

# EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS PARA EL MEJORAMIENTO DEL DESEMPEÑO ENERGÉTICO EN LA MINA SAN TOMAS, UBICADA EN EL MUNICIPIO DE SAN CAYETANO (NORTE DE SANTANDER).

**Proyecto de grado**  
Programa de Ingeniería en Energía

**Director:**

PhD (C) César Yobani Acevedo Arenas

**Estudiante:**

Meggeen Elisa Quilaguy Fajardo



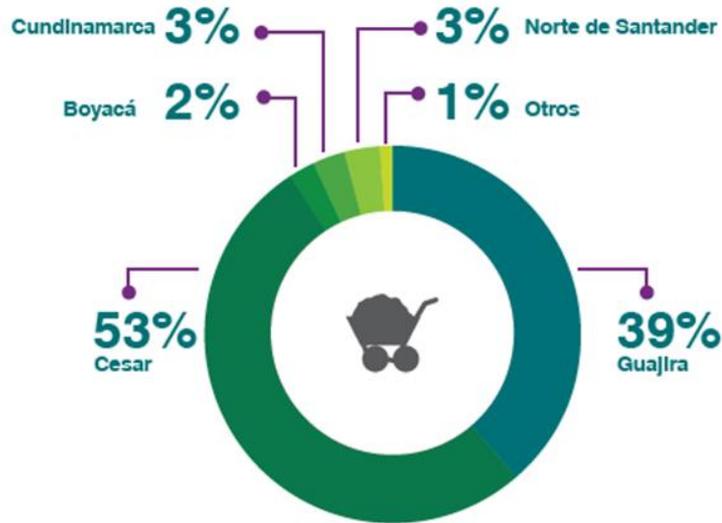


# TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN

- 1 MARCO CONTEXTUAL
- 2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA
- 3 OBJETIVOS
- 4 METODOLOGÍA
- 5 DESARROLLO Y RESULTADOS
- 6 CONCLUSIONES
- 7 RECOMENDACIONES
- 8 REFERENCIAS

# INTRODUCCION



Se estima que el **72%** de la minería de carbón en el país es de pequeña escala [1]

En Norte de Santander existen **283 UPM** de carbón bajo título, las cuales aportan el 98,59% de las regalías departamentales [2]

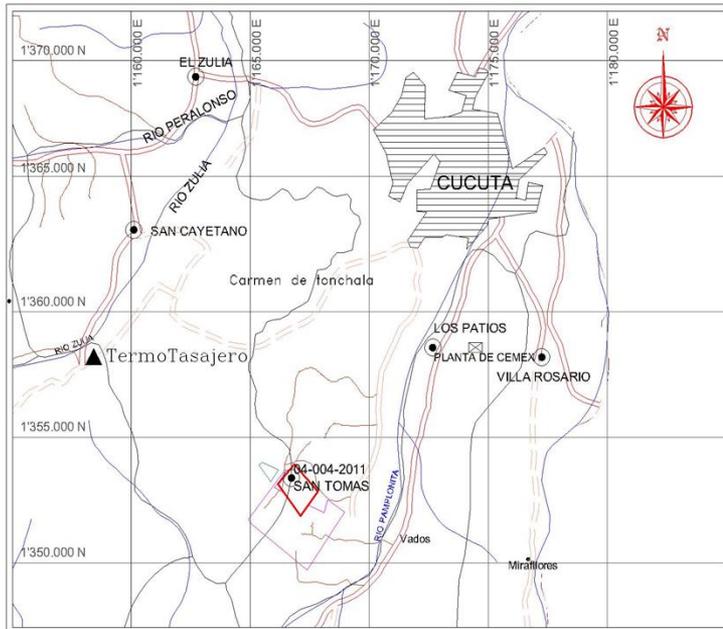


**Baja  
competitividad**

# 1

## MARCO CONTEXTUAL

### Mina San Tomas



Fuente: PTI Mina San tomas

Pequeña escala (~20.000 ton/año)  
Carbón metalúrgico/ Extracción subterránea  
~15 Km Cúcuta

Combustible Diesel

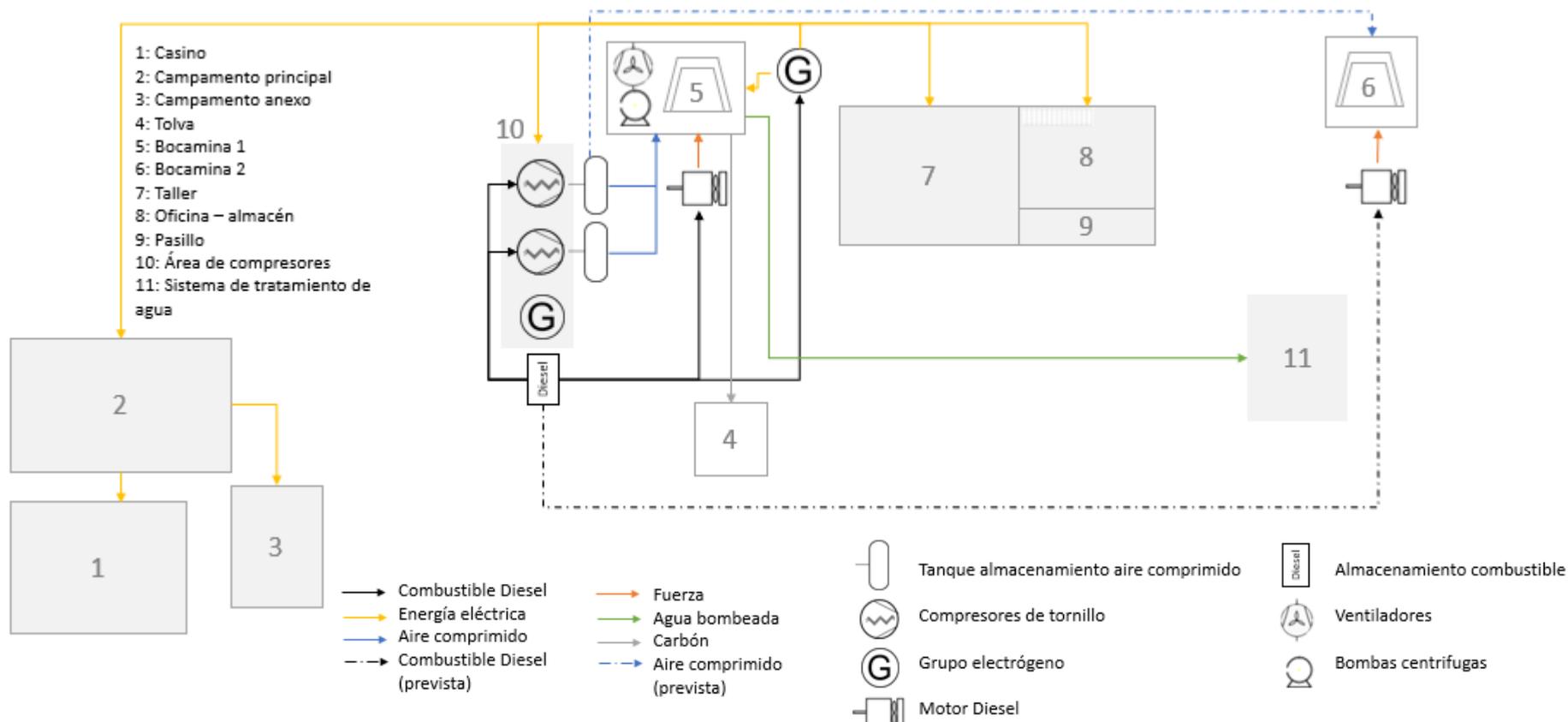
Planta eléctrica

Equipos eléctricos

Compresores

Malacate

## Distribución de planta



# 2

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA



Combustible Diesel B2 como único recurso energético, vincula el costo de producción con los costos de los combustibles



Se desconocen los costos específicos de abastecimiento y no se ha caracterizado el desempeño energético



Se desconoce el nivel de emisiones asociado al suministro energético y el potencial de reducción de emisiones

# 3 OBJETIVOS

## Objetivo general

Realizar una evaluación técnico-financiera de alternativas para el mejoramiento del desempeño energético en la mina San tomas.

### Objetivos específicos

-  Realizar una caracterización energética de la mina San tomas
-  Plantear alternativas para el mejoramiento del desempeño energético de la mina San tomas
-  Valorar financieramente las alternativas propuestas para el mejoramiento del desempeño energético de la mina San tomas

# 4 METODOLOGÍA

## 4.1 Caracterización energética

Cuantificación consumo de combustible, emisiones y costos suministro

Análisis relación consumo energía – producción

Determinación costos específicos Energía eléctrica, Aire comprimido y transporte de materiales

Determinación condiciones de operación, eficiencia, fugas en equipos y actividades

Identificación oportunidades de mejora

## 4.2 Propuestas de mejora del desempeño energético

Planteamiento técnico de las opciones de mejora

Establecimiento del consumo de energía, las emisiones y los ahorros previstos

## 4.3 Evaluación financiera de las propuestas

Determinación de costos y flujos de caja previstos

Calculo Indicadores financieros VPN, TIR

Comparación y ordenamiento las alternativas

# 5

## DESARROLLO Y RESULTADOS

- 5.1** Caracterización energética
- 5.2** Propuestas de mejora del desempeño energético
- 5.3** Evaluación financiera de las propuestas

## 5.1 Caracterización energética



## Consumo combustible

<b>Combustible</b>	Diesel B2	-
<b>Precio</b>	5400	\$/galón
<b>Poder calorífico</b>	36,1	MJ/L
<b>índice de emisiones</b>	2681	Kg CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>
<b>Densidad</b>	851,9	g/L

**Promedio:**  
250 L/día

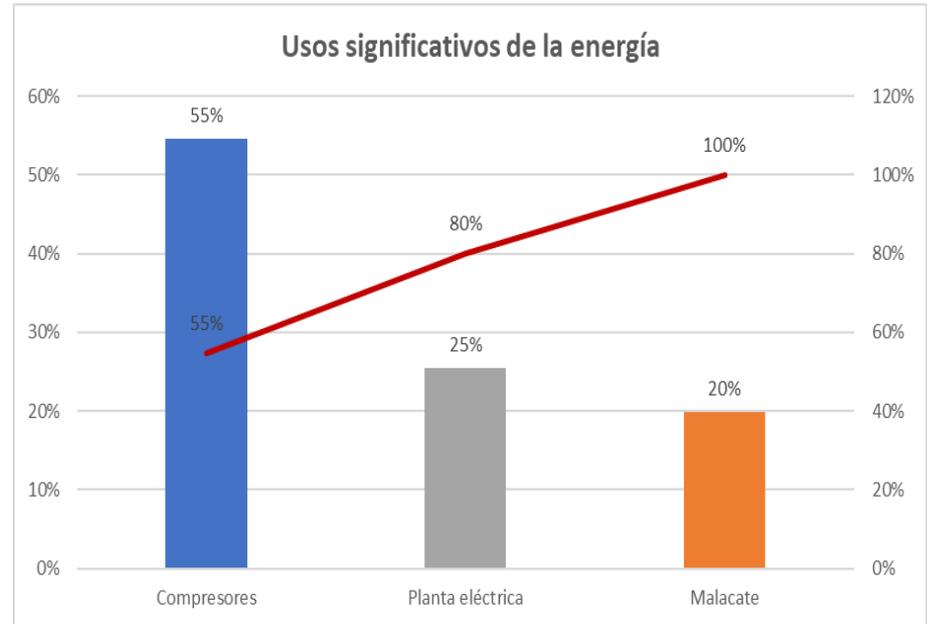
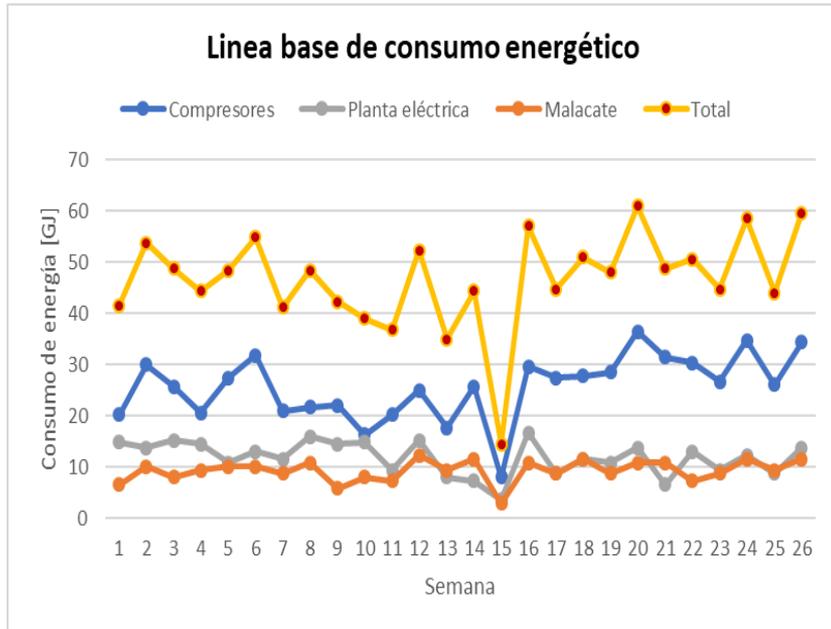
**Costo:**  
\$360.000/día

**Emisiones:**  
670 Kg CO<sub>2</sub>/día  
180 Ton CO<sub>2</sub>/año

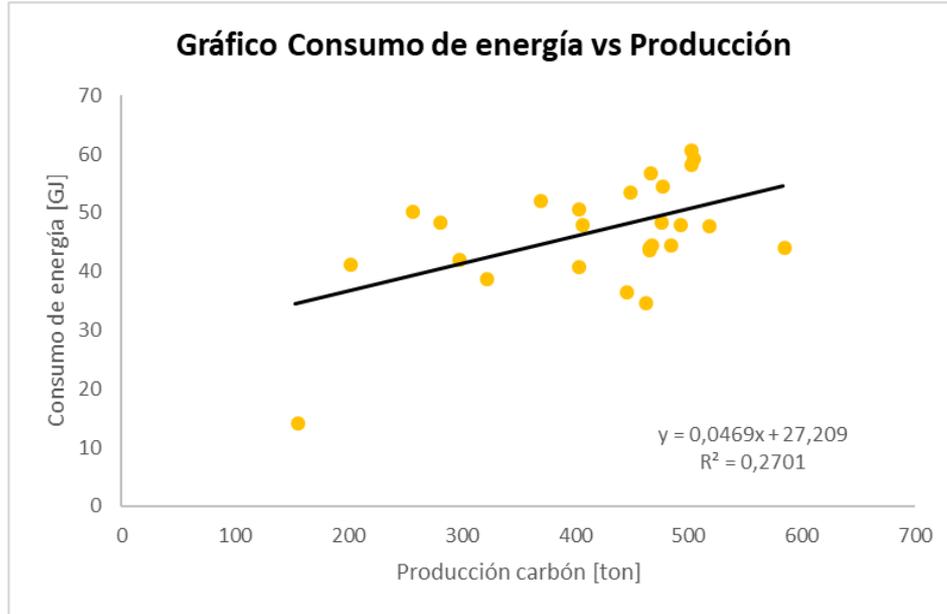


Fuente: EPA. Calculadora de equivalencias de GHG

## Consumo combustible



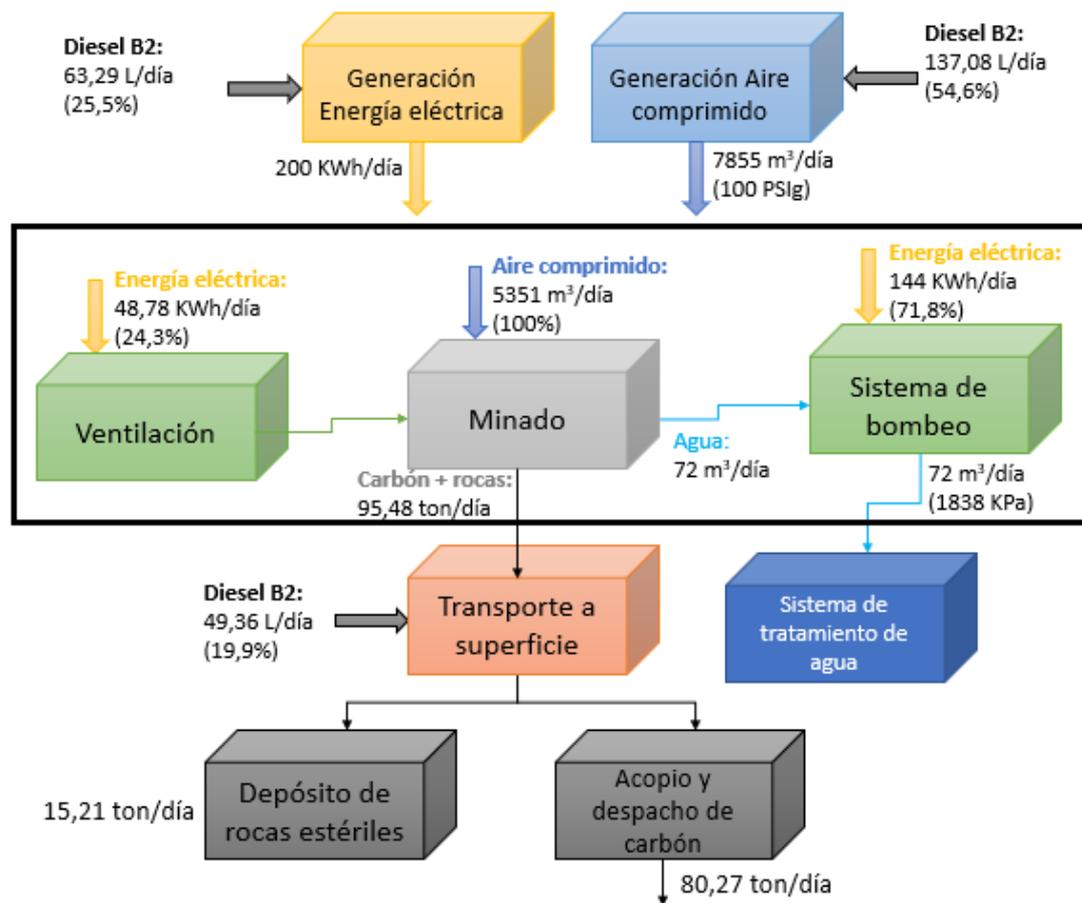
## Análisis del consumo de energía



Consumo no asociado a la producción			
	Semanal	Diario	Unidades
Energía	27,21	5,44	GJ
Combustible	753	151	L
Costo	<b>1.074.130</b>	<b>214.826</b>	\$

~58%

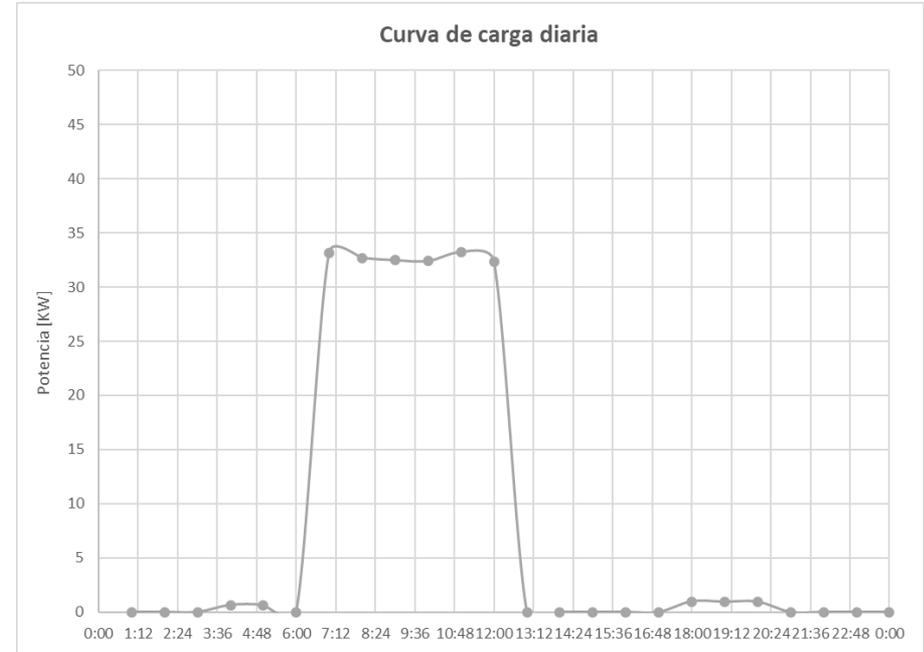
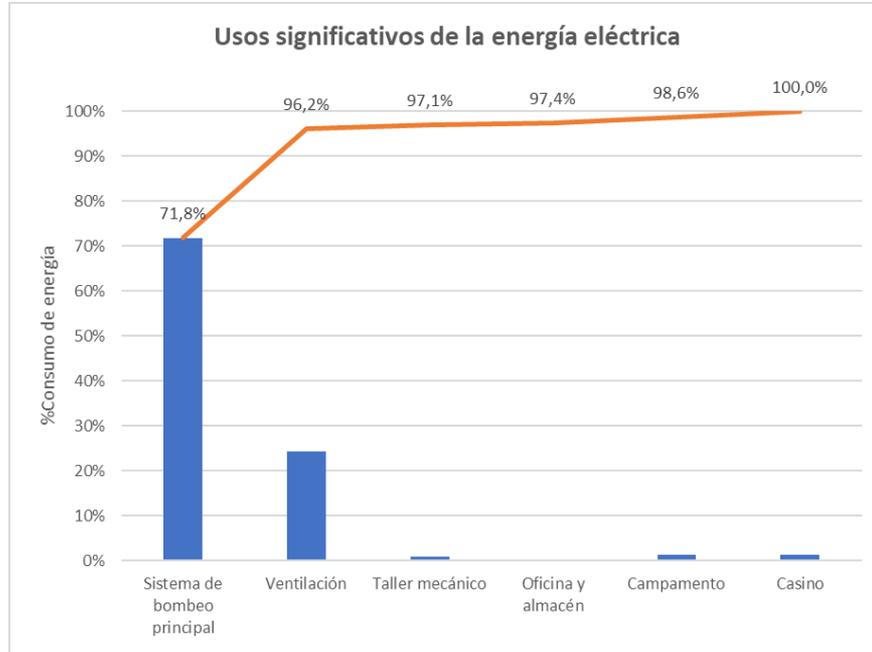
## 5.1 Caracterización energética



## Consumo de energía eléctrica

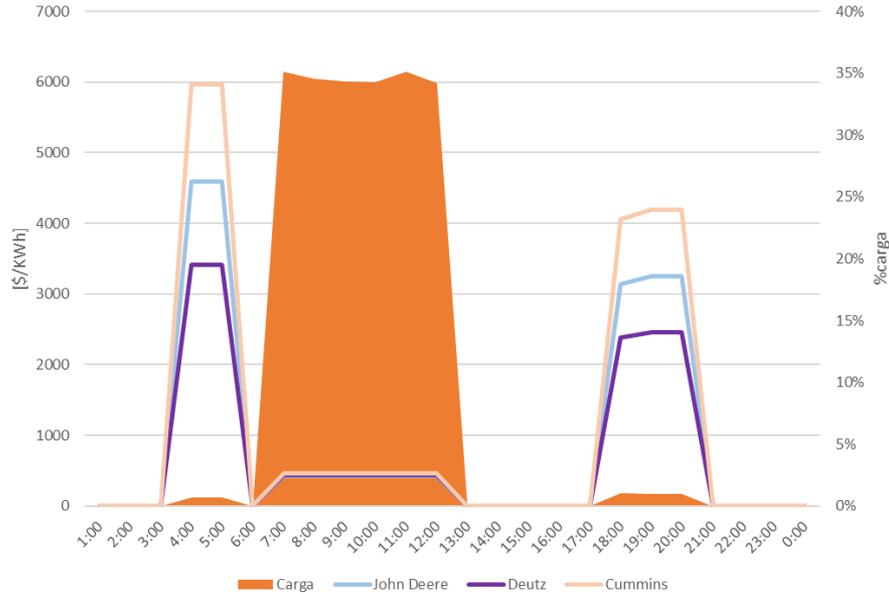
Censo de carga									
Actividad	Cantidad	Equipo	Potencia nominal [KW]	Potencia nom total [KW]	%Carga por actividad	Horas de trabajo/día	Estimación de la energía consumida [KWh/día]	Estimación de la energía consumida por actividad [KWh/día]	Estimación de la energía consumida por actividad [%]
Sistema de bombeo principal	4	Bomba centrífuga [0, 45, 90, 135 m]	6,00	24,00	48,0%	6	144,00	144	71,8%
Ventilación	1	Extractor de aire	3,73	3,73	16,3%	6	22,38	48,78	24,3%
	2	Ventiladores	2,20	4,40		6	26,40		
Taller mecánico	1	Esmeril	0,83	0,83	33,3%	2	1,66	1,86	0,93%
	1	Compresor	3,00	3,00			0,00		
	1	Taladro de pie	0,83	0,83		0,25	0,21		
	1	Equipo de soldadura	12,0	12,00			0,00		
Oficina y almacén	1	Computador portátil	0,12	0,12	0,4%	4	0,48	0,543	0,27%
	1	Impresora	0,01	0,01		0,5	0,01		
	2	Bombillas	0,02	0,04		1	0,04		
	2	Tomacorrientes	0,01	0,01		2	0,02		
Campamento	1	Televisor	0,10	0,10	0,9%	4	0,40	2,55	1,27%
	10	Bombillas	0,03	0,25		5	1,25		
	20	Tomacorrientes	0,01	0,10		6	0,90		
Casino	1	Nevera	0,25	0,25	1,1%	5,5	1,38	2,75	1,37%
	11	Bombillas	0,03	0,28		5	1,38		
	3	Tomacorrientes		0,00			0,00		
Area compresores	2	Bombillas	0,03	0,05	0,1%		0,00	0	0,00%
				<b>50,0</b>	<b>100%</b>		<b>200</b>	<b>200</b>	<b>100%</b>

## Consumo de energía eléctrica

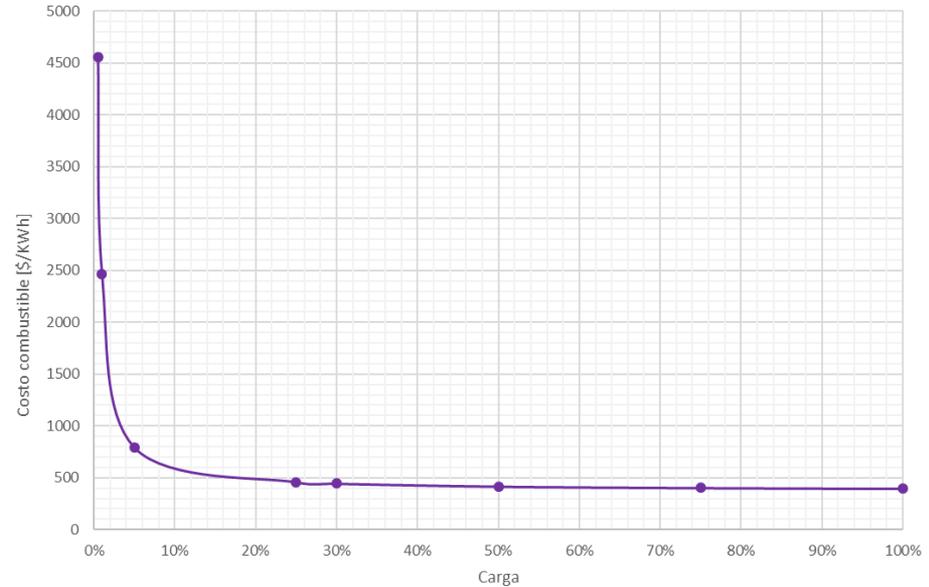


## Costo combustible

Costo combustible vs %Carga

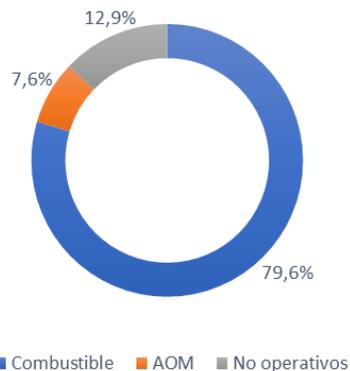


Costo combustible - Motor referencia 1 (Deutz)



## Costo de la energía eléctrica

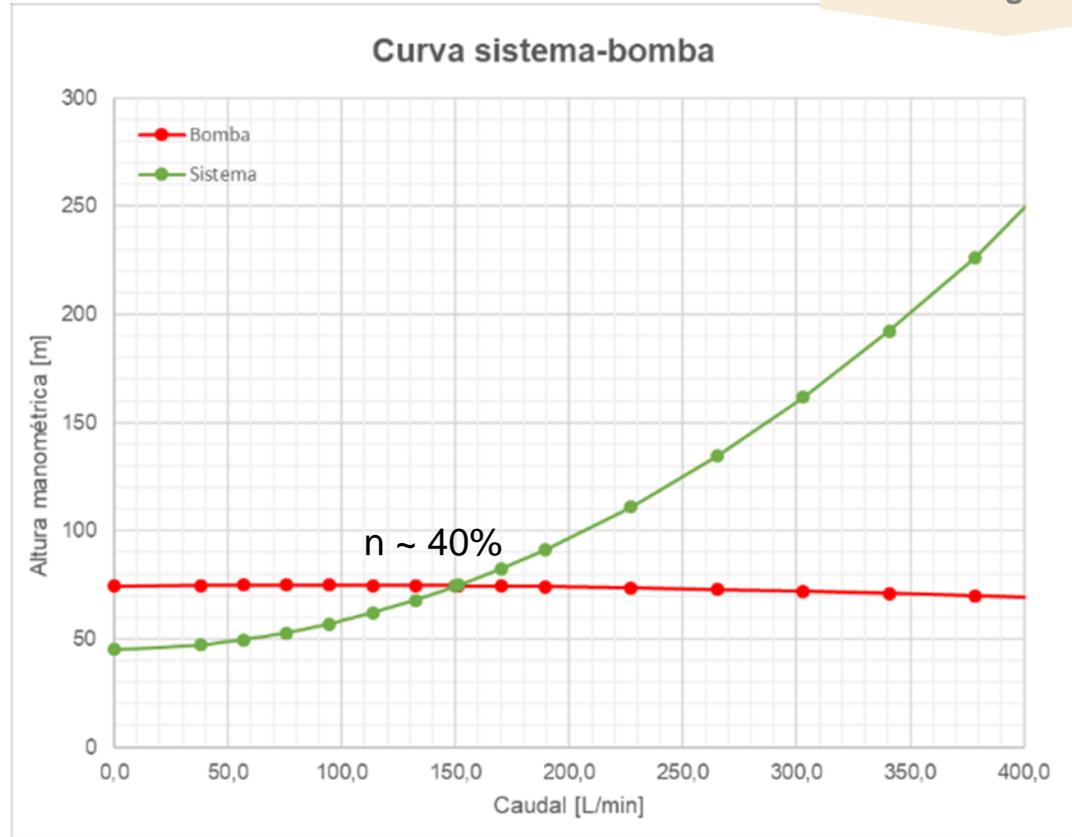
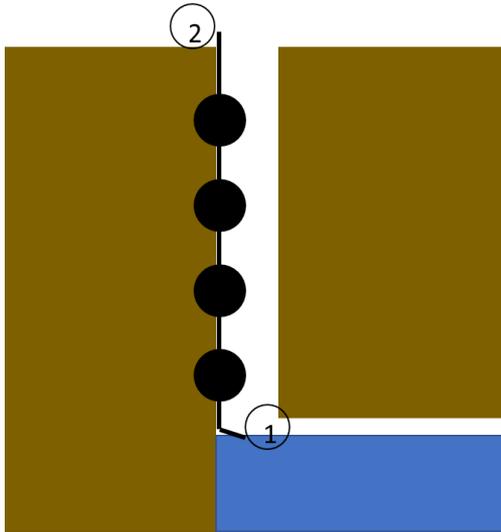
Estructura de costo de energía eléctrica



Combustible	\$ 483
AOM	\$ 46
No operativos	\$ 78
<b>Costo energía generada [\$/KWh]</b>	<b>\$ 607</b>

Actividad	Consumo EE [KWh/día]	Costo [\$/día]	caudal bombeado [m3/día]	Costo específico [\$/m3]
Bombeo	144	\$ 87.356	54	\$ 1.618
Ventilación	49	\$ 29.592		
Taller	1,86	\$ 1.131		
Oficina y almacén	0,543	\$ 329		
Campamento	2,55	\$ 1.547		
Casino	2,75	\$ 1.668		
		<b>\$ 121.624</b>		

## Sistema de bombeo



## Sistema de aire comprimido

### Generación:

Modelo	Presión [PSI <sub>g</sub> ]	Entrega teórica [ft <sup>3</sup> /min]	Volumen del tanque [ft <sup>3</sup> ]	Tiempo de llenado [min]	Entrega real [ft <sup>3</sup> /min]	Entrega a 120 PSI <sub>g</sub> [ft <sup>3</sup> /min]	[L diesel/m <sup>3</sup> AC generado]	
Sullair 185 DUQ-JD	100	185	1564	9	174	148	0,035	0,026
Kaeser M-100	100	360	866	3	289	246	0,020	
<b>Entrega total [ft<sup>3</sup>/min]</b>		<b>545</b>			<b>462</b>	<b>394</b>		

### Consumo:

Herramienta	Consumo específico herramienta [ft <sup>3</sup> /min]	Presión [PSI <sub>g</sub> ]	Consumo a 120 PSI <sub>g</sub> [ft <sup>3</sup> /min]	Cantidad	Factor de utilización[%]	Factor de simultaneidad	Consumo AC estimado [ft <sup>3</sup> /min]
Martillos neumáticos	40,6	71,1	25,9	22	65%	70%	259

### Caudal suministrado:

394 ft<sup>3</sup>/min

### Consumo:

259 ft<sup>3</sup>/min (65,8% generación)

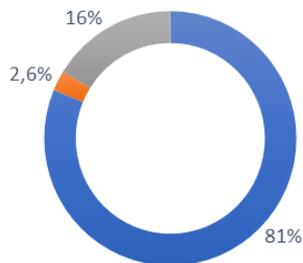
### Fugas totales:

135 ft<sup>3</sup>/min (34,2% generación)



## Costo del aire comprimido

Estructura de costo del Aire comprimido



■ Combustible ■ AOM ■ No operativos

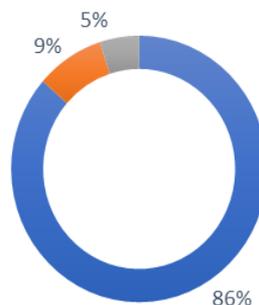
Combustible	\$ 36,5
AOM	\$ 1,2
No operativos	\$ 7,3
<b>Costo aire comprimido [\$/m3]</b>	<b>\$ 45</b>

### Costo fugas:

Fugas totales [m3/día]	1.832
Costo aire comprimido [\$/m3]	45,01
<b>Costo pérdidas [\$/día]</b>	<b>82.469</b>

## Costo del transporte de material

### Estructura de costo transporte interno materiales



■ Combustible ■ AOM ■ No operativos

	Carbón	Total material transportado
Combustible	\$ 877	\$ 737
AOM	\$ 87,2	\$ 73,3
No operativos	\$ 50,5	\$ 42,5
<b>Costo transporte [\$/ton]</b>	<b>\$ 1.015</b>	<b>\$ 853</b>

### Oportunidades de mejora identificadas

-  Bajos niveles de carga de operación de la planta eléctrica
-  Bajo nivel de eficiencia en la operación del sistema de bombeo
-  Altos porcentajes que representa el costo de combustible en los costos totales por actividad
-  Desproporción en los consumos específicos de combustible de los compresores

## 5.2 Propuestas de mejora del desempeño energético



### 01. Sistema de generación solar FV para abastecimiento casino y campamento

#### Carga:

Potencia máxima: 1 KW

Demanda de energía: 5,30 KWh/día

#### Componentes del sistema propuesto:

6 Paneles fotovoltaicos 260 Wp (3 serie X 2 paralelo)

1 Regulador de carga 100 A

2 Baterías 200Ah / 12 V en serie (400 Ah / 24 V)

1 Inversor DC/AC 2000W

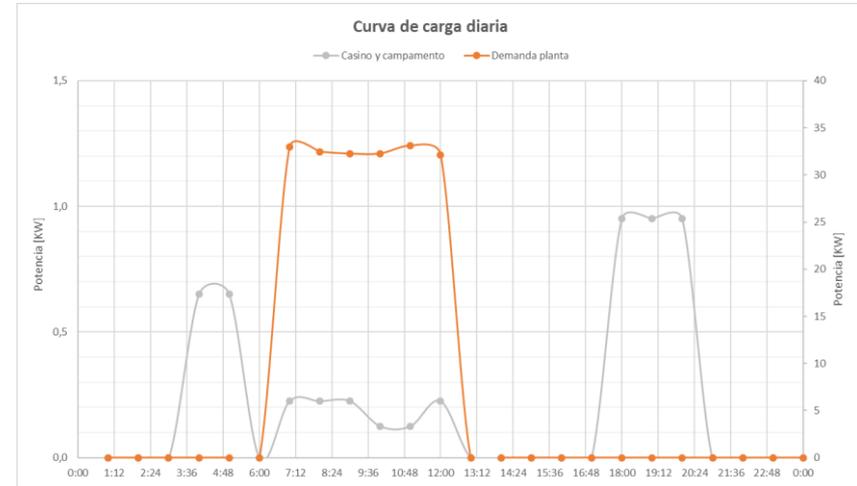
#### Características del sistema propuesto:

Capacidad instalada: 1,56 KW

Generación: 5,97 KWh/día

1 día de autonomía

Vida útil: 20 años



	Escenario 1	Escenario 2		Generación baja carga actual
	Diesel	Diesel	solar	Diesel
Generación [KWh/día]	200,49	195,19	5,30	5,30
Generación [KWh/año]	60.146	58.556	1.590	1.590
Inversiones [\$]	15.000.000	15.000.000	20.275.970	
<b>Costo fijo [\$/año]</b>	<b>\$ 2.008.182</b>	<b>\$ 2.008.182</b>	<b>\$ 2.714.522</b>	<b>\$ 124.035</b>
Costo combustible [\$/año]	\$ 27.090.290	\$ 23.652.990	\$ 0	\$ 3.437.300
Costo VOM [\$/año]	\$ 2.760.000	\$ 2.687.038	\$ 500.000	\$ 72.962
<b>Costo variable [\$/año]</b>	<b>\$ 29.850.290</b>	<b>\$ 26.340.028</b>	<b>\$ 500.000</b>	<b>\$ 3.510.263</b>
<b>Costo total anual</b>	<b>\$ 31.858.472</b>	<b>\$ 28.348.209</b>	<b>\$ 3.214.522</b>	
		<b>\$ 31.562.731</b>		<b>\$ 3.634.298</b>
<b>Costo energía eléctrica [\$/KWh]</b>	<b>\$ 530</b>	\$ 484	\$ 2.022	<b>\$ 2.286</b>
		<b>\$ 525</b>		

### Consideraciones:

Repotenciación de la planta (20 años)

Costos VOM 2017

Costo combustible 2017: \$5.400/gal

Discount rate: 12%

**Reducción costo energía eléctrica: \$5/KWh**

## 02. Sustitución del sistema de bombeo actual por un esquema más eficiente

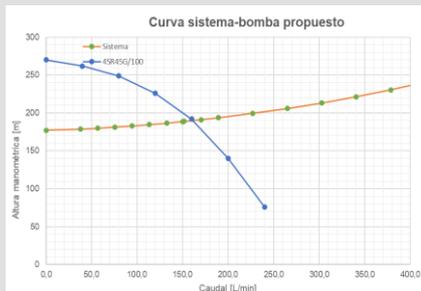
### Sistema actual:

4 bombas centrífugas Pedrollo CP680A en serie

### Sistema propuesto:

1 bomba sumergida Pedrollo 4SR45G/100

### Características del sistema propuesto:



Punto de operación del sistema	
Caudal [L/min]	160,9
Altura [m]	189,92
Eficiencia	64%
Potencia hidráulica [KW]	5,00
Potencia consumo [KW]	7,81
Consumo de energía [KWh/día]	46,84



<b>Carga máxima [KW]</b>	17,02
<b>Carga máxima [%]</b>	18,0%
<b>Energía a generar [KWh/día]</b>	103,3

	Sistema actual	Sistema propuesto
Consumo de energía [KWh/día]	144	46,84
Costo energía [\$/KWh]	607	825
Caudal [m3/día]	54	
Costo energía bombeo [\$/m3]	\$ 1.618	\$ 716

### 03. Conexión a la red del SIN

#### **Demanda total de energía eléctrica:**

Demanda potencia aparente: 228 KVA

Demanda potencia activa: 200 KW

Factor de potencia: 0,88

Consumo de energía: 1.640 KWh/día

Banco de capacitores: 15 mF

Factor de potencia corregido: 0,95

#### **Red SIN:**

Factor de emisiones: 0,367 ton CO2/MWh [4]

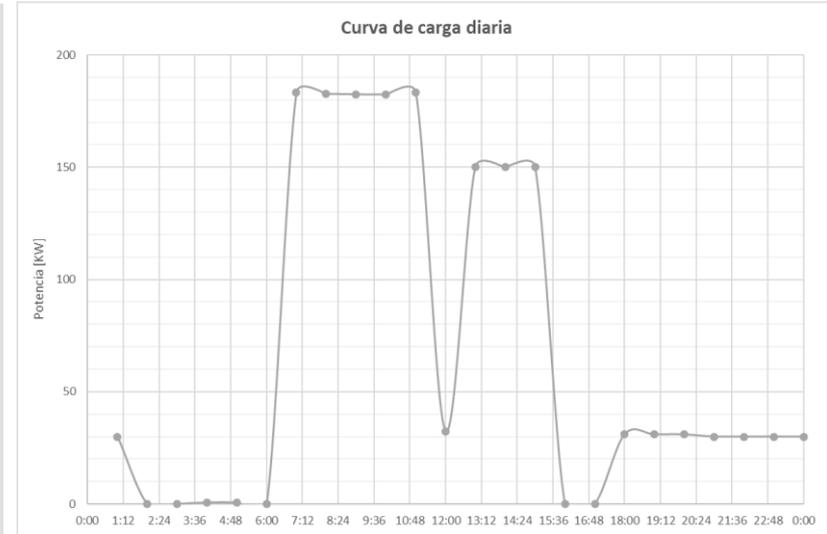
Operador de Red: CENS

Costo unitario usuarios industriales: \$585,23/KWh [5]

Punto de conexión: Corregimiento de San pedro (12 Km)

Nivel de tensión de servicio: 13.200 V

Tipo de cliente: Usuario no regulado



<b>Demanda promedio [KW]</b>	86,34
<b>Demanda pico [KW]</b>	183,21
<b>Factor de demanda</b>	0,916
<b>Factor de carga</b>	0,471

## 04. Sustitución de un compresor por un compresor eléctrico

### Sustitución propuesta

Parámetro	Compresor actual	Compresor propuesto
Motor	Diesel	Eléctrico
Marca	Sullair	
Modelo	185 DUQ-JD	ST3708
Presión nominal [PSIg]	125	115
Capacidad a Pnom [ft3/min]	185	222
Capacidad a 120 PSI [m3/día]	2.011	2.905
Potencia [KW]	45	37

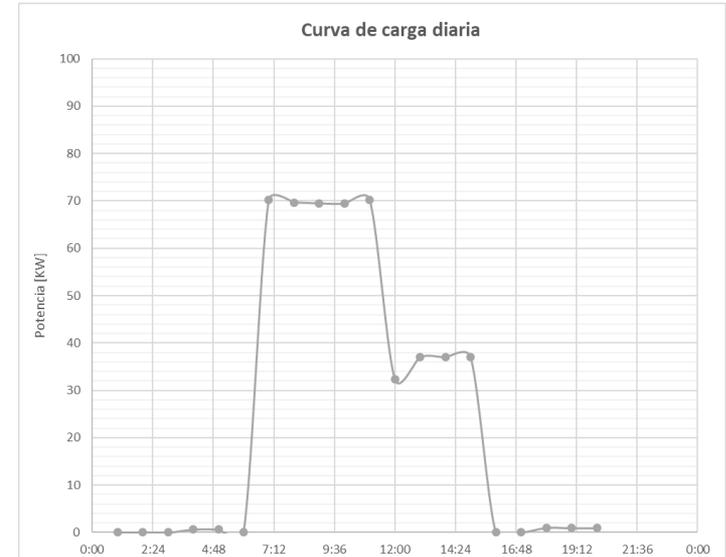
Aumento de producción: 44,5%

### Sistema de aire comprimido:

Modelo	Entrega a 120 PSIg [m3/día]	Consumo promedio [L/día]	Consumo [%]	Generación Aire comprimido [%]	[L diesel/m3 AC generado]
Sullair ST3708	2.905	81,8	55%	47%	0,028
Kaeser M-100	3.340	66,7	45%	53%	0,020
	6.245	148,5	100%	100%	0,024

Costo producción AC: \$48,1/m3

Aumento costo producción AC: 6,8%



<b>Carga máxima [KW]</b>	70,21
<b>Carga máxima [%]</b>	74,3%
<b>Energía a generar [KWh/día]</b>	496,5
<b>Costo energía generada [\$/KWh]</b>	507,4

## 05. Sustitución de la planta eléctrica actual

### Sustitución propuesta:

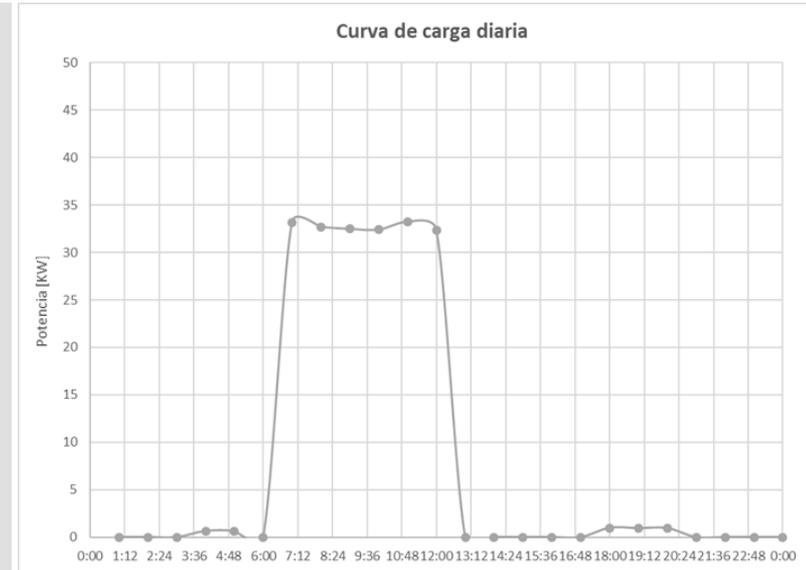
Características	Unidad	Planta actual	Planta propuesta
Modelo	-	SDC95	DE50E0
Aplicación	-	Emergencia	Continua/Emergencia
Modelo motor	-	Deutz TD226B-6DI	CAT C3.3
Modelo alternador	-	UC1274CIL632	LC1514L
Potencia activa	KW	95	40
Potencia aparente	KVA	118,75	50
Frecuencia	Hz	60	
Velocidad	rpm	1.800	

### Costo y condiciones de operación planta propuesta:

Carga máxima: 33,21 KW

% Carga máxima: 73,1%

Costo de generación: 642 [\$/KWh]



## Consumo de energía y emisiones previstos

		Consumo combustible [L/día]	Emisiones [kg CO2/día]	Ahorro combustible [%]	Reducción emisiones [%]
Esquema actual		250	670		
<b>Opciones de mejora</b>					
O1	Sistema solar FV autónomo para abastecimiento energético de las cargas de casino y campamento	242	648	3,2%	3,2%
O2	Sustitución del sistema de bombeo actual por un esquema más eficiente	224	601	10,2%	10,2%
O3.1	Conexión a la red del SIN	0	602	100%	10,1%
O3.2					
O3.3					
O4	Sustitución de un compresor por un compresor eléctrico	236	633	5,5%	5,5%
O5	Sustitución de la planta eléctrica actual	242	649	3,0%	3,0%
O2+O3.2	Sustitución del sistema de bombeo + conexión a la red del SIN	0	566	100%	15,4%

## 5.3 Evaluación financiera de las propuestas



## Indicadores financieros para las opciones de mejora propuestas

		Consumo combustible [L/día]	Costo de generación EE [\$/KWh]	Costo de generación AC [\$/m3]	VPN (12%)	TIR	IVAN
Esquema actual		250	607	45,0			
<b>Opciones de mejora</b>							
O1	Sistema solar FV autónomo para abastecimiento energético de las cargas de casino y campamento	242	557*		-\$ 3.097.468	9,5%	
O2	Sustitución del sistema de bombeo actual por un esquema más eficiente	224	\$ 825		\$ 20.294.484	95,2%	2,56
O3.1	Conexión a la red del SIN	0	\$ 585		-\$ 36.818.739	11,0%	
O3.2					\$ 194.644.365	21,5%	0,61
O3.3					\$ 226.207.515	24,3%	0,79
O4	Sustitución de un compresor por un compresor eléctrico	236	\$ 507	\$ 48,1	-\$ 21.422.093	2,7%	
O5	Sustitución de la planta eléctrica actual	242	\$ 642		-\$ 16.253.287	0,4%	
O2+O3.2	Sustitución del sistema de bombeo + conexión a la red del SIN	0	\$ 585		\$ 188.004.970	20,9%	0,57

\*No comparable con el caso base. Considerando repotenciación de la planta

## Opciones de mejora factibles para mejorar el desempeño energético:

Orden	Opción de mejora
1	O2: Sustitución del sistema de bombeo actual
2	O3.3: Interconexión a la red del SIN con línea de distribución a cargo del OR
3	O3.2: Interconexión a la red del SIN con costo de línea de distribución compartido con otra mina de la zona
4	O2 + O3.2: Sustitución del sistema de bombeo actual e interconexión a la red del SIN con costo de línea de distribución compartido con otra mina de la zona

# 6 CONCLUSIONES



Se realizó el proceso de **caracterización energética** en la mina San tomas, lo que permitió determinar la distribución de consumo y costos que describen su **desempeño energético**, así como sus **oportunidades de mejora** y las **emisiones asociadas al consumo de combustible**.

De acuerdo con las **oportunidades mejora identificadas** durante el proceso de caracterización energética, se plantearon **cinco opciones de mejora del desempeño energético**; todas ellas capaces de generar **ahorros** en el consumo de combustible entre el 3 y el 100% y reducción de las emisiones entre el 3 y el 10%.



Las opciones de mejora del desempeño energético planteadas consisten en la **optimización del consumo** de energía en las **actividades de uso significativo de la energía** o en la **sustitución, total o parcial, del combustible Diesel** por otros recursos energéticos. Aunque el sistema de aire comprimido presenta los mayores consumos de combustible, no se plantearon alternativas para su mejoramiento en etapas posteriores a la generación dado que se carece de datos para caracterizar y analizar de forma exacta el sistema.



Las alternativas **técnica y financieramente viables** para el mejoramiento del desempeño energético en la mina San tomas, de acuerdo con las opciones analizadas en este trabajo, serían la **sustitución del sistema de bombeo actual** (VPN= \$20.294.484) y/o la **conexión de la mina a la red del SIN** considerando la participación del operador de red o de otra mina aledaña en la construcción de la línea de distribución requerida, con VPN de \$226.207.515 y 194.644.365 respectivamente.

La evaluación financiera de las opciones de mejora propuestas indica que la alternativa con **mejor relación costo-beneficio** es la **sustitución del sistema de bombeo actual** con un IVAN de 2,56; mientras que la alternativa que generaría mayor beneficio económico, en términos de VPN, sería la conexión a la red del SIN con participación del operador de red.



La sustitución del sistema de bombeo actual generaría una reducción en el consumo de combustible del 10,2%; mientras que la conexión a la red del SIN lograría la eliminación del consumo de combustible y se podría tener una reducción de 80% en el caso de mantenimiento de la planta, que operaría como equipo de respaldo. En ambos casos, la **reducción de emisiones GEI** sería de aproximadamente el **10%** de las emisiones actuales; y podría lograrse una reducción del **15%** si se integraran las dos soluciones.

# 7 RECOMENDACIONES

Instalación y seguimiento de **equipos de medición de caudal y presión** en las tuberías de entrada y salida de los tanques de almacenamiento, así como antes del punto derivación hacia los equipos de consumo en el interior de la mina.



Instalación y seguimiento de un **equipo de medición de la energía eléctrica generada** por la planta que indique por lo menos los parámetros de tensión, corriente y factor de potencia; y **medidores del consumo de energía en las actividades de uso significativo** de la energía eléctrica.



Disponer de información suficiente para **caracterizar el sistema de aire comprimido de una manera más exacta** y poder identificar otras oportunidades de mejora que conduzcan a **nuevas alternativas para optimizar el desempeño energético en esta actividad.**

Disponer de información más **exacta** para el cálculo de los costos y las condiciones de operación de la planta, y para revisar y actualizar la caracterización energética realizada.

Mantener **registros** diarios del consumo de combustible por equipos, así como del avance de la mina, del total de material minado, de la producción de carbón, del caudal de agua bombeado y de los flujos de aire comprimido y de energía eléctrica.

Realizar la **solicitud de factibilidad del servicio de energía eléctrica** y desarrollar la alternativa de **conexión a la red como un proyecto** que incluya los estudios previos, obras de infraestructura adicionales, equipos de medición y condiciones de servidumbre requeridos por el operador de red.

Evaluar las alternativas planteadas frente a **distintos escenarios de aumento en el precio del combustible**, lo cual podría favorecer la **viabilidad** de las opciones de mejora propuestas.



**Establecer y analizar indicadores del desempeño energético**, como el nivel de energía no asociada a la producción, los costos específicos por actividad, el nivel de pérdidas de aire comprimido, las condiciones de carga en la operación de la planta y la eficiencia en el bombeo de agua.



Determinar un costo total de la alternativa y establecer el modelo de cooperación óptimo para su implementación, ya sea con otras minas de la zona o con el operador de red.

# 8 REFERENCIAS

- [1] L. Güiza, «La pequeña minería en Colombia: una actividad no tan pequeña,» *DYNA*, vol. 80, n° 181, pp. 109-117, 2013.
- [2] Agencia Nacional Minera, «Caracterización de la actividad minera departamental Norte de Santander,» Bogotá, 2017.
- [3] UPME, «Factores de Emisión de los Combustibles Colombianos (FECOC),» 2016. [En línea]. Available: [http://www.upme.gov.co/calculadora\\_emisiones/aplicacion/calculadora.html](http://www.upme.gov.co/calculadora_emisiones/aplicacion/calculadora.html). [Último acceso: 11 Febrero 2018].
- [4] UPME, «Factores de emisión del Sistema Interconectado Nacional Colombia -SIN,» Bogotá, 2017.
- [5] CENS, «Tarifas de energía mercado regulado,» 15 Septiembre 2018. [En línea]. Available: [https://www.cens.com.co/Portals/1/documentos/tarifas/Tarifa\\_CENS\\_201809.pdf](https://www.cens.com.co/Portals/1/documentos/tarifas/Tarifa_CENS_201809.pdf). [Último acceso: 24 Octubre 2018].



# Gracias

mquilaguy@unab.edu.co