. INTRODUCCIÓN

Dentro de la creciente gama de posibilidades para generación eléctrica a partir de fuentes alternativas de energía, se ha contado desde hace ya varios años con la energía geotérmica<sup>2</sup>. Sin embargo desde hace poco tiempo se ha sumado la posibilidad de aprovechar el calor de la tierra mediante un sistema cerrado, sin necesidad de utilizar agua que se encuentre en la superficie o debajo de ella; dicha fuente es la energía geomagnética<sup>3</sup>.

Ésta revolucionaria tecnología tiene el potencial de cambiar el panorama energético para todos los países que se encuentran en el llamado cinturón de fuego, entre ellos Colombia<sup>4</sup>.

Es por esto que la empresa colombiana de petróleos ECOPETROL S.A en aras de apalancar su iniciativa para el desarrollo de las energías alternativas, suplir los requerimientos eléctricos propios de forma autónoma, disminuir los costos por compra de energía y a su vez evitar la generación por medio de combustibles

---

<sup>2</sup> Renewable Energy World, Geothermal Energy.[En línea], disponible en: <http://www.renewableenergyworld.com/rea/tech/geothermal-energy>

<sup>3</sup> GeomagneticTechnology[En línea], disponible en: [http://wn.com/Geomagnetic\\_Technology](http://wn.com/Geomagnetic_Technology)

<sup>4</sup> Mapa geotérmico de Colombia – 2009[en línea], disponible en: [www.simposiobolivariano.org/WEB2/memorias/download.php?f=Carlos\\_Vargas-Mapa\\_Geotermico\\_-\\_2009.pdf](http://www.simposiobolivariano.org/WEB2/memorias/download.php?f=Carlos_Vargas-Mapa_Geotermico_-_2009.pdf)

fósiles, ve la posibilidad de incursionar en la generación eléctrica a partir de la energía geomagnética.

Aprovechando el know how obtenido por la empresa a lo largo de los años en exploración y perforación se cuenta con un acercamiento más preciso para la implementación de la tecnología al igual que un aprovechamiento de pozos ya perforados que pueden ser utilizados para el desarrollo del proyecto. Éstas y muchas otras variables como la implementación y puesta en marcha de una planta piloto de energía geotérmica<sup>5</sup> al igual que un aerogenerador por fuente de energía eólica, incentivan a ECOPETROL<sup>6</sup> a implementar la tecnología Geomagnética dentro de su árbol de posibilidades.

Finalmente y con el fin de aclarar un poco más el panorama para la implementación de ésta tecnología se determinará por medio de éste estudio la factibilidad financiera de aplicar la tecnología geomagnética en Colombia por parte de ECOPETROL S.A.

---

<sup>5</sup> UCSUSA, HowGeothermalEnergy Works.[En línea], disponible en:  
[http://www.ucsusa.org/clean\\_energy/technology\\_and\\_impacts/energy\\_technologies/how-geothermal-energy-works.html](http://www.ucsusa.org/clean_energy/technology_and_impacts/energy_technologies/how-geothermal-energy-works.html)

<sup>6</sup> Reporte sostenibilidad Ecopetrol 2011[en línea], disponible en:  
[http://www.ecopetrol.com.co/especiales/Reporte%20de%20sostenibilidad%202011/ecoeficiencia\\_01.html](http://www.ecopetrol.com.co/especiales/Reporte%20de%20sostenibilidad%202011/ecoeficiencia_01.html)

Existen varios problemas para los cuales se pretende crear solución mediante la generación eléctrica a partir de energía geomagnética en los campos petroleros colombianos. A continuación se describe cada uno de ellos:

- Alto costo por compra de energía a externos
- Existe autogeneración en algunos campos pero es a partir de fuentes fósiles como diesel, gas, lo cual se quiere evitar.
- Debido a la generación a partir de combustibles fósiles se genera un alto impacto al medio ambiente.
- Necesidad de incursionar en el desarrollo de energías alternativas que hagan de ECOPETROL S.A y Colombia, entes de desarrollo sostenible, internacionalizando aún más la compañía y la nación.

## **2.1 Descripción del proyecto a evaluar**

Instalación y puesta en marcha de una planta de generación eléctrica a partir del recurso geomagnético para el campo de producción APIAY<sup>7</sup> de ECOPETROL S.A, aprovechando una perforación petrolera existente.

---

<sup>7</sup> [http://www.ecopetrol.com.co/especiales/Meta\\_2004-2007/operacion.htm](http://www.ecopetrol.com.co/especiales/Meta_2004-2007/operacion.htm)

### **3. DESCRIPCIÓN DE LA TECNOLOGÍA GEOMAGMÁTICA COMO FUENTE ALTERNATIVA DE ENERGÍA<sup>8</sup>**

La generación eléctrica a partir de energía geomagnética radica en la instalación de un tubo de potencia de 60 metros de largo y de 1,16 metros de diámetro acoplado a perforaciones en zonas geotérmicas<sup>9</sup> a una profundidad capaz de captar como mínimo 110 Celsius (El Tubo de Potencia requiere solo 300 Grados F para operar, 110 C, gracias a su sistema propulsivo<sup>10</sup>).

Para la generación eléctrica se cumple con un ciclo rankine de potencia con la diferencia que el calor que se suministra en la caldera es el que se adquiere del recurso geomagnético y el fluido de trabajo es el pentano<sup>11</sup>.

Al cambiar de estado líquido a vapor, el pentano se dirige hacia la superficie con una velocidad capaz de mover una turbina que va acoplada a un generador y es ese movimiento el que genera la electricidad.

---

<sup>8</sup> Power tube [En línea], disponible en: <http://powertubeenergy.com/?author=1>

<sup>9</sup> NREL, GeothermalEnergyBasics. [En línea], disponible en:

[http://www.nrel.gov/learning/re\\_geothermal.html](http://www.nrel.gov/learning/re_geothermal.html)

<sup>10</sup> Power tube [En línea], disponible en [http://powertubeenergy.com/?page\\_id=123](http://powertubeenergy.com/?page_id=123)

<sup>11</sup> Hidrocarburo saturado o alcano con fórmula C<sub>5</sub>H<sub>12</sub>, puede ser producido por Ecopetrol.

Luego, el pentano se condensa para regresar en estado líquido hacia el fondo y continuar el ciclo de generación eléctrica.

El mayor desarrollo tecnológico para el aprovechamiento de esa fuente energética corresponde a la empresa Power Tube<sup>12</sup>, Inc ubicada en Houston, Texas, U.S.A. “El sistema geomagnético no requiere los millones de galones de agua, o de vapor, o vapor a presión que requiere la tecnología geotérmica<sup>13</sup>.

El tubo<sup>14</sup> tiene adaptado un sistema de ascensor térmico diseñado para bajar a profundidades de hasta 7,500 pies (2,000 metros).

Mientras para obtener energía geotérmica<sup>15</sup> hay que hacer dos perforaciones (una para inyectar agua y otra para que el vapor regrese a la superficie y alimente las turbinas), su técnica sólo requiere un conducto. A continuación se presenta una figura que describe el proceso.

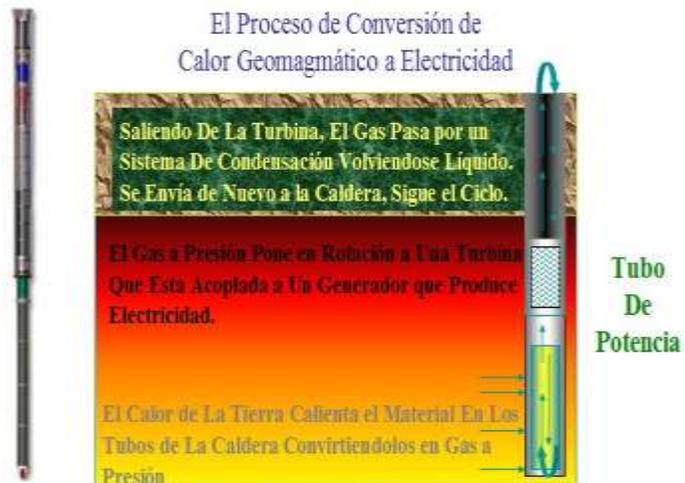
---

<sup>12</sup> PowerTube,[En línea], disponible en: [http://www.powertubeinc.com/about\\_us/](http://www.powertubeinc.com/about_us/)

<sup>13</sup> International Geothermal Association. [En línea], disponible en: <http://www.geothermal-energy.org/>

<sup>14</sup> PowerTube,[En línea], disponible en [http://www.powertubeinc.com/product\\_info/](http://www.powertubeinc.com/product_info/)

<sup>15</sup> Geothermal Resources Council. [En línea], disponible en: <http://www.geothermal.org/>



**Figura 1. Energía geomagnética. Fuente: PowerTube<sup>16</sup>**

A continuación se describe por medio de imágenes la tecnología geomagnética:



**Figura 2. Instalación de tecnología geomagnética. Fuente: Power Tube<sup>17</sup>.**

<sup>16</sup> PowerTube,[En línea], disponible en: [http://powertubeenergy.com/?page\\_id=133](http://powertubeenergy.com/?page_id=133)

<sup>17</sup> Graficas enviada a los autores por Power tube en presentación Powerpoint.



Figura 3. La Caldera Principal y el equipo extractor geomagnético.

*Fuente: PowerTube<sup>18</sup>.*



Figura 4. Los componentes principales. Fuente: Power Tube.

<sup>18</sup> Graficas enviada a los autores por Power tube en presentación Powerpoint.

Hay cinco generadores de calor en la tierra:

1. El centro de la tierra 7,027 C = 12,898 F
2. Elementos radioactivos que varían en temperatura: (235U) (238U) (232Th) (40K)
3. La fricción de platos t ermicos<sup>19</sup>. (anillos de fuego)
4. La radiación solar sobre la tierra<sup>20</sup>
5. La temperatura que proviene de los seres vivientes

El tubo de potencia originalmente fue diseñado para uso en las zonas de los anillos de fuego<sup>21</sup>.



**Figura 5. Zona de anillos de fuego. Fuente: UPME<sup>22</sup>.**

<sup>19</sup> Solar Thermal World, Solar Power Industry Report,[En línea], disponible en:

<http://www.solarthermalworld.org/files/Industry%20Report%20Major%20Solar%20Players.pdf?download>

<sup>20</sup> Renewable energy word.com, Mix'n'Match Hybrids Boost Renewable Load Factors [En línea], disponible en: <http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2010/10/mixnmatch-hybrids-boost-renewable-load-factors>

<sup>21</sup> Consulta documental. [En línea], disponible en:

[http://www1.upme.gov.co/index.php?option=com\\_wrapper&view=wrapper&Itemid=109](http://www1.upme.gov.co/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=109)

### **3.1 Ventajas de la energía geomagnética**

Entre las variadas ventajas que presenta la tecnología están:

- Para la generación eléctrica, la tecnología geomagnética aprovecha el calor de la tierra sin utilizar agua, protege la calidad de vida de las personas así como de la fauna, la flora y la naturaleza
- No consume ninguna clase de hidrocarburos ni recurso natural.
- No causa lluvia ácida.
- La energía eléctrica proviene de recursos renovables<sup>23</sup>
- No contamina los acuíferos ni necesita agua
- Su huella visual es mínima (10x10x3 mts)
- El sistema es monitoreado las 24 horas por satélite.

### **3.2. Ingeniería del proyecto**

Antes de 1998 no existía una tecnología similar que desarrollara el potencial energético suministrado por Power Tube. El desarrollo de nuevas tecnologías, nuevos materiales, y nuevos cálculos pusieron al día esta nueva fuente de energía.

---

<sup>22</sup> UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA – UPME. Boletín estadístico de minas y energía 2002-2007. Bogotá DC.:s.n., 2007

<sup>23</sup> Bührke Thomas. Renewable Energy. Alemania: Wiley-VCH, 2008. Kruger, P. Alternative Energy Resources- The Quest for sustainable Energy. Germany. Wiley VCH. 2006

El desarrollo de Power Tube<sup>24</sup> ha tomado mucho tiempo y dinero, pero después de dos prototipos anteriores que presentaron muchas fallas, costosos ejercicios de prueba permitieron alcanzarlos siguientes logros:

- Minimizar la huella en la superficie
- Generar la máxima energía en el mínimo espacio
- Eliminar el uso de agua
- Eliminar todo aspecto de polución
- La energía proviene de recursos renovables<sup>25</sup>
- Reducir al máximo los costos de energía
- Rápida instalación
- Facilidad en el transporte
- Máximo tiempo de trabajo sin detenciones
- Servicio y mantenimiento a control remoto
- Facilidad de poner al día al final de su ciclo de operación
- Económicamente factible para el cliente

---

<sup>24</sup> PowertubePakistan[En línea], disponible en: <http://www.powertubepakistan.com/>

<sup>25</sup> Rodríguez, Mario Ortega. Energías Renovables 2ª edición. Madrid : Thomson-Paraninfo,2003

- Mundialmente compite a menor costo con lo anteriormente existente.

### 3.2.1 Partes del tubo de poder (powertube A1)



**Figura 6. Partes del Tubo de Poder. Fuente: PowerTube Inc.**

1 Ascensor Térmico: Extrae el calor hasta 7.500 pies = 2286 metros

2 Bomba del extractor térmico

3 Intercambiador de calor. Contiene 6.600Ft= 2.005 metros de tubería SS

4 Turbo Generador.

5 tres pulgadas sección de condensador

6 Dos pulgadas sección de condensador

7 Una pulgada sección de condensador

8 Intercambio a sección SCCD.

9 Súper condensador acústico. (SCCD)

10 Tanque de expansión.

### 3.2.1.1 Ascensor térmico

El ascensor térmico, hace circular un aceite intercambiador de calor hacia el fondo al despachador regresivo que lo lleva de nuevo al intercambiador de calor. El aceite es anticorrosivo, biodegradable y No toxico.



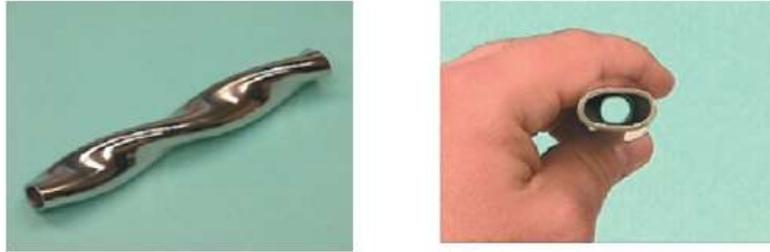
Figura 7. Ascensor térmico. Fuente: Power Tube Inc

### 3.2.1.2 Intercambiador térmico



Figura 8. Intercambiador térmico. Fuente: Power Tube Inc

La tubería del intercambiador de calor cuenta con un diseño especial.



Dos dobleces cada 8 centímetros

Dos mitades 3.80 cm. cada unidad

**Figura 9. Diseño de la tubería. Fuente: Power Tube Inc**

La tubería del intercambiador térmico tiene formato de enroscado en un proceso muy especial que aumenta en 35% la eficiencia del intercambiador de calor.

La tubería del intercambiador de calor se manipula en dobleces de configuración secuencial, para crear una serpentina continua que calienta el material propulsor en etapas controladas a través del sistema PLC (Controlador de lógica programable)



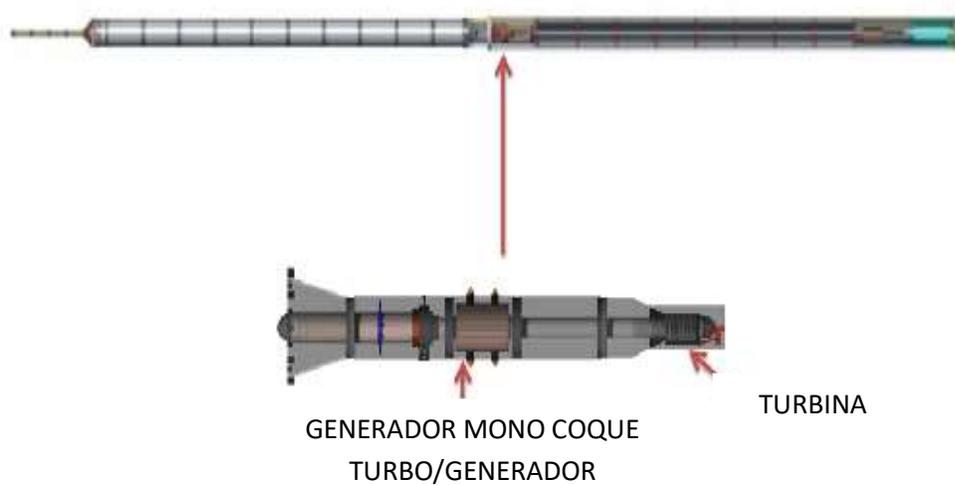
**Figura 10. Tubería para el intercambiador térmico. Fuente: Power Tube Inc.**



**Figura 11. Intercambiador de calor en preparación para el ensamble**

***Fuente: Power Tube Inc.***

### 3.2.1.3 Turbo generador



10.000 RPM Usando el líquido propulsor en su lubricación y enfriamiento

**Figura 12. Turbo Generador *Fuente: Power Tube Inc.***

### 3.2.1.4 Súper condensador acústico

Se usa para acelerar la condensación cuando es necesario.

En el SCCD el gas se convierte en líquido pasando por la compresión de la onda acústica que comprime el pentano y lo suelta en el tubo de expansión.

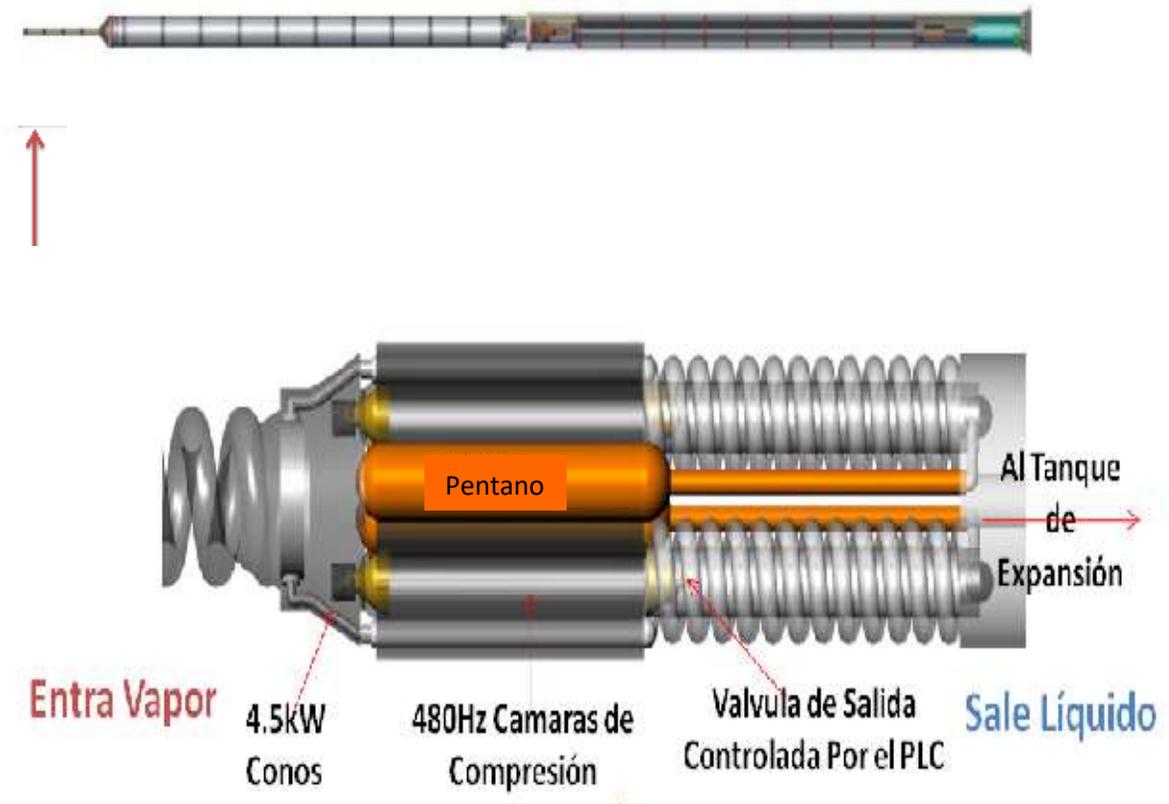


Figura 13. Súper Condensador Acústico. Fuente: Power Tube Inc.

### 3.2.2. Vista general del sistema

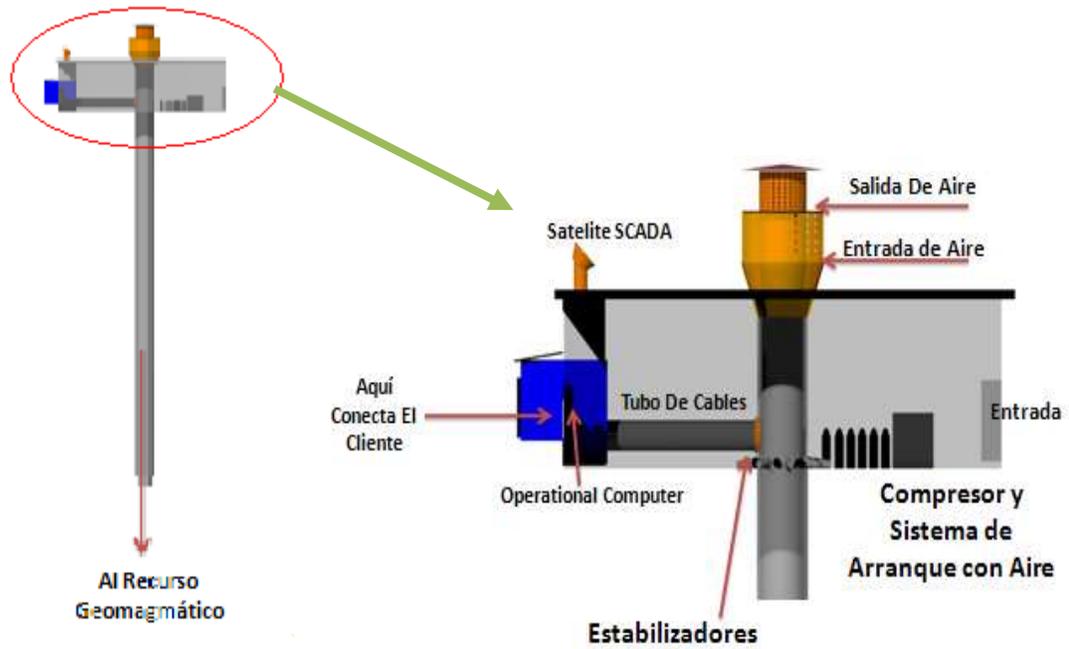


Figura 14. Vista General del Sistema. Fuente: Power Tube Inc.

### 3.2.3 Corazón del sistema Power Tube

175 puntos monitoreados por el PLC, Se envían señales en impulsos de 5 segundos cada 10 minutos por satélite al centro scada.

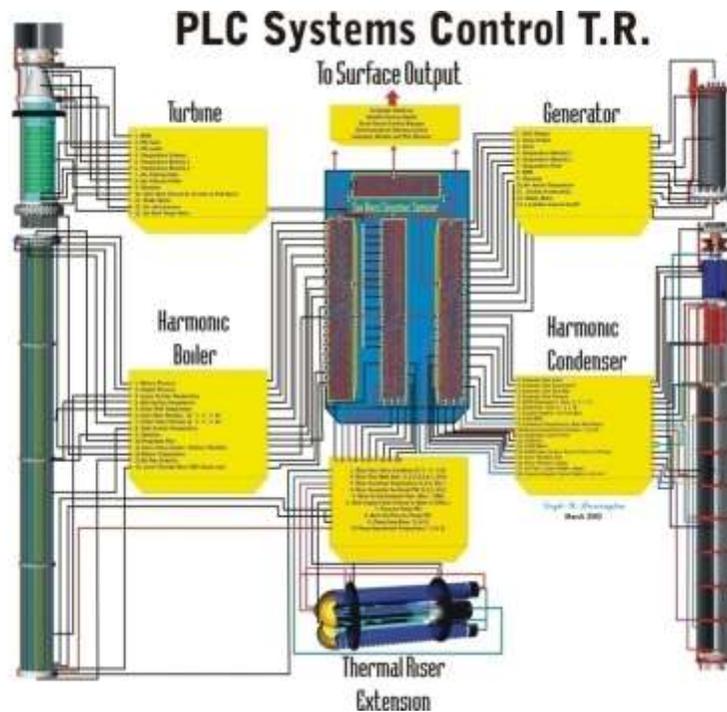


Figura 15. Corazón del sistema Power Tube. Fuente: Power Tube Inc.

### 3.2.4 Logros de la ingeniería geomagnética

El tiempo invertido en el desarrollo del programa de Power Tube han sido 11 años:

1. Los primeros tres años se dedicaron al estudio de la mejor manera de generar energía sin polución con recursos renovables.
  
2. Los siguientes 4 años en el desarrollo y costosas pruebas de dos prototipos, el MB2000 y el MB 2002. Analizando todos los sistemas y

buscando soluciones al mismo tiempo creando nueva tecnología para resolver los problemas enfrentados.

3. Un año en resolver el dilema de lubricación extensiva por largo tiempo en uso continuo bajo alta temperatura.
  
4. Los últimos 3 años, fueron dedicados al re-diseño completo, inclusive nuevas patentes cubriendo nuevos accesorios para hacer más eficiente el sistema.

Además el trabajo de crear un centro de pruebas para poder llegar a tener un lugar de ensamblaje y pruebas extensivas, para poder obtener la certificación final sin gastar millones más en hacerlo. A cambio de gastar dinero se optó por usar más tiempo.

#### **3.2.4.1. Estabilidad tecnológica de la generación geomagnética**

- No requiere agua como las geotérmicas<sup>26</sup>
  
- No requiere viento como los eólicos
  
- No requiere sol como los fotovoltaicos

---

<sup>26</sup> GEO, Geothermal Education Office. [En línea], disponible en: <http://geothermal.marin.org/>

- Trabaja 24 horas del día (teórico)
- 7 días a la semana (teórico)
- 365 días al año (teórico)

Y todo con la baja temperatura del planeta.

#### **4. SELECCIÓN TÉCNICA DE LOCALIZACIÓN DE LA PLANTA DE GENERACIÓN GEOMAGMÁTICA Y ANÁLISIS TERMODINÁMICO.**

Basado en información existente de las regiones colombianas<sup>27</sup> y gracias a las experiencias del proceso de recolección de información llevado a cabo por ECOPETROL S.A en el estudio e implementación de una planta de energía geotérmica<sup>28</sup> en la zona de apiay<sup>29</sup>, se determinó que ésta debería considerarse en más detalle<sup>30</sup>. Dentro de dicha información existen estudios de suelos<sup>31</sup> y temperaturas en pozos, el cual suministra información de referencia.

---

<sup>27</sup> Mapa geológico de Colombia [En línea], disponible en: <http://www.ingegominas.gov.co/Geologia/Mapa-geologico-de-Colombia.aspx>

<sup>28</sup> *GeothermalEnergy*. [En línea], disponible en: <http://www.geothermalenergy.org/>

<sup>29</sup> Ingeominas [En línea], disponible en: [http://issuu.com/revista\\_capicua/docs/datos\\_ingegominas](http://issuu.com/revista_capicua/docs/datos_ingegominas)

<sup>30</sup> Zona Apiay Ecopetrol [En línea], disponible en: <http://www.ecopetrol.com.co/contenido.aspx?conID=41820&catID=1>

<sup>31</sup> Estudios de erosión [En línea], disponible en: [http://www.erosion.com.co/index2.php?option=com\\_content&task=view&id=51&pop=1&page=0](http://www.erosion.com.co/index2.php?option=com_content&task=view&id=51&pop=1&page=0)

La zona cercana a la actual planta geotérmica<sup>32</sup> cuenta con disponibilidad de recurso de subsuelo caliente a temperaturas y entalpías necesarias para el funcionamiento del tubo de poder (Tabla 2) y del proceso termodinámico del pentano ( $C_5H_{12}$ ) el cual será producido por Ecopetrol<sup>33</sup>, logrando temperaturas muy superiores a su punto de ebullición ( $36^\circ C$ ) (más adelante se hará el análisis termodinámico según el volumen de control). El vapor de pentano causa el movimiento de la turbina durante su ascenso en ciclo cerrado, generando electricidad.

Seguidamente se buscaron perforaciones no productivas existentes que cumplieran con los requisitos térmicos ya mencionados, con el fin de seleccionar entre estas la opción más adecuada, que además permita ahorros significativos en inversión por trabajos ya realizados.

Los pozos más calientes identificados en Apiay son (temperaturas tomadas a 100mts de profundidad):

---

<sup>32</sup> GeothermalEnergy. [En línea], disponible en: <http://www.alternative-energy-news.info/technology/heating/>

<sup>33</sup> Productos y refinerías Ecopetrol [En línea], disponible en: <http://www.ecopetrol.com.co/contenido.aspx?conID=37389&catID=223>

Pozo	Temp. Prom. (°C)
Apiay 15 K2	93,21
Apiay 17 K2	97,00
Apiay 19 K2	90,51
Guatiquía 4H K2	87,49
Guatiquía 2	91,21

**Tabla 1. Pozos más calientes de Apiay (temperaturas tomadas a 100mt de profundidad). Fuente: ECOPETROL S.A**

Dadas las anteriores consideraciones y comparando con otros campos como Suria, Castilla II y Acacias, se corroboró durante el estudio que la estación Apiay es la más apropiada para la instalación de una planta Geomagnética.

La estación Apiay se encuentra ubicada en el sur del país en el departamento del Meta a 67 Km<sup>34</sup>. de Villavicencio vía Puerto López y a 11 Km. antes de este último, zona interconectada a la red nacional.

Se decidió realizar el presente proyecto para una perforación no productiva existente a aproximadamente 15 metros (en superficie) del pozo productivo Apiay 17 con una profundidad total de 6000 pies (1828 mt). A la perforación existente se le debe hacer una adecuación a los primeros 60 mt para ampliarla a un diámetro de 1,16mt. Esto se concluye considerando que dicho pozo cuenta con las mejores condiciones de temperatura de la zona para la implementación de la planta de 5MW<sup>35</sup>, capacidad utilizada en 31 pozos aledaños pertenecientes a ECOPELROL S.A. y que serán descritos a continuación. Con esta información se evaluaría el desempeño de la tecnología seleccionada para la producción de electricidad.

Se debe tener en cuenta que estas temperaturas son tomadas (tabla 1) en los primeros 100 mts de la perforación, sin embargo la región cuenta con un

---

<sup>34</sup> Mapa de tierras Colombia [En línea], disponible en: [http://hasp.axesnet.com/contenido/documentos/mt\\_feb04.pdf](http://hasp.axesnet.com/contenido/documentos/mt_feb04.pdf)

<sup>35</sup> Powertube Canada[En línea], disponible en: <http://www.powertubecanada.com/services>

gradiente<sup>36</sup> de 39°C/Km, por tanto la temperatura al final de la perforación será de aproximadamente 164°C.

A continuación se detalla el **análisis Termodinámico** para el ciclo rankine con pentano en el volumen de control. Se utilizó la herramienta TermoGraf v5.6 con licencia gratuita estudiantil<sup>37</sup>.

Los *datos de entrada* para el análisis del ciclo son los siguientes:

Ciclo: Rankine ideal de Potencia

Sustancia: Pentano

Punto 4: 164 Celsius y 100psi.

Punto 1: 117 Celsius y 14,7 psi.

$\Delta_f H^0_{\text{gas}}$	$\Delta_f H^0_{\text{líquido}}$	$S^0_{\text{gas, 1 bar}}$	$S^0_{\text{líquido, 1 bar}}$
-146.8 ± 0.59 <a href="#">kJ/mol</a>	-173.5 ± 0.59 <a href="#">kJ/mol</a>	347.82 ± 0.84 J·mol <sup>-1</sup> · <a href="#">K</a> <sup>-1</sup>	263.47 J·mol <sup>-1</sup> · <a href="#">K</a> <sup>-1</sup>

---

<sup>36</sup> Mapa geotérmico 2009 [En línea], disponible en: [www.simposiobolivariano.org/WEB2/memorias/download.php?f=Carlos\\_Vargas-Mapa\\_Geotermico\\_-\\_2009.pdf](http://www.simposiobolivariano.org/WEB2/memorias/download.php?f=Carlos_Vargas-Mapa_Geotermico_-_2009.pdf)

<sup>37</sup> Herramienta termograf [En línea], disponible en: <http://termograf.unizar.es/descargas/termograf.htm>

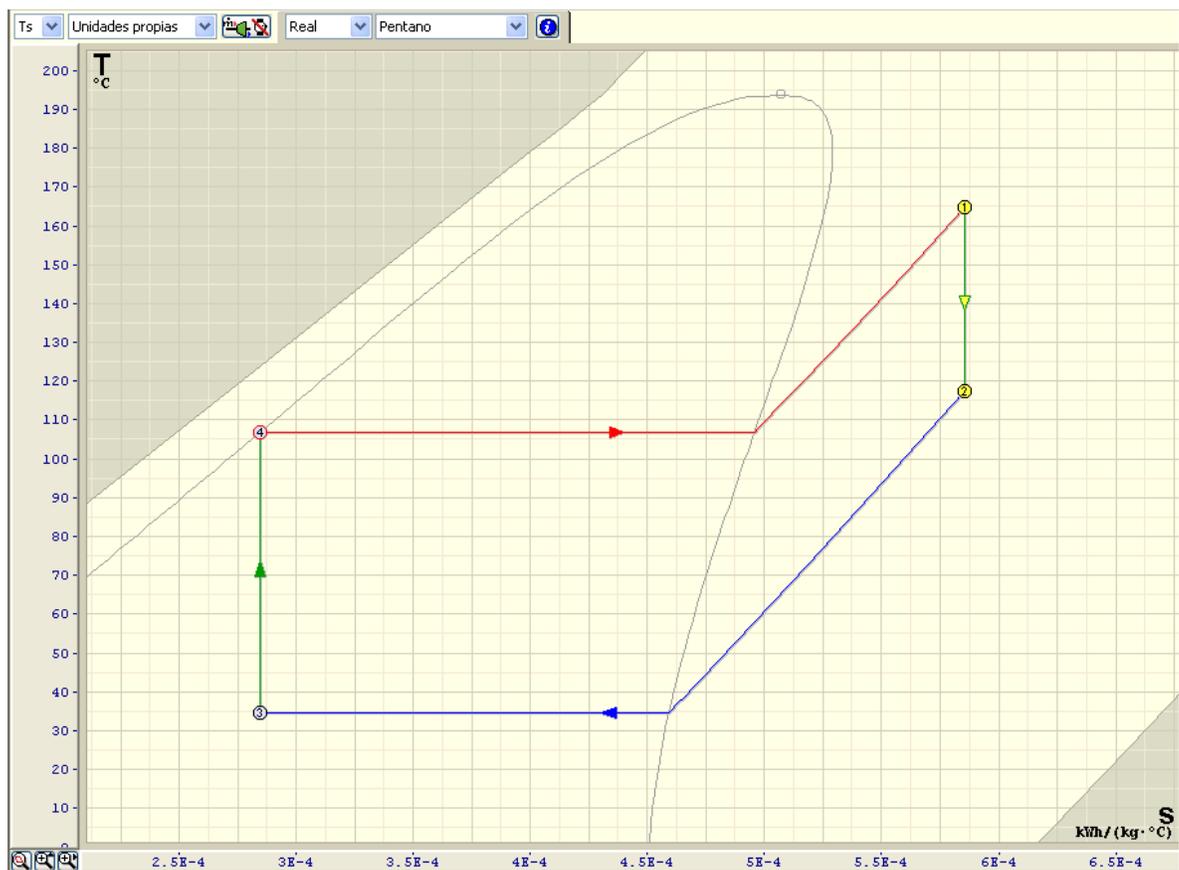
**Información de sustancia**

Sustancia		Rango de validez	
Nombre:	Pentano (Real)	Mínimo	Máximo
Fórmula:	$C_5H_{12}$	P:	1.515E-3    1237.5    bar
Masa molecular:	72.15 kg/kmol	T:	200.01    999.99    K
Punto crítico		Calor específico = f(T)	
P:	32.3953    bar	cp	cv
T:	467    K	Tamb:	2.38326    2.10139    kJ/(kg·K)
v:	5.085E-3    m <sup>3</sup> /kg	300 K:	2.38473    2.12319    kJ/(kg·K)
		0°C:	2.36789    2.17679    kJ/(kg·K)
		0°F:	2.38128    2.17819    kJ/(kg·K)

Aceptar

Java Applet Window

Diagrama T-S



Realizando el respectivo calculo, y en base a las temperaturas, presiones, entalpias y demás condiciones del pentano en el volumen de control del ciclo Rankine se determinó un flujo másico de 69 kg/s con el cual se conseguirá una potencia de 4756.98 KW. Teniendo en cuenta una eficiencia térmica en la turbina del 80%<sup>38</sup> y considerando una pérdida de energía en la tubería del 15%<sup>39</sup> se obtendrá un valor de potencia de 3092.03 KW.

Los resultados del análisis termodinámico fueron los siguientes:

Proc.12		s	5.851E-4	kWh/(kg·°C)	$\bar{n}$
Est.1		Est.2			
P	100.296	P	14.1471	psia	
v	0.065926	v	0.4529	m <sup>3</sup> /kg	
T	164.862	T	117.508	°C	
u	0.19329	u	0.16899	kWh/kg	
h	0.20595	h	0.18126	kWh/kg	
s	5.851E-4	s	5.851E-4	kWh/(kg·°C)	
X	---	X	---	p.u.	
Proc.12		Ciclo (potencia)			
$\dot{m}$	69	69	kg/s		
$\dot{W}_{vc}$ :	<b>6133.05</b>	<b>4756.98</b>	kW		
$\dot{Q}_{vc}$ :	<b>0</b>	<b>4756.98</b>	kW		

<sup>38</sup> Dato suministrado telefónicamente por Power Tube en Dallas TX, USA

<sup>39</sup> Dato suministrado telefónicamente por Power Tube en Dallas TX, USA.

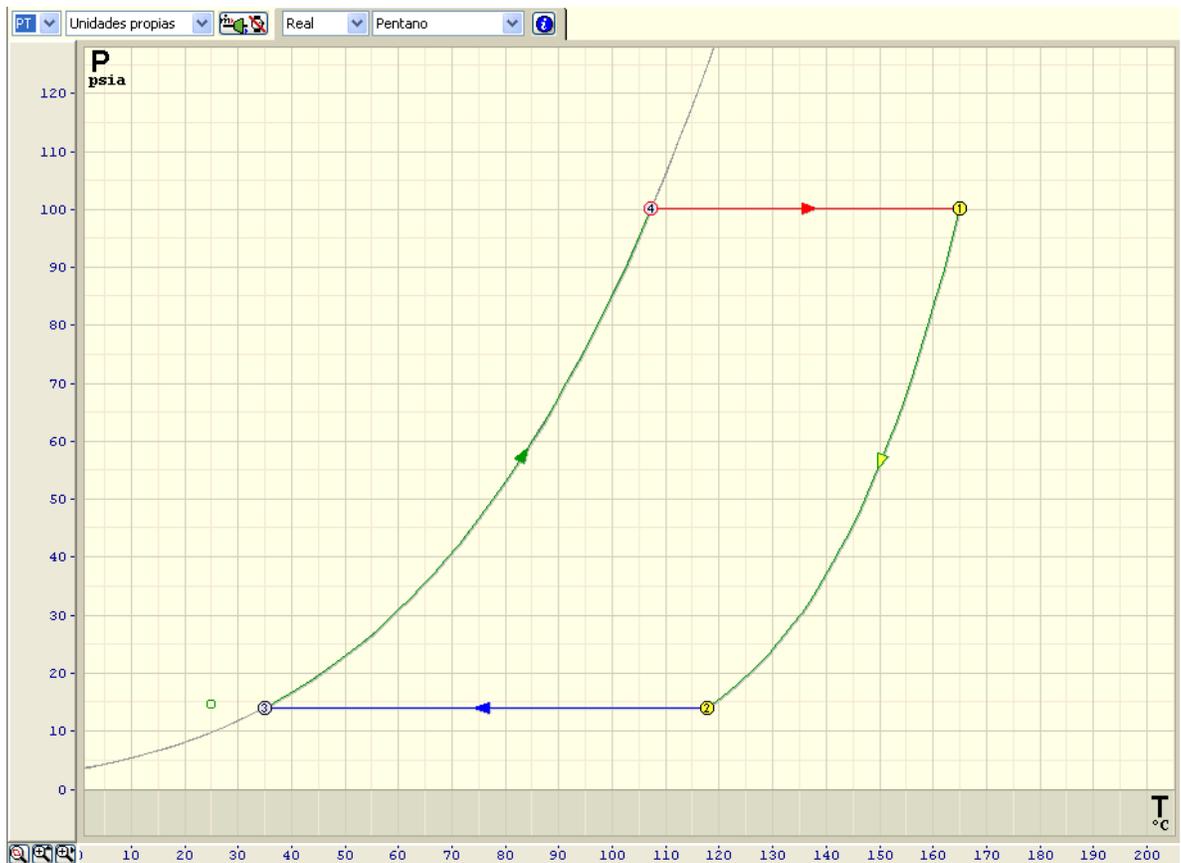


Diagrama P-T

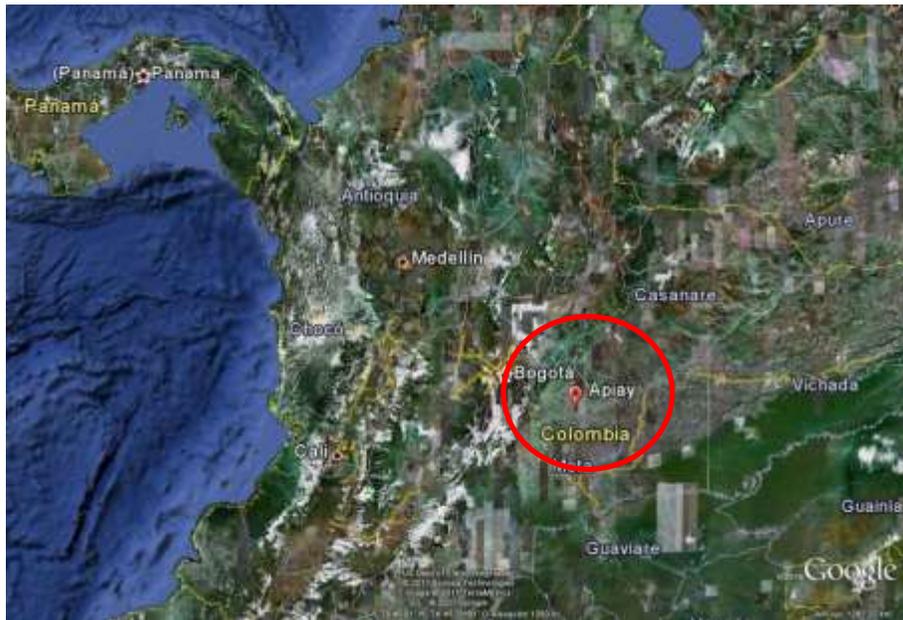
El volumen de pentano a utilizar lo calculamos llenando la tubería de 2" de diámetro y 1" de radio (1 pulgada= 0.0254 m) con la sustancia, lo cual sería el producto del área del círculo en metros ( $A = \pi r^2$ ) por la longitud de la tubería en metros, es decir  $\pi * 0.0254^2 * 3656 = 7.41 \text{ m}^3$ .<sup>40</sup>

La demanda que consumirá la energía proveniente del Power Tube se concentrará en 31 pozos adyacentes, todos ellos con expectativa de vida útil superior a los 15

<sup>40</sup> El pentano lo produce la refinería de Barrancabermeja; éste costo junto con el transporte será tenido en cuenta en el flujo de fondos.

años. Las estadísticas suministradas en el Anexo 6. (Demanda de pozos Apiay) indican un promedio de 95kw<sup>41</sup> de consumo. Multiplicando dicho valor por los 31 pozos obtendremos 2945 kw. Para conocer el consumo diario multiplicamos por las 24 horas, es decir 2,945 MW x 24 horas = 70,68MWh<sup>42</sup> día (ver anexo 1).

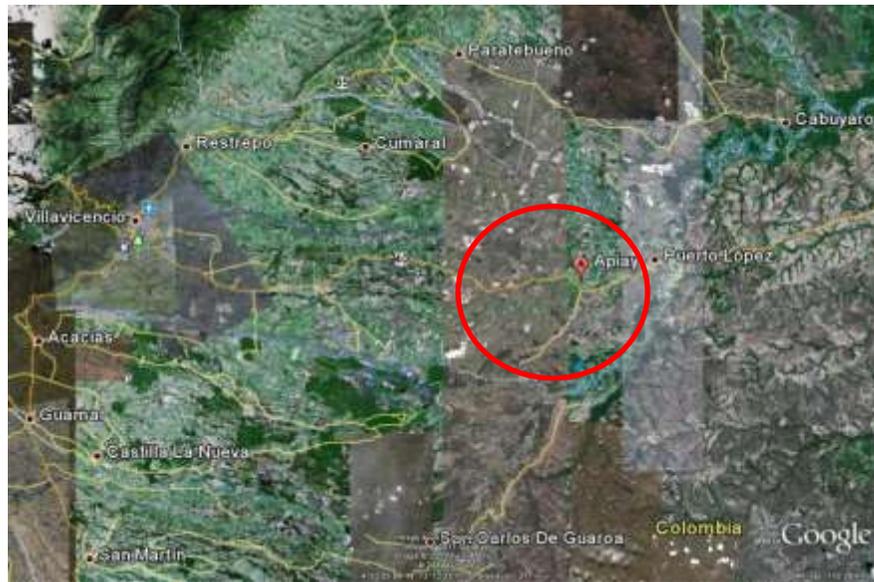
Realizando un análisis al anexo 6 podemos observar que la gran mayoría de pozos (el 85%) tienen una disponibilidad alta del 100%, sin embargo existen pozos que tienen una tasa de fallas mayor la cual afecta la disponibilidad de los mismos. En promedio la disponibilidad de los pozos es del 90%.



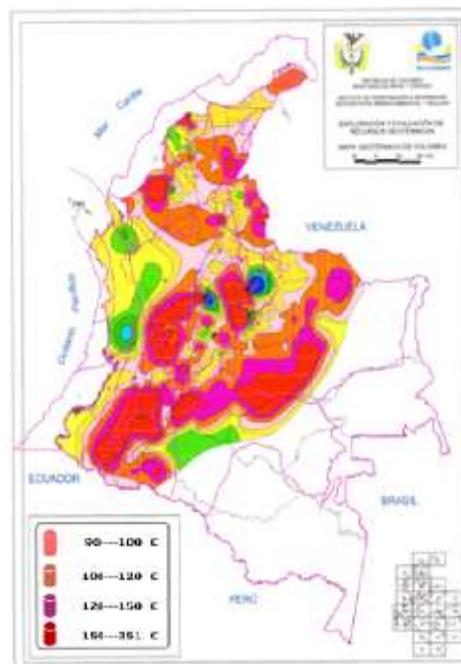
**Figura 16. Ubicación Apiay en Colombia. Fuente: Google Earth.**

<sup>41</sup> La demanda promedio disponible en el anexo 6 muestran una demanda promedio de 95Kw

<sup>42</sup> Las variaciones por picos de demanda han sido despreciadas teniendo en cuenta que se trata de una instalación interconectada a la red nacional, la cual se encargara de suplir los requerimientos que el Power tube no pudiera suplir en algún momento específico.



**Figura 17. Ubicación Apiay en Colombia. Fuente: Google Earth.**



**Figura 18. Mapa de zonas geomagnéticas en Colombia. Fuente: UPME<sup>43</sup>**

<sup>43</sup> Mapa de zonas geomagnéticas en Colombia [En línea], disponible en: <http://www.upme.gov.co/>

## **5. PARÁMETROS DEL PROYECTO**

### **5.1 Costos de inversión del proyecto.**

Los costos de compra de terrenos, importación de equipos, personal, transporte, campamentos, pentano, importación de maquinaria, instalación y puesta en marcha del sistema de poder a nivel de tensión utilizable para campos petroleros(ver detalle numeral 6) fue desarrollada con base información del sector petrolero, aportes informativos de ECOPETROL, consultas con expertos y en lo referente a la tecnología del tubo de poder, a las recomendaciones suministradas por el proveedor Power Tube, teniendo también en cuenta la experiencia de cálculos de proyectos similares en otros países. Sin embargo, teniendo en cuenta que es el primer proyecto de la empresa en Colombia, el equipo de trabajo decidió aplicar un margen de seguridad del 20%, incrementando de esta forma la inversión inicial y los gastos pre operativos en el mismo porcentaje, justificados en documentación interna del proveedor de la tecnología, la cual indica que es el porcentaje de seguridad con el que se debe realizar el análisis financiero para disminuir la variabilidad al momento de ejecutar el proyecto. Mayor detalle de esto en el numeral 6.

(Costo de inversión) x 1,2= Valor inversión utilizado

## **5.2 Capacidad de generación de la planta geomagnética.**

La empresa proveedora de la maquinaria y el sistema completo de potencia, "Power Tube" actualmente produce modelos a mediana escala de 5MW y 10MW. Buscando aprovechar mejor las economías de escala, el know how en perforación, transporte de maquinaria, todo el proceso de instalación del tubo de poder y teniendo en cuenta los requerimientos energéticos de los campos petroleros de la región se decidió realizar todo el análisis de este primer proyecto para 5MW como se especificó en el numeral 4.

## **5.3 Implementación de tecnología de última generación (Power Tube).**

En el mercado de maquinaria geomagnética de estas características, existe únicamente otra empresa que tiene en proceso de investigación esta tecnología, pero a escala comercial la tecnología Power Tube al momento de realización de este documento, es la única plenamente desarrollada, por tanto será dicha empresa la que proveerá la tecnología de última generación necesaria para este proyecto.

## **5.4 Producción anual en Kwh.**

Con el fin de utilizar datos conservadores sobre esta nueva tecnología, el análisis se trabajará con un porcentaje de carga inferior (del tubo de poder) para la planta

geomagnética a los datos suministrados por el fabricante (90%), al igual que el factor de disponibilidad un poco menor (97% fabricante<sup>44</sup>).

Lo cual quiere decir según Power Tube y su experiencia en las plantas piloto instaladas, la maquina puede trabajar un 97% de las 8.760 horas del año con una capacidad del 90% de los 5.000 KW de capacidad instalada.

Por tanto, para calcular la producción anual de Kwh en el proyecto se asumió que se trabajará con los siguientes datos:

Porcentaje de carga (del tubo de poder): 70%

Factor de disponibilidad (del tubo de poder): 95%

Esto buscando mantener un margen de seguridad en la operación y en el análisis financiero puesto que la información disponible en esta área es limitada es importante profundizar en la etapa posterior al presente con el fin de perfeccionar el análisis.

---

<sup>44</sup> Datos suministrados por personal Powertube con base a las experiencias en plantas instaladas, sin embargo se carece de documento físico válido para Colombia, es por esto que los autores deciden disminuir estos valores con el fin de suavizar el impacto de la posible inexactitud es la información que suministro el fabricante.

## 5.5 Costos de producción

Con el fin de estimar el precio del Kwh producido en el proceso geomagnético, se encontró que la forma más acertada para hacerlo es mediante la aplicación de un porcentaje sobre el valor de los ingresos estimados:

$$\text{Ingresos estimados} \times (\%) = \text{Costos operacionales base} + \text{costos personal} + \\ \text{Mantenimiento campamento} + \text{vehículos}$$

Como ya se menciona, al momento de realización de este documento las únicas experiencias existentes en esta tecnología, son las dos plantas piloto creadas por Power Tube en otros países, los costos de mantenimiento y funcionamiento no son fácilmente calculables para Colombia, por tanto, el fabricante utilizar un 10%-12%<sup>45</sup> del valor de los ingresos.

A pesar de tratarse de un proceso cerrado, con reutilización del gas y bajos costos de mantenimiento o paradas de planta, se decidió incrementar el porcentaje suministrado por el fabricante, para finalmente trabajar con el 20% de costos de operación de la maquinaria y del sistema completo de generación.

---

<sup>45</sup> El representante de powertube recomendo de forma verbal estos valores, sin embargo por desconocer mayor detalle del mercado colombiano se decidió utilizar un 100% de seguridad es decir pasar de un 10% recomendado a un 20% ajustado a Colombia practica utilizada en la industria tecnologica con implementaciones novedosas.

Adicionalmente se sumaron los valores pertinentes a la cantidad de personal necesaria para la operación (1 Ingeniero y 4 tecnólogos) con unos costos estimados de 350 millones por año, así como el costo de los vehículos y mantenimiento del campamento (ver detalle numeral 6).

### **5.6 Proyección de los valores del Kwh a 15 años.**

El proyecto está contemplado como una planta para auto abastecimiento (interconectada), por tanto no se planea vender la energía sino auto generar para suplir el consumo interno de campos petroleros adyacentes.

A pesar de esto, se hace la salvedad de que esta no es la única posibilidad, podría plantearse otro proyecto para campos en zonas no interconectadas.

Para este proyecto, la zona donde se planea el proyecto es interconectada y los ingresos para el proyecto son los precios de compra de la electricidad en nivel de tensión dos que la empresa actualmente está pagando, más los costos de la transmisión y mantenimiento para su transformación a una tensión utilizable (+ 15%) totalizando \$170/Kwh.

**No se contemplaron ahorros por diesel utilizado actualmente en los generadores de respaldo o ganancias potenciales por disminución en paradas de producción de los pozos, que se puedan tener gracias a este nuevo generador puesto se trata de una tecnología nueva que será introducida por primera vez al país y realmente se desconoce su confiabilidad final. Igualmente la confiabilidad<sup>46</sup> de la red eléctrica en esta zona por inversiones realizadas 2007<sup>47</sup>, actualmente en promedio está por encima el 99%<sup>48</sup>. Posteriormente a la puesta en marcha en la cual se puedan recolectar datos reales de funcionamiento, estos valores podrán tenerse en cuenta para proyectos posteriores.**

Otro aspecto a tener en cuenta es la variación del precio del petróleo<sup>49</sup> que repentinamente podría bajar a niveles que hagan inviable la operación de ciertos campos petroleros con costos de operación superiores a los precios de crudo en ese momento. Para ese último escenario la única opción sería vender la energía como un generador, sin embargo, teniendo en cuenta que históricamente los

---

<sup>46</sup> Informe de gestión 2010 XM [En línea], disponible en:

[http://www.xm.com.co/Informes%20Empresariales/Informe\\_gs.pdf](http://www.xm.com.co/Informes%20Empresariales/Informe_gs.pdf)

<sup>47</sup> *Consulta documental*. [En línea], disponible en: <http://www.acolgen.org.co/article.php?sid=150>

<sup>48</sup> Informes empresariales XM [En línea], disponible en:

<http://www.xm.com.co/Informes%20Empresariales/Forms/AllItems.aspx>

<sup>49</sup> Precio del petróleo WTI [En línea], disponible en: [http://www.cx-portal.com/wti/oil\\_en.html](http://www.cx-portal.com/wti/oil_en.html)

precios del crudo han seguido aumentando es un escenario improbable para Apiay por tanto no se contemplará.

Finalmente, teniendo en cuenta estos factores, se decidió trabajar con un precio constante de \$170/Kwh.

### **5.7 Evaluación del acceso a la red de interconexión.**

En los numerales anteriores se evidencia que se existe acceso a la red interconectada lo cual se realiza por medio de la red de 34.5 Kv de la Electrificadora del Meta.

La Electrificadora del Meta cuenta con una línea de transmisión eléctrica que parte de Villavicencio, cruzando por los campos Suria, Apiay y llega hasta el municipio de puerto López. Dicha línea está alimentada a 34.5KV<sup>50</sup>.

“La Electrificadora del Meta firmó un contrato con Ecopetrol para alimentar a 115 (kv) la línea Ocoa-Puerto López y así garantizar la explotación de los campos petroleros en la zona de Castilla Chichimene y Apiay.”

---

<sup>50</sup> Consulta documental. [En línea], disponible en: <http://www.acolgen.org.co/article.php?sid=150>

Lo anterior asegura confiabilidad del sistema eléctrico de la región por encima del 99%<sup>51</sup>.

No obstante, se requiere infraestructura eléctrica adicional con el fin de conectar la red que sale del transformador de la planta de generación geomagnética a 13.800V con la barra del mismo nivel de tensión de la subestación Apiay propiedad de Ecopetrol, que está alimentada de la red de la Electrificadora del Meta a 34.5 KV, subestación que actualmente cuenta con un transformador de 35.4 KV a 13.800V que alimenta dos barras de distribución que abastecen los pozos, los cuales cuentan cada uno con su respectiva transformación de 13.800V a 440V.

En las barras actuales de 13.800V se va a construir una celda de enlace que sirva de respaldo en caso de falla de la planta de generación geomagnética.

Los elementos que se requieren para esta interconexión son<sup>52</sup>(ver Figura 23):

---

<sup>51</sup> Informes empresariales XM [En línea], disponible en:  
<http://www.xm.com.co/Informes%20Empresariales/Forms/AllItems.aspx>

<sup>52</sup> Componentes requeridos para la complementación necesaria en la instalación eléctrica. Apoyo personal capacitado ESSA.

- Transformador de 5 MW a la salida de la planta de generación.
- 300 metros de red de media tensión (13.200V).
- Adecuación de barra de la subestación Apiay
- Instalación de la celda de enlace en las barras de 13.800V de la subestación Apiay.
- Protecciones y accesorios automáticos de la transferencia.

**a. Especificaciones de la planta de generación geomagnética.**

De acuerdo a los numerales anteriores, estas son las características de la planta a utilizar:

<b>Especificaciones de la planta geomagnética</b>	
<i>Tipo</i>	<i>PowerTube</i>
<i>Número de plantas</i>	<i>1</i>
<i>Capacidad Nominal neta</i>	<i>5000 Kw</i>
<i>Capacidad real neta</i>	<i>4500 Kw</i>
<i>Porcentaje de carga</i>	<i>70 %</i>

<i>Factor de disponibilidad (Temperatura, Caudal y equipo)</i>	<i>95%</i>
<i>Consumo eléctrico equipos Auxiliares</i>	<i>1 Kw</i>

**Tabla 2. Especificaciones de la planta geomagnética.**

## **6. INVERSIÓN DEL PROYECTO.**

### **6.1 Contratación de personal especializado.**

Para la primer etapa de implementación y puesta en marcha del proyecto es necesaria la contratación de personal<sup>53</sup> especializado en dirección (2) y planeación de proyectos (2), interventoría(1) y supervisoría (1), abogados (1), geólogos (1), ingenieros civiles (1), ingenieros electricistas (2), ingenieros mecánicos (4), ingenieros ambientales (1), trabajadores sociales (1), ingenieros industriales(1), tecnólogos electricistas (4), tecnólogos electromecánicos (2), auxiliares electricistas (2), operadores de maquinaria pesada (4), soldadores(1), esto

---

<sup>53</sup> Contratación personal Ecopetrol [En línea], disponible en:  
<http://www.ecopetrol.com.co/contenido.aspx?catID=269&conID=42827>

promedia \$2.729 millones<sup>54</sup> durante el primer año en el cual no existe operación por tanto se colocaron dentro de gastos preoperativos.

Para el funcionamiento del tubo de poder, se necesitan únicamente: ingenieros (1) y técnicos (4). Aportando al ítem de gastos 352 millones al año.

## **6.2 Contratación de vehículos y estudio de suelos.**

Con respecto a los vehículos, se realiza la contratación<sup>55</sup> de tres camionetas con sus respectivos conductores, doble tracción, de combustible Diesel, doble cabina que cumpla los parámetros de seguridad industrial con seguros y pólizas vigentes durante el proceso de instalación preoperativa aportando \$295 millones de pesos durante el primer año, y normalizándose con un único vehículo en 108 millones de pesos anuales durante los siguientes años.

El estudio de suelos para la construcción del cuarto de control y de máquinas e información adicional necesaria tiene como costo \$155 millones de pesos.

---

<sup>54</sup> Lista precios consultorías Ecopetrol ajustado a 2011[En línea], disponible en:

<http://xa.yimg.com/kq/groups/18090091/55194649/name/precios>

<sup>55</sup> Contratación Ecopetrol [En línea], disponible en:

<http://www.ecopetrol.com.co/contenido.aspx?catID=200&conID=41656>

### **6.3 Gestión de permisos y gastos legales (ambientales, sociales, de grupos protegidos.)**

Se realizan los estudios ambientales correspondientes al proyecto.

Se presentan las patentes del Power Tube en donde se rinden los siguientes resultados:

-Un Power Tube de 5 Mw elimina lo siguiente:

- 400 toneladas de polución atmosférica.

- 1.000.000 de galones de combustible equivalente de 1240 toneladas de carbón.

-Elimina o no permite contaminación a los acuíferos producción de lluvia acida.

- Elimina la polución visual por enormes construcciones.

-No destruye la fauna o flora de la zona.

Estos estudios relacionados específicamente con la tecnología y su interacción con la región se calculan en \$245 millones de pesos<sup>56</sup> y se suman a gastos preoperativos.

---

<sup>56</sup> Costos Ecopetrol [En línea], disponible en:  
<http://www.ecopetrol.com.co/contenido.aspx?catID=49&conID=38352&pagID=129078>

#### **6.4 Socialización con las comunidades de la región.**

La socialización del proyecto con las comunidades, estará a cargo de un grupo de trabajadores sociales(1), psicólogos(1) y otros profesionales con vasta experiencia en el tema(2).

Dentro de la programación para la socialización se realizará un estudio sobre los riesgos sísmicos en el territorio del proyecto geomagmático. Los recursos para su realización serán aportados por Ecopetrol. Se crea comisión que defina el objeto, los alcances y los ejecutores del estudio.

Otro punto de la socialización comprende la realización del estudio de Caracterización socioeconómica que debe contener todos los estudios sociales solicitados por el Ministerio del medio ambiente. Estos estudios se entregarán al programa de desarrollo y paz de la región quien lo entregará posteriormente al comité de concertación entre Ecopetrol y las comunidades de la zona del proyecto geomagmático. Ecopetrol hará la respectiva socialización del estudio.



**Figura 19. Comunidades participantes a la socialización de otros Proyectos.**

***Fuente: ESSA.***

Adicionalmente se construirá una escuelita para motivar el estudio de la comunidad aledaña a la zona de influencia. El total de estos costos serán asumidos durante el primer año por ECOPETROL y se estiman en \$425 millones de pesos en total, los cuales serán cargados al ítem de inversión inicial.

### **6.5 Asignación del terreno para el desarrollo del proyecto**

Una vez determinada la ubicación geográfica del proyecto se procede a realizar la negociación y compra de los terrenos, los cuales para este caso son terrenos privados propiedad de ECOPETROL y no corresponde a resguardos indígenas ni se requieren negociaciones con terceros, lo que facilita de cierta forma la asignación interna de las tierras por parte de la empresa al proyecto. Para tal fin el grupo de abogados e expertos en el tema de la empresa son los encargados de

realizar este trámite, por lo cual se recomendó que se asigne un costo de inversión en el terreno de \$102 millones de pesos<sup>57</sup>.

## **6.6 Construcción de campamento y locaciones**

Una vez asignados los terrenos se procede a la construcción del campamento para albergar al personal técnico, operativo, almacén y laboratorio de tal modo que se convierta en un lugar casi autosuficiente.

Para el proyecto geomagnético se cuenta con un novedoso sistema estructural cuyo su peso se distribuye más eficientemente y logrando que la estructura sea menos robusta. Adicionalmente, al ser más livianos que otros productos similares, los camiones gastan menos combustible en su transporte y presentan menor desgaste mecánico en general fueron diseñados pensando en la utilización racional de los recursos naturales de energía.

El material que se utiliza para aislar el interior del exterior, es el más eficiente del mercado; el poliuretano de alta densidad (40kg/m<sup>3</sup>) permite que el uso de los equipos de aire acondicionado o de calentadores, se limite a menos horas al día gracias a la capacidad que le brinda al módulo de mantener la temperatura

---

<sup>57</sup> El valor ha sido tomado según trabajo para el proyecto de energía geotérmica en el mismo campo apiay.

interior. Las redes hidráulicas y sanitarias se dividen en agua potable, aguas grises y aguas negras; de esta manera se puede reutilizar el agua de lavamanos y duchas en orinales y sanitarios.

Los módulos están diseñados para soportar condiciones climáticas agresivas, gracias a que está construido con materiales de la más alta calidad; adicionalmente, su inteligente diseño les permite ser reparados fácil y rápidamente en el mismo campo donde estén instalados.

Esta infraestructura y demás relacionados a este numeral se calculan en \$393 millones de pesos como inversión inicial y \$82 millones de pesos de mantenimiento anual de instalaciones<sup>58</sup>.



**Figura 20. Construcción de campamento y locaciones para la planta Geomagnética. Fuente: Power Tube Inc.**

---

<sup>58</sup> Basado en costos actuales de instalación y mantenimientos en la región de Apiay.

## 6.7 Costos de perforación

La contratación de los equipos<sup>59</sup> o empresa de perforación están íntimamente ligado al montaje del tubo de poder, aunque una empresa especializada se encarga de adecuar una perforación existente en el sitio determinado, las características de diámetro del pozo son suministradas por la empresa Power Tube Inc. de acuerdo a las particularidades de tubo de potencia.

La perforación del pozo para la instalación del tubo de poder generalmente tiene un diámetro de 1,16 metros y la profundidad varía de acuerdo a las características del suelo y su temperatura. El tubo tiene adaptado un sistema de ascensor térmico diseñado para bajar a profundidades de hasta 7,500 pies (2,000 metros) donde existen temperaturas requeridas; hasta esta profundidad ya existe la perforación.

El equipo de perforación propiamente dicho consiste en un sistema mecánico o electromecánico, compuesto por una torre, de unos veinte o treinta metros de altura, que soporta un aparejo diferencial: juntos conforman un instrumento que permite el movimiento de tuberías con sus respectivas herramientas, que es accionado por una transmisión energizada por motores a explosión o eléctricos.

---

<sup>59</sup> Reporte contratación equipos Ecopetrol [En línea], disponible en:  
[http://www.ecopetrol.com.co/especiales/Informe\\_Carta\\_Abr2006/rev\\_port2.htm](http://www.ecopetrol.com.co/especiales/Informe_Carta_Abr2006/rev_port2.htm)

Este mismo conjunto impulsa simultánea o alternativamente una mesa de rotación que contiene al vástago, tope de la columna perforadora y transmisor del giro a la tubería.

Paralelamente el equipo de perforación cuenta con elementos auxiliares, tales como tuberías, bombas, tanques, un sistema de seguridad que consiste en válvulas de cierre del pozo para su control u operaciones de rutina, generadores eléctricos de distinta capacidad según el tipo de equipo. Con estas especificaciones se calcula una inversión en este ítem de \$1.660 millones de pesos.

### **6.8 Instalación del tubo de potencia (Power Tube) con pentano**

Una vez realizada la perforación para el tubo de potencia de 60 metros de largo y de 1,16 metros de diámetro en la zona geomagnética seleccionada, con la profundidad capaz de captar entre 90° durante los primeros 100mts y 165° Celsius a profundidad total de la perforación (6000pies), se procede a realizar la instalación del equipo Power Tube por los expertos de la firma quienes prestan el servicio suministro, montaje, instalación y capacitación al personal de la empresa.

El valor estimado de este ítem es de \$8.000 millones de pesos de inversión.<sup>60</sup>

Adicionalmente el pentano necesario 7410 Lt (ver numeral 4) a un precio promedio de \$6.200pesos/lit<sup>61</sup>, da un costos de \$45.942.000=, adicionalmente se estimó que el transporte y demás relacionados con la puesta en sitio del pentano en el pozo tendrá un costo de \$23.500.000<sup>62</sup>=. Se trabajará con un valor cerrado de \$70 millones de pesos con respecto al pentano.



**Figura 22. Instalación del Tubo de Potencia. Fuente: Power Tube Inc.**

---

<sup>60</sup> El representante powertube estimó el valor de 4 millones de dólares (precio dólar para el proyecto 2.000 pesos) para el equipo instalado en Colombia, sin embargo en la siguiente etapa se debe revisar a profundidad pues podría variar dependiendo de las características del pozo seleccionado.

<sup>61</sup> Puesto que no se encontró el pentano numerado en los listados de Ecopetrol como producto o subproducto se trabajó con promedios internacionales y datos de diversas fuentes para promediar el valor entregado [http://www.quiminet.com/pr9/Pentano.htm#t\\_prec](http://www.quiminet.com/pr9/Pentano.htm#t_prec)

<sup>62</sup> Valor estimado con tablas internas Ecopetrol.

## 6.9 Infraestructura eléctrica.

De los 63 pozos del campo, 32 se siguen abasteciendo de la red de la Electrificadora del Meta y 31 por medio de la energía del proyecto, en caso de falla de la planta de generación geomagnética, la celda de enlace se activa permitiendo que la totalidad de los pozos se abastezcan de energía de la red de la Electrificadora del Meta sin presentar parada en la operación de los pozos.

En este proyecto se dimensiona la construcción de 300 metros de la red de media tensión desde el transformador de la planta de generación geomagnética hasta la barra de línea de la subestación Apiay, la cual existe en la actualidad y es la que alimenta los pozos mediante conexión con la red de la Electrificadora del Meta<sup>63</sup> de 34.5 KV. la adecuación de la barra de 13.800V en la subestación Apiay, la instalación de una celda de enlace entre las barras de 13.800 V. de la subestación Apiay y las protecciones y accesorios de la celda.

La subestación Apiay propiedad de Ecopetrol se encuentra a 300 metros de la planta de generación geomagnética y las coordenadas suministradas por la empresa son: W 4.06971 N -73.04994.

---

<sup>63</sup>ISA, [En línea], disponible en:

<http://www1.electrificadoradelmeta.com.co/irj/portal/anonymos?NavigationTarget=navurl://bd8d927dfca3108a6e8b86f0ba2e582e> (el diagrama de infraestructura eléctrica ISA es considerado hoy en día como documento privado por tanto no pudo incluirse en el presente)



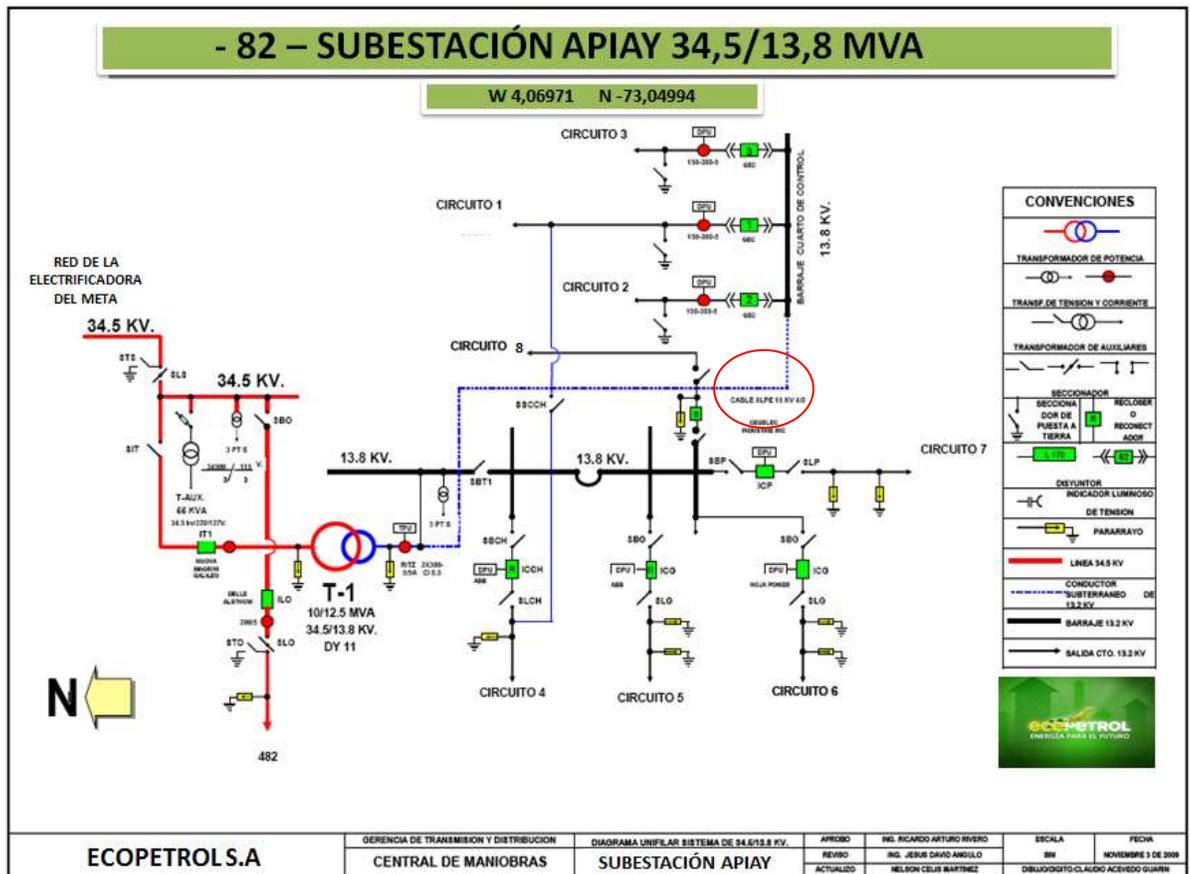


Figura 24. Diagrama unifilar de la subestación Apiay de ECOPETROL.

Fuente: ECOPETROL

La celda de enlace se instalará en el trazado de la red de XLP facilitando la acción automática en caso de falla de la planta de generación geomagnética e independizando los circuitos 1, 2 y 3 los cuales abastecen de energía los 31 pozos beneficiados por el proyecto

<b>PRESUPUESTO PARA LA INTECONEXIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA ELÉCTRICA DEL PROYECTO DE GENERACIÓN GEOMAGÁTICA CON LA SUBESTACIÓN APIAY DE ECOPETROL</b>	
<b>ELEMENTO</b>	<b>UND</b>
Poste de concreto de 12 mt. Tensión de rotura 510 kg.	6
Herrajes de configuración de la estructura	6
Conductor de aluminio 4/0	900
Cimentación en poste de 12 metros	6
Elementos de puesta a tierra para media tensión	2
transformador de potencia de 5 MW	1
adaptación de barra de 13,200 V	1
Celda de enlace trifásica automática de 13,200 V tipo exterior	1
Caja de accionamiento motorizado para seccionador	1
Mando eléctrico motorizado para seccionador	1
Interruptor tripolar tipo exterior	3
Protección diferencial barra sencilla tipo 2	1
Equipos de medida	2
Recloser de 13,8 V para 400 A con relé multifunción en el control	1
Adecuación patio de la subestación	1
Imprevistos	1

**Tabla 3. Resumen elementos de la infraestructura eléctrica<sup>64</sup>.**

**Fuente: Datos CREG, Elaboración Tabla Autores**

El trazado de la red comprende el desarrollo de toda la infraestructura energética correspondiente a la construcción de las redes de media, suministro y transporte

<sup>64</sup> Consulta documental. [En línea], disponible en: [Resolución CREG 097 de 2008 capítulo 5 páginas 56 - 60 Descripción de unidades constructivas](#)

de materiales, equipos y herramientas al sitio del proyecto, desarrollo de las pruebas respectivas y puesto en funcionamiento de las redes.

La metodología utilizada (ver anexo 7-costos infraestructura eléctrica) para calcular los costos de este numeral fue: primero tomar los precios de la resolución de la CREG 097 2008, seguidamente se le aplicaron a esos precios los incrementos de las variaciones del IPC<sup>65</sup> (bancodelarepública, 2011) a cada año para finalmente al valor actual aplicarle un margen de seguridad del 15% lo cual entrega valores cercanos a los disponibles en el mercado 2011.

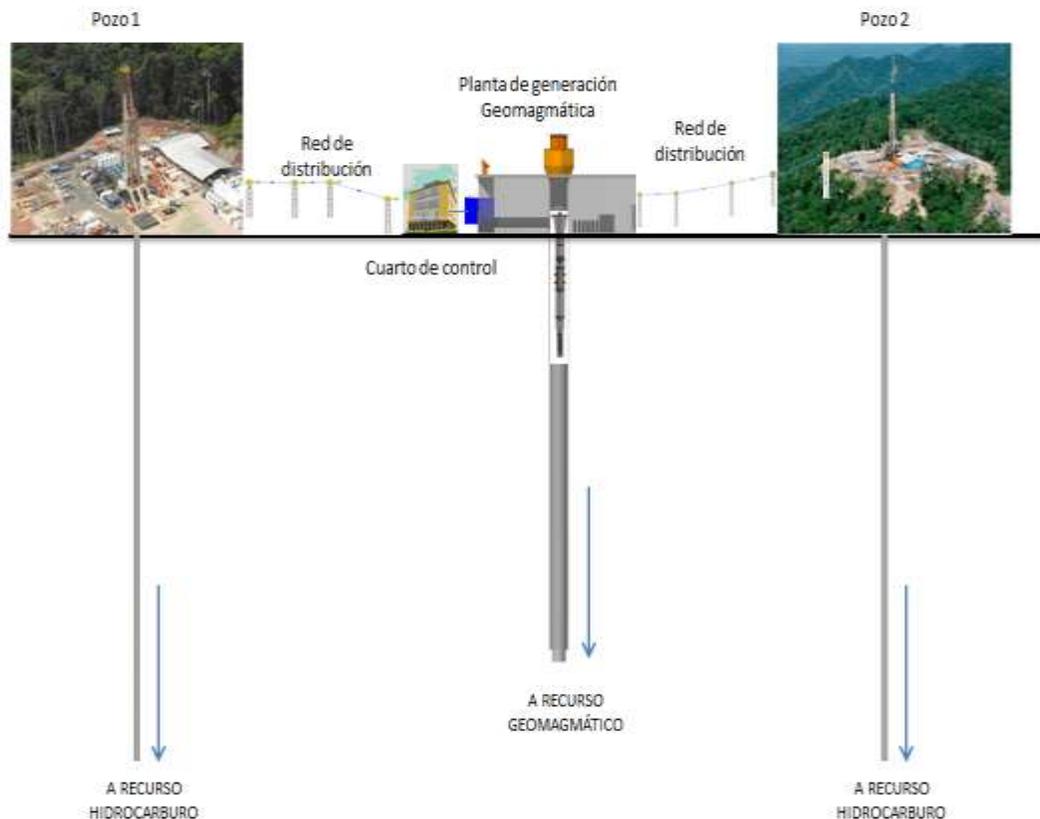
De esta forma, su costo de inversión inicial se estima en \$ 963,9 millones de pesos, por tanto se trabajara en el presupuesto con un valor cerrado de \$970 millones de pesos. Los costos de mantenimiento están incluidos dentro del 20% de los ingresos que se están asignando para la operación y mantenimiento del tubo de poder y equipos auxiliares.

---

<sup>65</sup> Banco de la República, Índice de precios al consumidor(IPC) [En línea], disponible en: [http://obiee.banrep.gov.co/analytics/saw.dll?Go&\\_scid=WgKuCqgG-9c&ViewID=o%3ago~r%3areport~v%3acomoundView!1~v%3aviewSelector!1~v%3apivotTableView!1&SearchID=n9b2b2c5knc16c408skcti41ti&Options=rd&Path=/shared/Consulta%20Series%20Estadisticas%20desde%20E](http://obiee.banrep.gov.co/analytics/saw.dll?Go&_scid=WgKuCqgG-9c&ViewID=o%3ago~r%3areport~v%3acomoundView!1~v%3aviewSelector!1~v%3apivotTableView!1&SearchID=n9b2b2c5knc16c408skcti41ti&Options=rd&Path=/shared/Consulta%20Series%20Estadisticas%20desde%20E)

## 6.10 Pruebas de los equipos

Una vez realizada la instalación de toda la infraestructura para la generación geomagnética se realizan las pruebas preliminares para la puesta en marcha de la planta, para lo cual primero se realiza un ensayo en vacío para confirmar el correcto funcionamiento, correlación y sincronismo de todos los equipos; después de las pruebas a circuito abierto se realiza la conexión por medio de la red de distribución a los pozos petroleros. Este procedimiento suma \$95 millones de pesos a gastos pre operativos.



**Figura 25. Instalación en campo de la tecnología Geomagnética.**



## **8. EVALUACIÓN FINANCIERA**

### **8.0 Evaluación preliminar sin proyecto – con proyecto (ver anexo 1 y 3)**

Como se mencionó anteriormente (numeral 4), el proyecto se concentrará en abastecer la demanda de 31 pozos adyacentes, todos ellos con expectativa de vida útil superior a los 15 años. Las estadísticas promedio suministradas por el operador de los pozos, indican 95kw de consumo por cada uno de ellos cada hora 24 horas al día, sumando  $2945 \text{ kw} \times 24 \text{ horas al día}$ , es decir  $2,945 \text{ MW} \times 24 \text{ horas} = 70.68 \text{ MWh día}$ .

Con el fin de garantizar ingresos estables al proyecto (por ahorros de energía) se desechó la posibilidad de abastecer otros grandes equipos intermitentes tales como las torres petroleras en proceso de perforación. Sin embargo en la práctica, equipos auxiliares menores podrán conectarse para aprovechar posibles excedentes de energía generada.

Igualmente existen otros 32 pozos aledaños que podrían aprovechar electricidad extra que pudiera generarse en caso de mayor confiabilidad o disponibilidad a la esperada en estos escenarios conservadores.

Con respecto a ese aspecto, en el caso sin proyecto se trata de un suministro eléctrico a partir de una red eléctrica con confiabilidad por encima del 99%(numerales 5.6 y 5.7) que cuenta con un sistema diesel de respaldo el cual genera costos de mantenimiento y disponibilidad en caso de ser necesarios. En el caso de con proyecto, se pasa a un sistema cuyo principal suministro de energía esta proveído por el Power Tube, mientras que la red eléctrica interconectada sirve de sistema secundario de respaldo y suministro eléctrico, los tiempo que el primer sistema no estén generando. Finalmente el sistema diesel se mantendrá como sistema terciario durante este proyecto con el fin de garantizar que no se tendrá menor disponibilidad eléctrica aún en un escenario de falla tecnológica. Esto con el fin de que ECOPETROL que con esfuerzos y gestión interna y externa han logrado gran confiabilidad de la red eléctrica en Apiay y campos aledaños, permita el proyecto.

Debido a que los generadores Diesel se manejan por contratos hacia terceros y su uso como sistema secundario es bajo, se ha despreciado para el análisis financiero del proyecto su aporte en ahorros, pues se espera que sea igualmente bajo.

Con esta carga (demanda energética), el Power Tube puede abastecer con su generación estimada de 71.82MWh día (oferta energética) esta electricidad dentro

de los límites de generación del Tubo de potencia de energía geomagnética (con los parámetros ya explicados).

Al momento de realizar el contacto con el proveedor de la tecnología, y suministrar los reportes de los estudios realizados por la empresa referentes al recurso geotérmico disponible (privados de la empresa) muestran que la capacidad térmica de la locación con sus niveles de entalpia y consecuente temperatura, son suficientes para abastecer el tubo de poder por varias centenas de años, igualmente los autores corroboraron mediante análisis termodinámico(numeral 4) que la tecnología es operativa con las temperaturas encontradas en la región. Mayor detalle termodinámico está fuera del alcance de este documento.

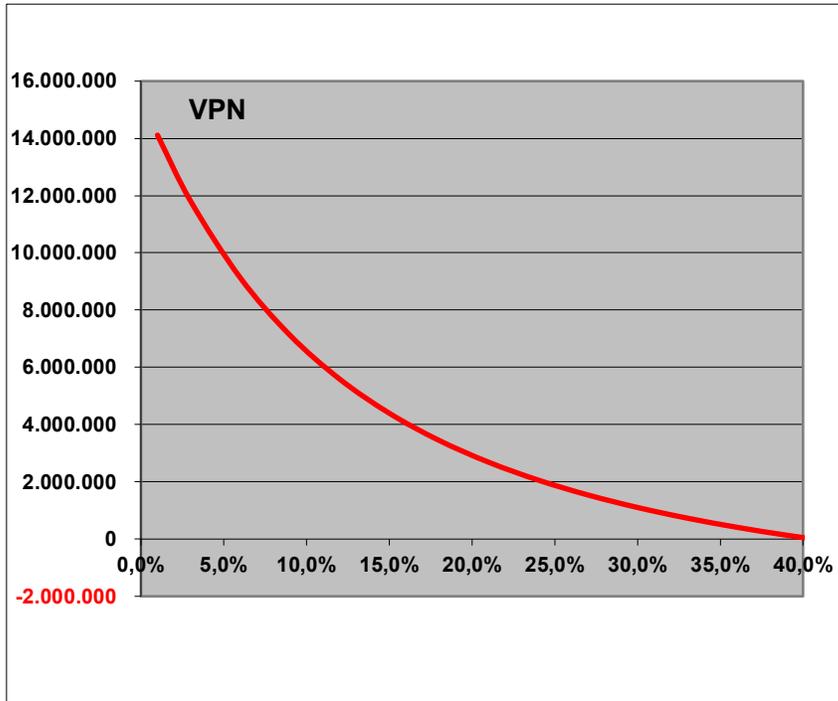
### 8.1. Con proyecto: Flujo de Fondos, VPN, TIR

Con respecto a la realización del flujo de caja se debe tener en cuenta que no se aplicaron pagos de dividendos al proyecto como tal, pues será la empresa la que decida el mejor destino de los recursos obtenidos por la implementación de esta tecnología.

Igualmente se decidió utilizar la menor cantidad de recursos propios de la empresa para facilitar la aceptación del proyecto (80% financiado y 20% recursos propios). Se debe tener en cuenta que la inversión inicial y a los gastos preoperativos se les incrementó un 20% de seguridad recomendado al interior de la empresa. Demás detalles de inversión y demás pueden ser consultados en el numeral 5. El flujo de fondos del escenario base planteado ofrece los siguientes datos para el proyecto (Ver anexo 2. Flujo de fondos):

Escenario base Cálculos sin sensibilidades	Escenario Base
% aplicado	100%
<b>TIR</b>	<b>40,63%</b>
WACC	<b>0,10</b>
<b>VPN</b>	<b>4.398.078</b>
<b>IVAN</b>	<b>-1,22</b>
<b>MAYOR ENDEUDAMIENTO</b>	<b>-3.610.560</b>

VPN	4.398.078
TIR	<b>40,63%</b>



TIO	VPN
1,0%	14.112.152
3,0%	11.807.952
6,0%	9.129.832
9,0%	7.124.806
12,0%	5.592.303
15,0%	4.398.078
18,0%	3.450.604
21,0%	2.686.350
24,0%	2.060.462
27,0%	1.540.746
30,0%	1.103.728
33,0%	732.034
36,0%	412.620
39,0%	135.561
42,0%	-106.798
45,0%	-320.425
48,0%	-510.035

Esto demuestra que con la TIR por encima del 40%, un endeudamiento máximo de 3.610 millones y un valor presente neto de 4.398 millones es un proyecto que vale la pena analizarse con mayor profundidad.

Nótese en el flujo de fondos que se ha trabajado con un precio de compra de KWh a nivel de tensión 2 y ha sido obtenido de forma comparativa del precio de compra de electricidad de la red en zonas con conexión eléctrica.

Sin embargo, en el momento que la empresa desee llevar este proyecto a otras áreas donde con frecuencia los pozos se encuentran en zonas no interconectadas, las cuales actualmente obligan a la empresa a abastecer sus generadores eléctricos a partir de Diesel, los ingresos se pueden multiplicar por factores de entre 5 y 8 veces los actuales sin variaciones significativas en inversión o gastos de operación lo cual llevaría a tener una TIR muy superior que en otros escenarios serian casi imposibles de lograr.

## **8.2. Análisis de sensibilidades (inversión, ingresos y egresos)**

Después de analizar la composición del proyecto, se determinó que las sensibilidades más importantes y por ende las que se van a analizar con: inversión, ingresos y egresos. Por tratarse de un sistema de generación eléctrica independiente, estas variables demuestran tener baja interrelación entre sí por tanto el modelo se emplea para análisis uni-variable.

### 8.2.1 Análisis de sensibilidad uni-variable: inversión

Sensibilidad a la variable inversión				
	Inversión		VPN	TIR
			4.398.078	40,63%
-40%	-10.831.680	-10.831.680	11.619.198	#¡NUM!
-35%	-11.734.320	-11.734.320	10.716.558	#¡NUM!
-30%	-12.636.960	-12.636.960	9.813.918	#¡NUM!
-25%	-13.539.600	-13.539.600	8.911.278	#¡NUM!
-20%	-14.442.240	-14.442.240	8.008.638	#¡NUM!
-15%	-15.344.880	-15.344.880	7.105.998	172,20%
-10%	-16.247.520	-16.247.520	6.203.358	84,93%
-5%	-17.150.160	-17.150.160	5.300.718	55,52%
0%	-18.052.800	-18.052.800	4.398.078	40,63%
5%	-18.955.440	-18.955.440	3.495.438	31,56%
10%	-19.858.080	-19.858.080	2.592.798	25,41%
15%	-20.760.720	-20.760.720	1.690.158	20,91%
20%	-21.663.360	-21.663.360	787.518	17,44%
25%	-22.566.000	-22.566.000	-115.122	14,68%
30%	-23.468.640	-23.468.640	-1.017.762	12,40%
35%	-24.371.280	-24.371.280	-1.920.402	10,48%
40%	-25.273.920	-25.273.920	-2.823.042	8,84%

Sensibilidad a la variable inversión				
	Inversión		IVAN	Mayor Endeu.
			-1,22	-3.610.560
-40%	-10.831.680	-10.831.680	3,22	3.610.560
-35%	-11.734.320	-11.734.320	3,96	2.707.920
-30%	-12.636.960	-12.636.960	5,44	1.805.280
-25%	-13.539.600	-13.539.600	9,87	902.640
-20%	-14.442.240	-14.442.240	#¡DIV/0!	0
-15%	-15.344.880	-15.344.880	-7,87	-902.640
-10%	-16.247.520	-16.247.520	-3,44	-1.805.280
-5%	-17.150.160	-17.150.160	-1,96	-2.707.920
0%	-18.052.800	-18.052.800	-1,22	-3.610.560
5%	-18.955.440	-18.955.440	-0,77	-4.513.200
10%	-19.858.080	-19.858.080	-0,48	-5.415.840
15%	-20.760.720	-20.760.720	-0,27	-6.318.480
20%	-21.663.360	-21.663.360	-0,11	-7.221.120
25%	-22.566.000	-22.566.000	0,01	-8.123.760
30%	-23.468.640	-23.468.640	0,11	-9.026.400
35%	-24.371.280	-24.371.280	0,19	-9.929.040
40%	-25.273.920	-25.273.920	0,26	-10.831.680

Variaciones en la inversión tienen un impacto enorme en la TIR. Con una disminución del 15% de la inversión base, se observa un incremento en la TIR de un 430%, pasando de 40.63% a 172.2%. Si se da el caso contrario, la TIR disminuye un 47.7% pasando a un valor de 20.91%. Aún así, la tasa interna de retorno en el peor escenario de inversión analizado (incremento de 40% inversión) es de un 8,84% manteniendo completa viabilidad para el proyecto.

Igualmente en el caso del VPN en un escenario de disminución de un 25% de la inversión se dispara a 8.911 millones. Por el contrario en caso de incrementarse la inversión en un 25% el VPN pasa a ser negativo **-115.122** millones, por tanto el máximo valor que se puede aumentar la inversión manteniendo un VPN positivo es cercano al 20%, para que dicho escenario siga siendo atractivo.

El IVAN no es la excepción en este análisis, casi sextuplicándose en caso de lograr la disminución en la inversión del 15% y reduciéndose a 0.27 en el escenario de incremento de inversión del mismo porcentaje, a pesar de esto, la recomendación sigue siendo avanzar.

Debido al tamaño del mayor endeudamiento base de 3.610 millones de pesos, no obstante el incremento de poco menos del doble de este valor en el escenario

pesimista (15% incremento inversión), sigue siendo un valor manejable para la empresa, aunque amerita mirarlo en mayor detalle, pues si se desea o requiere se podría incrementar el % del crédito actual disminuyendo los dineros correspondientes a mayor endeudamiento, quedara a consideración del comité de aprobación si requieren dichos cambios.

A pesar de las variaciones el potencial de la variable inversión tiene tendencia positiva, de tal forma que el mirar de cerca este ítem puede lograr grande impactos positivos en el aspecto financiero. El proyecto puede ser considerado poco riesgoso en la variable inversión.

## 8.2.2 Análisis de sensibilidad uni-variable: ingresos

Sensibilidad a la variable ingresos				
	Ingresos		VPN	TIR
			4.398.078	40,63%
-40%	2.673.859	2.673.859	-1.188.843	5,10%
-35%	2.896.680	2.896.680	-490.478	11,31%
-30%	3.119.502	3.119.502	207.887	16,46%
-25%	3.342.323	3.342.323	906.253	21,05%
-20%	3.565.145	3.565.145	1.604.618	25,30%
-15%	3.787.966	3.787.966	2.302.983	29,32%
-10%	4.010.788	4.010.788	3.001.348	33,19%
-5%	4.233.609	4.233.609	3.699.713	36,95%
0%	4.456.431	4.456.431	4.398.078	40,63%
5%	4.679.253	4.679.253	5.096.444	44,24%
10%	4.902.074	4.902.074	5.794.809	47,80%
15%	5.124.896	5.124.896	6.493.174	51,33%
20%	5.347.717	5.347.717	7.191.539	54,82%
25%	5.570.539	5.570.539	7.889.904	58,28%
30%	5.793.360	5.793.360	8.588.269	61,73%
35%	6.016.182	6.016.182	9.286.635	65,15%
40%	6.239.003	6.239.003	9.985.000	68,56%

Sensibilidad a la variable ingresos				
	Ingresos		IVAN	Mayor Endeu.
			-1,22	-3.610.560
-40%	2.673.859	2.673.859	0,33	-3.610.560
-35%	2.896.680	2.896.680	0,14	-3.610.560
-30%	3.119.502	3.119.502	-0,06	-3.610.560
-25%	3.342.323	3.342.323	-0,25	-3.610.560
-20%	3.565.145	3.565.145	-0,44	-3.610.560
-15%	3.787.966	3.787.966	-0,64	-3.610.560
-10%	4.010.788	4.010.788	-0,83	-3.610.560
-5%	4.233.609	4.233.609	-1,02	-3.610.560
0%	4.456.431	4.456.431	-1,22	-3.610.560
5%	4.679.253	4.679.253	-1,41	-3.610.560
10%	4.902.074	4.902.074	-1,60	-3.610.560
15%	5.124.896	5.124.896	-1,80	-3.610.560
20%	5.347.717	5.347.717	-1,99	-3.610.560
25%	5.570.539	5.570.539	-2,19	-3.610.560
30%	5.793.360	5.793.360	-2,38	-3.610.560
35%	6.016.182	6.016.182	-2,57	-3.610.560
40%	6.239.003	6.239.003	-2,77	-3.610.560

Es importante recordar que se ha sido bastante conservador con el precio del KWh utilizado de \$170 pesos teniendo en cuenta los costos actuales de la empresa a tensión dos con sus respectivos cargos de distribución. Con una disminución de 25% en los ingresos, bien sea por disminución en el precio del KWh, por menor disponibilidad o debido a un factor de carga menor, la TIR cae a un 21.05%. Si por el contrario alguna de esas sub-variables lleva a un incremento de los ingresos en 25%, se verá reflejado en una nueva TIR de 58.28%.

Por su parte el valor presente neto llegaría a poco más de 906 millones en el escenario pesimista (-25% ingresos) y aumentaría a 7.889 millones en el escenario de mejora en ingresos por 25%, en este último caso también se obtiene un incremento del 79% en el VPN.

En este escenario de variación de ingresos, el IVAN se mueve entre valores del 0.25 y 2.19 considerando cambios dentro del rango del 25%. Teniendo en cuenta nuevamente lo conservador del precio del Kwh, son valores muy interesantes para invertir, no obstante es necesario indagar en detalles de la tecnología que puedan afectar su confiabilidad, escenario que se considerara en el numeral 8.2.6.

Finalmente el mayor endeudamiento es completamente inelástico a variaciones de hasta el 40% lo que quiere decir que se mantiene estable en 3.610 millones en el peor escenario al igual que en el mejor, justificado principalmente porque este mayor endeudamiento se da en el año 0 durante el montaje y puesta en marcha cuando todavía no hay ingresos. Esto lleva a concluir que en la variable de ingresos el proyecto se mantiene viable y demuestra ser muy atractivo para la empresa interesada en invertir.

### 8.2.3. Análisis de sensibilidad uni-variable: Egresos

Sensibilidad a la variable egresos				
	Egresos		VPN	TIR
			4.398.078	40,63%
-40%	-535.090	-535.090	5.795.639	47,81%
-35%	-579.681	-579.681	5.620.944	46,92%
-30%	-624.271	-624.271	5.446.249	46,03%
-25%	-668.862	-668.862	5.271.554	45,14%
-20%	-713.453	-713.453	5.096.859	44,24%
-15%	-758.044	-758.044	4.922.164	43,35%
-10%	-802.635	-802.635	4.747.469	42,44%
-5%	-847.225	-847.225	4.572.774	41,54%
0%	-891.816	-891.816	4.398.078	40,63%
5%	-936.407	-936.407	4.223.383	39,72%
10%	-980.998	-980.998	4.048.688	38,80%
15%	-1.025.589	-1.025.589	3.873.993	37,88%
20%	-1.070.179	-1.070.179	3.699.298	36,95%
25%	-1.114.770	-1.114.770	3.524.603	36,02%
30%	-1.159.361	-1.159.361	3.349.908	35,08%
35%	-1.203.952	-1.203.952	3.175.213	34,14%
40%	-1.248.543	-1.248.543	3.000.518	33,19%

<b>Sensibilidad a la variable egresos</b>				
	<b>Egresos</b>		<b>IVAN</b>	<b>Mayor Endeud.</b>
			-1,22	-3.610.560
-40%	-535.090	-535.090	-1,61	-3.610.560
-35%	-579.681	-579.681	-1,56	-3.610.560
-30%	-624.271	-624.271	-1,51	-3.610.560
-25%	-668.862	-668.862	-1,46	-3.610.560
-20%	-713.453	-713.453	-1,41	-3.610.560
-15%	-758.044	-758.044	-1,36	-3.610.560
-10%	-802.635	-802.635	-1,31	-3.610.560
-5%	-847.225	-847.225	-1,27	-3.610.560
0%	-891.816	-891.816	-1,22	-3.610.560
5%	-936.407	-936.407	-1,17	-3.610.560
10%	-980.998	-980.998	-1,12	-3.610.560
15%	-1.025.589	-1.025.589	-1,07	-3.610.560
20%	-1.070.179	-1.070.179	-1,02	-3.610.560
25%	-1.114.770	-1.114.770	-0,98	-3.610.560
30%	-1.159.361	-1.159.361	-0,93	-3.610.560
35%	-1.203.952	-1.203.952	-0,88	-3.610.560
40%	-1.248.543	-1.248.543	-0,83	-3.610.560

El impacto de una disminución de los egresos en un 25%, se refleja en un incremento de la TIR hasta llegar a 45.14%. Si se da el caso contrario de incremento en los egresos, la TIR baja hasta 36.02%. Comparándola con la TIR del escenario base 40.63%, vemos que la influencia de este ítem no es muy relevante para la tasa interna de retorno, demostrando que la tasa interna de retorno es muy atractiva en cualquier caso.

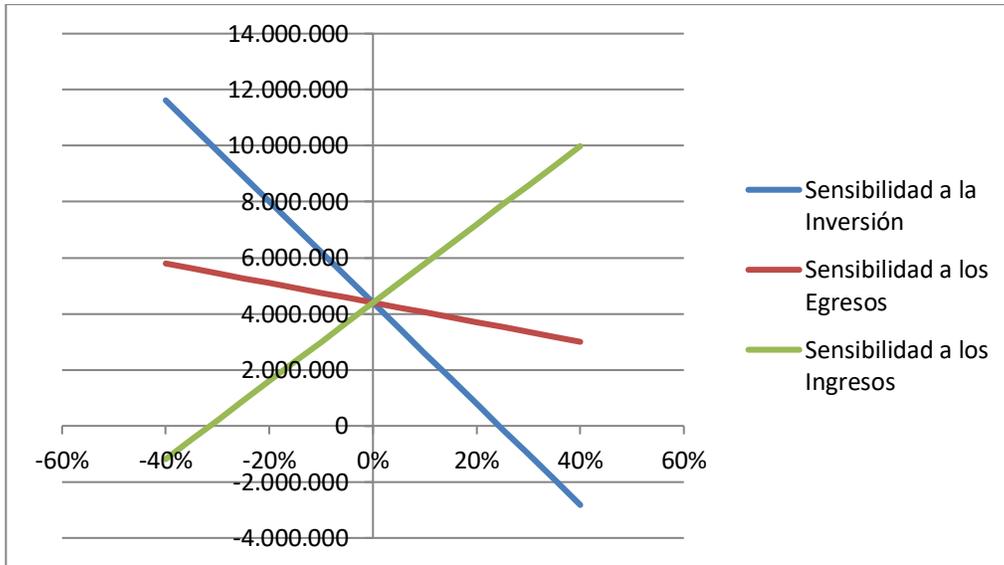
Similar a esto el VPN se mueve entre 3.000 millones y 5.795 millones con un valor base de 4.398 millones, soportando variaciones en los egresos de hasta un 40% pero manteniéndose en un rango de baja volatilidad en el VPN.

El IVAN se mueve en un rango de 0.83-1.61, manteniendo muy atractivo aun el peor escenario.

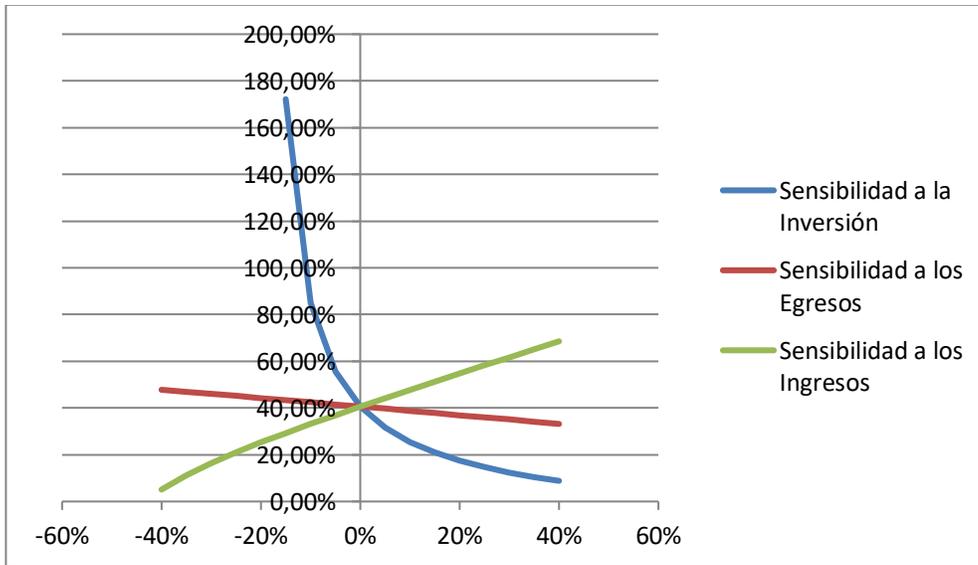
Por su parte el mayor endeudamiento se mantiene al igual que en el caso del análisis de los ingresos inafectado debido a la misma razón, dicho valor de endeudamiento se da en el periodo cero en el cual no existe ingreso o egresos de la operación.

Los egresos de este tipo de sistemas de generación geomagnética dependen principalmente del diseño de la máquina y otros factores altamente previsibles al momento de diseñar, instalar y operar los equipos. Adicionalmente, son un porcentaje pequeño de los ingresos, por lo cual con estos datos se corrobora su baja influencia y sensibilidad para la viabilidad del proyecto.

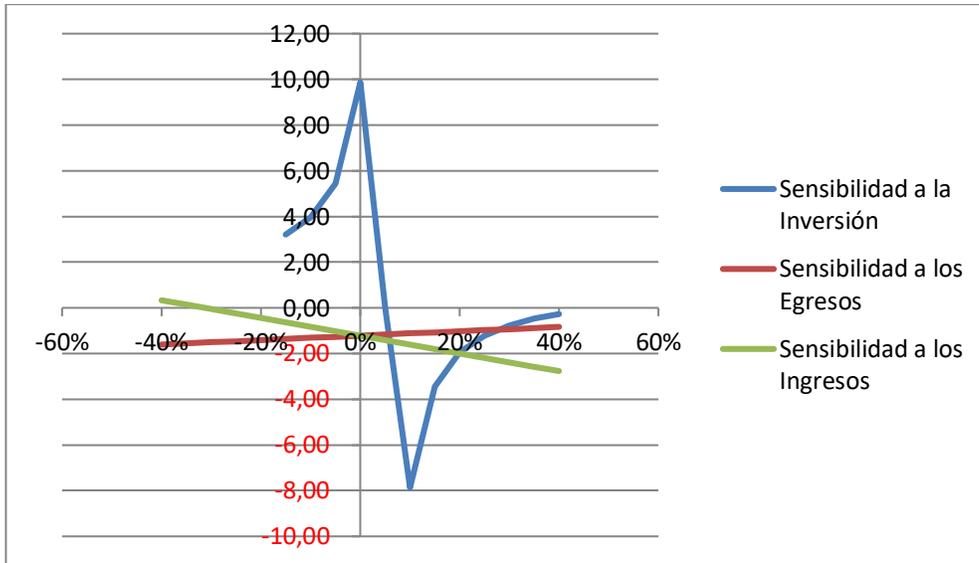
### Variaciones del VPN con cada sensibilidad



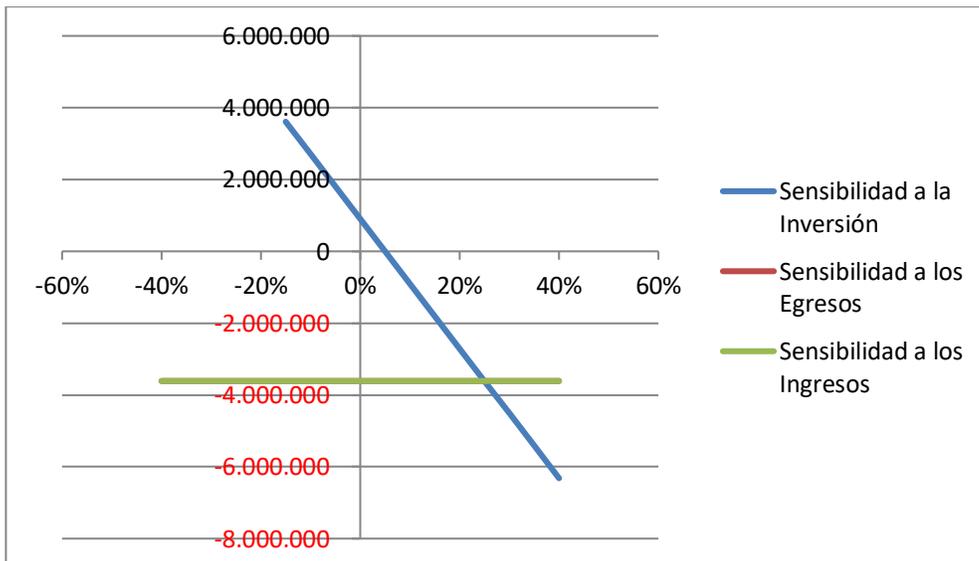
### Variaciones de la TIR con cada sensibilidad



### Variaciones del IVAN con cada sensibilidad



### Variaciones del mayor endeudamiento con cada sensibilidad



#### 8.2.4. Análisis de sensibilidad multivariable-variable Pesimista:

**Inversión 125%, Egresos 125% e Ingresos 75%**

Escenario Sensibilidades Cálculos Multi-variable		Pesimista= inversión 125% + Egresos 125% + Ingresos 75%
<b>TIR</b>		<b>-1,99%</b>
WACC		<b>0,10</b>
<b>VPN</b>		<b>-2.160.495</b>
<b>IVAN</b>		<b>0,48</b>
<b>MAYOR ENDEUDAMIENTO</b>		<b>-4.513.200</b>

Se decidió realizar un par de análisis multivariable. En el primero lugar un escenario pesimista, en el cual los costos e inversión se incrementan en un 25% sobre el valor base, mientras que los ingresos llegan tan solo a un 75% de lo planteado inicialmente.

Esto nos mostró que la TIR puede llegar a ser negativa del 1.99% con un VPN negativo, un IVAN de 0.48 con signo contrario y elevando el mayor endeudamiento a 4.513 millones de pesos.

En este escenario el proyecto requeriría pensar en incrementar el valor del crédito a para disminuir la cantidad de dinero que se necesita por parte de la empresa,

pero aún así resultaría inviable, por tanto se observa que no se trata de un proyecto libre de riesgo, en unas condiciones pesimistas no se obtiene un cierre financiero adecuado, por tanto es importante controlar estas tres variables durante la ejecución, especialmente en esta primera instalación.

### 8.2.5. Análisis de sensibilidad multivariable-variable Optimista:

Inversión 100%, Egresos 75% e Ingresos 125%

Escenario Sensibilidades Cálculos Multi-variable		Optimista= inversión 100% + Egresos 75% + Ingresos 125%
<b>TIR</b>		<b>63,66%</b>
WACC		<b>0,10</b>
<b>VPN</b>		<b>8.981.619</b>
<b>IVAN</b>		<b>-2,49</b>
<b>MAYOR ENDEUDAMIENTO</b>		<b>-3.610.560</b>

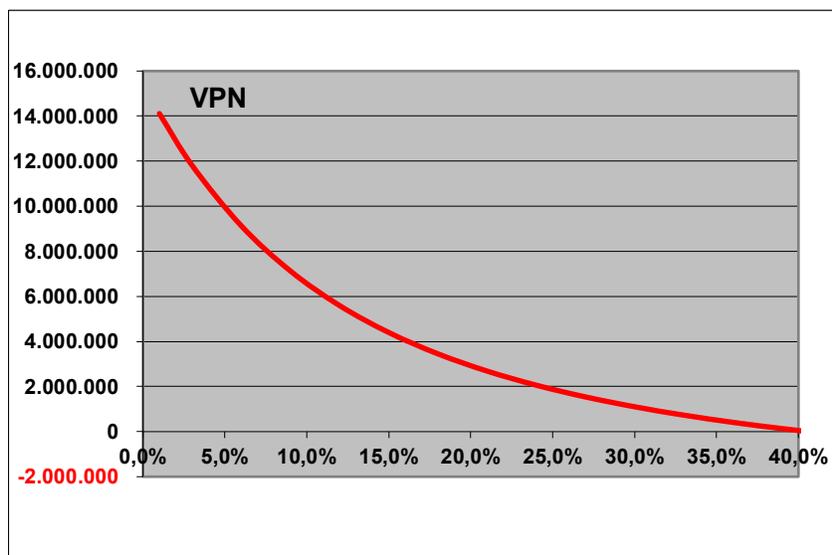
En última instancia se analizó un escenario positivo en el cual la inversión se mantiene estable pero los egresos se disminuyen en un 25% mientras que los ingresos crecen en ese mismo porcentaje.

Esto revela una TIR del 63.66%, un IVAN de 2.49 y un mayor endeudamiento de 3.610 millones de pesos, por tanto el potencial económico bien vale la pena los riesgos.

### 8.2.6. Análisis de escenario de falla tecnológica A y B

Con el fin de considerar la posibilidad de fallos en la tecnología se realizó un primer escenario(A) en el cual se afectaron dos variables tecnológicas: la primera de ellas es el porcentaje de carga, el cual se redujo a tan solo un 60%, mientras que en segunda instancia el factor de disponibilidad se disminuyó al 80%. Los resultados obtenidos fueron:

VPN	512.438
TIR	18,51%



TIO	VPN
1,0%	4.898.674
3,0%	3.875.065
6,0%	2.675.937
9,0%	1.768.391
12,0%	1.066.409
15,0%	512.438
18,0%	67.195
21,0%	-296.644
24,0%	-598.441
27,0%	-852.159
30,0%	-1.068.034
33,0%	-1.253.696
36,0%	-1.414.915
39,0%	-1.556.117
42,0%	-1.680.745
45,0%	-1.791.509
48,0%	-1.890.566

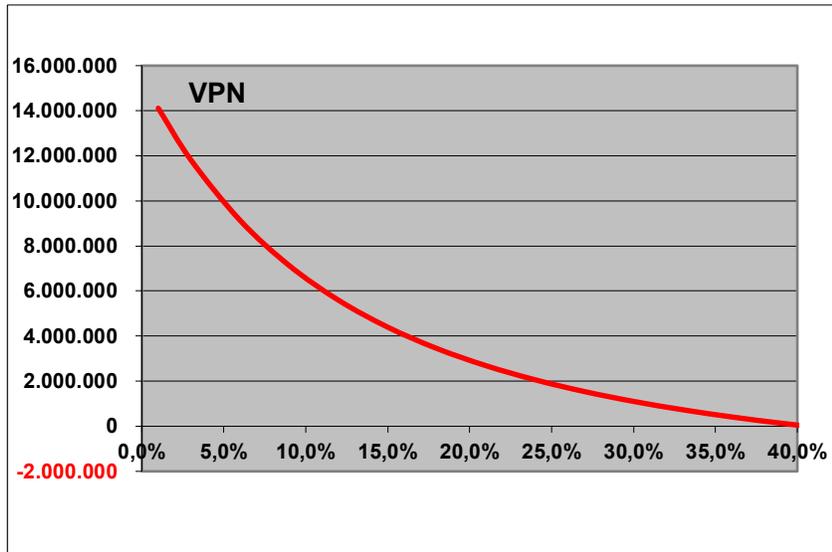
	Escenario Falla Tec. A
% aplicado	100%
<b>TIR</b>	<b>18,51%</b>
WACC	<b>0,10</b>
<b>VPN</b>	<b>512.438</b>
<b>IVAN</b>	<b>-0,14</b>
<b>MAYOR ENDEUDAMIENTO</b>	<b>-3.610.560</b>

Manteniendo viable el proyecto. No obstante si alguno de estos factores se afecta en manera más severa la TIR y el VPN se volverían negativos aniquilando la viabilidad del proyecto, por tanto se debe buscar asimilar la mayor cantidad de conocimiento local para disminuir estos riesgos de parada de planta y operación a menor carga de la posible (ver Anexo 4).

Sin embargo seguidamente se analizó un escenario B, considerando las mismas variables con un incremento del porcentaje de costos de funcionamiento pasando de un 20%(escenario base) a un 30%, lo cual inmediatamente convierte al proyecto en inviable con los siguientes resultados (ver Anexo 5):

	Escenario Falla Tec. B
% aplicado	100%
<b>TIR</b>	<b>9,19%</b>
WACC	<b>0,10</b>
<b>VPN</b>	<b>-747.770</b>
<b>IVAN</b>	<b>0,21</b>
<b>MAYOR ENDEUDAMIENTO</b>	<b>-3.610.560</b>

VPN	-747.770
TIR	9,19%



Lo cual lleva a concluir que en este caso solo con una TIO inferior al 9% se puede obtener un VPN positivo, lo cual evidencia los riesgos potenciales en caso de falla tecnológica incrementados por el único fabricante y proveedor de conocimiento y repuestos disponibles.

### **8.3. Factibilidad**

Los análisis de sensibilidades llevan a demostrar que el proyecto es viable y factible económicamente aunque se debe ser extremadamente exigentes al momento de contratar con la transferencia de conocimiento a personal local así como con la disposición de provisión de repuestos esencial en Colombia.

Por su parte, el proyecto presenta ventajas estratégicas a la empresa que la implementa, pues les permite independencia técnica, auto abastecimiento y una fuente de ahorro (ingresos) importante, especialmente atractiva para zonas interconectadas.

Es importante capacitar personal local para que se encargue de la operación, mantener stock de repuestos y maquinaria de evaluación que permita solucionar cualquier falencia técnica en cortos tiempos, para así mantener verdaderamente estables los valores acá propuestos, de lo contrario, los costos y disminución de ingresos relacionados por paradas de máquinas serían fulminantes para el proyecto, debido a que tendríamos que cargarle no solo los costos de energía dejada de generar sino la parada de producción de uno o varios pozos petroleros.

Nuevamente se insiste en que se debe mantener repuestos y personal capacitado capaz de solucionar fallas de funcionamiento insitu a la mayor prontitud.

## 9. CONCLUSIONES

- Económicamente y financieramente se encuentra que el proyecto es viable para su realización con resultados bastante atractivos para la inversión.
- Se debe hacer seguimiento de cerca de tres variables: Inversión, ingresos y egresos. Dándoles especial importancia puesto que la combinación de ellas hará la diferencia entre un gran éxito con una TIR por encima del 80% a un VPN negativo con el cual nunca se recuperaría el dinero invertido.
- Repuestos, personal capacitado y maquinaria de evaluación deben estar disponibles in-situ para garantizar la confiabilidad del suministro energético del tubo de poder.
- El proyecto presenta ventajas estratégicas para la empresa que lo implementa, pues se hace independiente de terceros para suplir el suministro energético de su operación y disminuye la inversión necesaria en infraestructura externa.

- Se requiere un acercamiento más profundo con el proveedor de la tecnología Power Tube con el fin de perfeccionar los datos de flujo de caja que llevarán a aterrizar cada vez más el proyecto.
- El IPC deberá incluir la tecnología geomagnética dentro de su programa de investigación, de forma aliada al programa ya existente de energía geotérmica con el fin de incrementar el entendimiento de este avance y su maquinaria.
- Numéricamente el proyecto se considera de bajo riesgo para la inversión, sin embargo se recomienda implementarlo por primera vez en un campo que cuente con interconexión eléctrica. De esta forma ese sistema permitirá suplir cualquier falencia que pudiera darse en el sistema durante el proceso de transferencia de know-how evitando sobrecostos por paradas de producción de pozos petroleros.
- La confiabilidad de esta tecnología deberá comprobarse mediante visita a la planta demostrativa en Texas y seguimiento a los datos suministrados por el fabricante. Esto es especialmente válido teniendo en cuenta que en caso

de parada de planta no programada en una zona no interconectada, el pozo no tendría energía para operar y por tanto los costos de menor producción devastarían la viabilidad financiera de la planta de generación geomagmática en corto tiempo.

- Es necesario desarrollar programas de investigación del recurso geotérmico para la creación de mapas más detallados en Colombia y así aumentar las posibilidades de funcionamiento exitoso de tecnologías geomagmáticas y geotérmicas en el país.
- Colombia cuenta con potencial en esta tecnología no solo para pozos petroleros sino también para empresas industriales y complejos residenciales donde el recurso térmico se encuentre a bajas profundidades.
- Teniendo en cuenta la novedad de la tecnología en el país, los análisis financieros se debe realizar de forma conservadora, de tal forma que suavice el impacto de los posibles sobrecostos o demoras mientras se adquiere un mayor know how.

- Las experiencias aprendidas y el personal que ha sido capacitado en la planta piloto de geotérmica en Apiay deben ser incluidos en este proceso para favorecer los intereses de la empresa.
- Para una próxima etapa posterior al presente documento se deberá incluir los beneficios económicos de los ahorros por mantenimiento de la red de respaldo con Diesel, así como los pertinentes al combustible y finalmente los ahorros por disminución de paradas de producción por mayor confiabilidad en la electricidad.
- El presente documento se encuentra limitado por las características y disponibilidad de datos detallados de la tecnología en Colombia por tanto deberán tenerse en cuenta dichas limitaciones para su aprovechamiento apropiado.

## 10. BIBLIOGRAFÍA Y CIBERGRAFÍA

[1] GeomagneticTechnology[En línea], disponible en:

[http://wn.com/Geomagnetic\\_Technology](http://wn.com/Geomagnetic_Technology)

[2] Renewable Energy World, Geothermal Energy.[En línea], disponible en:

<http://www.renewableenergyworld.com/rea/tech/geothermal-energy>

[3] GeomagneticTechnology[En línea], disponible en:

[http://wn.com/Geomagnetic\\_Technology](http://wn.com/Geomagnetic_Technology)

[4] Mapa geotérmico de Colombia – 2009[en línea], disponible en:

[www.simposiobolivariano.org/WEB2/memorias/download.php?f=Carlos\\_Vargas-Mapa\\_Geotermico\\_-\\_2009.pdf](http://www.simposiobolivariano.org/WEB2/memorias/download.php?f=Carlos_Vargas-Mapa_Geotermico_-_2009.pdf)

[5] UCSUSA, HowGeothermalEnergy Works.[En línea], disponible en:

[http://www.ucsusa.org/clean\\_energy/technology\\_and\\_impacts/energy\\_technologies/how-geothermal-energy-works.html](http://www.ucsusa.org/clean_energy/technology_and_impacts/energy_technologies/how-geothermal-energy-works.html)

[6] Reporte sostenibilidad Ecopetrol 2011[en línea], disponible en:

[http://www.ecopetrol.com.co/especiales/Reporte%20de%20sostenibilidad%202011/ecoeficiencia\\_01.html](http://www.ecopetrol.com.co/especiales/Reporte%20de%20sostenibilidad%202011/ecoeficiencia_01.html)

[7] Operación Meta Ecopetrol 2004-20007[En línea], disponible en:

[http://www.ecopetrol.com.co/especiales/Meta\\_2004-2007/operacion.htm](http://www.ecopetrol.com.co/especiales/Meta_2004-2007/operacion.htm)

[8]Power tube [En línea], disponible en: <http://powertubeenergy.com/?author=1>

[9] NREL, GeothermalEnergyBasics. [En línea], disponible en:

[http://www.nrel.gov/learning/re\\_geothermal.html](http://www.nrel.gov/learning/re_geothermal.html)

[10] Power tube [En línea], disponible en

[http://powertubeenergy.com/?page\\_id=123](http://powertubeenergy.com/?page_id=123)

[12] PowerTube,[En línea], disponible en: [http://www.powertubeinc.com/about\\_us/](http://www.powertubeinc.com/about_us/)

[13] International GeothermalAssociation. [En línea], disponible en:

<http://www.geothermal-energy.org/>

[14] PowerTube,[En línea], disponible en

[http://www.powertubeinc.com/product\\_info/](http://www.powertubeinc.com/product_info/)

[15] GeothermalResources Council. [En línea], disponible en:

<http://www.geothermal.org/>

[16] PowerTube,[En línea], disponible en:

[http://powertubeenergy.com/?page\\_id=133](http://powertubeenergy.com/?page_id=133)

[19] Solar Thermal World, Solar Power Industry Report,[En línea], disponible en:

<http://www.solarthermalworld.org/files/Industry%20Report%20Major%20Solar%20Players.pdf?download>

[20] Renewable energy word.com, Mix'n'Match Hybrids Boost Renewable Load

Factors [En línea], disponible en:

<http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2010/10/mixnmatch-hybrids-boost-renewable-load-factors>

[21] *Consulta documental*. [En línea], disponible en:

[http://www1.upme.gov.co/index.php?option=com\\_wrapper&view=wrapper&Itemid=109](http://www1.upme.gov.co/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=109)

[22] UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA – UPME. Boletín estadístico de minas y energía 2002-2007. Bogotá DC.:s.n., 2007

[23] Bührke Thomas. *Renewable Energy*. Alemania: Wiley-VCH, 2008. Kruger, P. *Alternative Energy Resources- The Quest for sustainable Energy*. Germany. Wiley VCH. 2006

[24] PowertubePakistan[En línea], disponible en:

<http://www.powertubepakistan.com/>

[25] Rodríguez, Mario Ortega. *Energías Renovables 2ª edición*. Madrid : Thomson-Paraninfo,2003

[26] GEO, Geothermal Education Office. [En línea], disponible en:

<http://geothermal.marin.org/>

[27] Mapa geológico de Colombia [En línea], disponible en:

<http://www.ingeminas.gov.co/Geologia/Mapa-geologico-de-Colombia.aspx>

[28] *GeothermalEnergy*. [En línea], disponible en:

<http://www.geothermalenergy.org/>

[29] Ingeominas [En línea], disponible en:

[http://issuu.com/revista\\_capicua/docs/datos\\_ingeominas](http://issuu.com/revista_capicua/docs/datos_ingeominas)

[30] Zona Apiay Ecopetrol [En línea], disponible en:

<http://www.ecopetrol.com.co/contenido.aspx?conID=41820&catID=1>

[31] Estudios de erosión [En línea], disponible en:

[http://www.erosion.com.co/index2.php?option=com\\_content&task=view&id=51&pop=1&page=0](http://www.erosion.com.co/index2.php?option=com_content&task=view&id=51&pop=1&page=0)

[32] *GeothermalEnergy*. [En línea], disponible en: <http://www.alternative-energy-news.info/technology/heating/>

[33] Productos y refinerías Ecopetrol [En línea], disponible en:

<http://www.ecopetrol.com.co/contenido.aspx?conID=37389&catID=223>

[34] Mapa de tierras Colombia [En línea], disponible en:

[http://hasp.axesnet.com/contenido/documentos/mt\\_feb04.pdf](http://hasp.axesnet.com/contenido/documentos/mt_feb04.pdf)

[35] Powertube Canada [En línea], disponible en:

<http://www.powertubecanada.com/services>

[36] Mapa geotérmico 2009 [En línea], disponible en:

[www.simposiobolivariano.org/WEB2/memorias/download.php?f=Carlos\\_Vargas-Mapa\\_Geotermico\\_-\\_2009.pdf](http://www.simposiobolivariano.org/WEB2/memorias/download.php?f=Carlos_Vargas-Mapa_Geotermico_-_2009.pdf)

[37] Herramienta termograf [En línea], disponible en:

<http://termograf.unizar.es/descargas/termograf.htm>

[43] Mapa de zonas geomagmáticas en Colombia [En línea], disponible en:

<http://www.upme.gov.co/>

[46] Informe de gestión 2010 XM [En línea], disponible en:

[http://www.xm.com.co/Informes%20Empresariales/Informe\\_gs.pdf](http://www.xm.com.co/Informes%20Empresariales/Informe_gs.pdf)

[47] *Consulta documental*. [En línea], disponible en:

<http://www.acolgen.org.co/article.php?sid=150>

[48] Informes empresariales XM [En línea], disponible en:

<http://www.xm.com.co/Informes%20Empresariales/Forms/AllItems.aspx>

[49] Precio del petróleo WTI [En línea], disponible en: [http://www.cx-](http://www.cx-portal.com/wti/oil_en.html)

[portal.com/wti/oil\\_en.html](http://www.cx-portal.com/wti/oil_en.html)

[50] *Consulta documental*. [En línea], disponible en:

<http://www.acolgen.org.co/article.php?sid=150>

[51] Informes empresariales XM [En línea], disponible en:

<http://www.xm.com.co/Informes%20Empresariales/Forms/AllItems.aspx>

[53] Contratación personal Ecopetrol [En línea], disponible en:

<http://www.ecopetrol.com.co/contenido.aspx?catID=269&conID=42827>

[54] Lista precios consultorías Ecopetrol ajustado a 2011 [En línea], disponible en:

<http://xa.yimg.com/kq/groups/18090091/55194649/name/precios>

[55] Contratación Ecopetrol [En línea], disponible en:

<http://www.ecopetrol.com.co/contenido.aspx?catID=200&conID=41656>

[56] Costos Ecopetrol [En línea], disponible en:

<http://www.ecopetrol.com.co/contenido.aspx?catID=49&conID=38352&pagID=129078>

[61] Precios del pentano o similares, [En línea], disponible en:

[http://www.quiminet.com/pr9/Pentano.htm#t\\_prec](http://www.quiminet.com/pr9/Pentano.htm#t_prec)

[62] ISA, [En línea], disponible en:

<http://www1.isa.com.co/irj/portal/anonymous?NavigationTarget=navurl://bd8d927dfca3108a6e8b86f0ba2e582e>

[63] Consulta documental. [En línea], disponible en: [Resolución CREG 097 de 2008 capítulo 5 páginas 56 - 60 Descripción de unidades constructivas](#)

[64] Banco de la República, Índice de precios al consumidor (IPC) [En línea], disponible en:

[http://obiee.banrep.gov.co/analytics/saw.dll?Go&\\_scid=WgKuCqqG-9c&ViewID=o%3ago~r%3areport~v%3acomoundView!1~v%3aviewSelector!1~v%3apivotTableView!1&SearchID=n9b2b2c5knc16c408skcti41ti&Options=rdf&Path=/shared/Consulta%20Series%20Estadisticas%20desde%20E](http://obiee.banrep.gov.co/analytics/saw.dll?Go&_scid=WgKuCqqG-9c&ViewID=o%3ago~r%3areport~v%3acomoundView!1~v%3aviewSelector!1~v%3apivotTableView!1&SearchID=n9b2b2c5knc16c408skcti41ti&Options=rdf&Path=/shared/Consulta%20Series%20Estadisticas%20desde%20E)

## **11. ANEXOS**

11.1 Anexo 1. Costos actuales por pago de electricidad (sin proyecto)

11.1 Anexo 2. Flujo de fondos escenario base y sensibilidades

11.1 Anexo 3. Sin proyecto Vs con proyecto

11.4 Anexo 4. Flujo de fondos escenario fallo tecnológico A.

11.5 Anexo 5. Flujo de fondos escenario fallo tecnológico B.

11.6 Anexo 6. Características y demanda energía de pozos Apiay

11.7 Anexo 7. Costos Infraestructura eléctrica