

## TEC-312 Reducción de la Huella de Carbono usando Motores de Imanes Permanentes en Sistemas de Levantamiento Artificial

Autor(es): L. Ararat, R. Herrera, A. Parra, F. Solano, SierraCol Energy; A. Martinez, E. Suarez Borets

Categoría: Marque con una "X"

- Artículo Técnico
- Tesis Pregrado
- Tesis Posgrado

Derechos de Autor 2022, ACIPET

Este artículo técnico fue preparado para presentación en el XIX Congreso Regional Colombiano de Petróleo, Gas y Energía organizado por ACIPET en Cartagena, Colombia.  
Este artículo fue seleccionado para presentación por el comité técnico de ACIPET, basado en información contenida en un resumen enviado por el autor(es).

### Resumen

Se evaluó e implementó la tecnología de motores de imanes permanentes (PMM por sus siglas en inglés) en los diferentes sistemas de levantamiento artificial en los campos Llanos Norte (LLN) y La Cira Infantas (LCI) con el objetivo de encontrar un motor más eficiente que se alinee con la misión de SierraCol Energy como operador independiente en Colombia de generar ahorros en el consumo energético y contribuir con la reducción de la huella de carbono.

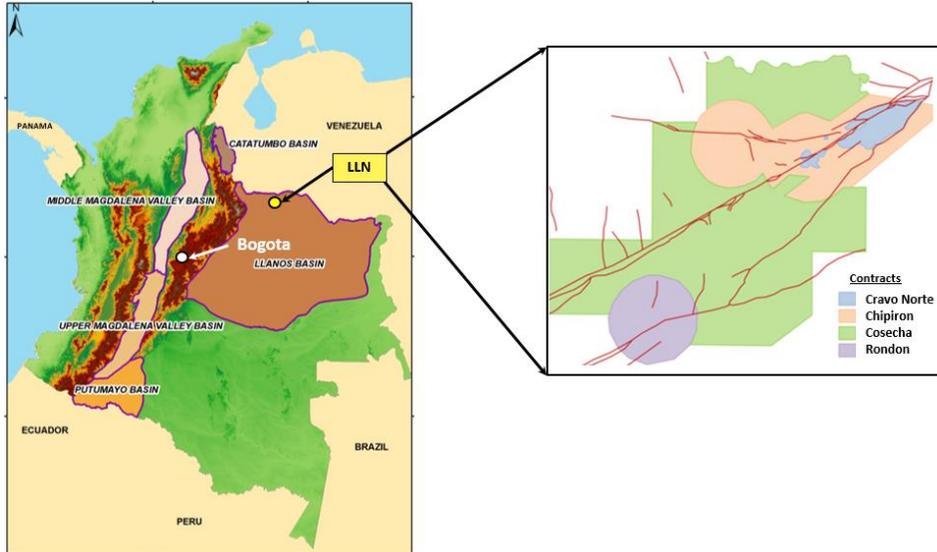
Durante la última década se ha generado conciencia sobre los temas ambientales y la necesidad de combatir los efectos del cambio climático. Los esfuerzos liderados por diferentes acuerdos entre naciones han cobrado fuerza a partir de la Cumbre de la Tierra de 1992 y el Acuerdo de París de 2015, que establece medidas de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero con el fin de minimizar el impacto de la huella de carbono en diferentes industrias fuertemente asociadas a la explotación de los recursos fósiles y su impacto. Las tecnologías más eficientes dentro del sector del petróleo y el gas son importantes, ya que el aumento de los costos de la energía en todo el mundo ha tenido un impacto en los costos operativos de los yacimientos de petróleo y gas maduros, teniendo en cuenta el depletamiento de los yacimientos, los cortes de agua elevados y el mantenimiento de los equipos aumentan la demanda de energía. Debido a esto, se inició el proceso de identificación de nuevas tecnologías y se seleccionaron e implementaron los motores de imanes permanentes, logrando una reducción significativa en el consumo de energía (15% - 25%) en los sistemas de levantamiento artificial en los campos de SierraCol Energy.

En 2016, se inició una prueba piloto en el campo LLN con la instalación de PMM en dos pozos con sistemas BES, con un ahorro de energía promedio del 15%. La segunda prueba piloto comenzó en 2019 con dos pozos con sistemas BCP en LCI, obteniendo un 35% de ahorro de energía, estos ahorros dieron como resultado una implementación a gran escala en los completamientos iniciales en 2021. La prueba piloto para el sistema BM comenzó en 2020/2021 con la instalación de cinco pozos en LCI con un ahorro de energía promedio del 18%. La tecnología cumplió con las expectativas y objetivos planteados para su evaluación, ya que se ha conseguido una reducción de más del 15% en el consumo energético de los principales sistemas de levantamiento artificial (BES, BM y BCP) con tecnología PMM respecto a los sistemas convencionales. El ahorro energético se traduce en una reducción de 24.500 ton CO<sub>2</sub>eq en cinco años; por lo tanto, la implementación de la tecnología PMM se considera una alternativa energéticamente eficiente y un potencial agente de cambio en la reducción de la huella de carbono.

Este artículo comparte detalles técnicos de la evaluación de esta nueva tecnología y las pruebas realizadas en campo para validar su implementación en los sistemas de levantamiento artificial, el cálculo de reducción de toneladas de CO<sub>2</sub>eq y los principales desafíos en su aplicación como fuente de energía y solución eficiente para futuros proyectos.

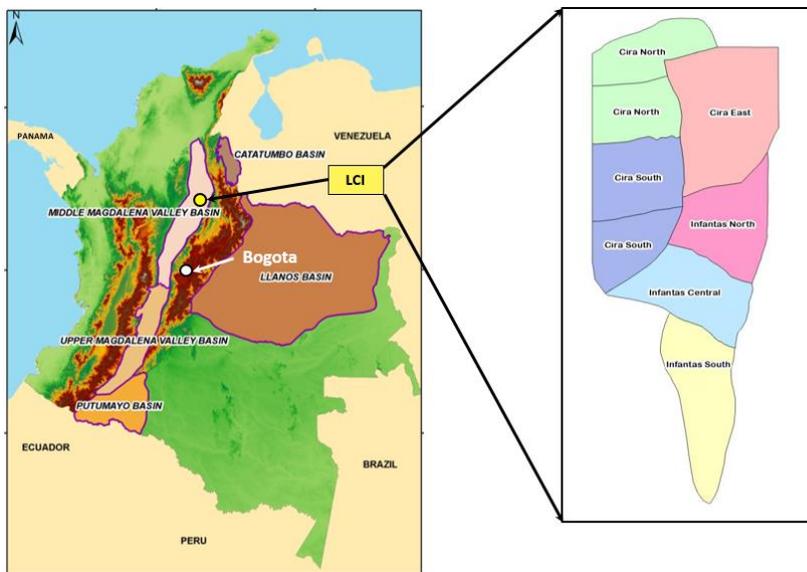
### Introducción

**Información General de los Campos.** La implementación de la tecnología de motores de imanes permanentes (PMM) se ha llevado a cabo en dos campos donde SierraCol Energy opera como una empresa independiente y líder en E&P. Caño Limón está ubicado en Arauca (Figura 1), dentro de la cuenca de los Llanos Orientales, que actualmente cuenta con una población de 482 pozos con Bombas Electrosumergibles (BES) y 24 pozos con Bombeo Mecánico (BM) a una profundidad promedio de 7,450 pies TVD.



**Figura 1. Campo Caño Limón - Arauca**

La Cira Infantas es el otro campo en estudio para la implementación de la tecnología. Ubicado en Barrancabermeja (Figura 2), es el primer campo productor en Colombia y cuenta con tres sistemas diferentes de levantamiento artificial para producir sus pozos: 215 instalaciones de Bombeo de cavidades progresivas (BCP), 691 instalaciones de BM y 257 instalaciones de BES. La profundidad promedio del campo es de 3,500 pies TVD.



**Figura 2. Campo La Cira Infanta - El Centro, Barrancabermeja**

## Antecedentes de los Motores de Imanes Permanentes en los Campos de SierraCol Energy

En 2016 se realizó el primer acercamiento a la tecnología PMM para equipos BES en los campos LLN y LCI con el objetivo de encontrar una tecnología que pudiera maximizar la eficiencia de estos sistemas y generar ahorros significativos en el consumo de energía. El proyecto comenzó en noviembre del mismo año con una prueba de prueba en LLN con la instalación de PMM en dos pozos BES. Durante los siguientes dos años se ajustaron las condiciones de prueba dando como resultado un ahorro energético promedio del 15%, lo que validó su implementación a gran escala desde 2020 con más de 250 instalaciones a la fecha en LCI y LLN. De acuerdo con los resultados obtenidos en BES, se consideró la implementación de PMM para el sistema BCP en superficie. La prueba piloto comenzó en 2019 con la instalación de PMM en dos pozos BCP en LCI, lo que resultó en un ahorro de energía del 35 %. Los resultados permitieron iniciar la implementación a gran escala en los completamientos Iniciales en BCP desde 2021, a la fecha se han instalado 12 pozos. Finalmente, en 2020 se inició la prueba piloto de los sistemas BM, finalizando en 2021 con la instalación de cinco pozos en LCI con un ahorro energético promedio del 18%.

## Aplicación de Motores de Imanes Permanentes en los Sistemas de Levantamiento Artificial

**Bombeo Electrosumergible – BES.** La unidad de bombeo electrosumergible consta de un motor eléctrico con una sección de sellos, bomba centrífuga multietapa, cable de potencia, extensión del cable del motor, controlador del motor y transformador de potencia. JJ Xiao, et al. [1] explicó que los motores eléctricos son bipolares, trifásicos, de jaula de ardilla y del tipo de inducción (Motor de Inducción – IM). El rotor tiene barras conductoras embebidas en los espacios formados por las laminaciones del rotor, para minimizar la pérdida de corriente, y las barras conductoras están conectadas entre sí en sus extremos mediante anillos también conductores. La corriente pasa a través de las barras generando un campo magnético giratorio que crea la fuerza magnética que hace girar el rotor. Asimismo, la electricidad es inducida por el estator mediante inducción magnética. La figura 3 muestra la configuración del motor de inducción.

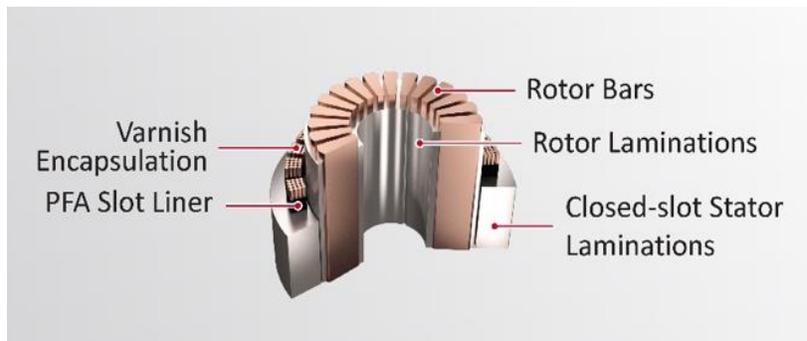
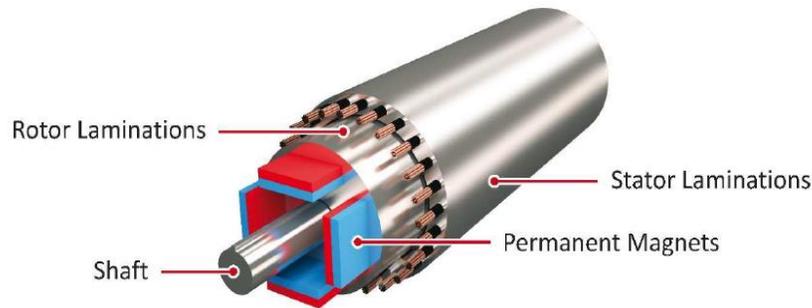


Figura 3. Motor de Inducción (Cortesía de Borets)

**Bombeo Electrosumergible – BES PMM.** Según L. Seczon, et al. [2] el BES-PMM es similar al BES IM trifásico (Figura 4), la principal diferencia es que el PMM tiene imanes permanentes montados en el rotor y debido a esto, el flujo del rotor ahora es suministrado por los imanes, por lo tanto no requiere una fuente de alimentación eléctrica para generar este campo magnético. Los imanes permanentes en el rotor del motor brindan las siguientes ventajas clave:

- Al utilizar únicamente energía para generar el campo magnético en el estator, se requiere menos energía para la operación de PMM.
- El deslizamiento del flujo magnético entre el rotor y el estator es cero.
- Alta eficiencia (90-93%) en un rango operativo más amplio.
- Mayor densidad de potencia que los rotores IM convencionales, lo que se traduce en longitudes más cortas para la misma salida de HP.
- Debido a la máxima eficiencia y operación síncrona, se reducen las pérdidas eléctricas, hay una menor corriente de operación y menos generación de calor.
- Proporciona un mayor potencial de producción y mitiga los problemas asociados con arranques y paradas frecuentes.



**Figura 4. Motor de Imanes Permanentes (Cortesía de Borets)**

Las principales diferencias entre el motor de inducción y el motor de imanes permanentes se muestran en la Tabla 1.

Motor Inducción	Motor de Imanes Permanentes
Motor Asíncrono	Motor Síncrono
Rotor construido con barras de cobre cortocircuitadas por dos anillos terminales de cobre.	Rotor construido por imanes permanentes.
El campo magnético del rotor es generado por la corriente inducida en las barras de cobre (del rotor).	(Constante) Flujo magnético del rotor creado por la presencia de imanes permanentes.
La interacción del campo magnético del rotor y el campo magnético (giratorio) del estator da como resultado: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Torque del rotor</li> <li>• Deslizamiento del rotor</li> </ul>	La interacción del campo magnético del rotor y el campo magnético del estator (rotor) da como resultado: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Torque del rotor</li> </ul>
Eficiencia 80 – 83 %	Eficiencia 90 – 93 %
Factor de Potencia alrededor de 0.8	Factor de Potencia cercano a 1
Frecuencias de Operación (35 a 60 Hz)	Frecuencias de Operación (16 a 120 Hz)
No se requiere un algoritmo especial para el Variador.	Se requiere de un ajuste en la configuración del variador.

**Tabla 1. Motor de Inducción TECvs Motor de Imanes Permanentes**

En 2018 se inició la prueba piloto para BES PMM en el campo LLN con la instalación de dos pozos con PMM. La prueba consistió en dos etapas; la primera etapa fue la instalación del sistema con PMM para establecer una línea base para pozos con caudal alto y bajo durante un periodo, y en la segunda fase se cambió el PMM por IM manteniendo las mismas condiciones de operación para validar el consumo de energía (kWh) para cada fase. Las condiciones operativas y el ahorro de energía para la prueba piloto se muestran en la Tabla 2.

Pozo	Prueba	Etapa	Fase I - PMM					Fase II - IM					Ahorro Energía (%)
			Motor RPM	Velocidad Hz	BFPD	kWh	PIP (psi)	Motor RPM	Velocidad Hz	BFPD	kWh	PIP (psi)	
Pozo 1	Bajo Caudal	I	3,298	110	3,630	64.5	955	3,298	55.8	3,660	78	934	17
		II	3,509	117	4,070	77.3	933	3,509	59.5	4,110	92.0	920	16
		III	4,018	134	5,040	108.4	889	4,018	68.3	5020	131	885	17
Pozo 2	Alto Caudal	I	3,294	109.8	12,050	309	424	3,294	55.9	12,540	337.9	490	9
		II	3,525	117.5	13,550	373	374	3,525	60	14,000	408.1	433	9
		III	3,852	128.4	15,610	472	317	3,823	65	15,680	503.6	357	6

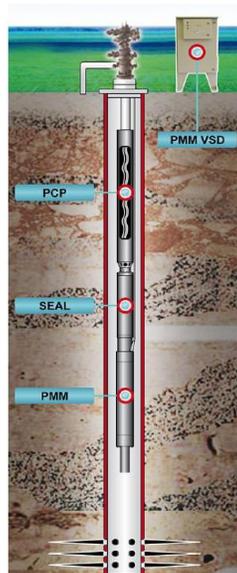
**Tabla 2. Resultados Prueba Piloto BES - LLN**

La prueba piloto BES PMM y sus resultados permitieron evaluar e iniciar la implementación a gran escala de este sistema para los campos LLN y LCI desde 2020.

**Bombeo de Cavidades Progresivas con BES PMM – BESCP.** El campo LCI es conocido por ser un campo petrolero desafiante para los ingenieros de producción, debido a las condiciones a las que se somete el equipo de levantamiento artificial. Entre estas se encuentran una inclinación superior a 30° para algunos pozos, alta producción de arena debido a la poca consolidación de algunas arenas productoras, el control de pozos inyectores en los patrones inversos, y la severidad del *dogleg* que para algunos pozos es superior a 4°/100 pies, etc.

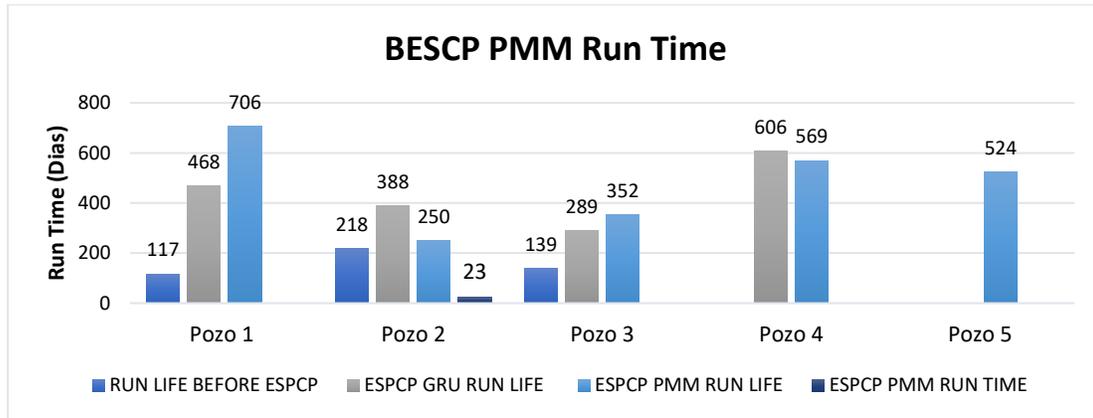
Con las dificultades y limitaciones presentes en algunos pozos problemáticos en el campo La Cira Infantas, y debido a un problema conocido de fricción entre tubería-varilla que afecta al 85% de los pozos, se decidió explorar un sistema de levantamiento sin varillas. Inicialmente se consideró el sistema GRU. Este sistema se caracteriza por tener un motor de inducción sumergible (equivalente a un motor BES) y una caja reductora, que reduce las revoluciones por minuto del eje del motor a unas revoluciones por minuto a las que puede operar el BCP.

Sin embargo, con la instalación de este sistema se identificó que la mayor cantidad de fallas ocurrían sobre la caja de engranajes (Caja reductora GRU) debido a un problema en el diseño, en el eje del respectivo componente y el sistema de engranajes tipo aguja. Teniendo en cuenta esta problemática se decide entonces retirar este componente y se propone la instalación de un motor que imprima el potencial requerido por el equipo de fondo para levantar el fluido y girar a las mismas velocidades que permitía la caja de engranajes GRU, por lo cual se prueba la instalación de un equipo BESCP con un motor de imanes permanentes (Figura 5).



**Figura 5. Sistema BESCP PMM**  
(Cortesía de Borets)

Con el desempeño actual del equipo BЕСP PMM (Figura 6), se tienen 1.3 intervenciones menos por pozo al año, equivalente a un promedio total de 13 intervenciones menos respecto a la situación previa a su aplicación.



**Figura 6. Desempeño de BЕСP PMM**

**Bombas de Cavidades Progresivas – BCP.** Los Motores de Inducción Convencionales con sistema de transmisión de potencia al cabezal de rotación con freno mecánico o hidráulico han sido utilizados a lo largo de los años en sistemas de levantamiento artificial con Bombeo de Cavidad Progresiva. Estos sistemas tienen las siguientes características:

- Baja Eficiencia que inclusive con el tiempo se reduce aún más por el desgaste de poleas y correas.
- Altos costos y gastos operativos asociados, bien sea en mantenimientos preventivos o correctivos.
- Aumento de producción diferida dadas las paradas por mantenimientos.
- Alto consumo de energía.
- Alta cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub>.
- Altos costos de rebobinado.
- Altos costos de mantenimiento de rodamientos.
- Necesidad de Equipos de soporte para mantenimientos mayores (cambios de rodamientos o rebobinados).
- Difícil y peligroso manejo, instalación y desinstalación.
- Altos riesgos de accidente: más partes giratorias equivale a más posibilidades de fallas y accidentes.

**BСP PMM.** El Motor de imanes Permanentes es parte de la serie de cabezales con transmisión de potencia directamente al sistema de varillas, sin tener que utilizar poleas, engranajes o correas, lo cual ofrecen el más alto nivel de eficiencia energética. El mismo posee un motor de rotor hueco el cual se acopla directamente a la barra lisa. Este cabezal posee un rodamiento de alta carga en la parte inferior donde se soporta la carga axial del equipo de subsuelo; este rodamiento posee un reservorio de aceite el cual debe ser inspeccionado periódicamente o cambiado anualmente según como el plan de mantenimiento lo requiera. El PMM está diseñado para aplicaciones de alta potencia y alto torque. Los cabezales con motor de imanes permanentes brindan un alto grado de seguridad operacional, ya que no posee piezas en movimiento, es ligero y de peso concéntrico para la instalación y desinstalación, el sonido en funcionamiento es menor a 60 dB y su mantenimiento es bajo, requiere cambio de *stuffing box* en caso de fugas y revisión anual de aceite, el cual puede ser reutilizado por más de dos años.

El Cabezal PMM, es un equipo que lleva en el mercado mundial más de 9 años, en diferentes campos a nivel mundial y ofrece principalmente:

- Acople directo a la barra lisa, eliminando sistemas de transmisión.
- El motor de imanes permanentes ofrece ahorro de energía eléctrica. (Hasta más de 20% ahorro)
- Reduce las Emisiones de Gases de Efecto Invernadero.
- Velocidad de funcionamiento desde 30 hasta 450 RPM.
- Factores de potencia de 0.98 en lectura en el motor.
- Eficiencias por encima del 97% en cualquier velocidad y torque.
- Torque hasta 1000 lb/Ft @ 450 RPM, al reducir la velocidad de funcionamiento, aumenta el torque disponible, pudiendo llegar a 1150 lb/Ft.

- Mitigación de riesgos operacionales.
- El mantenimiento del cabezal se reduce a cambios de empaques de *stuffing box* y un cambio de aceite anual.
- *Stuffing box* standard, fácil cambio de empaquetaduras.

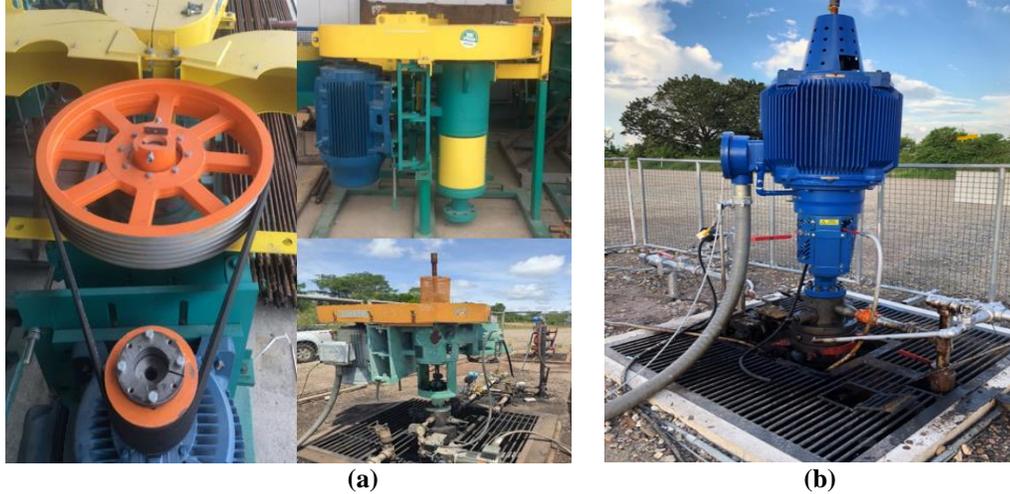


Figura 7. (a) Sistema Convencional PCP; (b) PCP PMM

La Figura 7 muestra el sistema BCP convencional versus el sistema PMM. En el año 2019 se inició la prueba de prueba en dos pozos del campo LCI con el objetivo de verificar el ahorro energético, esta prueba tuvo una duración de dos años en los que se obtuvieron ahorros del 41% y 35% respectivamente (Tabla 3).

Resultados Prueba Piloto - PCP								
Pozo	Fecha de Inicio	Fecha de Finalización	Dias	RPM - IM	RPM - PMM	Consumo IM kW/Dia	Consumo PMM kW/Dia	Ahorro Energía
Pozo 1	4/26/2019	4/25/2020	365	170	140	936	552	41%
Pozo 2	4/29/2019	4/28/2020	365	175	165	660	432	35%

Tabla 3. Resultado Prueba Piloto BCP PMM

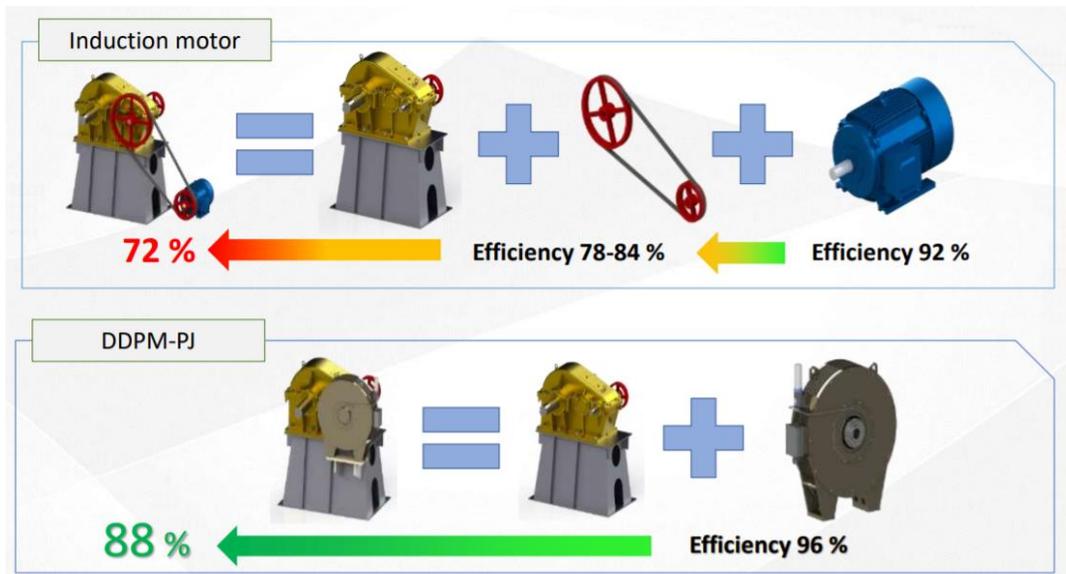
**Bombeo Mecánico – BM.** Los Motores eléctricos convencionales de Inducción con sistema de transmisión de potencia por poleas y correas ha sido el método más común para la operación de las unidades de bombeo, el sistema actual tiene las siguientes características:

- Baja eficiencia por los cambios de velocidad en la unidad de bombeo para acelerar y desacelerar en ambas carreras lo que produce deslizamiento en correas con el consecuente desgaste prematuro y pérdida de tensión del tren de correas.
- Se requiere un gran número de correas y canales de poleas para una buena transmisión de potencia.
- Altos costos y gastos operativos asociados para la instalación de un tren de correas.
- Mayores costos de mantenimiento.
- Aumento de producción diferida cuando se presenta rotura de correas, tensionamiento e intervenciones por mantenimiento preventivo y correctivo.
- Alto consumo de energía.
- Alta cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub>.
- Altos costos de rebobinado.
- Necesidad de equipos de repuesto para mantenimientos mayores (Cambios de rodamientos o rebobinados).
- Difícil y peligroso manejo, instalación y desinstalación (Guarda correas, correas, poleas, equipo grúa, etc)
- Altos riesgos de accidente: más partes giratorias, más posibilidades de fallas y accidentes.

Con la implementación de los motores de imanes permanentes en BM se buscó:

- Disminuir componentes que son susceptibles a falla.
- Reducir componentes que presenten desgaste y número de intervenciones de mantenimiento que adicionan costos de equipos y personal.
- Reducir costos por mayor número de insumos requeridos.
- Disminuir diferida por perdida de la función operativa del equipo al existir rotura de correas.

**BM PMM.** El sistema directo con motor de imanes permanentes está acoplado directamente al eje de alta velocidad de la unidad de bombeo (Figura 8). La polea principal se retira de la caja de cambios y se reemplaza por el sistema de imanes permanentes.



**Figure 8. Sistemas de Imanes Permanentes para Unidad de Bombeo Mecánico Convencional (Cortesía de EOR)**



**Figura 9. Unidad de Bombeo Mecánico con PMM – Instalación LCI**

El sistema no requiere el uso de poleas, engranajes o correas para la transmisión de potencia, ofreciendo el más alto nivel de eficiencia energética (Figura 9).

El sistema con motor de imanes permanentes proporciona un alto grado de seguridad operativa, ya que no tiene partes móviles, es confiable y tiene su propio sistema de control de velocidad con su controlador. A continuación, se mencionan sus principales ventajas:

- Acople directo al eje alta velocidad del reductor de engranajes.
- El motor de imanes permanentes ofrece ahorro de energía eléctrica. (Hasta más de 20% ahorro).
- Reducidas Emisiones de Gases de Efecto Invernadero.
- Factores de potencia de 0.98 en lectura en el motor.
- Eficiencias por encima del 97% en cualquier velocidad y torque.
- Mitigación de riesgos operacionales.

En 2020, comenzó la prueba de campo de LCI. Esta fue la primera prueba en el país con este sistema, con la instalación de cinco motores de imanes permanentes en unidades de bombeo convencionales utilizando los mismos drivers instalados, con el objetivo de evaluar el ahorro energético frente a los motores de inducción en las unidades de bombeo. Los resultados se muestran en la Tabla 4.

Resultados de Prueba Piloto - BM							
Pozo	Fecha de Inicio	Fecha de Finalización	Motor	Dias	Consumo IM kW/Dia	Consumo PMM kW/Dia	Ahorro Energía
Pozo 1	11/19/2020	2/19/2021	100 HP	265	636	521	18%
Pozo 2	11/27/2020	11/27/2021	75 HP	257	432	367	15%
Pozo 3	4/14/2021	7/14/2021	100 HP	119	590	490	17%
Pozo 4	4/21/2021	7/21/2021	75 HP	112	672	564	16%
Pozo 5	4/27/2021	7/27/2021	100 HP	106	700	569	19%

**Tabla 4. Resultados Prueba Piloto BM PMM**

### Impacto en el Ahorro de Energía y Reducción de la Huella de Carbono.

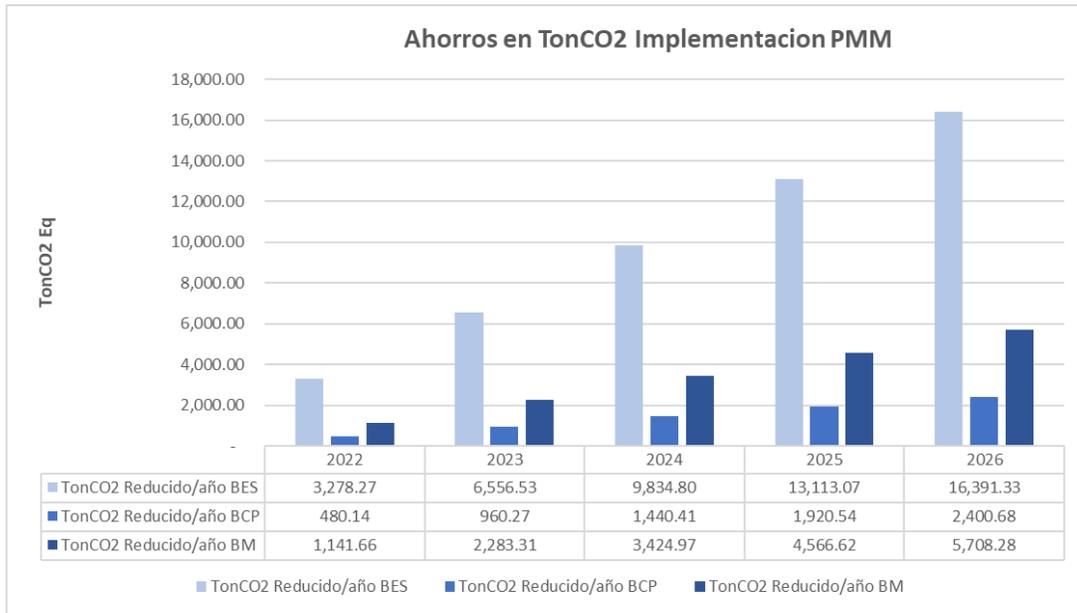
El Acuerdo de París [3] inicia una transición hacia el desarrollo de una política climática internacional con el objetivo de reducir sustancialmente las emisiones globales de gases de efecto invernadero para limitar el aumento de la temperatura global en este siglo a 2 grados centígrados, mientras continúan los esfuerzos para limitar el aumento aún más a 1,5 grados. Para apoyar el plan de Colombia para el Acuerdo de París de reducir el 20% de sus emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) para 2030, utilizando como punto de partida el inventario nacional de emisiones de 2010, SierraCol se ha fijado la ambiciosa meta de reducir las emisiones de carbono en un 50% para 2023.

Para evaluar el impacto del ahorro de energía (kWh), durante la implementación de la tecnología PMM en los principales sistemas de levantamiento instalados en los campos de SierraCol, se consideró la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> con la aplicación del factor equivalente GEI 0.203 Ton CO<sub>2</sub>eq/MWh según el factor de emisión de gases invernadero del Sistema Interconectado Nacional [4]. Las toneladas de reducción de CO<sub>2</sub> resultantes para la implementación del PMM a gran escala en 2022 se muestran a continuación (Tabla 5):

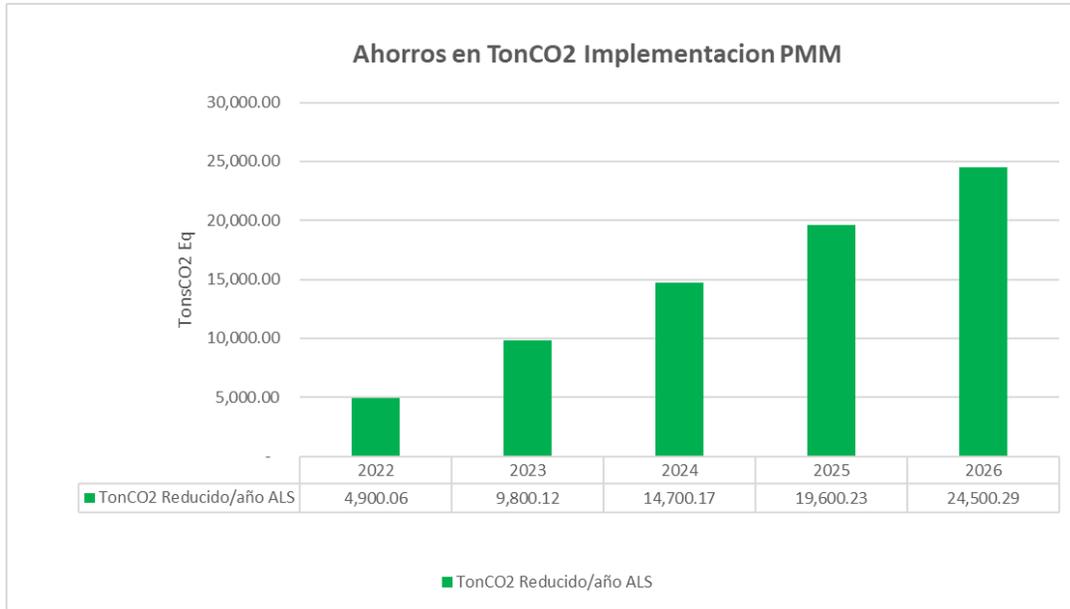
Factor de Conversión - Ton CO2eq/MWh			0.203
BES LCI	Ahorro en el consumo de Energía MWh	3,475.96	Reducción Tons CO2eq 706
BES NLL	Ahorro en el consumo de Energía MWh	12,673.13	Reducción Tons CO2eq 2,573
BCP LCI	Ahorro en el consumo de Energía MWh	2,365.20	Reducción Tons CO2eq 480
BM LCI	Ahorro en el consumo de Energía MWh	5,623.92	Reducción Tons CO2eq 1,142

**Tabla 5. Reducción de Ton CO2eq**

Con base en los resultados obtenidos de más de 4.900 Ton CO2/año y ante la implementación masiva de todos los sistemas, con el objetivo de reducir el impacto de la huella de carbono, se proyecta la reducción de Ton CO2 para los próximos cinco años (Figura 10-11):



**Figura 10. Reducción de Toneladas de CO2eq con la implementación masiva PMM por sistema de levantamiento.**



**Figura 11. Reducción de Toneladas de CO<sub>2</sub>eq con la implementación masiva PMM Acumulado.**

Teniendo en cuenta la proyección de la implementación a larga escala, la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> se considera favorable en la aplicación de PMM y se prueba como una alternativa a los métodos de levantamiento artificial energéticamente eficiente, además de ser una tecnología con un potencial del cambio en futuros proyectos enfocados en reducir la huella de carbono en los próximos años.

### Desafíos y Lecciones Aprendidas en la Implementación del PMM

Durante la prueba inicial e instalación de los motores de imanes permanentes, hubo desafíos en todos los niveles, lo que generó una curva de aprendizaje y procesos para garantizar su aplicación óptima y segura. Los principales desafíos se explican a continuación:

**Riegos Eléctrico.** La rotación del motor debido al movimiento del fluido a través de la bomba puede generar un voltaje y un flujo de corriente considerables. El nivel de voltaje depende de la velocidad de rotación y puede exceder el valor nominal de voltaje que figura en la placa de identificación del motor, lo que podría causar quemaduras, descargas eléctricas y electrocución, incluso cuando está desenergizado y aislado externamente. La generación de este riesgo requiere atención y capacitación específica para PMM sobre los peligros asociados con el manejo, instalación, solución de problemas y remoción, así como procesos, controles y dispositivos para garantizar la seguridad de todo el personal.

Los procedimientos de bloqueo/etiquetado, si se siguen correctamente, aseguran que el sistema esté desenergizado desde el lado de la línea. Estos deben incluir comprobaciones para confirmar que no hay alimentación en los terminales (caja de venteo o caja de conexiones) antes de comenzar cualquier trabajo. Entre los elementos clave de la mitigación del riesgo eléctrico, se encuentran:

**Barreras de Fondo y Superficie.** La primera línea de defensa con un sistema PMM es evitar el giro inverso o el giro libre del motor. Como con cualquier sistema eléctrico, siempre se debe suponer que el sistema está activo y con la máxima potencia. Todas las pruebas y verificaciones eléctricas deben realizarse con EPP, herramientas y equipos clasificados para el trabajo y solo deben ser utilizados por personal calificado. La seguridad requiere que todo el personal sea consciente de los riesgos y peligros asociados con un PMM e identifique métodos para mitigar dicho riesgo.

Otro tema por considerar es cuando se requieren trabajos de mantenimiento de la superficie. Debe haber un punto de desconexión de superficie visible para las aplicaciones de PMM en BES y ESPCP para que el trabajo se pueda realizar de manera segura al nivel de la caja de venteo, SUT, VSD, etc. Inicialmente para las aplicaciones de BES y ESPCP se comenzó con la instalación de reconectores montados en superficie, los cuales debido a su alto costo y mantenibilidad fueron dejados atrás y finalmente reemplazados por conectores eléctricos especiales tipo *Power Feed Thru* (PFT).

**Ajustes de los Procedimientos Operativos.** Partiendo de la premisa de que los motores de imanes permanentes son capaces de generar voltaje cuando se encuentran en movimiento, es importante realizar ajustes a los procedimientos operativos durante la corrida y sacada de estos equipos, al igual que en las labores de mantenimiento. Es importante que en los *Job Safety Analysis* se tengan en consideración estas diferencias en comparación con los motores a inducción. Otras consideraciones para tener en cuenta son:

- Puesta a tierra eléctrica y cortocircuito de equipos y cable BES.
- Lecturas de cable (P-P, P-G), alimentación directa, voltaje generado en el fondo del pozo, etc.
- Uso de EPP, manejo, empalme, penetradores, potencial de arco eléctrico.
- Herramientas y procedimientos de servicios de pozos.
- Control de pozo con un PMM.

**Entrenamiento del Personal.** Un programa de seguridad bien diseñado incluirá capacitación sobre trabajos y equipos específicos, equipo de protección personal (EPP), herramientas e instrumentos, control de pozos, el sistema de fondo de pozo BES, procedimientos de instalación, instalación y extracción de herramientas de fondo de pozo, barreras y señalización, y permisos de trabajo, entre otras consideraciones.

Todo el personal expuesto al riesgo de descarga eléctrica, quemadura o arco eléctrico debe recibir capacitación que le permita identificar y mitigar adecuadamente todos los riesgos que pueda encontrar al realizar una tarea asignada. En otras palabras, la capacitación más la competencia demostrada es igual a "Calificado para realizar la tarea de manera segura".

Para la instalación de motores PMM se debe contar con personal calificado, certificado y competente en áreas de riesgo eléctrico, principios, riesgos y mitigación de sistemas PMM, pruebas de evaluación de percepción del riesgo. Personas con baja percepción del riesgo no deben instalar sistemas PMM.

**Equipo de Protección Personal.** El equipo de protección está diseñado para proteger al personal de peligros específicos, por lo que es importante identificar peligros específicos y garantizar que se utilice el EPP correcto para los peligros que puedan surgir.

El uso de elementos EPP es la mejor manera de garantizar la seguridad del técnico de servicio. Se recomiendan los siguientes (Figura 12) para la instalación de motores PMM:

- Kit de rescate eléctrico.
- Guantes dieléctricos clase 2 (17 Kv).
- Tapete dieléctrico.
- Mascara para arco eléctrico Clase 2.
- Desfibrilador automático (DEA).
- Zapatos de seguridad con clasificación eléctrica.



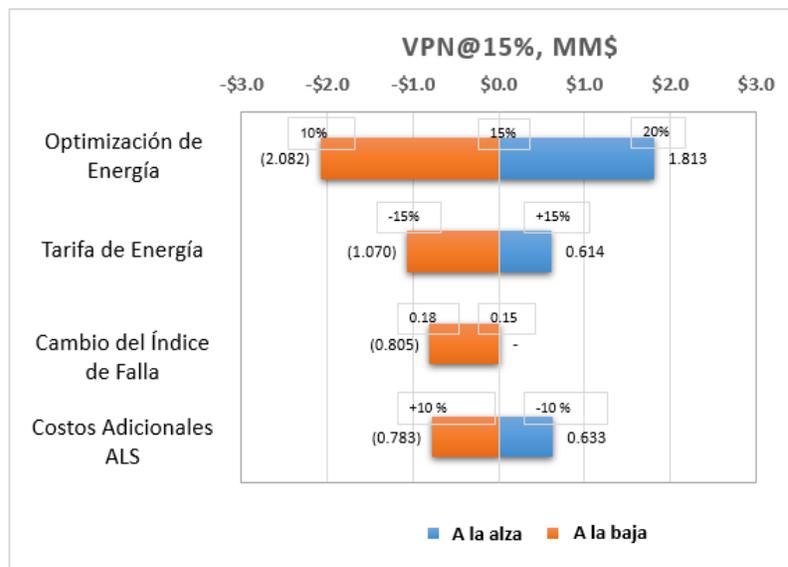
**Figure 12. PMM – Equipo de Protección Personal**

**Evaluación Financiera de Proyectos con PMM.** Dado que se trata de aplicaciones recientes, los costos de los motores de imanes permanentes suelen ser un 25% - 30% superiores a los de los motores de inducción según el estudio de mercado realizado por SierraCol Energy, por lo que se deben considerar las siguientes consideraciones para realizar el proyecto a gran escala. Implementación de este equipo en sistemas de levantamiento artificial económicamente factible:

- Costo diferencial del PMM vs Inducción.
- Costo adicional de las barreras de fondo y superficie (BES).
- Costos del actualización de los VSD para manejo de los PMM (Si se requiere).
- Ahorro de energía.
- Mejoras en el tiempo de vida y confiabilidad de los equipos.
- Reducción en costos de mantenimiento (BM / BCP).
- Beneficio en reducción de huella de carbono.

La tendencia actual del incremento de los costos de la energía a nivel mundial establece un gran reto en términos del uso de equipos más eficientes energéticamente, al mismo tiempo que reduzcan el requerimiento de horas hombre de mantenimiento y sean más amigables con el medio ambiente.

En nuestro caso, para la evaluación financiera de estos proyectos, se definió un escenario base y se realizaron diferentes sensibilidades para cada una de las aplicaciones del PMM en los diferentes sistemas de levantamiento artificial, para establecer cuál de las variables tenía mayor impacto en el Presente Neto Valor (VPN @ 15%) del proyecto. Esta evaluación se ilustra en los gráficos de tornados a continuación en la Figura 13.



**Figura 13. Evaluación Económica – Variables de alto impacto**

Otras alternativas como pagos diferidos, pagos por renta diaria y/o leasing, o si es necesario realizar cambios en los variadores de superficie, se deben considerar con el fin de apalancar mejor este tipo de tecnologías sobre todo en pozos existentes y reducir de esa manera los requerimientos de capital (CAPEX), especialmente en campos maduros.

## Conclusiones

La implementación de la tecnología de imanes permanentes en diferentes sistemas de levantamiento artificial (BES, BESCP, BCP y BM) ha sido exitosa en los campos operados por SierraCol Energy, mostrando ahorros de energía superiores al 15% y una optimización de los costos de levantamiento. Este ahorro energético valida la tecnología como una alternativa energéticamente eficiente y con potencial en futuros proyectos para reducir la huella de carbono.

El impacto de ahorro energético obtenido por cada uno de los sistemas se traduce en una reducción prevista de 24.500 Ton CO<sub>2</sub>eq. Esta reducción planificada de la huella de carbono se alinea con los objetivos sostenibles de SierraCol Energy.

Durante la evaluación e implementación de los PMM fue necesario identificar los posibles riesgos de HSE asociados a la generación de tensión del sistema, para lo cual se generó una matriz de riesgos y se establecieron puntos clave para mitigar su impacto mediante el establecimiento de barreras de fondo/superficie, procedimientos operativos durante la instalación, desmontaje y mantenimiento de los equipos y capacitación del personal.

Como es habitual con los proyectos de nuevas tecnologías, se debe considerar la evaluación financiera para una implementación a gran escala, especialmente para campos maduros donde el costo de levantamiento tiene un gran impacto en el OPEX.

## References

1. Xiao, J. J., Aramco, S., & Lastra, R. (2018). "Induction versus Permanent Magnet Motors for ESP Applications" SPE-192177-MS, SPE Saudi Arabia Annual Technical Symposium and Exhibition held in Dammam, Saudi Arabia, 23–26 April 2018. <http://onepetro.org/SPESATS/proceedings-pdf/18SATS/All-18SATS/SPE-192177-MS/1244680/spe-192177-ms.pdf/1>
2. Seczon, L., & Sagalovskiy, A. (2013). "Field Experience with the Application and Operation of Permanent Magnet Motors in the ESP Industry: Success Stories and Lessons Learned". SPE 165030, SPE Artificial Lift Conference-Americas held in Cartagena, Colombia, 21-22 May 2013. <http://onepetro.org/SPELAAL/proceedings-pdf/13LAAL/All-13LAAL/SPE-165030-MS/1586682/spe-165030-ms.pdf/1>
3. United Nations. (2020). The Paris Agreement. <https://www.un.org/en/climatechange/paris-agreement>
4. Unidad De Planeación Minero-Energética - UPME. (2020). "RESOLUCIÓN No. 000382 de 2021: Sistema Interconectado Nacional del año 2020 para inventarios de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y proyectos de mitigación (GEI)." pp 4.
5. Nicholson, B., Yicon, C., Harris, D., & Delaloye, R. (2021). "Permanent Magnet Motor Safety". SPE-204487-MS. SPE Gulf Coast Section Electric Submersible Pumps Symposium held in The Woodlands, Texas, USA, 4 - 8 October 2021. <http://onepetro.org/SPEESP/proceedings-pdf/21ESP/3-21ESP/D031S008R001/2493864/spe-204487-ms.pdf/1>