

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE ELECTROTÉCNIA



**Análisis e implementación de motor de imán permanente
para producción de petróleo con sistema de bombeo
mecánico**

Plan de Trabajo para el Proyecto Integrador Profesional presentado por:

LILLO MAURICIO CARLOS

Ante la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue para
acceder al título de:

INGENIERO ELECTRÓNICO

Dirección

Director: Cuello, Marcela Alicia

Codirector: Ferrandiz, Alfredo Raúl

Neuquén, Abril 2023

Dedicatorias y Agradecimientos

A los pilares de esta etapa; mis padres que con su esfuerzo y apoyo incondicional permitieron que pueda continuar y centrarme mis estudios.

A mi pareja y compañera de vida Yamila, con quien compartimos mismos sentimientos y momentos inolvidables durante toda la carrera.

A mis Abuelos que, aunque ya no están físicamente vieron mis inicios en la carrera, me apoyaron y se sintieron orgullosos de mi en todo momento. Mas que nunca esto también es por ustedes.

A mis compañeros que me incentivaron cuando más lo necesitaba para continuar.

A Marcela Cuello, quien acepto sin dudar en ayudarme para realizar este trabajo sin importar mi residencia fuera de la ciudad.

A Alfredo Ferrandiz, mentor en mi primera experiencia laboral en Pan American Energy. Una persona con todos los valores y a quien admiro mucho y que siempre tuvo un tiempo para mí y me permitió incluirme en este proyecto tan importante.

A todos los compañeros de trabajo que se permitieron ayudarme en responder todas las dudas como buenos profesionales que son

Resumen

Este trabajo se centra en uno de los métodos más antiguos de extracción de hidrocarburos, el Aparato Individual de Bombeo o AIB, el cual puede operar a más de 2500 metros de profundidad. Poseen un motor eléctrico asíncrono alimentado por energía de la red que luego es convertida a energía mecánica mediante un sistema de transmisión de potencia. Este estudio consiste en evaluar las ventajas y desventajas técnicas y operacionales de un motor de imán permanente (MIP) respecto a su competencia directa, el motor asíncrono.

En primer lugar, se presentará un resumen de las instalaciones y operaciones en el yacimiento de Golfo San Jorge. Se describirán los componentes y el funcionamiento de un aparato individual de bombeo.

En el segundo capítulo veremos el marco teórico de los motores asíncronos y síncronos para centrar el análisis en el motor síncrono de imán permanente. Con el avance de la tecnología de procesamiento digital y la electrónica de potencia se accedió al variador de frecuencia idóneo para este motor permitiendo tener un control preciso y confiable ya que impide que el motor salga de sincronismo. Este control es el denominado “control vectorial” y permite aprovechar la potencia suministrada eficientemente ya que varía la tensión y frecuencia de alimentación para obtener un factor de potencia unitario independientemente de la carga.

En el capítulo 3 se muestra el análisis de proyecto usando los datos aportados por el fabricante y proveedor del MIP e información de la empresa respecto a los motores asíncronos pudiendo definir la rentabilidad del proyecto ya sea para pozos nuevos o pozos existentes que requieran cambiar la tecnología del motor. Definido el análisis de proyecto se muestra el desarrollo de este empezando por el montaje hasta la toma de mediciones.

En el cuarto capítulo se presenta los resultados de las mediciones realizadas en ambos motores para un mismo pozo productor pudiendo lograr ver las diferencias de consumo de potencia, inyección de armónicos y factor de potencia de cada tecnología.

Por último se realiza la conclusión mostrando las principales ventajas del motor de imán permanente frente al motor asíncrono y sus puntos más débiles que deben ser tenidos en cuenta.

Palabras clave: Imán permanente – Bombeo mecánico – Eficiencia energética

Abstract

This paper focuses on one of the oldest methods of hydrocarbon extraction, the Individual Pumping Apparatus or IBA, which can operate at depths of more than 2500 metres. They have an asynchronous electric motor powered by mains energy which is then converted to mechanical energy through a power transmission system. This study consists of evaluating the technical and operational advantages and disadvantages of a permanent magnet motor (PMM) with respect to its direct competitor, the asynchronous motor.

First, an overview of the installations and operations at the Golfo San Jorge field will be presented. The components and operation of an individual pumping unit will be described.

In the second chapter we will look at the theoretical framework of asynchronous and synchronous motors in order to focus the analysis on the permanent magnet synchronous motor. With the advance of digital processing technology and power electronics, the ideal frequency inverter for this motor has become available, allowing us to have precise and reliable control, as it does not allow the motor to go out of synchronism. This control is called "vector control" and allows the power supplied to be used efficiently as it varies the power supply voltage and frequency to obtain a unitary power factor regardless of the load.

Chapter 3 shows the project analysis using the data provided by the manufacturer and supplier of the PMM and information from the company regarding asynchronous motors, defining the profitability of the project, whether for new wells or existing wells that require a change in motor technology. Once the project analysis has been defined, the development of the project is shown, starting with the assembly and ending with the measurements.

In the fourth chapter, the results of the measurements made on both motors for the same producing well are presented, showing the differences in power consumption, harmonic injection and power factor of each technology.

Finally, a conclusion is made showing the main advantages of the permanent magnet motor over the asynchronous motor and its weakest points that must be taken into account.

Keywords: Permanent magnet - Permanent magnet - Mechanical pumping - Energy efficiency

Índice general

Índice general.....	v
1 Introducción y Fundamentación	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Fundamentación	1
1.3 Objetivos e hipótesis.....	2
2 Marco Teórico.....	3
2.1 Sistema de extracción por bombeo mecánico.	3
1.1 APARATO INDIVIDUAL DE BOMBEO.....	4
2.2 Aparato Individual de bombeo	4
2.3 Dinamometría	8
2.3.1 Equipo dinamométrico	10
2.3.2 Dinamometría de superficie.....	13
2.4 Sistema eléctrico.....	17
2.4.1 Centrales generadoras de energía	17
2.5 Reserva rotante y alivios de carga	21
2.6 Motor asíncrono	25
2.6.1 Circuito equivalente de motor de inducción.....	28
2.6.2 Pérdidas.....	29
2.6.3 Par inducido.....	30
2.7 Motor sincrónico.....	33
2.8 Motor sincrónico de imán permanente.....	38
2.8.1 Circuito equivalente motor sincrónico de imán permanente	41
2.8.2 Torque motor imán permanente	43
2.9 Carga de un pozo productor	46
2.9.1 Torque en la caja reductora	46
2.10 Variador de frecuencia	49
2.10.11° Etapa: Potencia	50
2.10.22° Etapa: Control	56
3 Metodología y Desarrollo.....	62
3.1 Evaluación de proyecto.....	62
3.1.1 Análisis de costo de ciclo de vida de motor de imán permanente	62
3.1.2 Condiciones de borde para el análisis de costo de vida.....	62
3.1.3 Analisis de alternativas para pozo nuevo	67
3.1.4 Análisis de sensibilidad según producción para pozos nuevos:.....	73

3.1.5	Análisis de sensibilidad según producción para instalación en pozo existente	75
3.2	Desarrollo.....	77
3.2.1	Instalación y montaje	79
3.2.2	Mediciones eléctricas.....	81
4	Resultados	83
4.1	Potencia consumida.....	83
4.2	Factor de Potencia	85
4.3	Inyección de armónicos	87
4.4	Reducción de huella de carbono	90
5	Conclusiones.....	92
5.1	Conclusiones	92
5.2	Recomendaciones o Trabajos futuros	93
6	Bibliografía.....	100

Lista de figuras y símbolos

Figura 2-1: Partes principales de un AIB- Pan American Energy. Manual de Operaciones Upstream (2020).....	4
Figura 2-2: Transmisión de movimiento en un AIB- Pan American Energy. Manual de Operaciones Upstream (2020).....	5
Figura 2-3: Esquema completo del sistema de extracción por bombeo mecánico con AIB- Pan American Energy. Manual de Operaciones Upstream (2020)	6
Figura 2-4: Rotor NEMA clase D- Stephen j. Chapman – Maquinas Eléctricas (2000).....	7
Figura 2-5: Curvas características para distintos diseños de rotores- Stephen j. Chapman – Maquinas Eléctricas (2000).....	8
Figura 2-6: Esquema medición dinamométrica en el equipo de bombeo mecánico- Pan American Energy. Manual de Operaciones Upstream (2020)	11
Figura 2-7: Representación gráfica del significado de dinamómetro de fondo- Pan American Energy. Manual de Operaciones Upstream (2020)	13
Figura 2-8: carta dinamométrica ideal de un pozo productor con AIB- Pan American Energy. Manual de Operaciones Upstream (2020).....	14
Figura 2-9: Carta real de superficie en un pozo productor- Pan American Energy. Manual de Operaciones Upstream (2020).....	15
Figura 2-10: Principio de funcionamiento de una bomba mecánica y sus partes- Pan American Energy. Manual de Operaciones Upstream (2020)	16
Figura 2-11: Carta dinamométrica real de pozo con motor de imán permanente	17
Figura 2-12: Central turbogeneradora Cerro Dragón 2- Gerencia Energía GSJ – Sistema eléctrico Cerro Dragon 2022	19
Figura 2-13: Vista aérea central turbogeneradora Cerro Dragón 2- Pan American Energy. Manual de Operaciones Upstream (2020).....	20

Figura 2-14: Vista aérea de aerocondensador que completa el ciclo combinado Cerro Dragón	
2- Pan American Energy. Manual de Operaciones Upstream (2020)	20
Figura 2-15: Curva demanda media del yacimiento- Gerencia Energía GSJ – Sistema eléctrico Cerro Dragón 2022	22
Figura 2-16: Curva de potencia disponible y demandada- Gerencia Energía GSJ – Sistema eléctrico Cerro Dragon 2022	23
Figura 2-17: Distribución de consumo en distintas áreas- Gerencia Energía GSJ – Sistema eléctrico Cerro Dragón 2022	24
Figura 2-18: Deslizamiento vs Corriente de estator- Stephen j. Chapman – Maquinas Eléctricas (2000)	28
Figura 2-19: Circuito equivalente motor de inducción- Stephen j. Chapman – Maquinas Eléctricas (2000)	29
Figura 2-20: Resumen de pérdidas de potencia en un motor- Stephen j. Chapman – Maquinas Eléctricas (2000)	30
Figura 2-21: a) Campos magnéticos en un motor de inducción con carga baja. b) Campos magnéticos en un motor de inducción con carga alta - Stephen j. Chapman – Maquinas Eléctricas (2000)	32
Figura 2-22: Curva Par-Velocidad Motor asíncrono de inducción- Stephen j. Chapman – Maquinas Eléctricas (2000).....	33
Figura 2-23: Curva par-velocidad de motor sincrónico- Stephen j. Chapman – Maquinas Eléctricas (2000)	35
Figura 2-24: Motor sincrónico de dos polos- Stephen j. Chapman – Maquinas Eléctricas (2000)	35
Figura 2-25: Circuito equivalente motor sincrónico- Hughes A., Drury B. Electric Motors and Drives. Fundamentals, Types and Applications (2019)	36

Figura 2-26: Motor sincrónico con distintas cargas. A) Motor subexcitado B) Motor con factor de potencia unitario C) Motor Sobreexcitado - Hughes A., Drury B. Electric Motors and Drives. Fundamentals, Types and Applications (2019)	37
Figura 2-27: Triangulo de flujos- Hughes A., Drury B. Electric Motors and Drives. Fundamentals, Types and Applications (2019).....	38
Figura 2-28: Rotor de motor con imán permanente- Hughes A., Drury B. Electric Motors and Drives. Fundamentals, Types and Applications (2019)	39
Figura 2-29: Ciclo de histéresis de un material ferromagnético- Stephen j. Chapman – Maquinas Eléctricas (2000).....	40
Figura 2-30: Segundo cuadrante de la curva de magnetización de distintos materiales- Stephen j. Chapman – Maquinas Eléctricas (2000)	41
Figura 2-31: Diagrama fasorial de motor imán permanente a doble velocidad nominal y mitad de torque nominal- Hughes A., Drury B. Electric Motors and Drives. Fundamentals, Types and Applications (2019)	45
Figura 2-32: Caja reductora que transmite el giro del rotor del motor eléctrico a torque mecánico- Pan American Energy. Manual de Operaciones Upstream (2020).....	46
Figura 2-33: Representación de las curvas de torque y su origen- Pan American Energy. Manual de Operaciones Upstream (2020).....	48
Figura 2-34: Representación de las curvas de torque en la caja reductora- Pan American Energy. Manual de Operaciones Upstream (2020)	48
Figura 2-35: Esquema variador de frecuencia- Hughes A., Drury B. Electric Motors and Drives. Fundamentals, Types and Applications (2019)	49
Figura 2-36: Fotografía de tablero de pozo con motor de imán permanente, a la izquierda (caja blanca) controlador Pump Off del AIB; a la derecha (con bordes verdes) variador de frecuencia del motor.....	50

Figura 2-37: Rectificador-Inversor utilizando diodos SCR- Hughes A., Drury B. Electric Motors and Drives. Fundamentals, Types and Applications (2019).....	51
Figura 2-38: Señal de salida de SCR para distintos ángulos de disparo- Hughes A., Drury B. Electric Motors and Drives. Fundamentals, Types and Applications (2019)	52
Figura 2-39: Variador de frecuencia de motor con Resistencia de Frenado- Hughes A., Drury B. Electric Motors and Drives. Fundamentals, Types and Applications (2019).....	53
Figura 2-40: Fotografía de tablero de control con resistencia de frenado en pozo con motor de imán permanente.	54
Figura 2-41: Variador de frecuencia con freno regenerativo- Hughes A., Drury B. Electric Motors and Drives. Fundamentals, Types and Applications (2019).....	55
Figura 2-42: Diagrama fasorial de motor sincrónico con imán permanente- Hughes A., Drury B. Electric Motors and Drives. Fundamentals, Types and Applications (2019).....	57
Figura 2-43: Circuito de potencia inversor de tres fases- Hughes A., Drury B. Electric Motors and Drives. Fundamentals, Types and Applications (2019)	59
Figura 2-44: Simbología para equipos de conmutación- Hughes A., Drury B. Electric Motors and Drives. Fundamentals, Types and Applications (2019)	60
Figura 2-45: Esquema de control vectorial para motor sincrónico de imán permanente. - Hughes A., Drury B. Electric Motors and Drives. Fundamentals, Types and Applications (2019)	60
Figura 3-1: Ahorro con respecto a motor convencional	72
Figura 3-2: Ahorro acumulado de motor imán permanente contra motor de inducción	72
Figura 3-3: Tiempos de recuperación de inversión de MIP según producción de petróleo	74
Figura 3-4: VAN según producción de petróleo para pozo nuevo	75
Figura 3-5: Tiempo de repago de inversión según producción	76
Figura 3-6: VAN según producción de petróleo para recambio de tecnología	77

Figura 3-7: Motor de imán permanente- CIPOR S.R.L (2020).....	79
Figura 3-8: Soporte para motor de imán permanente- CIPOR S.R.L (2020).....	79
Figura 3-9: Montaje de motor de imán permanente- CIPOR S.R.L (2020).....	80
Figura 3-10: Motor de imán permanente ya montado sobre AIB en pozo productor	81
Figura 3-11: Colocación de equipo Fluke en variador de frecuencia.....	82
Figura 4-1: Potencia activa consumida en motor convencional	84
Figura 4-2: Potencia activa consumida en motor de imán permanente.....	85
Figura 4-3: Cos phi motor de inducción.....	86
Figura 4-4: Cos phi motor de imán permanente	86
Figura 4-5: Armónicos de tensión de motor convencional.....	88
Figura 4-6: Armónicos de tensión en motor de imán permanente	88
Figura 5-1: Esquema de instalación BES- Pan American Energy. Manual de Operaciones Upstream (2020).....	94
Figura 5-2: Esquema de motor de imán permanente en BES- Pan American Energy. Manual de Operaciones Upstream (2020).....	95
Figura 5-3: Partes de una bomba de cavidades progresivas- Pan American Energy. Manual de Operaciones Upstream (2020).....	96
Figura 5-4: Instalación de fondo y superficie de un sistema PCP- Pan American Energy. Manual de Operaciones Upstream (2020).....	97
Figura 5-5: Motor imán permanente en PCP-Schlumberger (2020)- recuperado de https://www.slb.com/	97
Figura 5-6: Eficiencia energética de sistemas de levantamiento artificial - Pan American Energy. Manual de Operaciones Upstream (2020)	98

Lista de tablas

Tabla 2-1: Resumen del parque de generación instalado yacimiento Golfo San Jorge- Gerencia Energía GSJ – Sistema eléctrico Cerro Dragon 2022.....	21
Tabla 2-2: Plan de alivio de carga- Gerencia Energía GSJ – Sistema eléctrico Cerro Dragon 2022.....	24
Tabla 3-1: Mediciones de consumo de potencia de distintos AIB- Gerencia Energía GSJ – Sistema eléctrico Cerro Dragon 2022	63
Tabla 3-2: Costos iniciales distintas tecnologías.....	64
Tabla 3-3: Flujo de caja para pozo nuevo.....	68
Tabla 3-4: Flujo de caja para pozo existente	70
Tabla 3-5: características motor imán permanente de prueba- CIPOR S.R.L (2020).....	78

1 Introducción y Fundamentación

1.1 Introducción

En un mundo donde la demanda de energía se encuentra en crecimiento y donde cada vez es más importante mejorar la calidad de esta, ya sea aumentando la productividad de extracción/generación como también su utilización, resulta necesario la innovación de nuevas tecnologías y la optimización de procesos entre otras cosas para aprovechar mejor la misma.

Actualmente en el Golfo de San Jorge se encuentran en marcha más de 2700 pozos productores de petróleo cuyo sistema de extracción utilizado es el mecánico, donde se utiliza el mecanismo de movimiento alternativo del aparato individual de bombeo o AIB para la extracción del fluido subterráneo. Cada uno de estos aparatos adquieren su energía mecánica mediante un sistema de transmisión de potencia impulsado por un motor eléctrico asíncrono que varía entre 75 a 125 HP de potencia, el cual se encuentra conectado a la red eléctrica trifásica propia de Pan American Energy.

1.2 Fundamentación

Los avances de la electrónica de potencia y el procesamiento de señales permitieron el uso de variadores de frecuencia en una alternativa tecnológica de motor que también permite cubrir las potencias requeridas y con un menor costo energético y operacional. Los MIP permiten cumplir con esta demanda, pero es escasa la experiencia de aplicación en sistemas de bombeo mecánicos por lo que se debe pasar por una curva de aprendizaje hasta lograr igualar el régimen de operación en producción que se tiene con la tecnología anterior.

El motor de imán permanente como indica su nombre posee un rotor ya imantado que permite ahorrar espacio y dinero en bobinados y circuitos de excitación permitiendo reducir las pérdidas magnéticas y por calor. A diferencia de los motores asíncronos, no se necesita un

equipo de transmisión de potencia ya que el MIP se conecta directamente sobre el eje de la caja reductora que convierte la relación velocidad / torque para el funcionamiento del AIB.

Una de las principales características de los motores síncronos es que funcionan también como generadores cuando el torque cambia de signo, lo cual supondrá un problema para el variador de frecuencia. Esto se puede salvar conectando una resistencia de frenado que disipe en forma de calor la energía generada por el motor. Mas eficiente aun resultaría si se pueden colocar variadores con módulos IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) de regeneración de energía, que permitan devolver a la red esa energía generada por el motor sincrónico.

Se generan en primera instancia interrogantes sobre como responderá el MIP ante las frecuentes variaciones de carga que posee un pozo productor o si será rentable el recambio de los motores.

1.3 Objetivos e hipótesis

El objetivo fundamental del proyecto es el de proponer el uso de los motores de imán permanente como principal alternativa en el accionamiento de bombes mecánicos para la extracción de hidrocarburos. En base a este objetivo principal, se formulan los siguientes objetivos parciales:

- Definir la rentabilidad del proyecto
- Definir protocolo de ensayo inicial de proyecto
- Medir consumo energético del motor asíncrono y del motor de imán permanente.
- Definir ventajas y desventajas del motor de imán permanente vs motor asíncrono convencional

2 Marco Teórico

2.1 Sistema de extracción por bombeo mecánico.

El bombeo mecánico es el sistema más antiguo de extracción. Su sencillez, flexibilidad y duración hacen que aun hoy sea el sistema de levantamiento artificial más usado en el mundo. Alrededor del 80% de los pozos petroleros producidos con levantamiento artificial del mundo utilizan el sistema de bombeo mecánico. En la cuenca del Golfo San Jorge el sistema es utilizado en pozos desde 250 hasta más de 3000 metros de profundidad con producciones de menos de 10 hasta 200 m³/día en casos excepcionales. El Sistema es utilizado con mayor frecuencia en la producción de caudales intermedios, pudiendo usarse para producir fluidos viscosos, con gas libre y con presencia de sólidos. La sarta de varillas, que une la bomba de profundidad con la cabeza del AIB, puede ser una limitación importante para la profundidad y/o los altos caudales, como también en el caso de pozos desviados y horizontales.

Específicamente en el yacimiento del Golfo San Jorge de PAE el 70% de los pozos petroleros utilizan el sistema de bombeo mecánico. Según sea la zona considerada, el sistema opera con bombas instaladas a profundidades desde 650 hasta 3200 metros.

El sistema de bombeo mecánico está constituido básicamente por los siguientes componentes:

- Aparato individual de bombeo (AIB)
- Vástago de bombeo (polished rod)
- Varillas de bombeo (sucker rods)
- Bomba
- Cañería de bombeo (tubing)

1.1 APARATO INDIVIDUAL DE BOMBEO

2.2 Aparato Individual de bombeo

Los aparatos de bombeo tradicionales mostrados en la figura 2-1 están conformados por una estructura metálica robusta, una fuente motriz que imprime un movimiento circular (motor eléctrico), un sistema de poleas y correas que transmite ese movimiento a una caja reductora que a su vez transfiere (a menor velocidad) el movimiento circular a un sistema de biela-manivela.

Estos últimos dos componentes transforman el movimiento circular en un movimiento alternativo que es transmitido a la viga balancín, luego a la cabeza de mula y finalmente al vástago de bombeo. Solidario al vástago se desplaza la sarta de varillas dentro del pozo, y esta a su vez transmite el movimiento alternativo al pistón de la bomba que se desplaza dentro del barril. Estos elementos principales se muestran en la siguiente figura.

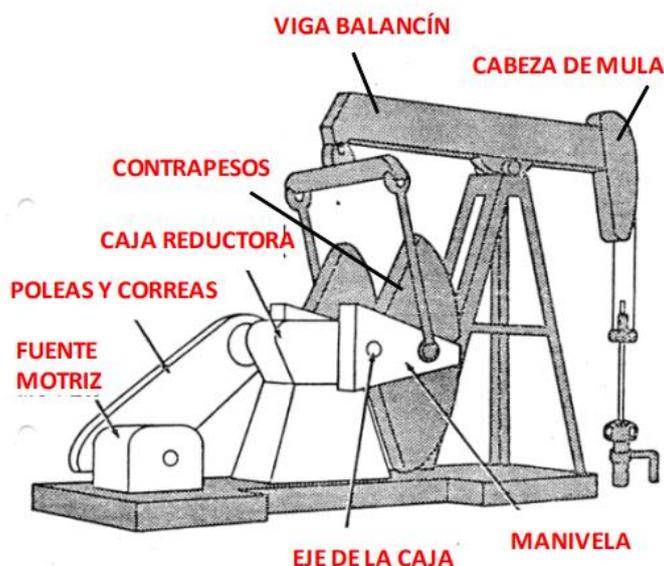


Figura 2-1: Partes principales de un AIB- Pan American Energy. Manual de Operaciones Upstream (2020)

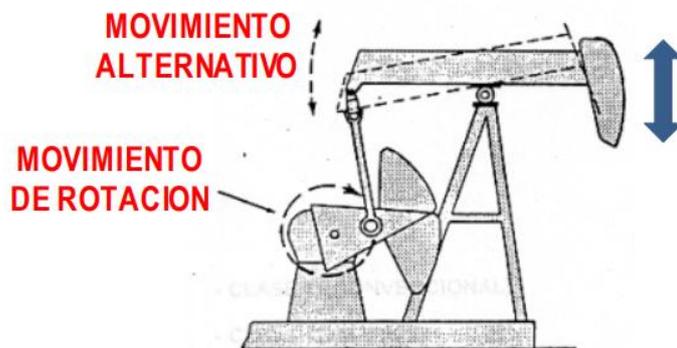


Figura 2-2: Transmisión de movimiento en un AIB- Pan American Energy. Manual de Operaciones Upstream (2020)

Siendo que la carrera productiva de la bomba se produce durante el desplazamiento ascendente, los AIB tienen incorporados un sistema acumulador de energía potencial, que en la mayoría de los casos los constituyen los contrapesos.

Durante la carrera descendente el conjunto formado por vástago-sarta-pistón cuelga de la cabeza de mula y baja por gravedad desde el punto muerto superior al punto muerto inferior. Bajo estas condiciones la fuente motriz del AIB se encuentra ociosa, con lo que se la utiliza para levantar los contrapesos mientras la herramienta se encuentra en la carrera descendente.

Al iniciarse la carrera ascendente, los contrapesos descienden, ayudando a la fuente motriz a levantar la sarta de varillas y al fluido producido.

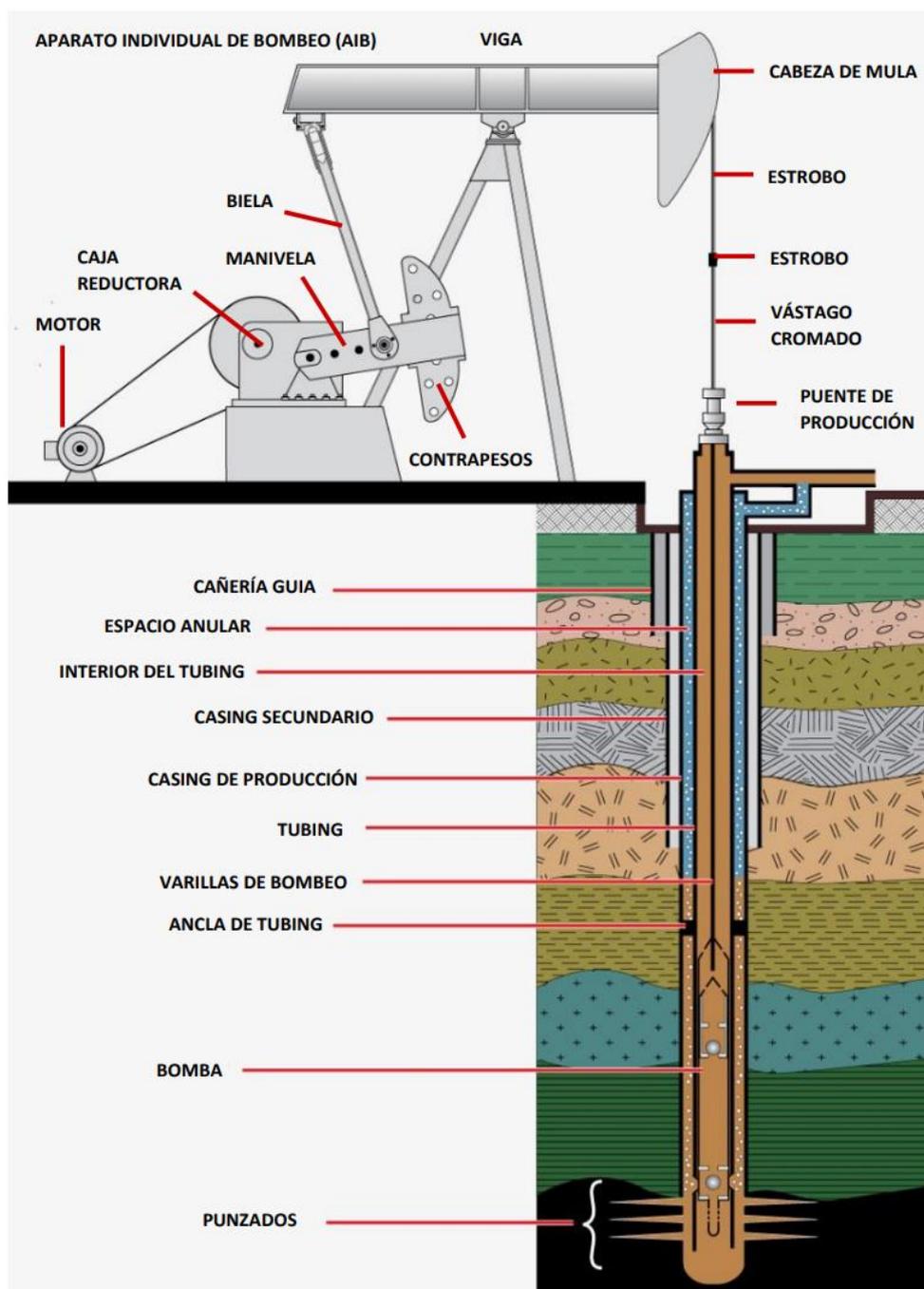


Figura 2-3: Esquema completo del sistema de extracción por bombeo mecánico con AIB- Pan American Energy. Manual de Operaciones Upstream (2020)

Algunos equipos de bombeo en vez de tener contrapesos tienen un cilindro que acumula energía potencial en forma de presión. Durante la carrera descendente se comprime el aire (o gas inerte según sea el caso) y esa presión ayuda luego a la fuente motriz a levantar la sarta de varillas y al fluido producido durante la carrera ascendente. Un correcto contrabalanceo (ya sea

con los contrapesos o con el cilindro acumulador) de las cargas redundará en la eficiencia del sistema y en la vida útil del mismo.

La fuente motriz de los AIB tradicionales puede ser un motor a explosión o un motor eléctrico. Ante la ausencia de una red de energía eléctrica se suelen utilizar motores a explosión. Estos pueden ser multicilindros de alta velocidad (600 a 1400 rpm) o monocilindros de baja velocidad (200 a 600 rpm), alimentados por gas, nafta o gasoil. La principal ventaja de los motores a explosión es la variación sencilla de la velocidad de bombeo, y la desventaja es su frecuente mantenimiento.

Teniendo la disponibilidad de energía eléctrica, se utilizan motores eléctricos trifásicos con estándar NEMA D con rotor en corto circuito que se muestra en la Figura 2-4, con un resbalamiento típico de 5 a 13% en plena carga.

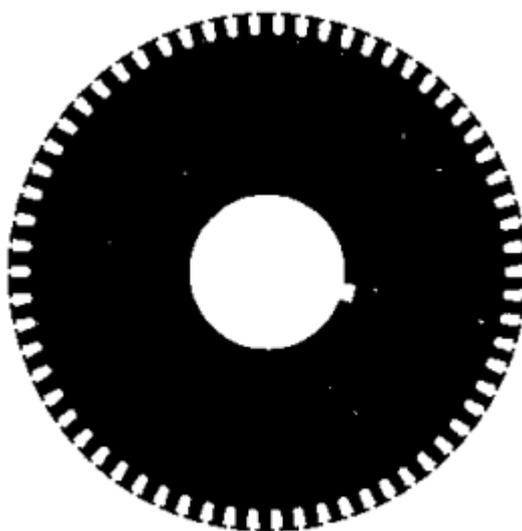


Figura 2-4: Rotor NEMA clase D- Stephen j. Chapman – Maquinas Eléctricas (2000)

Estos tipos de rotores tienen resistencia de rotor relativamente alta debido a que las barras del rotor son pequeñas, por lo que la reactancia de dispersión del rotor es aún más pequeña. Tener una resistencia de rotor grande implica que el par máximo del motor ocurre a un alto

deslizamiento y su par de arranque es bastante alto. En la Figura 2-5 se muestra los torques referidos a los distintos tipos de rotores.

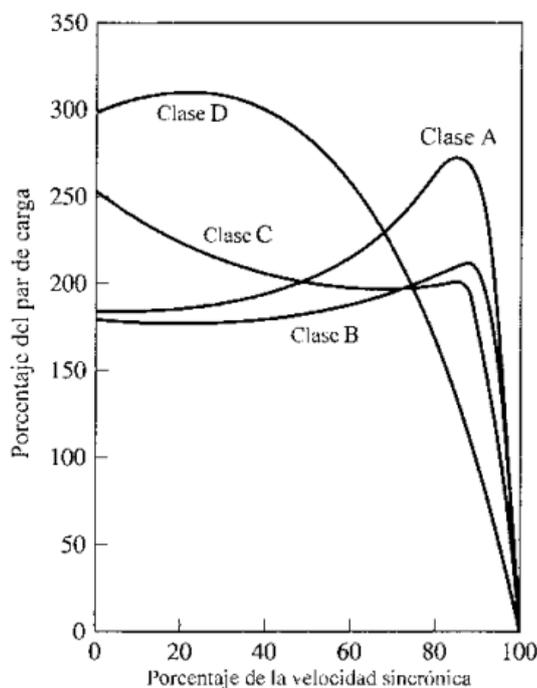


Figura 2-5: Curvas características para distintos diseños de rotores- Stephen j. Chapman – Maquinas Eléctricas (2000)

2.3 Dinamometría

Optimizar el funcionamiento de un sistema de extracción por bombeo mecánico, es lograr un funcionamiento que asegure extraer del pozo la máxima cantidad de fluido que los reservorios pueden aportar, con el mínimo consumo energético y costo operativo; mantener el régimen de operación equilibrado, ni sobredimensionado ni subdimensionado; tener en cuenta las dificultades de la extracción como presencia de gas, de arena, de parafinas, agresividad del fluido, etc. El sistema debe consumir el mínimo de energía eléctrica o calórica, compatible con la máxima extracción. Y a su vez, esta máxima extracción debe ser compatible con el potencial productivo de los reservorios.

Por lo tanto, para conocer el rendimiento de un sistema de extracción artificial por bombeo mecánico alternativo, no es suficiente con conocer la cantidad de fluido que produce un pozo. Es necesario relacionar el caudal con la cantidad de intervenciones a los pozos por correctivos o por mantenimiento, con el consumo de energía, con la atención y servicios que requiere, con los recursos materiales y humanos volcados a su mantenimiento y control.

Asimismo, como la producción de fluidos no es constante en el largo plazo, el régimen deberá siempre ser revisado periódicamente y corregido para mantenerlo en un valor óptimo respecto al rendimiento volumétrico. Es necesario contar con una base de datos y estadísticas que tendrán que contar con la siguiente información:

- 1- Realización e interpretación de mediciones físicas (nivel y dinamómetro)
- 2- Obtención de los parámetros de operación del sistema bajo estudio.

Los parámetros más representativos del funcionamiento del sistema son:

- Cargas máximas y mínimas sobre el vástago y varillas
- Estiramientos de las varillas y tubing y recorridos efectos del pistón de la bomba
- Nivel dinámico y presión de admisión a la bomba de profundidad.
- Llenado de la bomba de profundidad.
- Existencias de pérdidas a través de las válvulas fijas y móvil de la bomba
- Caudal efectivamente desplazado por la bomba de profundidad.
- Esfuerzos de las varillas y en vástago de bombeo
- Balanceo del equipo de bombeo
- Valor del torque aplicado al reductor del AIB.
- Potencia consumida para el trabajo.

La base de estos estudios tendientes a realizar un diagnóstico es la obtención en campo de mediciones dinamométricas y registros de niveles, lo que se conoce bajo el nombre de mediciones físicas.

En el caso de pozos equipados con bombeo mecánico como sistema de extracción, se entiende por "Mediciones Físicas" al registro de dinamómetros de superficie y de fondo.

2.3.1 Equipo dinamométrico

El dinamómetro tal como lo expresa su nombre, es un equipo medidor de fuerzas (o del peso de determinado elemento) y se lo utiliza en el sistema de bombeo mecánico para registrar la carga aplicada en el vástago de bombeo y a la columna de barras a lo largo del recorrido de esta.

La carga instantánea aplicada al vástago será registrada en una carta o gráfico en forma continua en diferentes posiciones a lo largo de todo el desarrollo del ciclo de bombeo, dibujando una curva dinamométrica de la carga en función del recorrido. Las lecturas mencionadas, tomadas todas en superficie, permiten deducir el comportamiento físico de todos los restantes elementos que integran el sistema.

Con el avance de la tecnología se puede tomar la información del sistema de bombeo y mediante una conexión de radioenlace verla directamente desde el sistema de control y adquisición de datos (SCADA) de forma remota.

El sistema de medición básicamente consiste en un transmisor de información (bomba de profundidad), una línea de transmisión (varillas de bombeo) y un receptor (el dinamómetro).

Las varillas transmiten continuamente información desde la bomba de profundidad a la superficie, pero esta información recibida en el vástago está codificada y es necesario decodificarla.

El registro de fuerzas y desplazamientos vs tiempo se obtiene actualmente por medio de un sensor de cargas instalado entre la grampa o anillos espaciadores y la cruceta, y un registro de

carrera que se desplaza solidario a la cruceta como indica la Figura 2-6. La información de los sensores es recibida por una computadora que realiza el dinamómetro de superficie y lo archiva de forma digital.

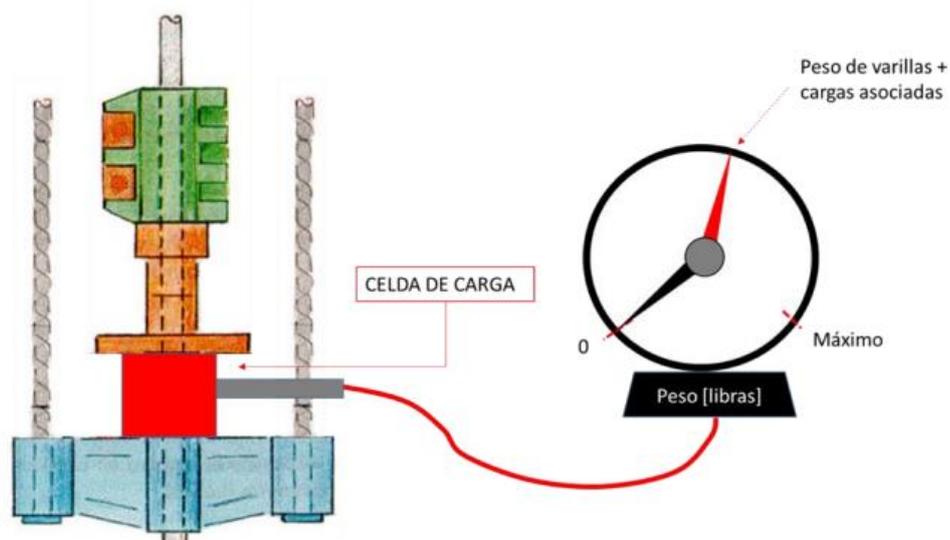


Figura 2-6: Esquema medición dinamoétrica en el equipo de bombeo mecánico- Pan American Energy. Manual de Operaciones Upstream (2020)

Es posible obtener un análisis cuantitativo en cualquier profundidad de la sarta de barras de bombeo, teniendo en cuenta las cargas estáticas y dinámicas. Las varillas transmiten información en forma permanente desde la bomba de profundidad a la superficie, de modo que, interpretando esta información, se deduce que sucede en el fondo del pozo con la bomba.

Este análisis cuantitativo corresponde a resolver la ecuación de onda elástica, el cual es una ecuación diferencial de segundo orden que representa el comportamiento de la sarta de varillas de bombeo durante el movimiento alternativo.

Siendo la variable X el desplazamiento en unidad de metros y la variable T el tiempo en segundos. La ecuación diferencial resulta:

$$\frac{\delta^2 \varphi}{\delta t^2} = c^2 \frac{\delta^2 \varphi}{\delta x^2}$$

Ecuación 2-1

Donde c es la velocidad de propagación de las ondas longitudinales en la varilla

$$c = \sqrt{\frac{Y}{\rho}}$$

Ecuación 2-2

Donde Y es el módulo de la elasticidad del material y ρ es la densidad.

Los instrumentos interpretan la información en base a las señales medidas en el vástago (Fuerza vs Tiempo y Desplazamiento vs Tiempo), calculan los valores de los esfuerzos en cualquier punto de la columna de barras y obtienen gráficos representativos del funcionamiento de la bomba de profundidad en el fondo del pozo, además de los gráficos tradicionales de superficie.

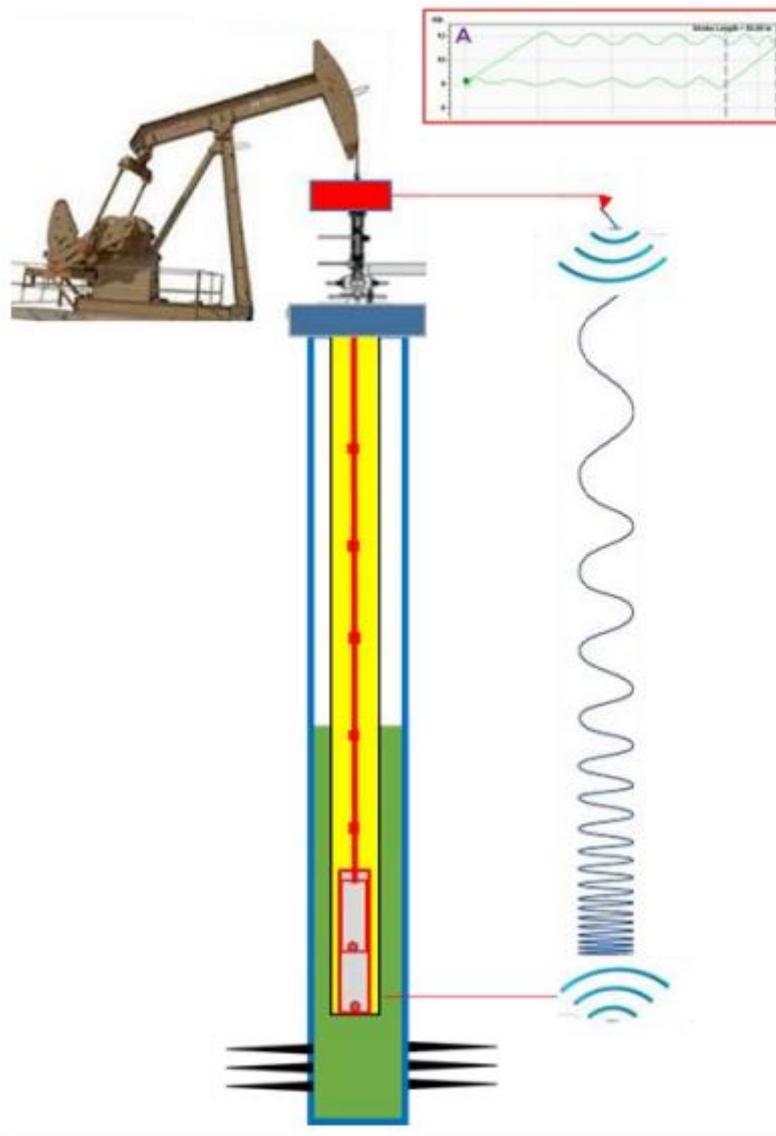


Figura 2-7: Representación gráfica del significado de dinamómetro de fondo- Pan American Energy. Manual de Operaciones Upstream (2020)

2.3.2 Dinamometría de superficie

Asumiendo una sarta de varillas de bombeo rígidas, una velocidad de bombeo lo suficientemente baja para eliminar las fuerzas dinámicas, líquido incompresible bombeado e ignorando todas las pérdidas de energía a través de la sarta se obtiene una carta dinamométrica

ideal, la cual representa la variación de cargas en el vástago vs la posición. Esta es la variación de cargas a la que el motor eléctrico se verá sometido.

La carta ideal está representada por el rectangular A-B-C-D mostrado en la Figura 2-8

- En el punto A comienza la carrera ascendente y la válvula viajera se cierra inmediatamente. La carga en el vástago, igual al peso de la sarta de varillas en flotación en el punto A, se incrementa instantáneamente al valor carga indicada por el punto B.
- El pistón y vástago se mueven juntos hasta que el punto C es alcanzado, mientras se mantiene una carga constante.
- El punto C indica el final de la carrera ascendente, comenzando la carrera descendente con la apertura de la válvula viajera. Instantáneamente las cargas de las varillas caen hasta el punto D, debido a que la carga de fluido no está más soportada por la válvula viajera.
- La sarta de varillas con la válvula viajera abierta en su extremo más bajo cae en el fluido del pozo desde el punto D al A, mientras las cargas en el vástago igualan el peso de la sarta de varillas de bombeo en flotación.
- En el punto A comienza un nuevo ciclo.

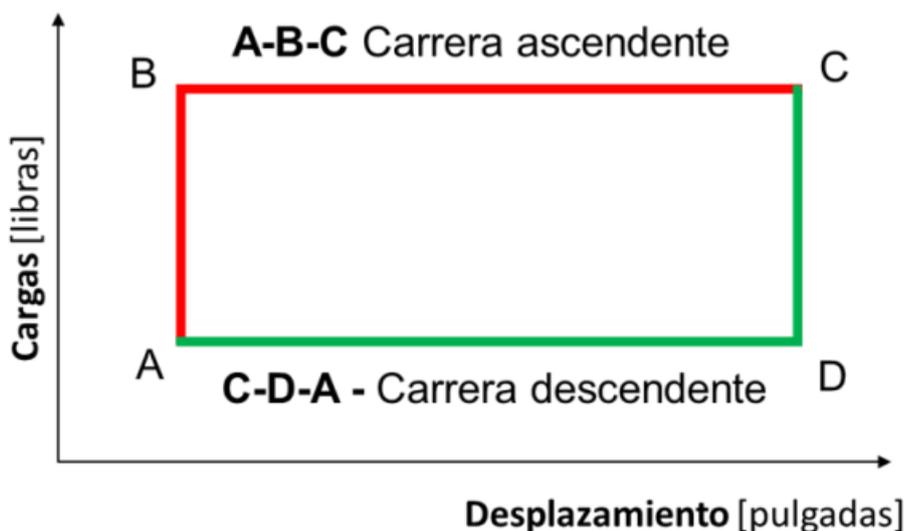


Figura 2-8: carta dinamoétrica ideal de un pozo productor con AIB- Pan American Energy. Manual de Operaciones Upstream (2020)

Considerando el estiramiento de las varillas, un llenado de bomba distinto del 100%, tiempos de demora para las transferencias de cargas y la presencia de fuerzas dinámicas debido a la velocidad de bombeo que genera aceleraciones de las masas de varillas y fluido, se producen gráficos con ciertas deformaciones como muestra la Figura 2-9.

Son varios los factores que conforman la carga del pozo, y por ende la del motor eléctrico. Se encuentran cargas del tipo estático, (que actúan o inciden aun con el equipo detenido) y cargas dinámicas, que aparecen por efecto del movimiento, es decir actúan solamente cuando el equipo está en movimiento.

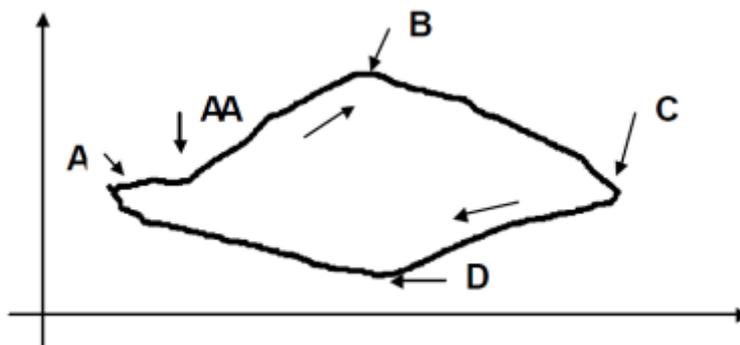


Figura 2-9: Carta real de superficie en un pozo productor- Pan American Energy. Manual de Operaciones Upstream (2020)

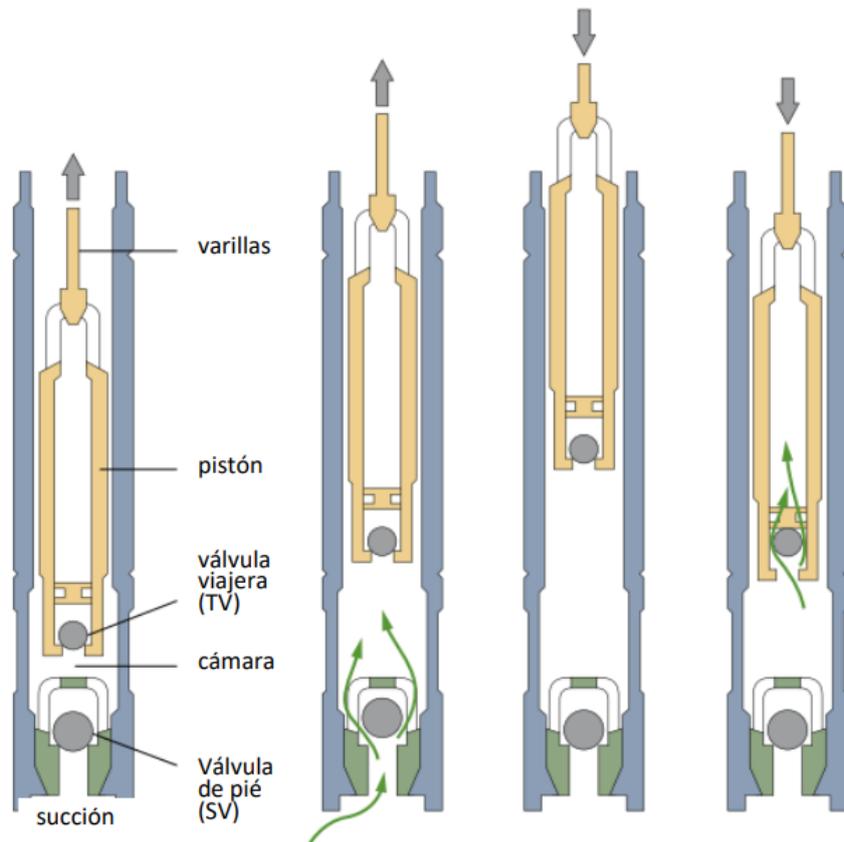


Figura 2-10: Principio de funcionamiento de una bomba mecánica y sus partes- Pan American Energy. Manual de Operaciones Upstream (2020)

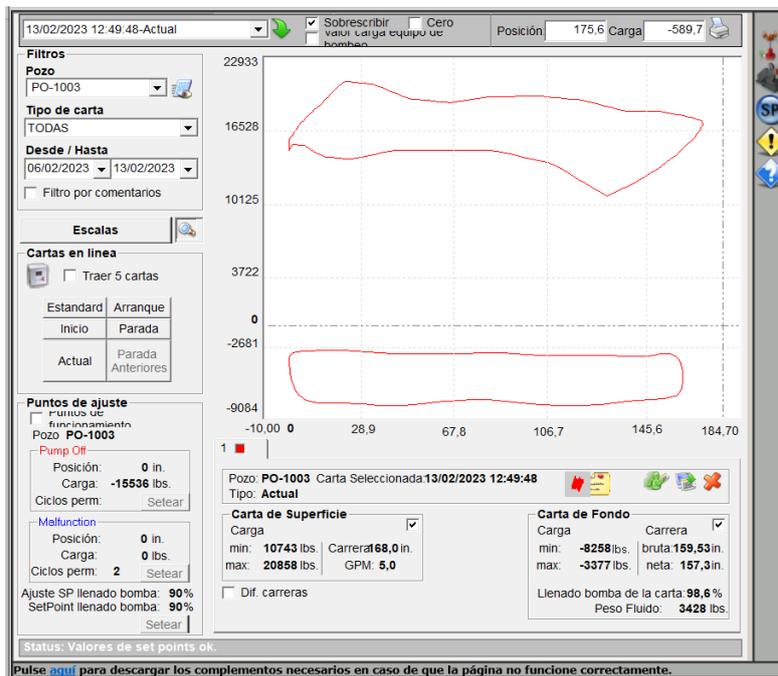


Figura 2-11: Carta dinámométrica real de pozo con motor de imán permanente

2.4 Sistema eléctrico

Pan American Energy cuenta con su Sistema Eléctrico en el Yacimiento de Cerro Dragón cuya función es satisfacer las necesidades de energía eléctrica del proceso de producción de gas y petróleo. Este Sistema Eléctrico funciona aislado del Sistema Argentino De Interconexión (SADI) y está conformado por dos Centrales de Generación de energía eléctrica y su red de transmisión / distribución que abarca toda la superficie del yacimiento.

2.4.1 Centrales generadoras de energía

Las dos Centrales Generadoras, Zorro y Cerro Dragón, se encuentran distantes 36 km y están equipadas con turbinas que utilizan como combustible el gas producido en el yacimiento. Estas turbinas se encuentran acopladas a generadores eléctricos que son los encargados de generar la energía eléctrica. En total la potencia instalada en las plantas generadoras es de 414MW aproximadamente.

CENTRAL TURBOGENERADORA ZORRO

La central turbogeneradora Zorro esta subdividida en dos centrales llamadas Zorro 1 y Zorro

2.

- Zorro 1: Está conformada por cinco turbinas de gas marca Solar modelo Titán 130S de 14,25 MW en condiciones ISO (15°C, 60% humedad relativa y presión a nivel del mar)
- Zorro 2: Está conformada por dos turbinas de gas General Electric modelo MS6001B de 42 MW en condiciones ISO

CENTRAL TURBOGENERADORA CERRO DRAGON

La central turbogeneradora de Cerro Dragón está subdividida en dos centrales llamadas Cerro Dragon 1 y Cerro Dragon 2

- Cerro Dragon 1: Está conformada por tres turbinas de gas marca Solar modelo Titán 130S de 14,25 MW en condiciones ISO
- Cerro Dragon 2: Está conformada por dos turbinas de gas marca General Electric modelo TM2500+ de 25 MW en condiciones ISO y dos turbinas de gas General Electric modelo MS6001B de 42 MW en condiciones ISO.

Adicionalmente, la central turbogeneradora Cerro Dragon 2 cuenta con una turbina de vapor de 82 MW cuyo combustible (vapor), se genera con los gases de escape de las dos turbinas a gas MS6001B y con fuego adicional en calderas de recuperación de calor instaladas para tal fin

Como la turbina de gas es una maquina poco eficiente ($\eta = 35\%$), se recupera el calor del escape (del orden del 50% de la energía térmica entrante a la turbina generadora) para generar vapor y con ello generar energía eléctrica.

Los gases de escape se envían a los recuperadores de calor (HRSG) calentando el agua que ingresa a los mismos para finalmente producir vapor. Luego este vapor producido gracias a la recuperación de calor del escape se canaliza hacia una turbina de vapor de forma de cumplir con un ciclo de Rankine (con vapor sobrecalentado). Este proceso se ilustra en la Figura 2-12.

Como fuente fría del ciclo de Rankine, y por estar instalado el Ciclo Combinado en un lugar donde el agua es un recurso escaso, se decidió utilizar un aerocondensador. Es en ese componente donde el vapor saturado proveniente del escape de la turbina de vapor pasa a fase líquida para ser nuevamente enviado a los recuperadores de calor.

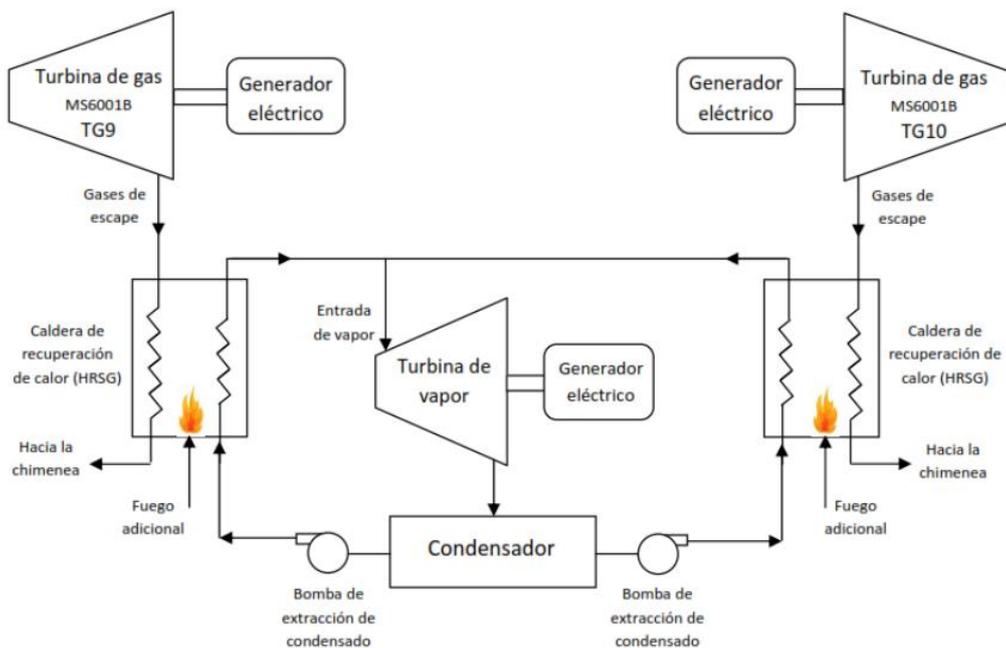


Figura 2-12: Central turbogeneradora Cerro Dragón 2- Gerencia Energía GSJ – Sistema eléctrico Cerro Dragon 2022



Figura 2-13: Vista aérea central turbogeneradora Cerro Dragón 2- Pan American Energy. Manual de Operaciones Upstream (2020)



Figura 2-14: Vista aérea de aerocondensador que completa el ciclo combinado Cerro Dragón 2- Pan American Energy. Manual de Operaciones Upstream (2020)

Turbogruppo	Planta Generadora	Marca	Modelo	Potencia (en condiciones ISO)
TG1	Zorro 1	Solar	Titan 130S	14,25 MW
TG2	Zorro 1	Solar	Titan 130S	14,25 MW
TG3	Zorro 1	Solar	Titan 130S	14,25 MW
TG4	Zorro 1	Solar	Titan 130S	14,25 MW
TG5	Zorro 1	Solar	Titan 130S	14,25 MW
TG6	Cerro Dragón 1	Solar	Titan 130S	14,25 MW
TG7	Cerro Dragón 1	Solar	Titan 130S	14,25 MW
TG8	Cerro Dragón 1	Solar	Titan 130S	14,25 MW
TG9	Cerro Dragón 2	General Electric	MS6001B	42 MW
TG10	Cerro Dragón 2	General Electric	MS6001B	42 MW
TG11	Zorro	General Electric	MS6001B	42 MW
TG12	Zorro	General Electric	MS6001B	42 MW
TG13	Cerro Dragón 2	General Electric	TM2500+	25 MW
TG14	Cerro Dragón 2	General Electric	TM2500+	25 MW
TV	Cerro Dragón 2	Siemens	ST-8000	82 MW

Tabla 2-1: Resumen del parque de generación instalado yacimiento Golfo San Jorge- Gerencia Energía GSJ – Sistema eléctrico Cerro Dragón 2022

2.5 Reserva rotante y alivios de carga

La demanda de la Unidad de Gestión del Golfo San Jorge viene incrementándose año a año debido a su constante crecimiento ya sea por pozos nuevos, plantas, edificios etc. En la Figura 2-15 se muestra un gráfico de consumo medio anual en todo el yacimiento y es función del área de Energía asegurar la disponibilidad de la energía eléctrica. Para ello se introduce el concepto de Reserva Rotante.

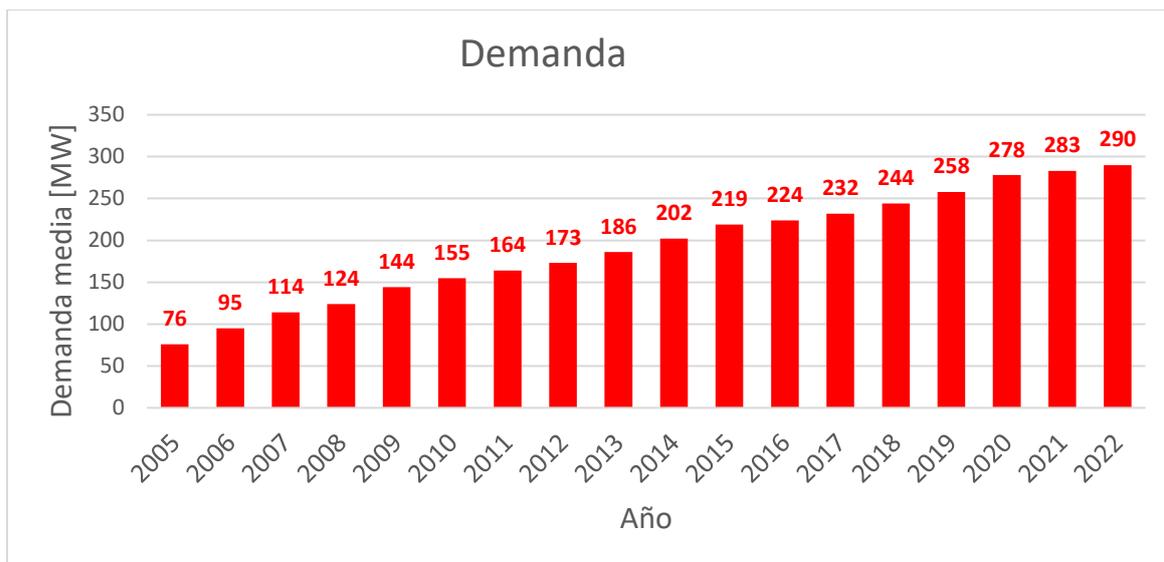


Figura 2-15: Curva demanda media del yacimiento- Gerencia Energía GSJ – Sistema eléctrico Cerro Dragón 2022

Se denomina Reserva Rotante de potencia en un sistema eléctrico a la potencia disponible para absorber las variaciones de demanda, o de generación, ante eventos que ocurran en el mismo. Resulta de la diferencia entre la potencia nominal de todos los generadores en servicio y el despacho total en un momento determinado.

$$R_{rotante} = \Sigma P_{nominal} (en\ servicio) - Demanda\ del\ sistema$$

Ecuación 2-3

En la Figura 2-16 la potencia disponible ideal (curva negra) es la potencia teórica que se obtendría de los generadores, mientras que la potencia real (curva roja) es obtenida por las distintas variaciones que aparecen en la generación, por ejemplo, cuando cambia la composición de CO₂ en el gas combustible.

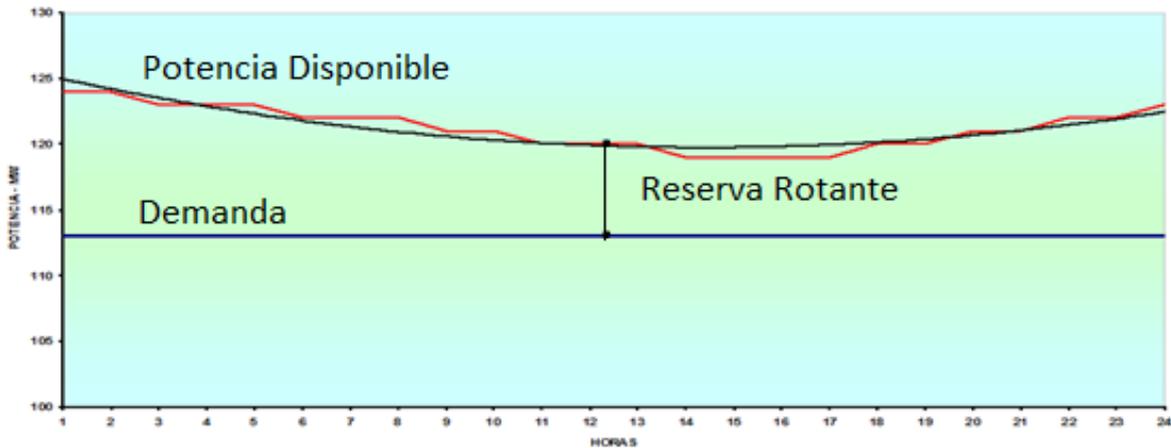


Figura 2-16: Curva de potencia disponible y demandada- Gerencia Energía GSJ – Sistema eléctrico Cerro Dragon 2022

El objetivo de la Reserva Rotante es de un 6% del valor de la demanda, es decir, aproximadamente 15KW. Esto es así ya que la energía rotante es energía generada que no es utilizada, por lo que un valor alto de energía rotante representaría una baja eficiencia en la relación generación/consumo. Actualmente se realizó un contrato de disponibilidad de energía con la cooperativa de la zona para poder acceder a 15KW de potencia de la red en caso de que la demanda este próxima a superar la Reserva Rotante.

Cuando por distintos motivos se supera la Reserva Rotante, se aplica un plan de contingencia de alivio de cargas que consiste en desconectar de la red a las instalaciones en orden de criticidad para la operación. Es decir, se van desconectando las estaciones transformadoras de las plantas de producción o plantas de inyección de agua salada (PIAS) que representen el menor costo posible de downtime de producción (tiempo sin producir/vender petróleo).

ALIVIOS DE CARGA						
Escalón	Líneas de despacho	ESTACIONES TRANSFORMADORAS	Demanda MW		Suma de la Demanda	Downtime Total
1	ZR2 H04	ET PIA ZRO2	9,0	MW	9,0	Agua
2	VH2 H10	ET PIA VH2	4,0	MW	13,0	Agua
3	CD2 H21	ET PIA CD2	5,2	MW	18,2	Agua
4	OR2 H04	ET PIA OR1	2,6	MW	20,8	Agua
5	CD2 H03	ET PIA Resero	7,4	MW	28,2	Agua
6	ZR2 H02	ET PIA ZRO3	5,1	MW	33,3	Agua
7	ZR2_H18	ET PIA LM, PIA LMS2 y PIA LMS3	12,5	MW	45,8	Agua
8	DR2_H16	ET PIA CG8 (Fuera del esquema de alivios)	9,1	MW	54,9	Agua
9	OR2 H15	ET PIA ORI 3 + PC AG	7,5	MW	62,4	Agua + Gas
10	OR2 H11	ET AGR + BYO + M14	4,7	MW	67,1	PETROLEO
11	OR2 H03	ET ESC	6,7	MW	73,8	PETROLEO
12	OR2 H13	ET OR3	10,0	MW	83,8	PETROLEO
13	ZR2 H06	ET PC VH2 Barra A (Comp.N°1 y Comp. N°2)	4,5	Mw	88,3	Gas
14	VH2 H09	ET LF	6,6	Mw	94,9	PETROLEO
15	ZR2 H17	ET VM	4,0	Mw	98,9	PETROLEO
16	CD2 H17	ET CG1	9,5	Mw	108,4	PETROLEO

Tabla 2-2: Plan de alivio de carga- Gerencia Energía GSJ – Sistema eléctrico Cerro Dragon 2022

La Fig 2-17 muestra cómo se distribuye el consumo de energía en las instalaciones:

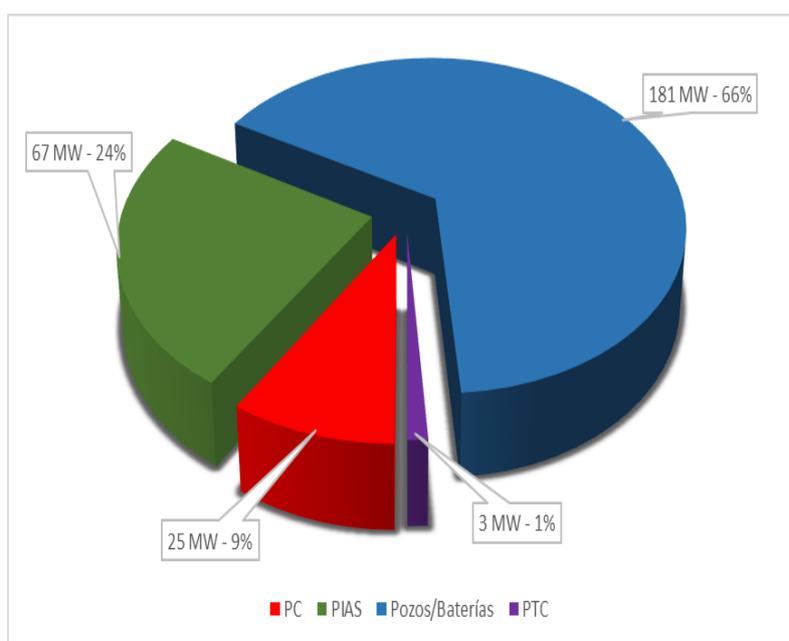


Figura 2-17: Distribución de consumo en distintas áreas- Gerencia Energía GSJ – Sistema eléctrico Cerro Dragón 2022

El 66% del consumo total se lo llevan los más de 4000 pozos y las Baterías donde se dirigen la producción de esos pozos y que están conformadas por bombas de inyección de petróleo impulsadas por motores eléctricos. El 24% corresponde al consumo de las PIAS, las cuales hay en menor cantidad, pero poseen bombas de inyección de agua que consumen mucha energía. Las últimas dos porciones de la torta son para las Plantas Compresoras (PC) con un 9% y las plantas de tratamiento de crudo (PTC) con un 1%. La primera recibe el gas de todos los pozos y son las encargadas de tratar el gas tanto para la venta como para la alimentación de los generadores de las plantas de energía.

2.6 Motor asíncrono

El motor asíncrono o de inducción al igual que cualquier otro dispositivo de conversión electromecánica de la energía de tipo rotativo, está formada por un estator y un rotor. En el estator se coloca normalmente el inductor, alimentado por una red mono o trifásica. El rotor es el inducido, y las corrientes que circulan por él aparecen como consecuencia de la interacción con el flujo del estator. Dependiendo del tipo de rotor, estas máquinas se clasifican en:

- Rotor en jaula de ardilla
- Rotor devanado

Los motores utilizados en PAE son motores alimentados por una red trifásica y con Rotor en jaula de ardilla.

El devanado del estator está constituido por tres arrollamientos desfasados 120° en el espacio y de p polos. Al introducir por estos corrientes de una red trifásica de frecuencia f_1 , se produce una onda rotativa de campo magnético distribuida senoidalmente por la periferia del entrehierro, que produce un flujo giratorio cuya velocidad n_1 (velocidad de sincronismo) se determina según por:

$$n_1 = \frac{120f_1}{p} \text{ (rpm)}$$

Ecuación 2-4

Este flujo giratorio inducirá tensiones en los conductores del rotor, y si está su circuito eléctrico cerrado, aparecerán corrientes que reaccionarán con el flujo del estator. Según la ley de Faraday, la f.e.m inducida e_{ind} en un conductor de longitud L que se mueve a la velocidad v (relativa al campo magnético) dentro de un campo B_S tiene un valor:

$$e_{ind} = \int (v \times B_S) dI = (v \times B_S) \cdot L$$

Ecuación 2-5

El movimiento relativo del rotor con respecto al campo magnético del estator produce el voltaje inducido en una barra del rotor. Este voltaje genera una corriente inducida, debido a que el rotor se encuentra cortocircuitado, y en atraso ya que el conjunto del rotor es inductivo.

Este flujo de corriente generado en el rotor produce un campo magnético del rotor B_R y luego el torque inducido τ_{ind} en la maquina será:

$$\tau_{ind} = kB_R \times B_S$$

Ecuación 2-6

$$\tau_{ind} = kB_R B_S \text{ sen } \delta$$

Ecuación 2-7

Donde δ es el ángulo entre los campos magnéticos del rotor y estator (B_R y B_S)

Existe un límite superior finito para la velocidad del motor. Si el rotor del motor de inducción estuviera rotando a la velocidad sincrónica, las barras del rotor serian estacionarias con respecto al campo magnético y no habría voltaje inducido. Si e_{ind} fuera igual a 0, no habría corriente en el rotor ni tampoco campo magnético rotórico B_R . Sin campo magnético rotorico, el par

inducido sería cero y el rotor se frenaría como resultado de las pérdidas por rozamiento. En consecuencia, un motor de inducción puede acelerar hasta una velocidad cercana a la de sincronismo, pero nunca puede alcanzarla por completo. En la Figura 2-18 se puede ver como varía la corriente a medida que la velocidad del rotor se acerca la velocidad sincrónica.

La velocidad relativa mencionada anteriormente entre el rotor y el campo magnético B_S se denomina velocidad de deslizamiento n_{des} , y será la diferencia entre la velocidad sincrónica y la velocidad del rotor

$$n_{des} = n_{sinc} - n_{Rotor}$$

Ecuación 2-8

De aquí se desprende el término deslizamiento S , que será la velocidad relativa expresada sobre una base en unidad de porcentaje.

$$S = \frac{n_{des}}{n_{sinc}} (\times 100\%)$$

Ecuación 2-9

Entonces de la Ecuac. 2-8

$$S = \frac{n_{sinc} - n_{Rotor}}{n_{sinc}} (\times 100\%)$$

Ecuación 2-10

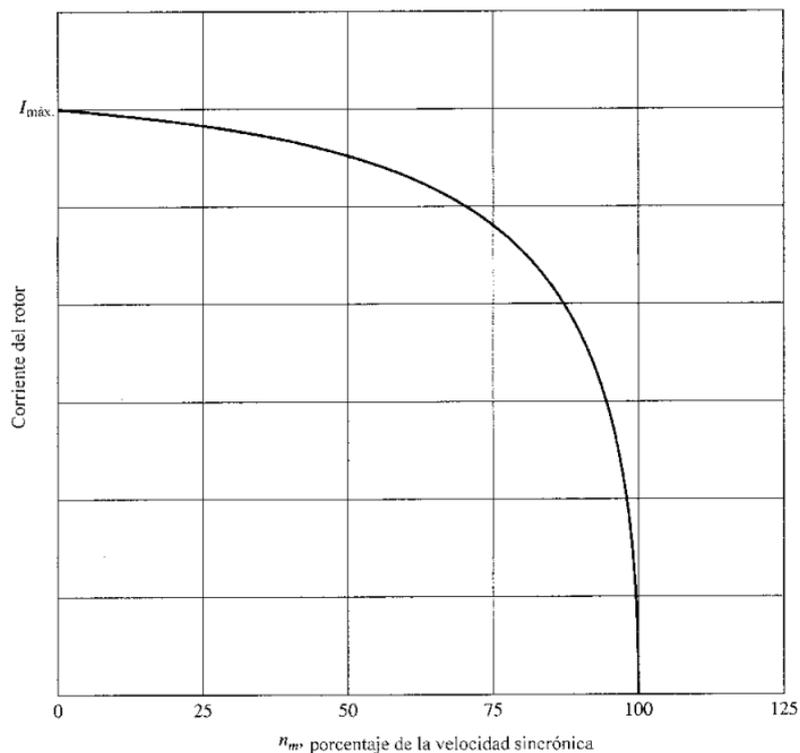


Figura 2-18: Deslizamiento vs Corriente de estator- Stephen j. Chapman – Maquinas Eléctricas (2000)

2.6.1 Circuito equivalente de motor de inducción

Para funcionar, un motor de inducción depende de la inducción de voltajes y corrientes en su circuito rotor desde el circuito estator la cual es equivalente a la de un transformador.

La figura 2-19 muestra el circuito equivalente del motor de inducción, el cual representa la operación de un motor de inducción. Las pérdidas activas y reactivas del devanado del estator están representadas por R_1 y X_1 respectivamente, donde R_1 representa las pérdidas por calor de corriente en el devanado y X_1 las pérdidas por dispersión del campo magnético en el estator. Luego la rama paralela representa al núcleo que separa el estator y el rotor, el cual en este caso es aire, por lo que R_c representa las pérdidas calóricas en el aire mientras que X_m representa las pérdidas por dispersión en el aire. El voltaje E_1 está acoplado al voltaje secundario E_R por un transformador ideal con una relación efectiva de vueltas a_{eff} .

El voltaje E_R producido en el rotor ocasiona a su vez un flujo de corriente I_R en el circuito rotor cortocircuitado de la máquina.

Al igual que con el estator, el bobinado del rotor posee sus pérdidas activas y reactivas representado por R_R y por X_R respectivamente.

El campo magnético neto B_{net} se considera al campo resultante tras eliminar las pérdidas del estator debido al cobre y a la dispersión magnética y es producido por la corriente de magnetización I_M que fluye en el circuito equivalente de la figura 2-19. La magnetización de la corriente I_M y por consiguiente de B_{net} es directamente proporcional al voltaje inducido E_1 el cual prácticamente no varía al cambiar los valores de carga por lo que se considera que el campo magnético del estator B_{net} es constante.

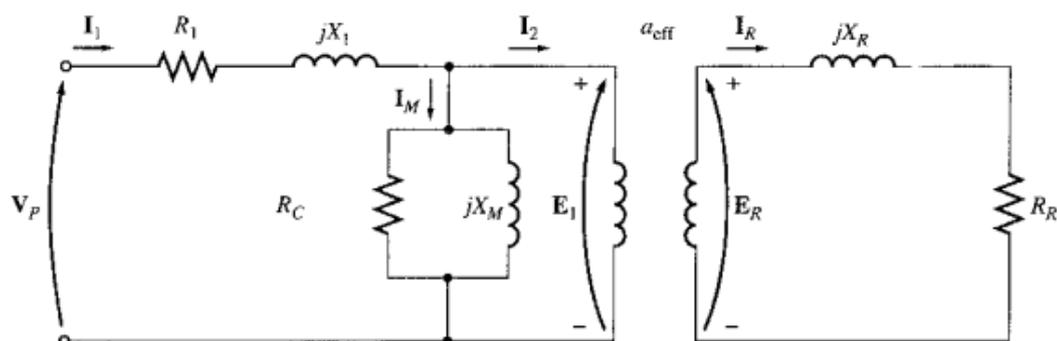


Figura 2-19: Circuito equivalente motor de inducción- Stephen j. Chapman – Maquinas Eléctricas (2000)

2.6.2 Pérdidas

Los motores de inducción tienen como entrada un sistema trifásico de voltajes y corrientes. Debido a que el rotor tiene los devanados cortocircuitados la salida de los motores es mecánica.

La potencia de entrada al motor de inducción P_{in} es potencia eléctrica trifásica. Las primeras pérdidas encontradas en el motor son los devanados del estator (pérdidas en el cobre del estator P_{SCL}). Luego, alguna cantidad de potencia se pierde por histéresis y por corrientes parasitas en

el estator ($P_{\text{núcleo}}$). La potencia remanente en este punto se transfiere al rotor de la máquina a través del entrehierro situado entre el rotor y el estator. Esta potencia se denomina P_{AG} . Después que la potencia fue transferida al rotor, algo de ella se disipa como pérdidas en el cobre del rotor (P_{RCL}) y la restante se convierte en potencia eléctrica en mecánica (P_{conv}). Por último, las pérdidas por rozamiento propio y por rozamiento con el aire ($P_{F\&W}$) y las pérdidas misceláneas P_{misc} se restan. La potencia restante es la salida del motor P_{out} .

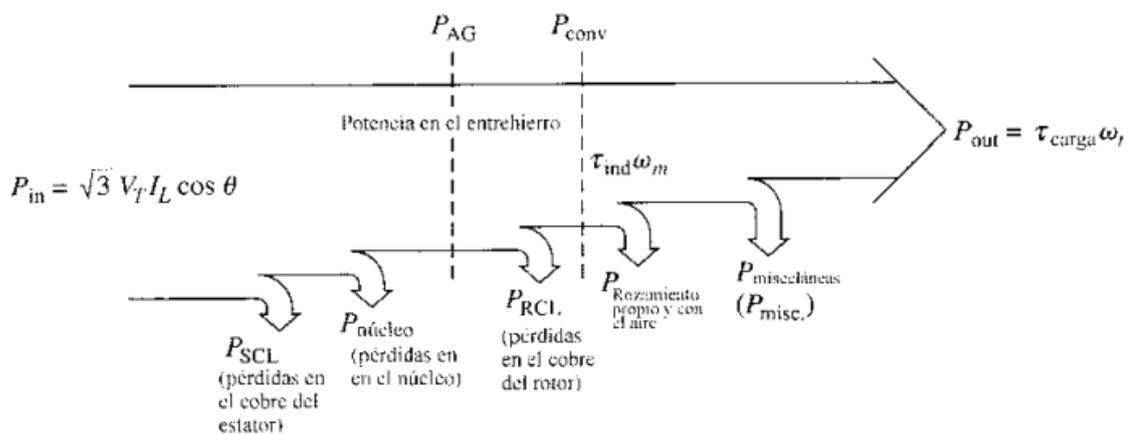


Figura 2-20: Resumen de pérdidas de potencia en un motor- Stephen j. Chapman – Maquinas Eléctricas (2000)

2.6.3 Par inducido

En la Figura 2-21a se muestra el motor cuando opera en vacío, es decir sin ninguna carga, la velocidad del rotor es muy cercana a la sincrónica por lo que el deslizamiento del rotor es muy pequeño, el cual se manifiesta en el rotor y genera el voltaje inducido E_R pequeño, como así también la corriente I_R . Debido a la baja velocidad relativa entre los campos magnéticos del rotor y del estator la reactancia inductiva JW_L del rotor también será pequeña y las pérdidas serán mínimas por lo que la corriente del rotor I_R estará casi en fase con el voltaje del rotor E_R .

La corriente del rotor produce entonces un campo magnético B_R pequeño a un ángulo un poco mayor a 90° detrás del campo magnético B_{net} .

La magnitud del par inducido que mantiene girando el rotor está dado por la ecuación:

$$\tau_{ind} = k B_R B_{NET} \text{ sen } \delta$$

Ecuación 2-11

Como el campo magnético del rotor es pequeño, entonces el torque inducido también lo es, pero suficientemente grande para contrarrestar las pérdidas rotacionales del motor.

Introduciendo una carga en el motor mostrado en la figura 2-21b, el deslizamiento aumenta y baja la velocidad del rotor. Dado que la velocidad del rotor es menor, existe más movimiento relativo entre los campos magnéticos B_{net} y B_{rotor} del motor. El mayor movimiento relativo produce un voltaje E_R más grande en el rotor que a su vez produce en una corriente de rotor I_R mayor. Si la corriente en el rotor es mayor, este aumenta su propio campo magnético B_{rotor} . Esto hace aumentar también la reactancia del bobinado del rotor por lo que la corriente I_R se desfasa aún más de la f.e.m inducida E_R , en consecuencia, B_{net} y B_{rotor} aumentan su ángulo δ en la misma proporción que se desfasa la corriente y tensión de rotor. Entonces por la ecuación 2-11 el par inducido aumenta debido al incremento de la magnitud del campo magnético del rotor para alimentar el incremento de carga del motor.

El motor alcanza su par máximo cuando se llega al punto en que el termino $\text{sen } \delta$ disminuya más que lo que se incremente el término B_{rotor} . Es decir, el desfasaje entre los campos magnéticos (δ , con $\delta > 90^\circ$) aumenta en mayor proporción que el desfasaje entre la corriente y tensión del rotor θ_R . En este punto un aumento de carga continuo disminuye el torque inducido hasta que el motor se frena.

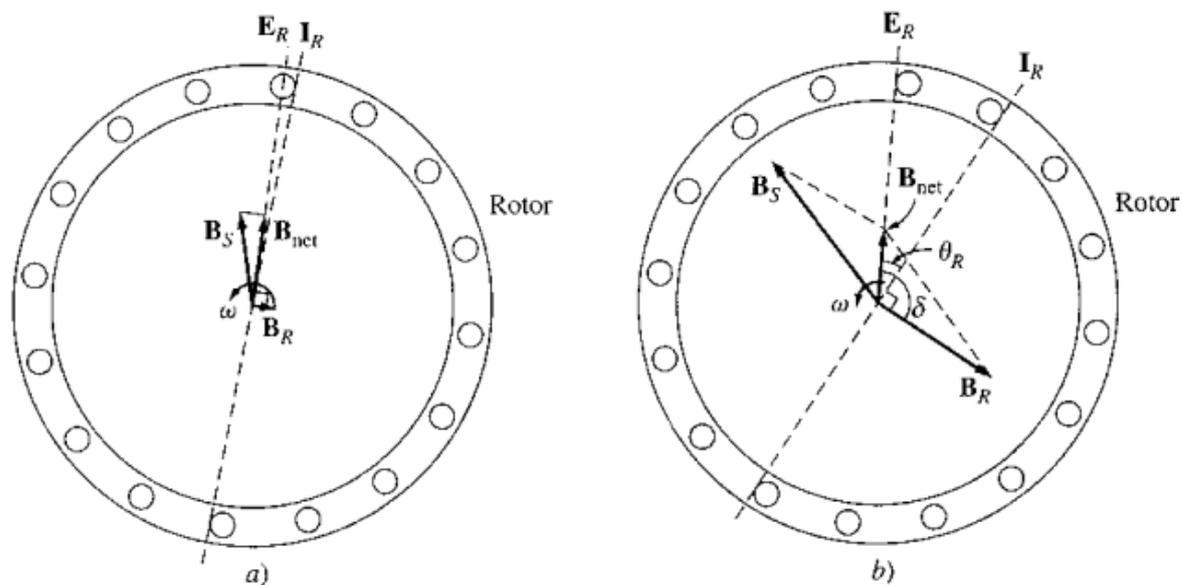


Figura 2-21: a) Campos magnéticos en un motor de inducción con carga baja. b) Campos magnéticos en un motor de inducción con carga alta - Stephen j. Chapman – Maquinas Eléctricas (2000)

Realizando un relevamiento punto a punto de carga vs torque en un motor de inducción se determina la curva mostrada en la Figura 2-22. Se puede observar que los motores de inducción tienen un alto par de arranque debido a que cuando se encuentran en vacío el campo magnético neto es producido con la máxima corriente del estator debido a que la corriente del rotor y por tanto su campo magnético serán muy pequeñas.

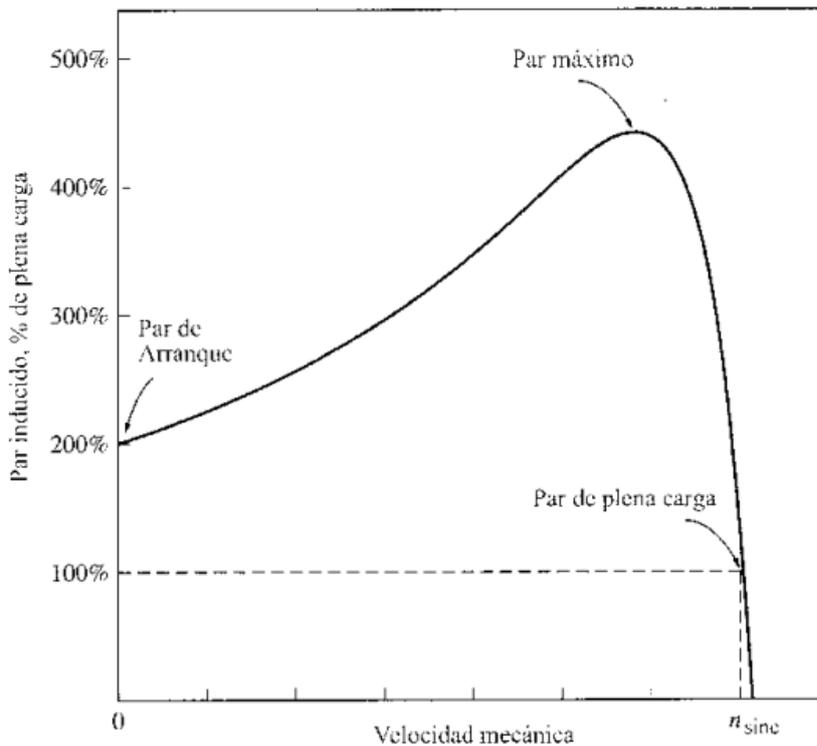


Figura 2-22: Curva Par-Velocidad Motor asíncrono de inducción- Stephen j. Chapman – Maquinas Eléctricas (2000)

2.7 Motor sincrónico

Los motores sincrónicos son muy similares a los motores de inducción o asíncronos en su forma constructiva ya que poseen un rotor y un estator. En los motores sincrónicos, el devanado del estator es esencialmente el mismo que en el motor de inducción y es conectado a una red trifásica produciendo un campo magnético rotante \mathbf{B}_s . Sin embargo, en lugar de tener un rotor cilíndrico con un devanado de jaula de ardilla, el motor sincrónico tiene un rotor con un devanado excitado en corriente continua o un rotor con imanes permanentes diseñados con el mismo número de polos que el estator que generan un campo magnético \mathbf{B}_R . De esta forma se tienen dos campos magnéticos presentes en la máquina, el campo del rotor tenderá a alinearse con el campo giratorio del estator, así como dos barras magnéticas tenderán a alinearse si se colocan una cerca de la otra. Cuanto mayor sea el ángulo δ entre los dos campos magnéticos, mayor es

el par sobre el rotor de la máquina (hasta un máximo). Entonces el rotor es capaz de sincronizarse con el campo magnético giratorio producido por el estator. Una vez sincronizado, el rotor funcionará exactamente a la misma velocidad que el campo giratorio a pesar de la variación de la carga mientras la frecuencia de alimentación sea estable.

La velocidad de sincronismo n_{sinc} , al igual que en el motor de inducción está definido como:

$$n_{sinc} = \frac{120 f}{p}$$

Ecuación 2-12

Donde f es la frecuencia de alimentación al estator y p la cantidad de polos.

Entonces la velocidad del rotor dependerá de la cantidad de polos. Lo cual trae un gran problema si se debe variar la velocidad, a menos que se invierta en un variador de frecuencia.

Cuando el motor funciona por debajo de la velocidad de sincronismo el torque permanece constante. La Figura 2-23 muestra que cuando el rotor del motor síncrono llega a la velocidad de sincronismo el torque cae en línea vertical extendiéndose a valores negativos, lo cual indica que si se fuerza al motor a funcionar a una velocidad mayor que la de sincronismo pasa a operarse como una máquina generadora.

El torque τ_{ind} inducido viene dado por:

$$\tau_{ind} = k B_R \times B_{NET}$$

Ecuación 2-13

Y su magnitud será de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\tau_{ind} = k B_R B_{NET} \text{ sen } \delta$$

Ecuación 2-14

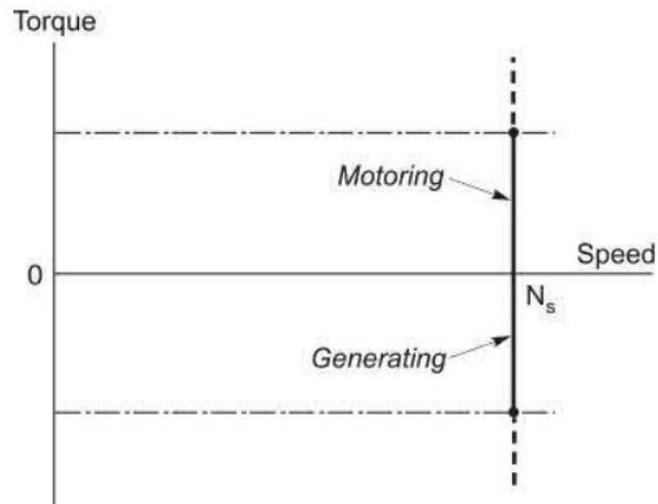


Figura 2-23: Curva par-velocidad de motor sincrónico- Stephen j. Chapman – Maquinas Eléctricas (2000)

El torque máximo viene dado cuando $\delta=90^\circ$. Es decir, cuando los campos \vec{B}_R y \vec{B}_S son perpendiculares.

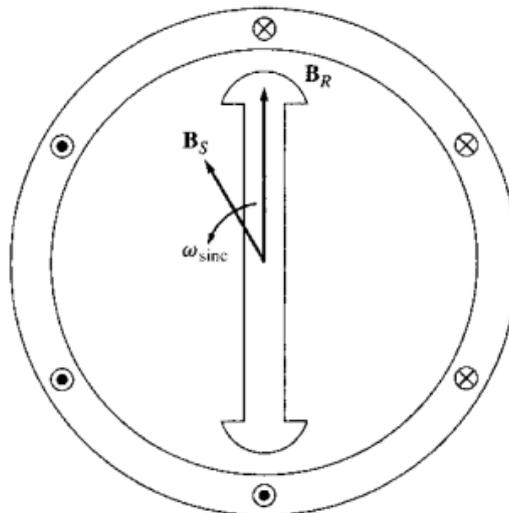


Figura 2-24: Motor sincrónico de dos polos- Stephen j. Chapman – Maquinas Eléctricas (2000)

Un motor de corriente continua (CC) absorbe potencia cuando la tensión de alimentación V es mayor que la f.e.m generada en el rotor, y entrega potencia reactiva cuando la tensión V es menor que la f.e.m.

En un motor síncrono no se puede seguir la misma analogía ya que es alimentado con corriente alterna. Entonces se debe armar un esquema fasorial para poder identificar los distintos funcionamientos del motor.

Teniendo en cuenta el circuito equivalente al motor síncrono mostrado en la figura 2-25, donde V es la tensión de alimentación C.A en bornes, I es la corriente del estator, R y X_s son las pérdidas resistiva e inductiva respectivamente generadas por el bobinado y E es la fuerza electromotriz generada en circuito abierto en el rotor, se puede construir el diagrama fasorial indicado en la figura 2-26.

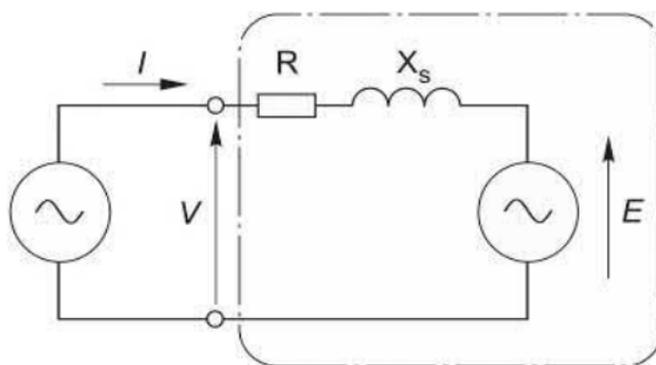


Figura 2-25: Circuito equivalente motor síncrono- Hughes A., Drury B. Electric Motors and Drives. Fundamentals, Types and Applications (2019)

La tensión de alimentación de un motor síncrono es la tensión de la red, en este caso V . Suponiendo una carga fija y la posibilidad de modificar la corriente de excitación del rotor, se determina el diagrama fasorial de la figura 2-25 A. Para una corriente de excitación baja la f.e.m del inducido E es menor a la tensión aplicada, lo cual implica una componente de la corriente reactiva relativamente grande representada por IX_s .

Si aumenta la corriente del rotor, se incrementa E y se reduce la corriente del estator I_a colocándose más en fase con la tensión de alimentación V . Entonces para un determinado valor de corriente de excitación de rotor se puede obtener un valor de corriente que se encuentre en

fase con la tensión de alimentación, como indica 2-25 B, logrando el momento más eficiente del motor ya que no posee componente reactiva de corriente logrando que todo sea transmitido al par de salida.

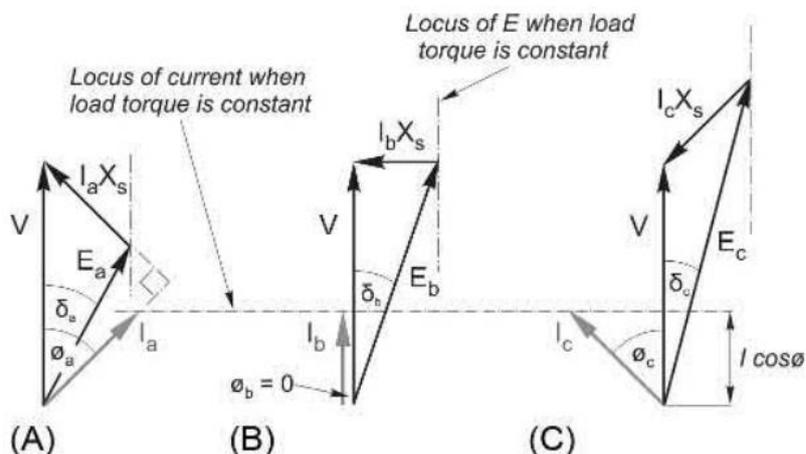


Figura 2-26: Motor síncrono con distintas cargas. A) Motor subexcitado B) Motor con factor de potencia unitario C) Motor Sobreexcitado - Hughes A., Drury B. *Electric Motors and Drives. Fundamentals, Types and Applications* (2019)

Entonces si la tensión de entrada V ya es fija y se define la tensión E (mediante la corriente de excitación del rotor), la corriente del inducido se ajustará para que se cumpla:

$$E + IX_s = V$$

Ecuación 2-15

De nuevo en la figura 2-25 C, si aumenta aún más la corriente de excitación, la tensión E aumentará aún más y será mayor a la tensión de alimentación V , por lo que se tendrá nuevamente una corriente de estator grande pero ahora en adelanto.

En conclusión, se puede elegir cualquier factor de potencia eligiendo la excitación adecuada de corriente al rotor del motor síncrono, lo cual es una ventaja respecto al motor de inducción.

Acá es posible aclarar lo siguiente: El triángulo de tensiones formado entre V , E y IX_s es completamente equivalente al triángulo formado por los flujos del estator, rotor y a la inducción del bobinado del estator respectivamente.

La figura 2-26 muestra el triángulo de flujos donde F es el flujo resultante, F_s es el flujo del estator y F_r es el flujo del rotor. Todos son proporcionales con sus tensiones equivalentes. Y a su vez el área del triángulo es un rápido indicador del par entregador por el motor ya que

$$\tau \propto F_R F_S \text{ sen } \lambda$$

Ecuación 2-16

Y como son fasores, es equivalente al producto interno entre F_r y F_s que equivale al área de un triángulo.

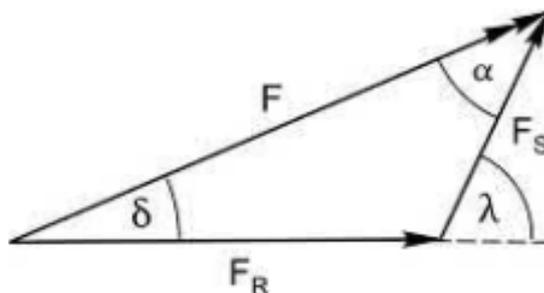


Figura 2-27: Triangulo de flujos- Hughes A., Drury B. Electric Motors and Drives. Fundamentals, Types and Applications (2019)

2.8 Motor sincrónico de imán permanente

Las maquinas sincrónicas requieren dos entradas eléctricas, la primera para alimentar el campo/excitación del rotor y la segunda para alimentar el bobinado del estator. Los motores con imanes permanentes sin escobillas (Brushless PM) tienen imanes fijados al rotor para

proporcionar el campo magnético que permitirá sincronizarlo con el estator. Por lo que solo se necesita una alimentación trifásica en el estator.

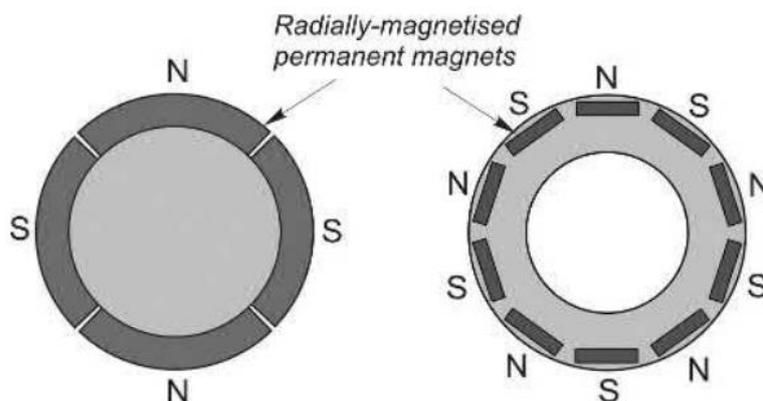


Figura 2-28: Rotor de motor con imán permanente- Hughes A., Drury B. Electric Motors and Drives. Fundamentals, Types and Applications (2019)

Los imanes permanentes funcionan entonces como una fuente de fuerza magnetomotriz cuyo campo magnético atraviesa tres reluctancias en serie, como son, la parte del hierro del cuerpo del rotor; el hierro del estator; y el espacio de aire entre el hierro del rotor y el del estator.

El estator tiene una mayor reluctancia debido a la profundidad radial de los imanes, esto significa que la autoinductancia del estator (IX_s) es mucho menor que la de un motor de rotor excitado, lo que es una ventaja en lo que respecta al control rápido de corriente.

Si la corriente del inducido, es decir del estator, llega a ser muy grande se corre el riesgo de que la fuerza magnetomotriz del inducido desmagnetice los polos, reduciendo y reorientando permanentemente el flujo residual en ellos. La desmagnetización también puede ser causada por el calentamiento excesivo, el cual puede ocurrir durante periodos prolongados de sobrecarga.

En la Figura 2-29 se ve una curva de magnetización o curva de histéresis para un material ferromagnético típico. El eje vertical corresponde a la densidad de flujo B en función de la intensidad de campo magnético H . Empezando desde el origen, cuando a un material se le aplica

una f.m.m externa y luego se quita, quedará un flujo residual B_{res} en el material. Para que el flujo residual sea 0, es necesario aplicar una intensidad magnetizante coercitiva H_c con una polaridad opuesta a la polaridad de la intensidad magnetizante H que originalmente estableció el campo magnético.

Entonces para un motor de imán permanente es necesario que el material utilizado tenga la mayor densidad de flujo residual B_{res} posible como la mayor intensidad magnetizante coercitiva H_c posible. “Una B_{res} grande produce un gran flujo en la máquina, mientras que la H_c grande indica que se necesitará una gran corriente para desmagnetizar los polos” - Stephen j. Chapman – Maquinas Eléctricas (2000).

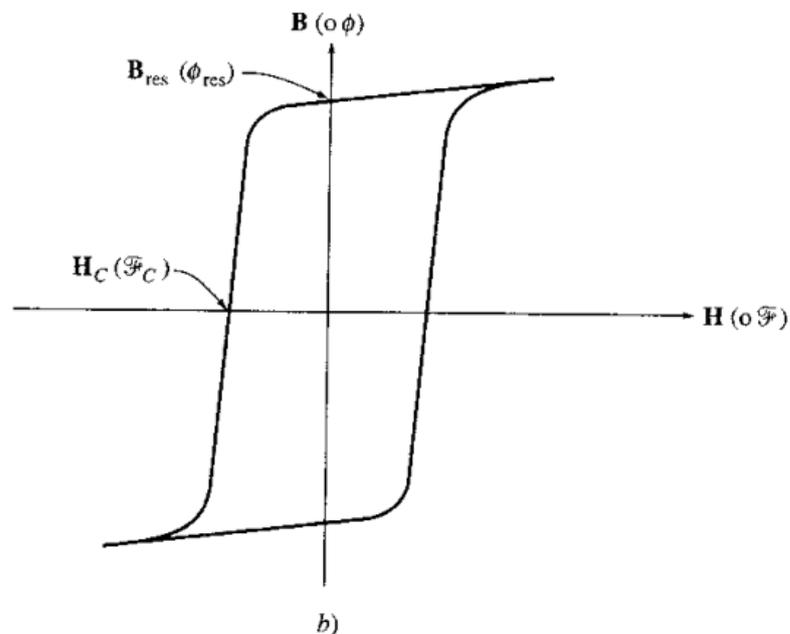


Figura 2-29: Ciclo de histéresis de un material ferromagnético- Stephen j. Chapman – Maquinas Eléctricas (2000)

Existen distintos tipos de materiales magnéticos con características deseables para fabricar imanes permanentes. Los principales son los materiales cerámico-magnéticos y los materiales magnéticos de tierras raras. La Figura 2-30 muestra las curvas de magnetización de estos materiales en el segundo cuadrante de la curva de histéresis. Se puede ver que los imanes de

tierras raras (Nd-Fe-B) combinan un alto flujo residual con una alta intensidad de campo magnetizante coercitiva. Es por lo que es el tipo de imán más utilizado para motores de potencias elevadas.

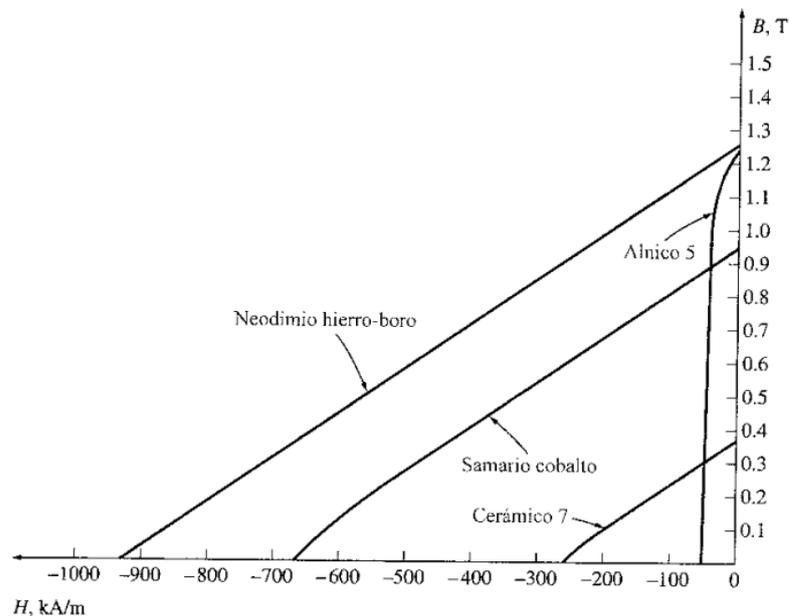
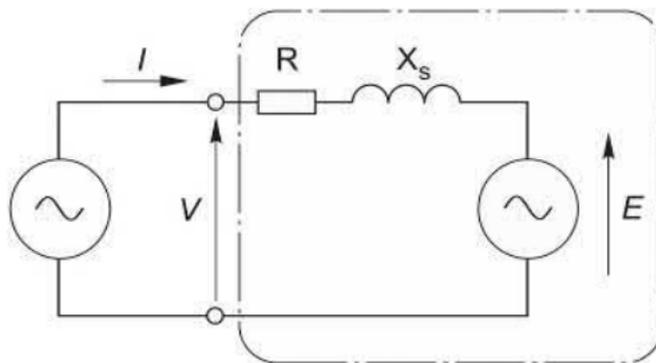


Figura 2-30: Segundo cuadrante de la curva de magnetización de distintos materiales-
Stephen j. Chapman – Maquinas Eléctricas (2000)

2.8.1 Circuito equivalente motor sincrónico de imán permanente

Se utiliza el mismo circuito del a Figura 2-25 (repetido aquí abajo) para representar al motor de imán permanente donde \mathbf{X}_s representa la reactancia efectiva del bobinado del estator; \mathbf{R} indica la resistencia del bobinado del estator; \mathbf{V} es el voltaje aplicado al estator (tensión trifásica) y \mathbf{E} es la f.e.m inducida en el bobinado del estator por el campo rotante del rotor de imanes permanentes.



Del circuito equivalente se desprende:

$$V = I.R + IX_s - E$$

Ecuación 2-17

o

$$E = I.R + IX_s - V$$

Ecuación 2-18

Como el imán permanente actúa como fuente de excitación constante se pierde el control sobre la magnitud de la f.e.m inducida \mathbf{E} (el cual anteriormente se controlaba con la corriente de excitación), que ahora depende de la fuerza del imán y de la velocidad de giro del campo magnético B_s el cual está fijado por la frecuencia de la red. Por lo tanto, la única variable independiente es el par de la carga colocada. Como la tensión de alimentación V es constante, el par de carga determina la componente en fase o factor de potencia de la corriente del estator $I \cos \varphi$. Es decir, dependiendo de la carga que coloque el motor puede funcionar como subexcitado (Caso A), o sobre excitado (Caso B y C) como se indicó en la Figura 2-26. Cuando el motor se encuentra subexcitado consume potencia reactiva de la red. A medida que aumento la carga y la corriente de campo aumenta, la corriente del inducido llega a ponerse en adelanto y el motor se convierte en una carga capacitiva que suministra potencia reactiva al sistema. En

el medio hay un valor de carga que logrará que el motor se comporte puramente resistivo, es decir $\cos \varphi = 1$.

Entonces los motores de imán permanente pierden la ventaja de poder controlar el factor de potencia controlando la corriente de campo, cosa que pueden hacer los motores con rotor excitado. Solo se puede variar la corriente de campo si se varia la carga, pero en aplicaciones reales la carga puede ser fija, o variar constantemente como es en la extracción de hidrocarburos. Es por esto por lo que el motor de imán permanente no era tenido en cuenta para aplicaciones que requieran potencias moderadas del orden de las decenas de Kw

2.8.2 Torque motor imán permanente

Como se mencionó anteriormente el motor de imán permanente entrega un torque constante mientras funciona a una velocidad nominal. Cuando se opera a velocidades inferiores a la velocidad base del motor, es necesario reducir el voltaje aplicado a los terminales del estator de forma lineal con la disminución de la frecuencia, ya que al no hacerlo se saturará el acero del núcleo del motor y fluirán corrientes de magnetización excesivas en la máquina. El flujo en el núcleo de un motor se puede encontrar aplicando la ley de Faraday:

$$v(t) = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

Ecuación 2-19

Como el voltaje aplicado es senoidal $v(t) = V_m \text{sen}(\omega t)$, entonces el flujo Φ será:

$$\begin{aligned} \Phi(t) &= \frac{1}{N_p} \int v(t) dt \\ &= \frac{1}{N_p} \int V_m \text{sen}(\omega t) dt \end{aligned}$$

$$\phi(t) = -\frac{V_m}{\omega N_p} \cos(\omega t)$$

Ecuación 2-20

Entonces de la ecuación anterior se observa que si la frecuencia aplicada al estator disminuye mientras la magnitud del voltaje aplicado al estator permanece constante, el flujo en el núcleo del motor se incrementará y la corriente de magnetización se incrementará también. Por lo tanto, el aumento de flujo debido a la disminución de frecuencia causara un flujo excesivo de corriente de magnetización en el rotor.

Entonces se debe disminuir el voltaje aplicado al estator en proporción directa a la disminución de la frecuencia siempre que la frecuencia este por debajo de la nominal del motor. Luego como V aparece en el numerador y la frecuencia en el denominador, estos efectos se contrarrestan entre sí y la corriente de magnetización no varía.

Si ahora la velocidad (frecuencia) del motor aumenta sobrepasando el límite de la velocidad nominal entonces la relación $\frac{V}{f}$ disminuye y el flujo resultante también cae. Esto hace que el flujo magnético del rotor aumente, entonces aumenta también el flujo de autoinductancia el cual es proporcional a IX_s . En otras palabras, se están incrementando las pérdidas en el estator.

Para el motor sincrónico con excitación, estas pérdidas se disminuyen reduciendo la corriente de excitación del rotor, logrando que la f.e.m (E) se reduzca, por ende, se reduce el flujo que genera el rotor.

En el motor de inducción solamente se tiene la alimentación en el estator como fuente de excitación y el flujo del rotor viene dado por el deslizamiento el cual no cambia. Una alimentación constante en el estator genera un deslizamiento constante, y como el flujo depende del deslizamiento de forma directa, no cambiará.

En cambio, el motor de imán permanente sigue teniendo una fuente de flujo magnético de rotor constante y bastante potente de excitación en todo momento, por lo que para llegar a un flujo reducido que satisfaga la relación $\frac{V}{f}$, la corriente del estator tendrá que anular parte de la influencia del imán, entonces la corriente del estator aumenta considerablemente generando mayores pérdidas en el cobre del estator y sobrecalentándolo y esto puede ser perjudicial para el motor.

La figura 2-31 esquematiza la situación en la que el motor aumenta su velocidad al doble de la nominal (perdiendo sincronismo), la f.e.m inducida E aumenta el doble lo cual obliga a aumentar de forma considerable a la corriente del estator para compensar el flujo neto del motor.

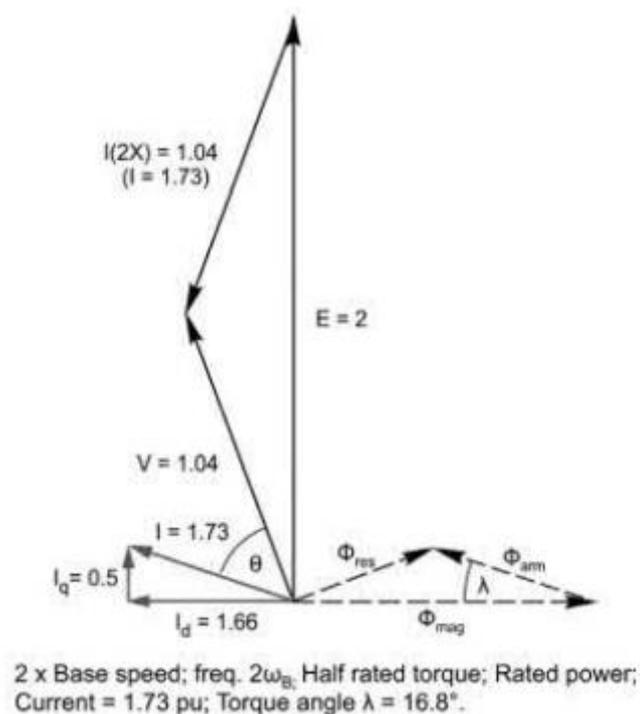


Figura 2-31: Diagrama fasorial de motor imán permanente a doble velocidad nominal y mitad de torque nominal- Hughes A., Drury B. Electric Motors and Drives. Fundamentals, Types and Applications (2019)

Otra forma de que el motor pierda sincronismo es si la frecuencia o velocidad cambia de forma abrupta. Es decir, ante un aumento abrupto de carga, el campo magnético resultante se acelera y el ángulo de carga (entre el campo resultante y el campo del rotor) empieza a aumentar,

por lo que el par aumenta y el rotor empieza a acelerar. Dependiendo de la inercia, si el ángulo de carga supera el punto de par máximo (90°), el rotor “resbalará” de los polos y perderá sincronismo generando un bloqueo.

Afortunadamente gracias al aprovechamiento del procesamiento digital de rápida respuesta todas estas deficiencias del motor cuando se alimenta directamente de la red pueden evitarse completamente colocando un variador de frecuencia.

2.9 Carga de un pozo productor

Como se nombró anteriormente, el sistema de transmisión de potencia del motor eléctrico al eje del AIB se ve reflejado en la caja reductora. La figura 2-32 muestra la caja reductora de un AIB la cual es el corazón del equipo de superficie. Es el encargado de convertir la potencia entregada en alta velocidad y bajo torque, en potencia de salida de baja velocidad de alto torque.

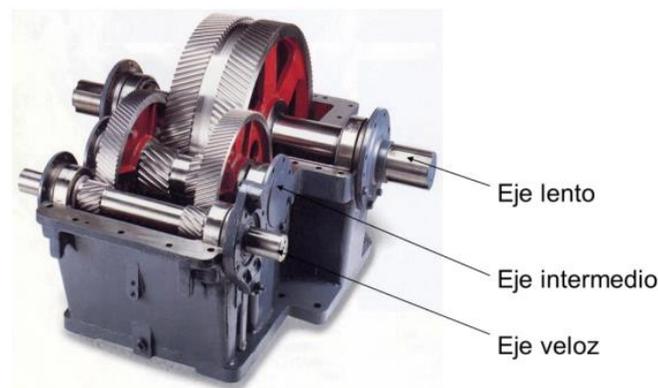


Figura 2-32: Caja reductora que transmite el giro del rotor del motor eléctrico a torque mecánico- Pan American Energy. Manual de Operaciones Upstream (2020)

2.9.1 Torque en la caja reductora

El torque nos refiere al producto de una fuerza por un brazo de palanca; en las unidades de bombeo el torque normalmente se expresa en libras-pulgadas. El brazo de palanca es la distancia del centro del eje de salida del reductor al centro del perno de biela; esta distancia define la carrera del equipo y es regulable

La fuerza que recibe el AIB proviene de la variación de cargas que transmite el balancín y el efecto del contrapeso durante el ciclo de bombeo. El torque máximo es el torque con que se puede hacer trabajar el reductor de la unidad sin peligro a roturas en el mismo.

Para determinar si una unidad de bombeo está bien balanceada, y la unidad es accionada por motor eléctrico, lo que se puede hacer es comparar el consumo de corriente medido en ambas carreras del equipo (ascendente y descendente). Se considera que la unidad está bien balanceada cuando ambas lecturas son similares. Actualmente esta medición la realiza automáticamente el variador de frecuencias y la transmite por radio al sistema de monitoreo realizando directamente los cálculos y mostrando el porcentaje de torque Real obtenido contra el Ideal requerido. Se considera que se puede diferir entre un 5 y 10% como máximo. Obviamente al cambiar las condiciones del pozo (nivel de fluido) y/o las condiciones de bombeo (carrera, régimen de GPM, diámetro de bomba) deberá efectuarse un nuevo balanceo. Es por ello por lo que se debe regular el control del pozo como mínimo dos veces mensuales.

La variación del valor del torque durante el ciclo de bombeo puede graficarse en función del ángulo que genera la manivela de acuerdo con lo que se ilustra en las siguientes imágenes.

En las siguientes figuras se puede ver la curva del torque del pozo, el torque del contrapesado (En la figura 2-33 esta invertido) y el torque neto, obtenido mediante la diferencia de las dos anteriores, que es el que recibe el reductor.

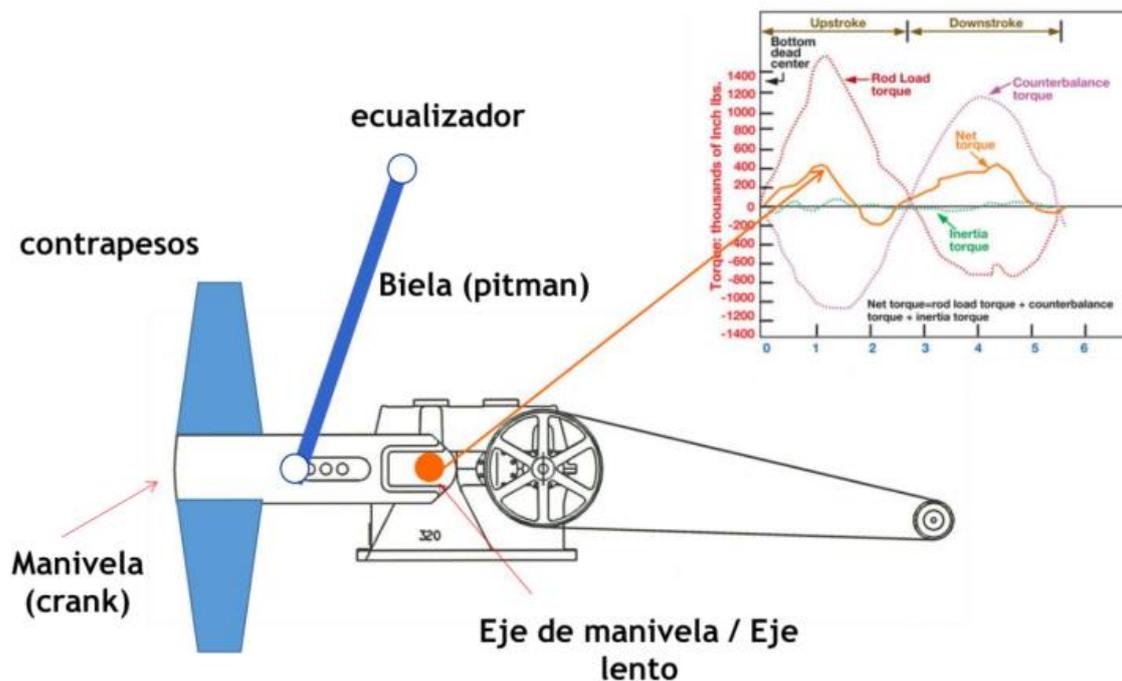


Figura 2-33: Representación de las curvas de torque y su origen- Pan American Energy. Manual de Operaciones Upstream (2020)

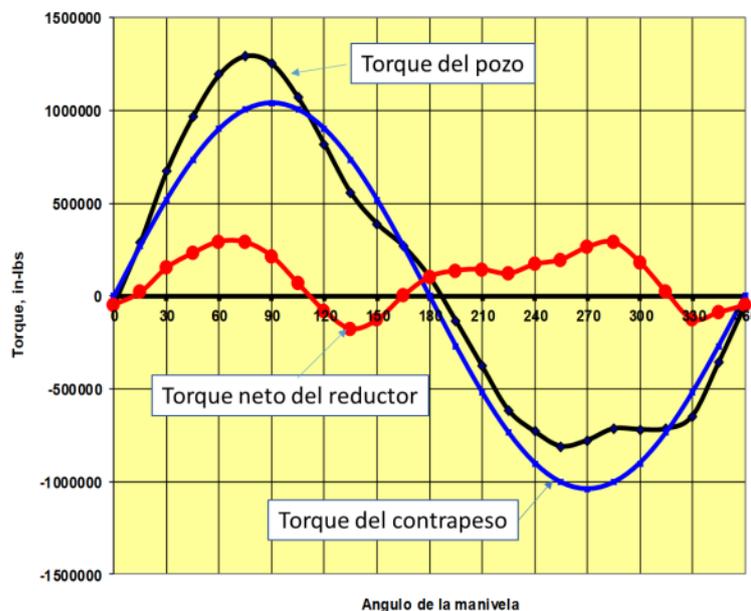


Figura 2-34: Representación de las curvas de torque en la caja reductora- Pan American Energy. Manual de Operaciones Upstream (2020)

En un marco IDEAL el torque del contrapeso debería ser igual al torque del pozo, logrando entonces que la caja reductora reciba un torque nulo y el AIB funcione solamente se balancee

con el contrapesado y el peso de las varillas, lo cual es irreal debido a que no perdería energía por rozamiento, estiramiento de varillas, golpe de bomba entre otras cosas que realmente suceden.

Considerando todo lo anterior se obtiene la curva real de torque neto que recibe la caja reductora y se debe lograr que sea la menor posible ya que es la energía que se está utilizando para el funcionamiento de un AIB.

Se puede ver que el torque neto resulta negativo en dos oportunidades durante una vuelta del eje lento de la caja reductora. Esto es importante ya que como se mencionó en los motores sincrónicos, cuando el torque es negativo el motor pasa a funcionar como generador y devuelve la energía a la red, o en este caso al variador de frecuencia. Entonces es importante saber que hacer con esta energía que vuelve ya que puede habilitar las protecciones por sobrecorriente del variador, parando el equipo de producción.

2.10 Variador de frecuencia

La función de un variador es extraer energía eléctrica de la red (a tensión y frecuencia constantes) y suministrar energía eléctrica al motor a la tensión y frecuencia necesaria para obtener el rendimiento mecánico deseado. Es decir, no solo se necesita controlar la velocidad del motor, sino también el torque, posición del eje entre otras variables. La Figura 2-35 muestra un esquema simplificado del sistema variador – motor.

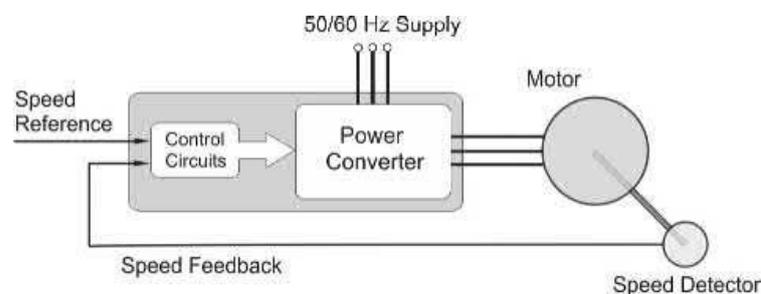


Figura 2-35: Esquema variador de frecuencia- Hughes A., Drury B. *Electric Motors and Drives. Fundamentals, Types and Applications* (2019)



Figura 2-36: Fotografía de tablero de pozo con motor de imán permanente, a la izquierda (caja blanca) controlador Pump Off del AIB; a la derecha (con bordes verdes) variador de frecuencia del motor

Un variador consiste en dos partes diferenciadas. La primera etapa es la de potencia, a través de la cual fluye la energía hacia el motor, y la segunda es la selección de control, que regula el flujo de potencia. Las señales de control de baja potencia indican al variador lo que se debe hacer, mientras que otras señales de realimentación de baja potencia se utilizan para medir lo que ocurre realmente. Comparando las señales de referencia y realimentación se puede ajustar la salida del variador objetivo.

2.10.1 1° Etapa: Potencia

Hay dos maneras de controlar la amplitud de la tensión de salida. La primera es utilizando un rectificador controlado con SCR, el cual permite ajustar la tensión de salida en cualquier valor dentro del rango del enlace de continua. Entonces para el control de motores se puede hacer que la tensión de enlace siga la frecuencia de salida del inversor, de modo que a una

frecuencia de salida alta se obtenga una tensión de salida alta y viceversa. Este tipo de control es sencillo, pero requiere un rectificador controlado el cual es caro económicamente.

El segundo método de control que es más utilizado consigue el control de la tensión mediante la modulación por ancho de pulsos (PWM) dentro del propio inversor, es decir que no requiere interruptores semiconductores de potencia adicionales. De este modo se abaratan los costos y se obtiene el mismo resultado.

El circuito básico de un variador de frecuencia se ve en el siguiente esquema:

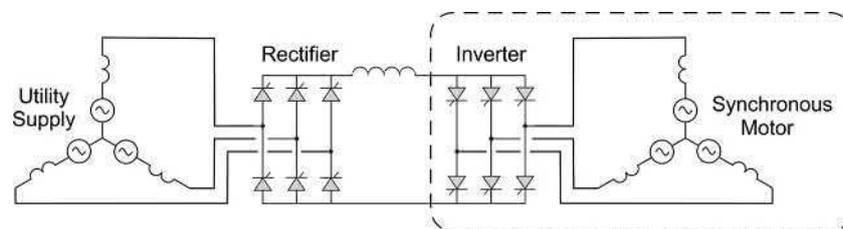


Figura 2-37: Rectificador-Inversor utilizando diodos SCR- Hughes A., Drury B. Electric Motors and Drives. Fundamentals, Types and Applications (2019)

El rectificador en el lado izquierdo se encarga de transformar la señal AC en CC para que luego el inversor lo transforme nuevamente en AC con la tensión y frecuencia requerida. La inductancia central se encuentra para garantizar la componente de CC que sale del rectificador

La figura 2-37 muestra el empleo de tiristores para realizar la rectificación e inversión, los tiristores son más baratos y sus valores nominales de tensión y corriente se extienden a niveles más altos que los transistores de potencia (es por eso que reemplazan a los BJT). A diferencia de los diodos convencionales, los tiristores solo conducen cuando se le aplica un pulso en la compuerta. Esto permite determinar en qué instante de la onda de entrada empezar a conducir. Normalmente se mide el retraso de encendido en ángulos, y combinando este encendido con los demás tiristores se puede rectificar la señal obtenida de la red.

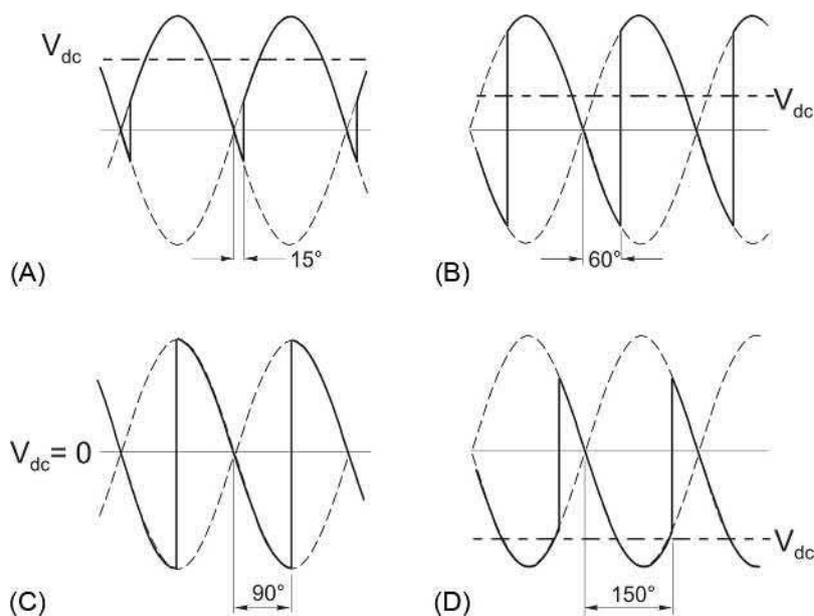


Figura 2-38: Señal de salida de SCR para distintos ángulos de disparo- Hughes A., Drury B. *Electric Motors and Drives. Fundamentals, Types and Applications* (2019)

A medida que el ángulo de encendido se incrementa (más retrasado) menor es la tensión media de salida. Esto sucede mientras el ángulo no supere los 90° . Si se supera habrá breves periodos en los que la tensión de salida se vuelve negativa, y debido al inductor central, la corriente se suaviza, pero no se vuelve cero. Esto quiere decir que habrá circulación de corriente en sentido de derecha a izquierda, invirtiendo los papeles entre el inversor y el rectificador.

Esto es clave ya que permite al variador de frecuencia devolver energía de la carga hacia la red, y esto es importante cuando se quiere utilizar un motor sincrónico en modo de generador.

Según se expuso anteriormente la potencia puede fluir en cualquier dirección entre el enlace de CC y el motor. Sin embargo, el rectificador de diodos simple que se utiliza a menudo entre el suministro de la red pública y los terminales de CC del inversor no permite que la potencia fluya de vuelta a la red, por lo tanto, un variador de frecuencia de CA basado en esta configuración no puede utilizarse cuando se requiere que la alimentación fluya desde el motor hasta la red eléctrica. A primera vista, es de esperar que esta limitación cause un problema en casi todas las aplicaciones cuando se trata de parar un proceso y la maquina accionada tiene que

ser frenada por un motor, en este caso sería frenar el contrapesado del AIB. Entonces esta energía cinética debe disiparse y, durante la aceleración activa, la potencia fluye del motor al circuito de CC, lo que hace que la tensión en el condensador del circuito de CC aumente para reflejar la energía adicional almacenada.

Para evitar que se dañe el circuito de alimentación, la mayoría de los sistemas de control de accionamientos industriales incluyen una protección contra sobretensión del enlace de CC. Esta protección desconecta el inversor si la tensión del enlace CC supera un umbral, pero se trata, en el mejor de los casos, de un último recurso.

Para superar este problema, el rectificador de diodos puede complementarse con un circuito de resistencia de frenado mostrado en la siguiente figura

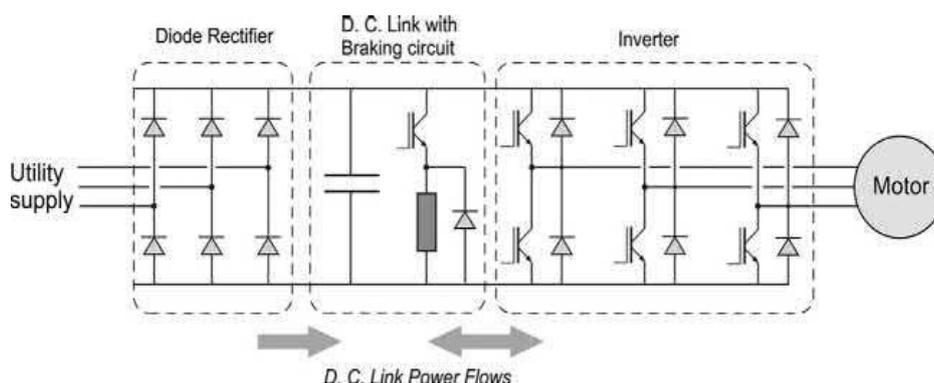


Figura 2-39: Variador de frecuencia de motor con Resistencia de Frenado- Hughes A., Drury B. *Electric Motors and Drives. Fundamentals, Types and Applications* (2019)



Figura 2-40: Fotografía de tablero de control con resistencia de frenado en pozo con motor de imán permanente.

De esta forma, cuando la tensión de enlace de CC supere la tensión umbral de frenado, el dispositivo de conmutación se cierra y conduce esa sobretensión a la resistencia, siempre y cuando la resistencia de frenado tenga una resistencia lo suficientemente baja como para absorber más potencia que la potencia que fluye desde el inversor. La tensión del enlace empezará a caer y el dispositivo de conmutación se desconectará de nuevo al bajar la tensión umbral.

2.10.1.1 Freno regenerativo

Una forma alternativa de gestionar el flujo de energía del inversor a la red pública es el rectificador activo, o freno regenerativo, en el que el rectificador de diodos se sustituye por un inversor IGBT.

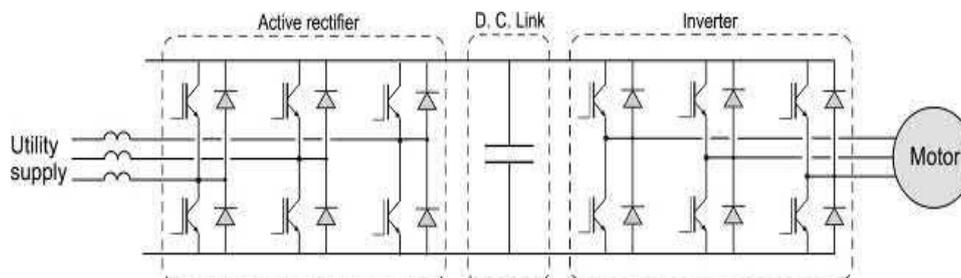


Figura 2-41: Variador de frecuencia con freno regenerativo- Hughes A., Drury B. *Electric Motors and Drives. Fundamentals, Types and Applications* (2019)

Cuando el motor genera energía se invierten los papeles del conjunto de diodos, los que rectificaban ahora invierten, y los que invierten ahora rectifican permitiendo el pasaje directo de la energía desde el motor a la red eléctrica.

Algunas de las ventajas para esta configuración serían:

- Mayor eficiencia que utilizar una resistencia de frenado, ya que la energía no se pierde en forma de calor si no que se devuelve a la red eléctrica.
- La forma de la señal de corriente de entrada será de buena calidad, es decir, tendrá baja distorsión armónica de la red eléctrica.
- El factor de potencia del suministro puede controlarse hasta llegar a la unidad. Aprovechando el 100% de la potencia activa.

La desventaja es que este tipo de rectificadores es mucho más caro que un simple rectificador de diodos y una resistencia de frenado.

2.10.2 2° Etapa: Control

En principio para controlar la etapa de potencia alcanza con una fuente de frecuencia de precisión, también llamado oscilador, que controle la conmutación del inversor. Pero esta forma de control es por fuera del motor y puede ocasionar eventos de desincronización. Hoy en día el principal método de control es el Control Vectorial.

2.10.2.1 Control vectorial

Es la principal forma de controlar el motor en lazo cerrado. La principal ventaja consiste en la posibilidad de controlar cuanta corriente se destina al par y al flujo. En otras palabras, cuanta potencia activa y reactiva se utiliza.

Para el motor de imán permanente, es factible evitar que el motor pierda sincronismo con el campo magnético giratorio generador en el estator. Esto se logra bloqueando la frecuencia de alimentación a la velocidad del rotor.

Recordando nuevamente el circuito equivalente del motor de imán permanente de la figura 2-24 se tiene que la tensión en bornes del rotor E es proporcional al flujo del imán permanente y a la velocidad de giro del rotor, la cual es proporcional a la frecuencia de la tensión V del estator. Una vez especificada la frecuencia de alimentación, se conocerá la magnitud de la tensión E . Por la regla de la mano izquierda la tensión es perpendicular al campo, por ende, perpendicular al flujo generado por los imanes.

A diferencia del motor de rotor excitado, el motor de imán permanente no tiene control de corriente sobre el rotor, entonces no hay posibilidad de ajustarla para obtener un factor de potencia unitario. En el motor de imán permanente, la corriente del estator se ajusta por sí misma para satisfacer el requisito de que el flujo resultante resulte constante. Como resultado, no se tiene control sobre el factor de potencia.

Con un motor alimentado con variador de frecuencia se controla tanto la tensión como la frecuencia, de modo que junto con el par de carga ahora se cuenta con tres variables independientes.

El diagrama fasorial de la figura 2-41 representa un caso de subexcitación, es decir que, para esta velocidad, la f.e.m en circuito abierto (E) del estator es inferior a la tensión en aplicada en bornes (V). Se elige como referencia horizontal el flujo del imán (Φ_{mag}) dado que permanece constante debido a los imanes permanentes. Como se indicó anteriormente el triángulo de tensiones es equivalente al triángulo de flujos, debido a que cada flujo es proporcional a su tensión

- $\Phi_{\text{mag}} \propto E$
- $\Phi_{\text{arm}} \propto IX_s$
- $\Phi_{\text{res}} \propto V$

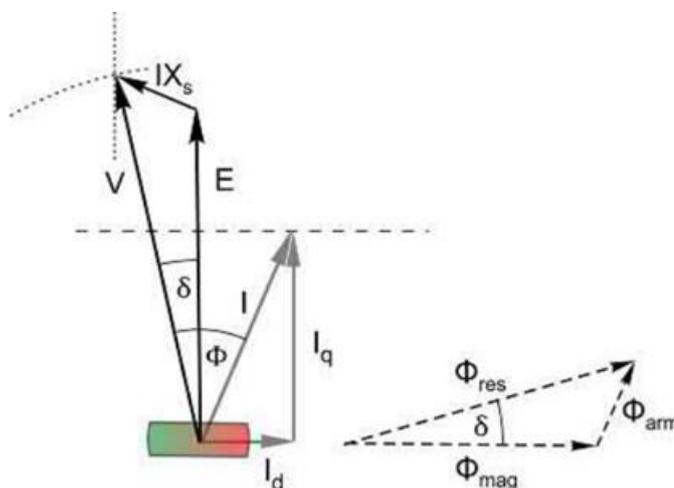


Figura 2-42: Diagrama fasorial de motor síncrono con imán permanente- Hughes A., Drury B. *Electric Motors and Drives. Fundamentals, Types and Applications* (2019)

Una vez establecida la frecuencia se define la magnitud de E , y el fasor perpendicular al flujo del imán. Suponiendo que no hay pérdidas de flujo por saliencia, las pérdidas del motor serían

únicamente por el bobinado del estator (IX_s). Entonces el flujo resultante será determinado por el voltaje aplicado y la frecuencia. Luego la magnitud del flujo resultante es perpendicular a V .

Despreciando la autoinducción en el rotor, φ_{arm} es el flujo que se establecerá si la corriente del inducido existiera solamente. Entonces la magnitud y dirección de este flujo solo depende de la magnitud y fase de la corriente de estator (I).

El flujo resultante Φ_{res} está determinado por la tensión y la frecuencia aplicada en el estator. Por lo tanto, debe estar en cuadratura con la tensión V .

La f.e.m autoinducida en el estator se modela mediante la tensión que atraviesa la reactancia inductiva efectiva del estator, X_s , por lo que, en el diagrama fasorial, la tensión IX_s se encuentra en cuadratura con la corriente del estator.

Entonces:

$$V = E + I X_s$$

Ecuación 2-21

La otra variable independiente es el par de carga. En el estado estacionario, el par del motor debe ser igual al par de la carga. El par del motor es proporcional al producto de la corriente (I), el flujo del imán (φ_{mag}) y el seno del ángulo entre ellos ($\sin \delta$), en otras palabras, equivale a decir que el par es proporcional al producto entre el flujo del imán y la componente de la corriente perpendicular al flujo del imán (φ_{mag}) denominado I_q . Por lo tanto, el par de la carga determina la componente de la corriente total I que se destina para producir esa potencia activa mientras que la componente perpendicular a E denominado I_d es la componente reactiva. Entonces el área del triángulo de flujos es un indicador inmediato del par realizado por el motor.

Ajustando V para que la corriente del estator esté en fase con E ($I_d = 0$), el par por amper de corriente del estator será máximo, y por tanto la mínima la pérdida de cobre en el estator para ese par concreto: si se ignora la pérdida en el hierro, esta sería la condición más eficiente.

En el control vectorial se elige una tensión de alimentación y una frecuencia adecuada fijando los valores de I_q e I_d para controlar el factor de potencia aplicada a la carga. Si $V \gg E$ o viceversa, la corriente que circularía por el estator sería muy grande lo cual no es deseable debido a las pérdidas del cobre y el calentamiento del estator

2.10.2.2 Circuito de control

El motor de imán permanente utiliza el circuito inversor presentado en la figura 2-42 donde se utilizan los IGBT como conmutador y un diodo antiparalelo para el flujo de la potencia reactiva debido a que el motor es una carga inductiva

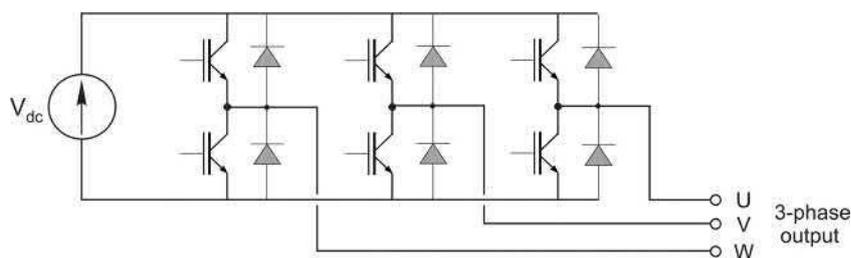


Figura 2-43: Circuito de potencia inversor de tres fases- Hughes A., Drury B. Electric Motors and Drives. Fundamentals, Types and Applications (2019)

El IGBT es un dispositivo híbrido que combina las mejores características del MOSFET (facilidad de conexión y desconexión del Gate a partir de circuitos lógicos de bajo consumo) y del BJT (disipación de potencia relativamente baja en el circuito colector-emisor). Son adecuados para potencias y tensiones medias. La corriente de carga va del colector al emisor, como en el BJT.

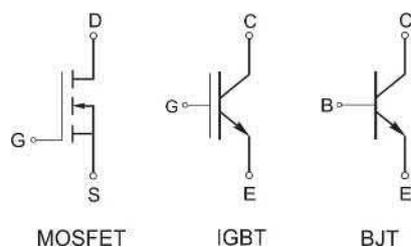


Figura 2-44: Simbología para equipos de conmutación- Hughes A., Drury B. *Electric Motors and Drives. Fundamentals, Types and Applications* (2019)

Un control típico de un motor de imán permanente es el mostrado en la Figura 22-45:

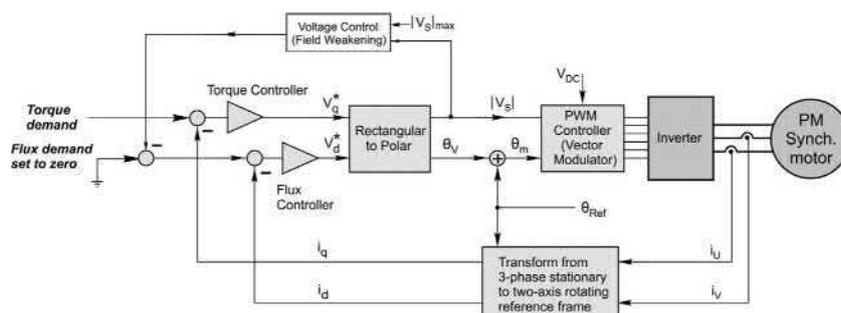


Figura 2-45: Esquema de control vectorial para motor sincrónico de imán permanente. - Hughes A., Drury B. *Electric Motors and Drives. Fundamentals, Types and Applications* (2019)

El flujo de referencia es cero debido a que el flujo es constante generado por los imanes. El torque requerido por la carga proporciona una componente de flujo de la corriente del estator que podrá aumentar o disminuir el efecto del flujo del imán, dependiendo de la polaridad de la señal de referencia. La realimentación de tensión permite disminuir el flujo del campo para poder funcionar en la zona de debilitamiento y poder trabajar a mayores velocidades. Recordando que la zona de debilitamiento de campo ocurre cuando se supera la velocidad nominal del motor, el torque disminuye y el flujo del estator aumenta. Una reducción de la tensión de entrada o aumento de la frecuencia refleja una reducción del flujo, dado que es proporcional a la relación V/f .

El debilitamiento de campo entonces permite ampliar el rango de velocidades del motor, pero esto requiere corriente adicional, por lo que el motor se vuelve menos eficiente en el rango de debilitamiento de campo. Esta forma de control también aumenta las pérdidas del rotor y eleva la temperatura del material magnético, aumentando así el riesgo de desmagnetización.

3 Metodología y Desarrollo

3.1 Evaluación de proyecto

3.1.1 Análisis de costo de ciclo de vida de motor de imán permanente

Para la licitación de la empresa proveedora de la tecnología se expresaron las condiciones necesarias para el cumplimiento de las tareas exigidas en las operaciones diarias.

Todos los datos de costos fueron brindados por referentes de Pan American con año de vigencia en 2021

Se compararon dos alternativas para motores de AIB:

- Motor convencional (asíncrono) con VDF
- Motor de imán permanente con VDF

Estas alternativas son comparadas con los motores asíncronos con arranque directo que son utilizados actualmente.

Se consideraron tanto los casos de pozo nuevo, como con recambio de motor asíncrono a un motor de imán permanente en un pozo existente con su respectivo análisis de sensibilidad para distintos valores de producción.

3.1.2 Condiciones de borde para el análisis de costo de vida

Debido a que una evaluación de proyectos conlleva estimar los beneficios y costos futuros asociados, se deben hacer la mayor aproximación posible obteniendo toda la información que esté al alcance.

➤ CONSUMO ENERGÉTICO MEDIDO CON AIB CON MOTOR VDF:

Se realizaron mediciones de consumo energético en las tres fases de la red en distintos pozos que tengan una producción similar, ubicados en puntos geográficos distintos. Esto implica tener una población representativa del yacimiento ya que los pozos son de

distintas profundidades, los AIB pueden ser distintos y el petróleo pueden tener distintas propiedades lo que le da una variabilidad a la carga del motor.

Entonces según la Tabla 3-1, luego de tomar distintas mediciones, se considera el promedio de consumo en 30KW para pozos por una producción aproximada de 2,7 m³/día

Pozo	Fase A			Fase B			Fase C			Total			Comentario
	Min	Average	Max	Min	Average	Max	Min	Average	Max	Min	Average	Max	
PJ-842	0,6 kW	9,6 kW	27,4 kW	0,6 kW	9,4 kW	27,0 kW	0,6 kW	9,6 kW	27,4 kW	1,9 kW	28,5 kW	81,7 kW	Con VDF
PCH-817	0,9 kW	6,1 kW	17,4 kW	0,9 kW	6,1 kW	17,5 kW	1,2 kW	6,2 kW	17,1 kW	3,0 kW	18,4 kW	52,0 kW	Con VDF
PJ-823	0,9 kW	9,8 kW	23,1 kW	0,9 kW	9,5 kW	22,5 kW	0,8 kW	9,6 kW	22,9 kW	2,5 kW	28,9 kW	68,5 kW	Con VDF
PLP-809	0,8 kW	12,3 kW	29,7 kW	0,8 kW	12,3 kW	29,6 kW	0,7 kW	12,0 kW	29,1 kW	2,3 kW	36,5 kW	88,4 kW	Con VDF
PVH-1420	0,8 kW	6,2 kW	17,8 kW	1,0 kW	6,5 kW	18,1 kW	0,7 kW	6,2 kW	17,8 kW	2,5 kW	18,8 kW	53,6 kW	Con VDF
PVH-1519	0,8 kW	2,7 kW	9,2 kW	0,8 kW	2,7 kW	9,0 kW	0,8 kW	2,9 kW	9,6 kW	2,4 kW	8,3 kW	27,8 kW	Con VDF
PVH-1520	2,5 kW	4,2 kW	6,6 kW	2,5 kW	4,2 kW	6,7 kW	2,3 kW	4,0 kW	6,4 kW	7,2 kW	12,4 kW	19,7 kW	VDF apagado al medir
										Promedio	3,1 kW	21,7 kW	55,9 kW
										Consumo considerado	30,0 kW		

Tabla 3-1: Mediciones de consumo de potencia de distintos AIB- Gerencia Energía GSJ – Sistema eléctrico Cerro Dragon 2022

➤ DATOS UTILIZADOS:

- Precio del barril de petróleo: 50 USD
- Potencia por pozo: 30KW
- Ahorro energético con MIP: 8% (proporcionado por fabricante)
- Costo de la energía: 50 USD /MWh
- Factor de servicio del pozo: 0,9
- Producción promedio de petróleo: 2,7m³/día
- Producción promedio de gas: 1015,82 m³/día
- Costo cuadrilla EBT: 114,7 USD/hr
- Tasa de retorno: 10%
- Plazo de análisis: 15 años

➤ COSTOS EQUIPOS

AIB:

Modelo	Precio [US\$]
L MII 912-168	145.940
W Maximizer II 912-365-168	86.469

➤ CUADRILLAS
MANTENIMIENTO

Cuadrilla	Precio [U\$/h]
Mecánica	162
Eléctrica	114,7
Instrumentación	92

➤ COSTOS INICIALES DISTINTAS TECNOLOGIAS

Equipo	Item	Costo [USD]
Motor Convencional	Motor WEG 920 RPM 100 HP	8472,45
	Tablero (Electro Patagonia)	6671
	CORREA BANDA D-285 SUP 32X21,3MMX285.8"	731,87
	Cubre correa	1650,65
	Polea	218,72
	Costo Total	17744,69
Motor con VDF	Motor WEG 920 RPM 100 HP	8472,45
	Tablero con VDF	8667
	CORREA BANDA D-285 SUP 32X21,3MMX285.8"	731,87
	Cubre correa	1650,65
	Polea	218,72
	Costo Total	19740,69*
	Diferencia con Motor Convencional	1996
Motor Iman Permanente	Cipor MDIP-912-28.72-5.2	23188
	Tablero con VDF	8667
	Costo Total	31855**
	Diferencia con Motor Convencional	14110,31

Tabla 3-2: Costos iniciales distintas tecnologías

*En el caso de cambio de un motor convencional ya instalado, se considera un costo adicional de 458,8 USD, equivalente a 4hs de cuadrilla de EBT, para cambio de tablero.

**En el caso de cambio de un motor convencional ya instalado, se considera un costo adicional de 917,6 USD equivalente a 8 hs de cuadrilla de EBT, para montaje del nuevo motor y desmontaje del existente

No se consideró el costo de compensación de armónicos, ya que, de acuerdo con estudios realizados mediante simulaciones del sistema de distribución de potencia, el mismo resulta necesario para una incorporación masiva de motores de imán permanente (>66%)

Una vez decidida la empresa que prestara los servicios de montaje y disposición del motor se realiza un proyecto de prueba con duración de 1 mes. El objetivo de este ensayo es evaluar la performance del equipo en un pozo elegido con un AIB determinado. Si el equipo no presenta

problemas de integración, fallas severas mecánicas o eléctricas en el periodo de ensayo habilitará la compra de más unidades con las mismas características:

Motor de prueba CIPOR	
Item	Costo [USD]
Montaje	2500
Alquiler	9000
Tablero (con VDF convencional)	6671
Precio motor MDIP-912-75	25000
Total alquiler	18171
Total compra	34171

Item	Costo unitario [USD]	Cantidad	Costo total [USD]
Motor MDIP-912-100	35633	3	106899
Acople MDIP-912-100	3089	1	3089
Sellos Internos del acople (Repuesto)	98	1	98
Instalación del motor en el AIB [hr]	225	3	675
Soldadura de base AIB [hr]	240	9	2160
Alineación [hr]	225	3	675
Conexión de motor [hr]	225	1,5	338
Parametrización del VFD [hr]	225	3	675
Asistencia en locación para la puesta en marcha [GI]	1000	3	3000
Base Motor MDIP-912-100	800	3	2400
Tablero (con VDF regenerativo) *	8005	3	24016
Total			144024

*La ingeniería del tablero fue tercerizada y se estimó un costo del 20% adicional con respecto al tablero convencional.

➤ **COSTOS MANTENIMIENTO:**

El análisis se realiza considerando una producción de 2,7m³/día de petróleo, lo cual equivale al promedio de producción de un AIB

MOTOR CONVENCIONAL

Correctivo - Motor Convencional						
Item	MTTF[Años]	MTTR[Hs]	Fallas por año	Horas por año	Costo mtto anual [USD]	Costo DT anual [USD]
Correa	2,28	4,0	0,44	1,75	536,56	401,09
Cubre Correa	12,81	4,0	0,08	0,31	164,65	71,48
Cambio de Regimen	1,00	1,5	1,00	1,50	172,03	62,44
Rodamiento	10,00	4,0	0,10	0,40	53,38	16,65
Sensor Velocidad	2,28	1,0	0,44	0,44	51,99	18,23
Tablero	3,00	4,0	0,33	1,33	153,92	55,50
Total			2,39	5,74	1132,53	625,38

Preventivo - Motor Convencional						
Item	Frec[años]	Cuadrilla[Hs]	Cantidad por año	Horas por año	Costo total mtto [USD]	Costo total DT [USD]
Mtto Electrico c/15 meses (HR 1103)	1,25	3	0,8	2,4	344,07	124,87

MOTOR CON VDF

Correctivo - Motor Convencional con VDF						
Item	MTTF[Años]	MTTR[Hs]	Fallas por año	Horas por año	Costo mtto anual [USD]	Costo DT anual [USD]
Correa	3,28	4,0	0,30	1,22	373,11	278,91
Cubre Correa	12,81	4,0	0,08	0,31	164,65	71,48
Cambio de Regimen	0,00	1,0	0,00	0,00	0,00	0,00
Rodamiento	10,00	4,0	0,10	0,40	53,38	16,65
Sensor Velocidad	3,28	1,0	0,30	0,30	36,15	12,68
Tablero	3,00	4,0	0,33	1,33	153,92	55,50
Total			1,12	3,57	781,20	435,21

Preventivo - Motor Convencional con VDF						
Item	Frec[años]	Cuadrilla[Hs]	Cantidad por año	Horas por año	Costo total mtto [USD]	Costo total DT [USD]
Mtto Electrico Anual (HR 1103)	1,25	3,1	0,8	2,48	365,54	129,03

El MTTF de la correa está calculado en base a la curva de confiabilidad de los motores donde se instaló un VDF

Se adiciono 0,1hs por limpieza de VDF

MOTOR IMAN PERMANENTE

El uso de un motor de imán permanente acoplado directamente en el eje del AIB permite prescindir del equipo de transmisión de potencia. El único mantenimiento preventivo que se realiza es rellenar el recipiente de aceite refrigerante del motor una vez al año. Esto reduce mucho el costo de mantenimiento anual en comparación con las otras tecnologías.

Correctivo - Motor imán permanente (MIP)						
Item	MTTF[Años]	MTTR[Hs]	Fallas por año	Horas por año	Costo mtto anual [USD]	Costo DT anual [USD]
Correa	0,00	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00
Rodamiento	15,00	4,0	0,07	0,27	41,58	11,10
Sensor Velocidad	3,00	2,0	0,33	0,67	76,79	27,75
Tablero	3,00	4,0	0,33	1,33	153,92	55,50
Total			0,73	2,27	272,29	94,35

Preventivo - Motor imán permanente (MIP)						
Item	Frec[años]	Cuadrilla[Hs]	Cantidad por año	Horas por año	Costo total mtto [USD]	Costo total DT [USD]
Mtto Electrico Anual (HR 1103)	1,25	2,8	0,8	2,24	331,13	116,55

Se adiciono 0,1 hs adicionales para la limpieza del variador, y se le restaron 0,3hs correspondientes a tareas de correa y polea ya que no se aplican con el motor de imán permanente.

3.1.3 Análisis de alternativas para pozo nuevo

Una vez analizados todos los costos de mantenimientos correctivos y predictivos se realiza el flujo de caja indicando los ingresos y egresos de dinero para llevar a cabo el proyecto

Se consideraron como costos de inversión el costo adicional que implica cada alternativa con respecto al motor convencional.

3.1.3.1 Flujo de caja

Para proyectar las ganancias del proyecto se analiza la información de beneficios y egresos bajo los costos mostrados anteriormente (costo de cuadrilla, precio de barril de oil, producción del pozo, etc).

El objetivo del cambio de tecnología no es aumentar la cantidad producida por un pozo, si no, aumentar la confiabilidad y eficiencia de la operación. Es decir, producir lo mismo, pero con un costo menor, lo que equivale a un aumento de productividad operacional. Por consiguiente, el único ingreso a en cuenta en este análisis es el ahorro de costos de mantenimiento y de consumo energético. El precio de venta del petróleo viene definido por el mercado por lo cual, al producir con un menor costo, los beneficios aumentan.

Para pozo nuevo:

Egreso inicial: Compra del equipo indicado en la tabla 3-2

Egresos anuales: Costo anual energía – (Mtto anual correctivo + costo DT anual correctivo)
– (Mtto anual preventivo + Costo DT anual preventivo)

Ingreso: Ahorro de costos respecto al motor convencional

Se tomará en un periodo de 15 años con una tasa de descuento definida por la gerencia de 10% y realizando el balance de ingresos y egresos tenemos:

Equipo	Variable	Año															
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Motor convencional	Inversion	-17.744,69	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Costo energia	0,00	-11.826,00	-11.826,00	-11.826,00	-11.826,00	-11.826,00	-11.826,00	-11.826,00	-11.826,00	-11.826,00	-11.826,00	-11.826,00	-11.826,00	-11.826,00	-11.826,00	-11.826,00
	Costo mtto correctivo	0,00	-1.132,53	-1.132,53	-1.132,53	-1.132,53	-1.132,53	-1.132,53	-1.132,53	-1.132,53	-1.132,53	-1.132,53	-1.132,53	-1.132,53	-1.132,53	-1.132,53	-1.132,53
	Costo DT mtto correctivo	0,00	-625,38	-625,38	-625,38	-625,38	-625,38	-625,38	-625,38	-625,38	-625,38	-625,38	-625,38	-625,38	-625,38	-625,38	-625,38
	Costo mtto preventivo	0,00	-354,07	-354,07	-354,07	-354,07	0,00	-354,07	-354,07	-354,07	0,00	-354,07	-354,07	-354,07	0,00	-354,07	-354,07
	Costo DT mtto Preventivo	0,00	-124,87	-124,87	-124,87	0,00	-124,87	-124,87	-124,87	-124,87	0,00	-124,87	-124,87	-124,87	0,00	-124,87	-124,87
	TOTAL	-17.744,69	-14.062,85	-14.062,85	-14.062,85	-13.583,91	-14.062,85	-14.062,85	-14.062,85	-14.062,85	-13.583,91	-14.062,85	-14.062,85	-14.062,85	-13.583,91	-14.062,85	-14.062,85
Motor con VDF	Inversion	-19.740,69	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
	Costo energia	0,00	-11.826,00	-11.826,00	-11.826,00	-11.826,00	-11.826,00	-11.826,00	-11.826,00	-11.826,00	-11.826,00	-11.826,00	-11.826,00	-11.826,00	-11.826,00	-11.826,00	
	Costo mtto correctivo	0,00	-781,20	-781,20	-781,20	-781,20	-781,20	-781,20	-781,20	-781,20	-781,20	-781,20	-781,20	-781,20	-781,20	-781,20	
	Costo DT mtto correctivo	0,00	-435,21	-435,21	-435,21	-435,21	-435,21	-435,21	-435,21	-435,21	-435,21	-435,21	-435,21	-435,21	-435,21	-435,21	
	Costo mtto preventivo	0,00	-365,54	-365,54	-365,54	0,00	-365,54	-365,54	-365,54	0,00	-365,54	-365,54	-365,54	0,00	-365,54	-365,54	
	Costo DT mtto preventivo	0,00	-129,03	-129,03	-129,03	0,00	-129,03	-129,03	-129,03	-129,03	0,00	-129,03	-129,03	-129,03	0,00	-129,03	-129,03
	TOTAL	-19.740,69	-13.536,99	-13.536,99	-13.536,99	-13.042,42	-13.536,99	-13.536,99	-13.536,99	-13.042,42	-13.536,99	-13.536,99	-13.536,99	-13.042,42	-13.536,99	-13.536,99	
Flujo de caja motor VDF contra motor convencional	-1.996,00	525,86	525,86	525,86	541,49	525,86	525,86	525,86	541,49	525,86	525,86	525,86	541,49	525,86	525,86		
Ahorro acumulado	-1.996,00	-1.470,14	-944,27	-418,41	123,09	648,95	1.174,81	1.700,68	2.242,17	2.768,04	3.293,90	3.819,76	4.361,26	4.887,12	5.412,99		
Motor iman permanente	Inversion	-31.855,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
	Costo energia	0,00	-10.879,92	-10.879,92	-10.879,92	-10.879,92	-10.879,92	-10.879,92	-10.879,92	-10.879,92	-10.879,92	-10.879,92	-10.879,92	-10.879,92	-10.879,92	-10.879,92	
	Costo mtto correctivo	0,00	-272,29	-272,29	-272,29	-272,29	-272,29	-272,29	-272,29	-272,29	-272,29	-272,29	-272,29	-272,29	-272,29	-272,29	
	Costo DT mtto correctivo	0,00	-94,35	-94,35	-94,35	-94,35	-94,35	-94,35	-94,35	-94,35	-94,35	-94,35	-94,35	-94,35	-94,35	-94,35	
	Costo mtto preventivo	0,00	-331,13	-331,13	-331,13	0,00	-331,13	-331,13	-331,13	0,00	-331,13	-331,13	-331,13	0,00	-331,13	-331,13	
	Costo DT mtto Preventivo	0,00	-116,55	-116,55	-116,55	0,00	-116,55	-116,55	-116,55	0,00	-116,55	-116,55	-116,55	0,00	-116,55	-116,55	
	TOTAL	-31.855,00	-11.694,24	-11.694,24	-11.694,24	-11.246,56	-11.694,24	-11.694,24	-11.694,24	-11.246,56	-11.694,24	-11.694,24	-11.694,24	-11.246,56	-11.694,24	-11.694,24	
Flujo de caja motor IP contra motor convencional	-14.110,31	2.368,61	2.368,61	2.368,61	2.337,35	2.368,61	2.368,61	2.368,61	2.337,35	2.368,61	2.368,61	2.368,61	2.337,35	2.368,61	2.368,61		
Ahorro acumulado	-14.110,31	-11.741,70	-9.373,09	-7.004,48	-4.667,13	-2.298,52	70,09	2.438,70	4.776,05	7.144,66	9.513,27	11.881,88	14.219,23	16.587,84	18.956,45		

Tabla 3-3: Flujo de caja para pozo nuevo

Para pozo existente:

En el caso de que ya esté operativo con un motor convencional, se le hará el recambio a motor + VDF o motor de imán permanente involucrando el costo de la cuadrilla empleada para la tarea. Es importante destacar que los motores convencionales reemplazados no son puestos en venta por lo que no se realiza un análisis de depreciación del valor y no se incluyen en el estudio de costos.

Egreso inicial: (Compra del equipo indicado en la tabla 3-2) + (Costo Cuadrilla * cantidad de horas)

Egresos anuales: Costo anual energía – (Mtto anual correctivo + costo DT anual correctivo)
– (Mtto anual preventivo + Costo DT anual preventivo)

Ingreso: Ahorro de costos respecto al motor convencional

Al igual que con el pozo nuevo, la tasa de descuento definida por la gerencia de proyectos es del 10% en un periodo de 15 años.

Equipo	Variable	Año															
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Motor convencional	Inversion	-17.744,69	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Costo energia	0,00	-11.826,00	-11.826,00	-11.826,00	-11.826,00	-11.826,00	-11.826,00	-11.826,00	-11.826,00	-11.826,00	-11.826,00	-11.826,00	-11.826,00	-11.826,00	-11.826,00	-11.826,00
	Costo mtto correctivo	0,00	-1.132,53	-1.132,53	-1.132,53	-1.132,53	-1.132,53	-1.132,53	-1.132,53	-1.132,53	-1.132,53	-1.132,53	-1.132,53	-1.132,53	-1.132,53	-1.132,53	-1.132,53
	Costo DT mtto correctivo	0,00	-625,38	-625,38	-625,38	-625,38	-625,38	-625,38	-625,38	-625,38	-625,38	-625,38	-625,38	-625,38	-625,38	-625,38	-625,38
	Costo mtto preventivo	0,00	-354,07	-354,07	-354,07	0,00	-354,07	-354,07	-354,07	0,00	-354,07	-354,07	-354,07	0,00	-354,07	-354,07	-354,07
	Costo DT mtto Preventivo	0,00	-124,87	-124,87	-124,87	0,00	-124,87	-124,87	-124,87	-124,87	0,00	-124,87	-124,87	-124,87	0,00	-124,87	-124,87
	TOTAL	-17.744,69	-14.062,85	-14.062,85	-14.062,85	-13.583,91	-14.062,85	-14.062,85	-14.062,85	-13.583,91	-14.062,85	-14.062,85	-14.062,85	-13.583,91	-14.062,85	-14.062,85	-14.062,85
Motor con VDF	Inversion	-26.870,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
	Costo energia	0,00	-11.826,00	-11.826,00	-11.826,00	-11.826,00	-11.826,00	-11.826,00	-11.826,00	-11.826,00	-11.826,00	-11.826,00	-11.826,00	-11.826,00	-11.826,00	-11.826,00	-11.826,00
	Costo mtto correctivo	0,00	-781,20	-781,20	-781,20	-781,20	-781,20	-781,20	-781,20	-781,20	-781,20	-781,20	-781,20	-781,20	-781,20	-781,20	-781,20
	Costo DT mtto correctivo	0,00	-435,21	-435,21	-435,21	-435,21	-435,21	-435,21	-435,21	-435,21	-435,21	-435,21	-435,21	-435,21	-435,21	-435,21	-435,21
	Costo mtto preventivo	0,00	-365,54	-365,54	-365,54	0,00	-365,54	-365,54	-365,54	0,00	-365,54	-365,54	-365,54	0,00	-365,54	-365,54	-365,54
	Costo DT mtto preventivo	0,00	-129,03	-129,03	-129,03	0,00	-129,03	-129,03	-129,03	-129,03	0,00	-129,03	-129,03	-129,03	0,00	-129,03	-129,03
	TOTAL	-26.870,45	-13.536,99	-13.536,99	-13.536,99	-13.042,42	-13.536,99	-13.536,99	-13.536,99	-13.042,42	-13.536,99	-13.536,99	-13.536,99	-13.042,42	-13.536,99	-13.536,99	-13.536,99
Flujo de caja motor VDF contra motor convencional	-9.125,76	525,86	525,86	525,86	541,49	525,86	525,86	525,86	541,49	525,86	525,86	525,86	541,49	525,86	525,86	525,86	
Ahorro acumulado	-9.125,76	-8.599,89	-8.074,03	-7.548,16	-7.006,67	-6.480,81	-5.954,94	-5.429,08	-4.887,58	-4.361,72	-3.835,86	-3.309,99	-2.768,50	-2.242,63	-1.716,77	-1.190,91	
Motor iman permanente	Inversion	-32.772,51	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
	Costo energia	0,00	-10.879,92	-10.879,92	-10.879,92	-10.879,92	-10.879,92	-10.879,92	-10.879,92	-10.879,92	-10.879,92	-10.879,92	-10.879,92	-10.879,92	-10.879,92	-10.879,92	-10.879,92
	Costo mtto correctivo	0,00	-272,29	-272,29	-272,29	-272,29	-272,29	-272,29	-272,29	-272,29	-272,29	-272,29	-272,29	-272,29	-272,29	-272,29	-272,29
	Costo DT mtto correctivo	0,00	-94,35	-94,35	-94,35	-94,35	-94,35	-94,35	-94,35	-94,35	-94,35	-94,35	-94,35	-94,35	-94,35	-94,35	-94,35
	Costo mtto preventivo	0,00	-331,13	-331,13	-331,13	0,00	-331,13	-331,13	-331,13	0,00	-331,13	-331,13	-331,13	0,00	-331,13	-331,13	-331,13
	Costo DT mtto Preventivo	0,00	-116,55	-116,55	-116,55	0,00	-116,55	-116,55	-116,55	0,00	-116,55	-116,55	-116,55	0,00	-116,55	-116,55	-116,55
	TOTAL	-32.772,51	-11.694,24	-11.694,24	-11.694,24	-11.246,56	-11.694,24	-11.694,24	-11.694,24	-11.246,56	-11.694,24	-11.694,24	-11.694,24	-11.246,56	-11.694,24	-11.694,24	-11.694,24
Flujo de caja motor IP contra motor convencional	-32.772,51	2.368,61	2.368,61	2.368,61	2.337,35	2.368,61	2.368,61	2.368,61	2.337,35	2.368,61	2.368,61	2.368,61	2.337,35	2.368,61	2.368,61	2.368,61	
Ahorro acumulado	-32.772,51	-30.403,90	-28.035,29	-25.666,68	-23.329,33	-20.960,72	-18.592,11	-16.223,50	-13.886,15	-11.517,54	-9.148,93	-6.780,32	-4.442,97	-2.074,36	294,25	2.662,86	

Tabla 3-4: Flujo de caja para pozo existente

3.1.3.2 Valor actual neto

El VAN del proyecto es el valor que tiene el proyecto al principio de su planeación. Es la diferencia de egresos e ingresos expresados en moneda actual.

$$VAN = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+k)^t} = -I_0 + \frac{F_1}{(1+k)} + \frac{F_2}{(1+k)^2} + \dots + \frac{F_n}{(1+k)^n}$$

Ecuación 3-1

Donde:

- F_t son los flujos de ingreso y egreso en cada periodo t
- I_0 es la inversión inicial ($t = 0$)
- N es el número de periodos (años en este caso)
- K es el tipo de descuento o interés exigido a la inversión

El valor calculado de VAN define:

Si $VAN > 0$: El valor actualizado de los cobros y pagos futuros de la inversión, a la tasa exigida generara beneficios

Si $VAN = 0$: El proyecto de inversión no generara beneficios ni pérdidas a la tasa exigida.

Si $VAN < 0$: El proyecto de inversión generará pérdidas, por lo que deberá ser rechazado.

Se calcula entonces el VAN utilizando los flujos de caja del motor con VDF y el motor de imán permanente con respecto al motor convencional mostrada en las tablas 3-3 y 3-4:

Para pozo nuevo:

- VAN Motor convencional + VDF: 2026,71 USD
- VAN Motor Imán Permanente: 3859,63 USD

Graficando los ahorros obtenidos con respecto al motor sincrónico sin variador se visualiza que, si bien el costo inicial es muy grande para el motor de imán permanente, desde el primer año el ahorro es mayor al del motor sincrónico con VDF. Estos ahorros podrán ser acumulados para determinar los años de repago de la inversión inicial en la Figura 3-2.



Figura 3-1: Ahorro con respecto a motor convencional

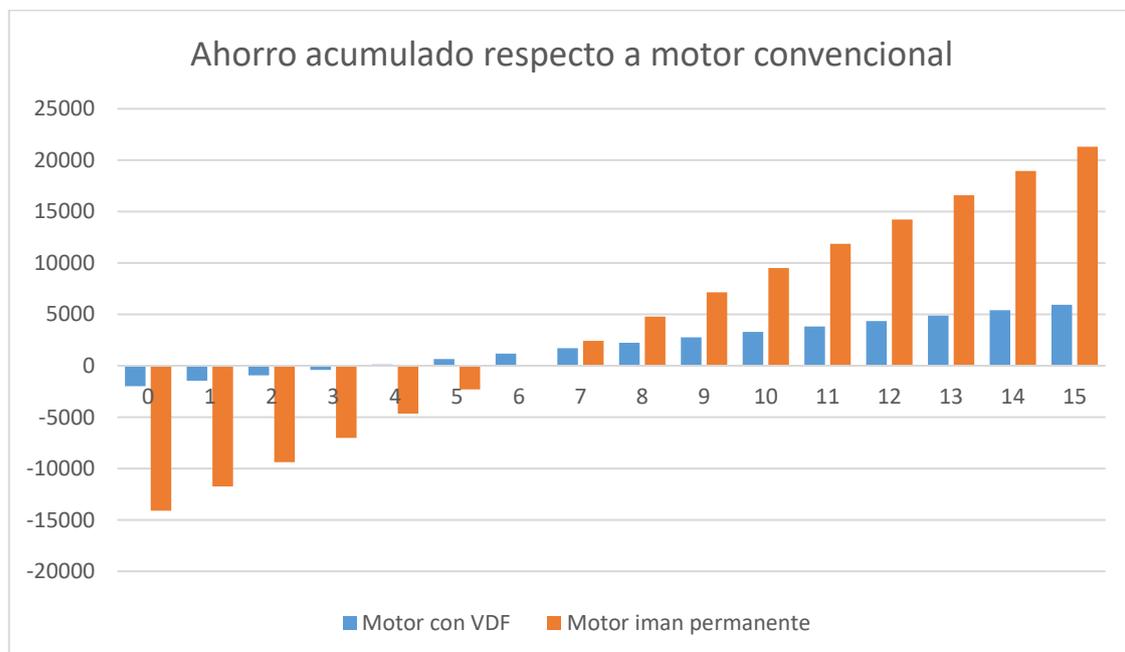


Figura 3-2: Ahorro acumulado de motor imán permanente contra motor de inducción

Tiempos de repago:

- 4,77 años para motor convencional con VDF (VAN de 2026,18 USD)
- 6,97 años para motor de imán permanente (VAN de 3859,63 USD)

Para pozo existente:

- VAN Motor convencional: **-5103,05 USD**
- VAN Motor Imán permanente: **-14802,57 USD**

Reemplazar el motor convencional existente indica un VAN negativo para el caso de un motor con VDF y de imán permanente. Esto se debe a que todos los cálculos realizados en el flujo de caja fueron en base a un pozo con una producción muy baja (2,7m³/día) indicado en los datos utilizados en la sección 3.1.2. Es decir que una primera conclusión sería que una inversión para agregar un variador de frecuencias al motor o cambiar la tecnología de motor convencional a imán permanente en un pozo de 2,7 m³/día de producción no sería rentable como se puede ver en la Figura 3-3. Se puede realizar un análisis de sensibilidad para determinar que producciones permitirían que esta inversión genere beneficios.

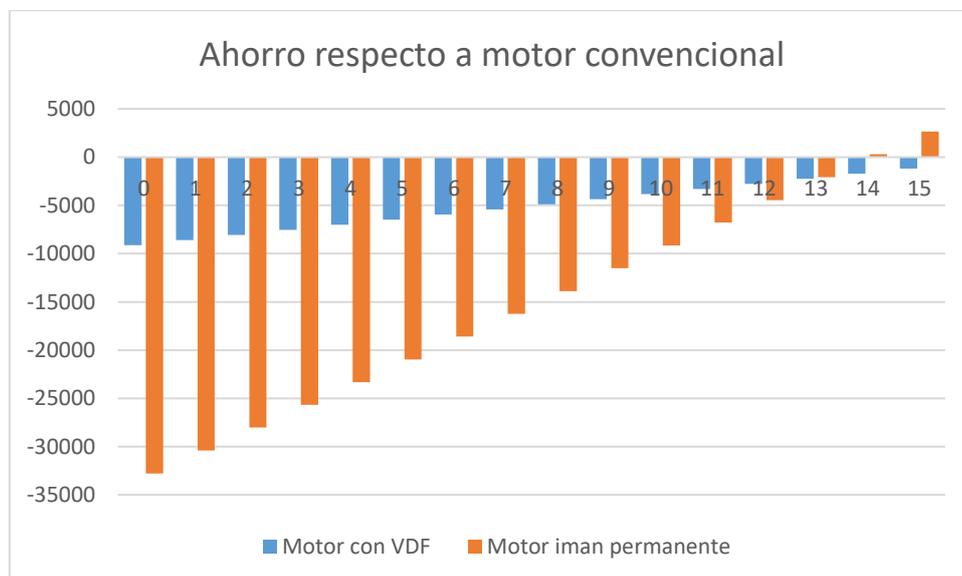


Figura 3-3: Ahorro respecto a motor convencional para pozo existente

3.1.4 Análisis de sensibilidad según producción para pozos nuevos:

Consiste en modificar variables que afecten directamente a los beneficios del proyecto, de a una a la vez para ver que sucede con la rentabilidad del proyecto, es decir, analizar el VAN en función de las variables.

Para la industria del petróleo, la variable más crítica es la producción neta de cada pozo, es decir cuantos metros cúbicos de petróleo saco y cuanto puedo sacar. La producción del pozo es indicador de la importancia y prioridad que se le dará en caso de necesitar alguna intervención ya sea para llegar a la producción teórica o para realizar mantenimientos correctivos.

En el Golfo de San Jorge los pozos productores varían su producción en el rango de 1m³/día a 30 m³/día. Existen pozos excepcionales que pueden superar estos valores, pero son pozos que recién fueron perforados o adecuados y cuya producción aún no está estabilizada.

Entonces considerando como variable critica a la producción de pozos se observará cómo es la recuperación de la inversión y cómo varía el VAN en los siguientes gráficos.

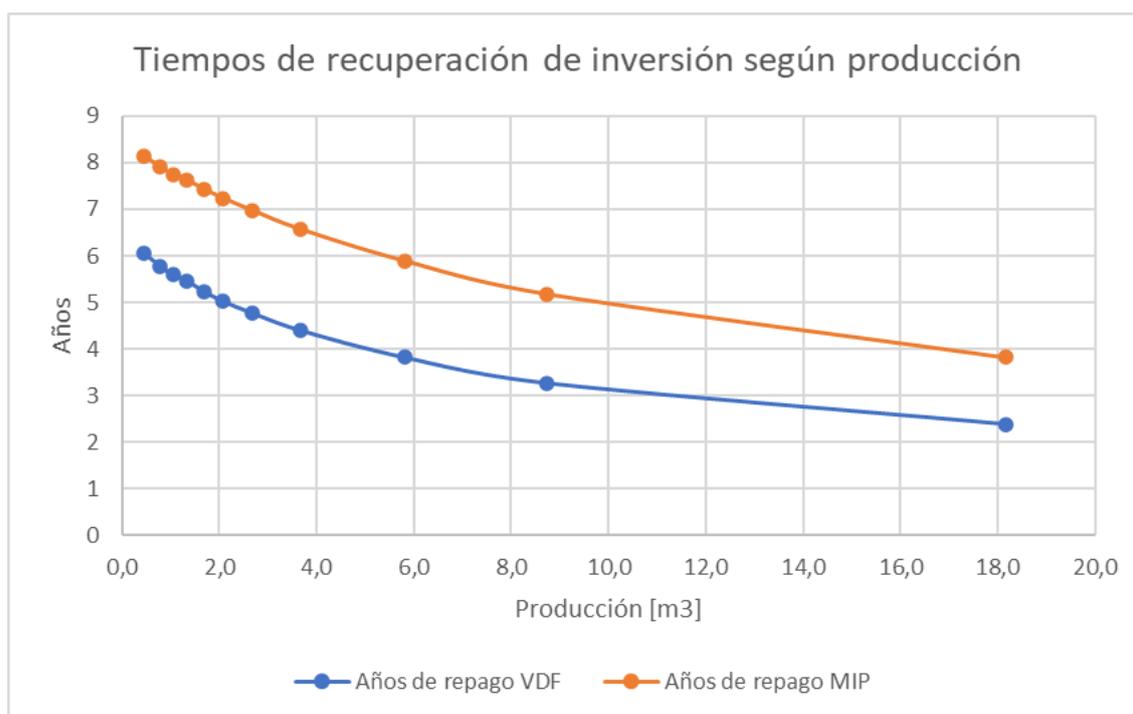


Figura 3-4: Tiempos de recuperación de inversión de MIP según producción de petróleo

El tiempo de repago de la inversión siempre será menor en el caso del motor convencional con VDF debido al menor costo inicial con respecto al motor de imán permanente. En los pozos con producción baja el tiempo de repago no supera los 8 años.

Según la figura 3-4 ambos proyectos son viables para un pozo nuevo ya que $VAN > 0$, pero en el caso del motor de imán permanente presenta una curva de VAN mayor que la alternativa de motor convencional con VDF

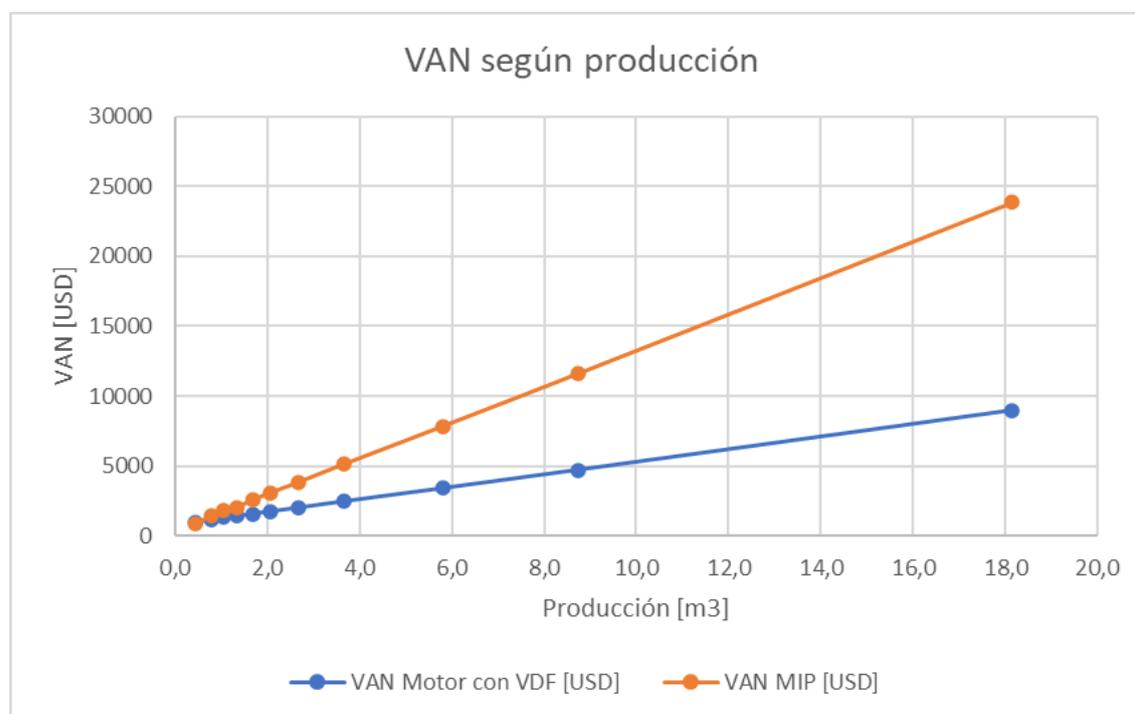


Figura 3-5: VAN según producción de petróleo para pozo nuevo

3.1.5 Análisis de sensibilidad según producción para instalación en pozo existente

Se plantea ahora la situación de cambiar un motor de imán permanente a un pozo ya operativo con motor asíncrono.

En este caso es necesario emplear las cuadrillas para el montaje del motor, ya que se trata de un recambio de motores, sumando esto al costo inicial.

Es fácil ver que el tiempo de recuperación de la inversión serán mayores debido a que los costos iniciales son mayores. Pero a medida que la producción del pozo aumenta, el tiempo de recuperación cae. Esto es debido a que cuanto menor es la producción de un pozo, es menor la diferencia entre el costo de mantenimiento y el petróleo obtenido, es decir, menor beneficios.

Debido al casi nulo mantenimiento del MIP, esta saca provecho para pozos de menor producción, pero debido a la inversión inicial puede que no se cumplan las expectativas que indica el VAN.

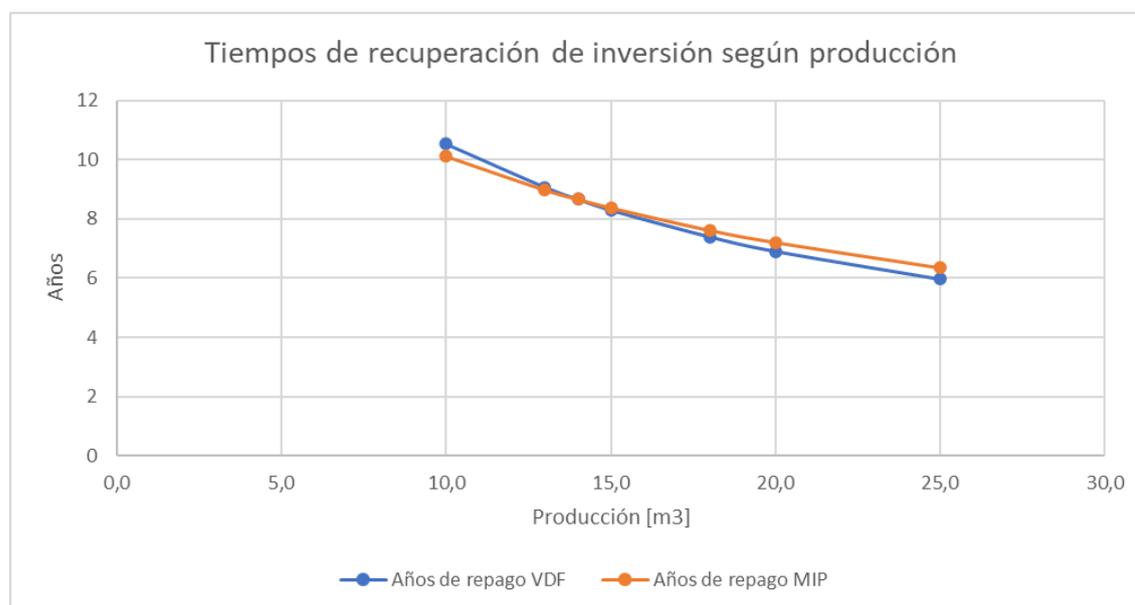


Figura 3-6: Tiempo de repago de inversión según producción

Los mayores ahorros se dan en la disminución/eliminación de corte de correa, y en ahorro energético. Se considero un ahorro de 8%, de acuerdo con las pruebas del fabricante, pero queda pendiente validar este valor con diferentes mediciones.

Para el caso de recambio del motor existente, el mismo resulta económicamente viable para pozos de más de 15m³/día de producción de petróleo ya que el VAN se hace positivo como muestra la siguiente figura lo cual aseguraría el cumplimiento de las expectativas impuestas.

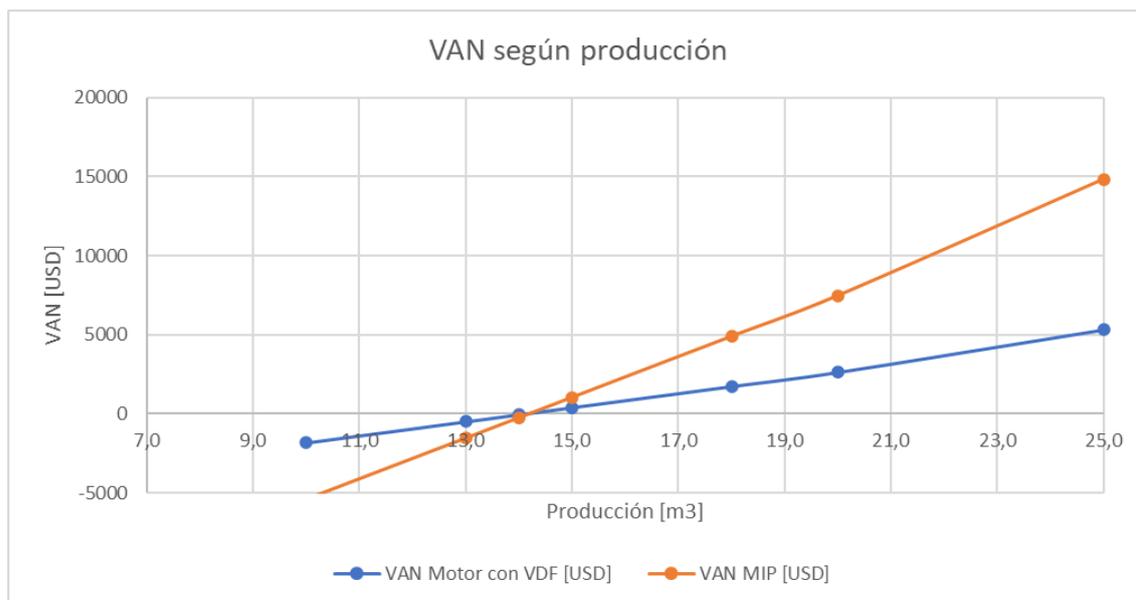


Figura 3-7: VAN según producción de petróleo para recambio de tecnología

3.2 Desarrollo

Como primera implementación se utilizó un motor de prueba otorgado por la empresa proveedora cuyas características son presentadas en la Tabla 3-5. La contratista fue la encargada de colocar todos los recursos disponibles para la instalación (cuadrillas, materiales). Las características del motor de imán permanente de prueba son las indicadas en la siguiente figura.

Tipo de motor	Imán permanente (IPM)
Potencia	75 HP
Voltaje nominal	380 V
Corriente nominal	92.9 A
Frecuencia nominal	74.5 Hz
Velocidad nominal	149 rpm
Cantidad de Polos	60
Eficiencia	93.2 %
Factor de potencia	0.983
Aislamiento Clase	H
Protección	IP55
Método de refrigeración	IC410
Servicio	S1

Tabla 3-5: características motor imán permanente de prueba- CIPOR S.R.L (2020)

Se puede ver que la forma del motor es de un espesor pequeño, pero con un radio más grande. La inercia depende del radio del motor a la cuarta potencia, esto permite que el motor responda lo menos posible ante variaciones de carga. Por lo tanto, como un pozo productor varía constantemente sus cargas será necesario un motor de gran diámetro.

El motor posee un recipiente de aceite refrigerante y lubricante que debe mantenerse a nivel para la correcta operación del motor. El único mantenimiento que posee el motor de forma anual es la reposición de aceite, el cual no requiere que se remueva el motor del equipo de bombeo. El consumo de aceite será menor si el pozo se encuentra en un régimen estable, es decir que no tenga cambios de GPM, o intervenciones de químicos, presencia de gas, etc.



Figura 3-8: Motor de imán permanente- CIPOR S.R.L (2020)

3.2.1 Instalación y montaje

Para la instalación del equipo se debe soldar un base soporte del motor directamente en el AIB, para ello es necesario un camión con Hidro grúa para el levantamiento del motor, y una cuadrilla de soldadores.

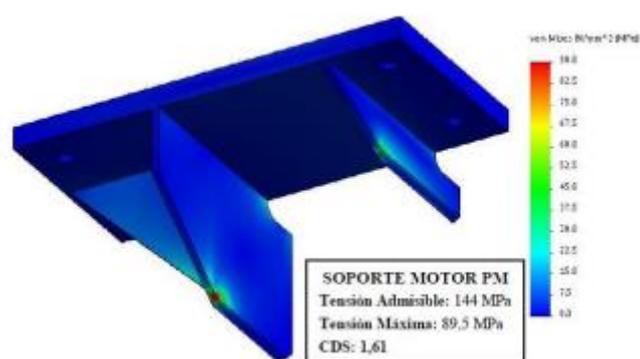


Figura 3-9: Soporte para motor de imán permanente- CIPOR S.R.L (2020)



Figura 3-10: Montaje de motor de imán permanente- CIPOR S.R.L (2020)

Una complicación que surge es que si el motor no es lo suficientemente angosto puede chocar o rozar con la manivela del contrapesado generando un gran problema. Con la posibilidad de alimentar los motores de imán permanente con energía de la red mediante variador de frecuencia permitió la libertad en el diseño del motor, por lo cual fue posible fabricarlo de forma más angosta y con un mayor radio.

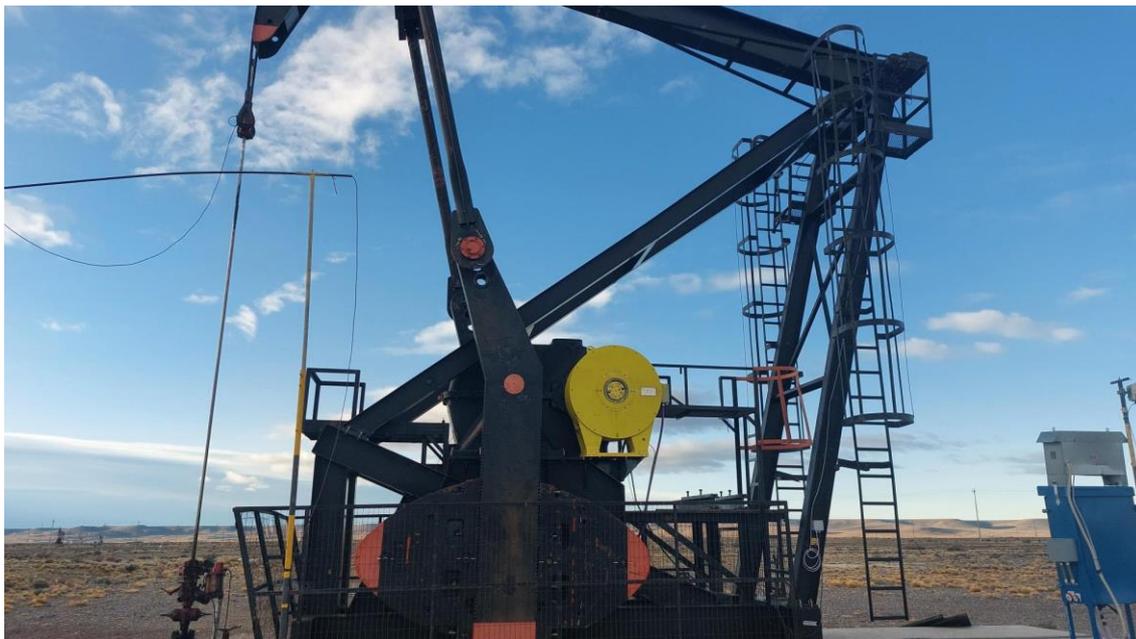


Figura 3-11: Motor de imán permanente ya montado sobre AIB en pozo productor

3.2.2 Mediciones eléctricas

Se realizó las mediciones de potencia e inyección de armónicos en el mismo pozo con ambas tecnologías. Es decir, en un principio con el motor de inducción y luego con el motor de imán permanente cuando quedó en funcionamiento. Cabe destacar que el pozo se encuentra funcionando con una resistencia de frenado en el variador de frecuencia debido a que por problemas de importaciones el proveedor no logró entregar los variadores con regenerador de energía.

El instrumento utilizado fue un Lufkin analizador de señales el cual se lo colocó en las tres fases ubicado entre el variador de frecuencias y el motor de imán permanente como indica la Figura 3-11.

Este instrumento puede registrar durante horas las potencias, energías, armónicos, tensiones etc. de las tres fases de salida del variador de frecuencias. Quedó pendiente realizar la misma

medición, pero entre el la línea distribución y el variador de frecuencia, para ver como es el comportamiento de la carga variador + motor que ve la red eléctrica.



Figura 3-12: Colocación de equipo Fluke en variador de frecuencia

4 Resultados

Las mediciones fueron tomadas durante cada ocasión (una para motor imán permanente y otra para motor de inducción) en un tiempo de 12 horas continuas de medición. Estos archivos guardados en una memoria pueden ser analizadas en el programa Power Log que puede ser descargado desde la página de Fluke.

Las mediciones principales fueron potencia consumida, factor de potencia ($\cos \phi$) y los armónicos generados en tensión.

Debido a que la medición se realizó entre el variador y el motor de imán permanente no se pudieron obtener tener resultados concretos cuantitativamente debido al ruido medido por consecuencia del variador de frecuencia. Lo mismo ocurre con el motor de inducción. Pero se observa de manera general como es que el motor de imán permanente se comporta de mejor manera que el motor de inducción.

4.1 Potencia consumida

Empezando por la potencia activa consumida total entre las tres fases podemos ver como el motor de imán permanente muestra una mejora del consumo respecto al motor de inducción.

Para cada instante de tiempo se tiene un valor máximo (Rojo), un valor mínimo (Verde) y un valor medio (Negro) de consumo de potencia. El motor de inducción muestra una diferencia abismal con respecto al motor de imán permanente en lo que refiere al consumo (50KW del motor de inducción vs 4KW del MIP). Esto se debe a la ubicación del equipo de medición a la salida del variador de frecuencia que distorsiona fuertemente la corriente medida debido a la gran potencia de los armónicos mostrada en la figura 4-8

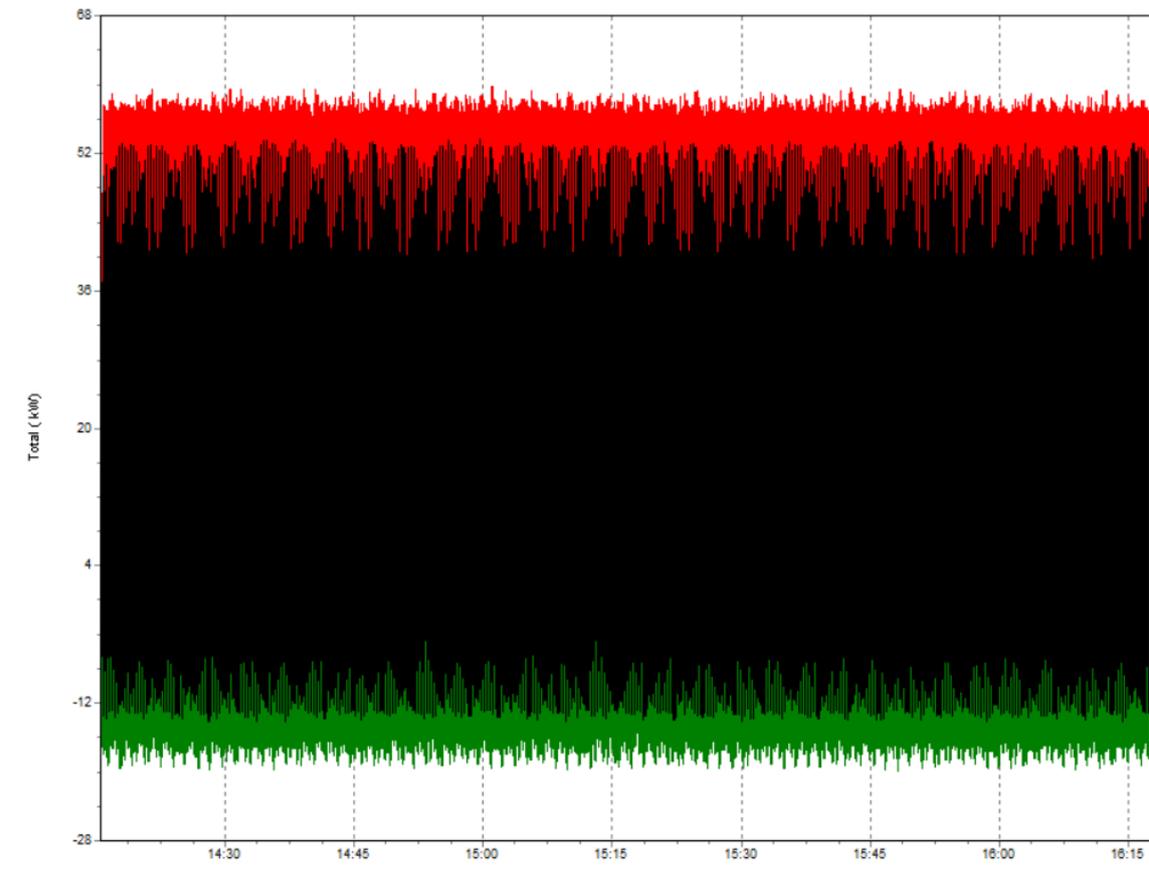


Figura 4-1: Potencia activa consumida en motor convencional

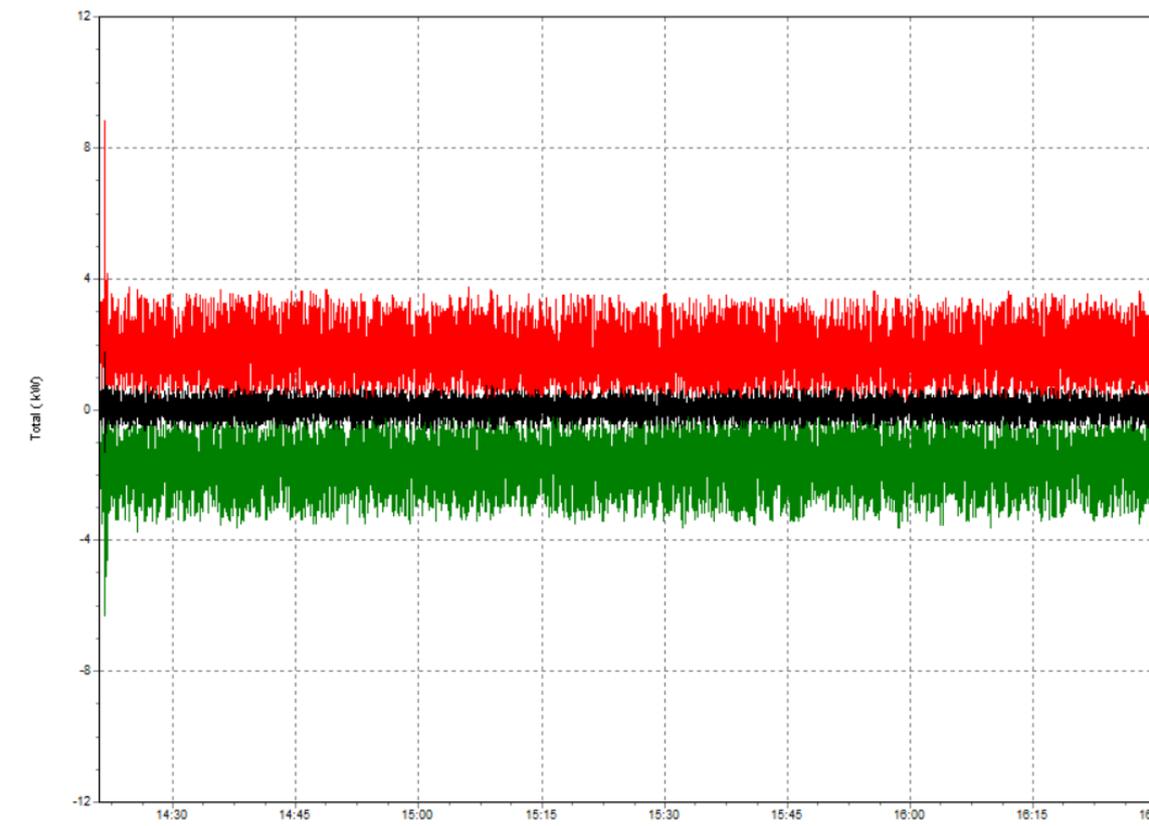


Figura 4-2: Potencia activa consumida en motor de imán permanente

4.2 Factor de Potencia

Otro indicador analizado fue el factor de potencia $\cos \varphi$ el cual me indica el factor de potencia que tendría el motor con respecto a la carga presentada. El motor de inducción presenta picos máximos de 0,87 mientras que el motor de imán permanente llega al valor unitario de factor de potencia. Es decir toda la energía es convertida en activa. Recordando que mediante el control vectorial el motor de imán permanente permite variar la tensión de alimentación y la frecuencia para que la corriente generada por los imanes se aplique puramente en potencia activa.

Los valores negativos del factor de potencia indican que el motor devuelve energía al variador. Esto ocurre dos veces durante cada ciclo de bombeo del AIB. Para el motor de inducción la tensión generada es soportada por el variador, mientras que para el motor de imán

permanente la tensión generada es tan alta que es necesario colocar una resistencia de frenado (posteriormente un regenerador de energía) que permitiera desviar esa energía del inversor y evitara que el motor se pare por sobretensión.

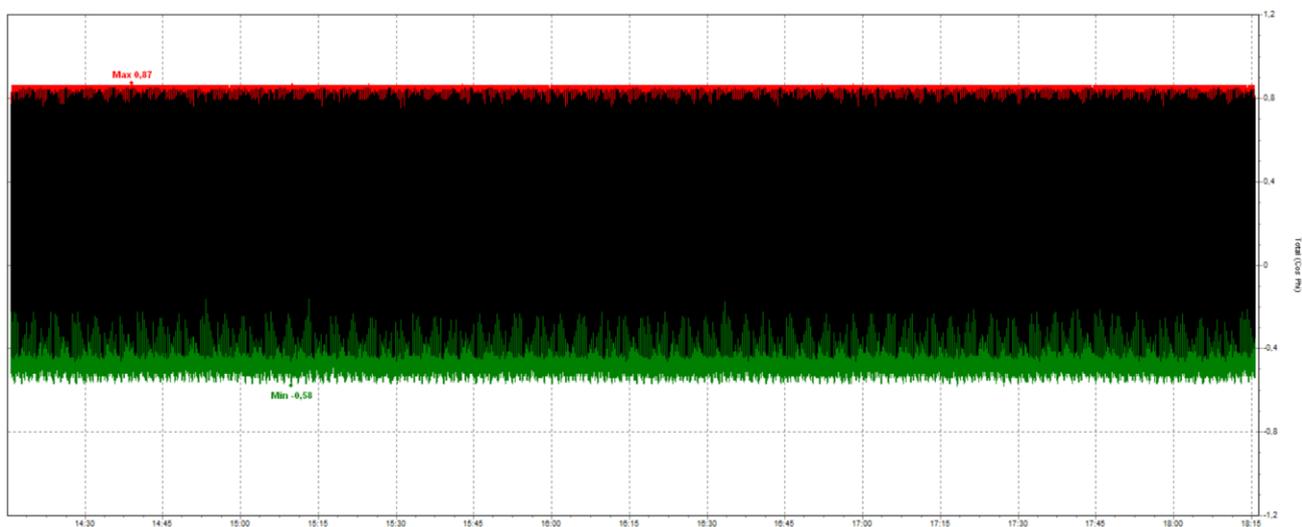


Figura 4-3: Cos phi motor de inducción

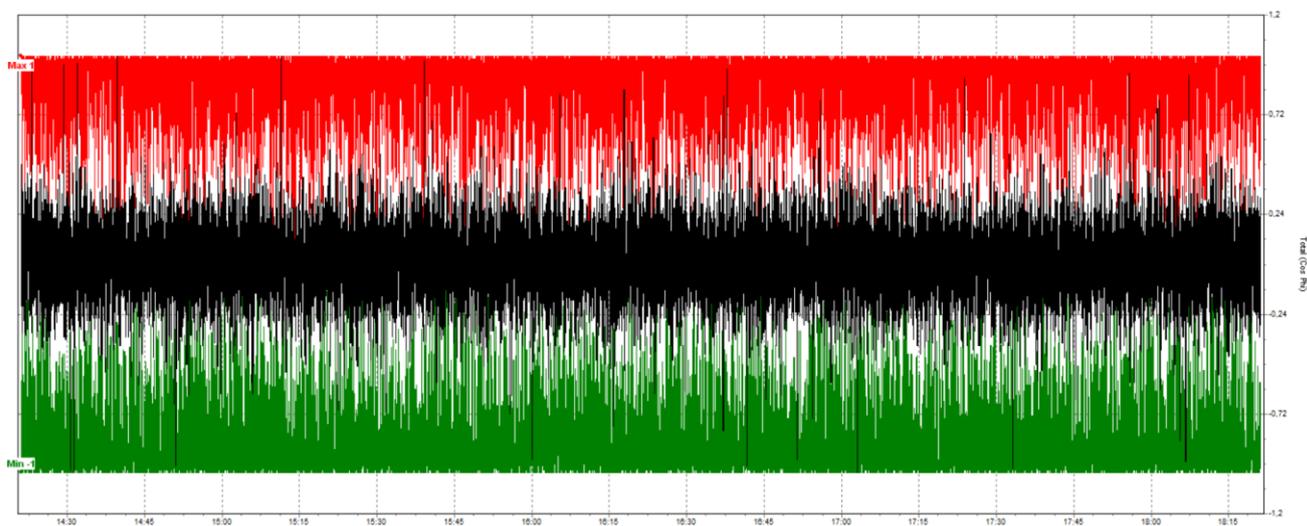


Figura 4-4: Cos phi motor de imán permanente

4.3 Inyección de armónicos

Los armónicos nos referen al THD o distorsión armónica total en su traducción al español. Es decir, el porcentaje de deformación de la señal fundamental con la que es alimentado el motor debido a la presencia de un variador de frecuencia.

$$THD = \frac{\sum \text{Potencia de los armónicos}}{\text{Potencia de la frecuencia fundamental}} = \frac{P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n}{P_1}$$

Ecuación 4-1

Es necesario recordar que un VDF está compuesto por rectificadores controlados e inversores que constantemente se abren y cierran “cortando” la señal, estos cambios bruscos de señal generan armónicos en todas las frecuencias pero son más intensas en los órdenes múltiplos de 6 ± 1 , es decir:

Los armónicos tienen más amplitud en el orden 5 y 7; 11 y 13; 17 y 19 etc...

Esto se debe a que los variadores de frecuencia son normalmente de 6 puntos, es decir poseen 6 diodos controlados que rectifican la señal. Así mismo, para los variadores de 12 puntos los órdenes de armónicos más importantes serán los 11 y 13; 23 y 25; etc.

El valor máximo admitido de THD es de hasta un 10%. Si fuese mayor se debe agregar un banco de filtros que me permitan disminuir esa distorsión.

En las mediciones realizadas se observa que los THD son bastante aceptables en el motor convencional. Pero el motor de imán permanente entrega valores aún más reducidos de armónicos.

THD motor de inducción:

- Fase 1: 7,035%
- Fase 2: 6,707%

- Fase 3: 12%

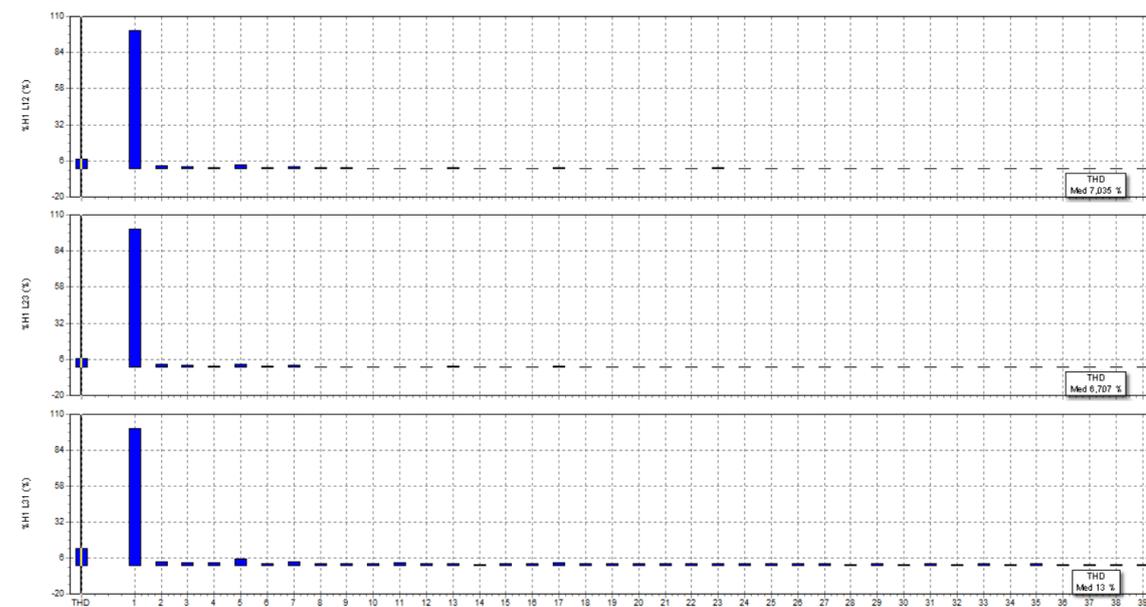


Figura 4-5: Armónicos de tensión de motor convencional

THD motor de imán permanente:

- Fase 1: 3,508%
- Fase 2: 3,451%
- Fase 3: 3,549%

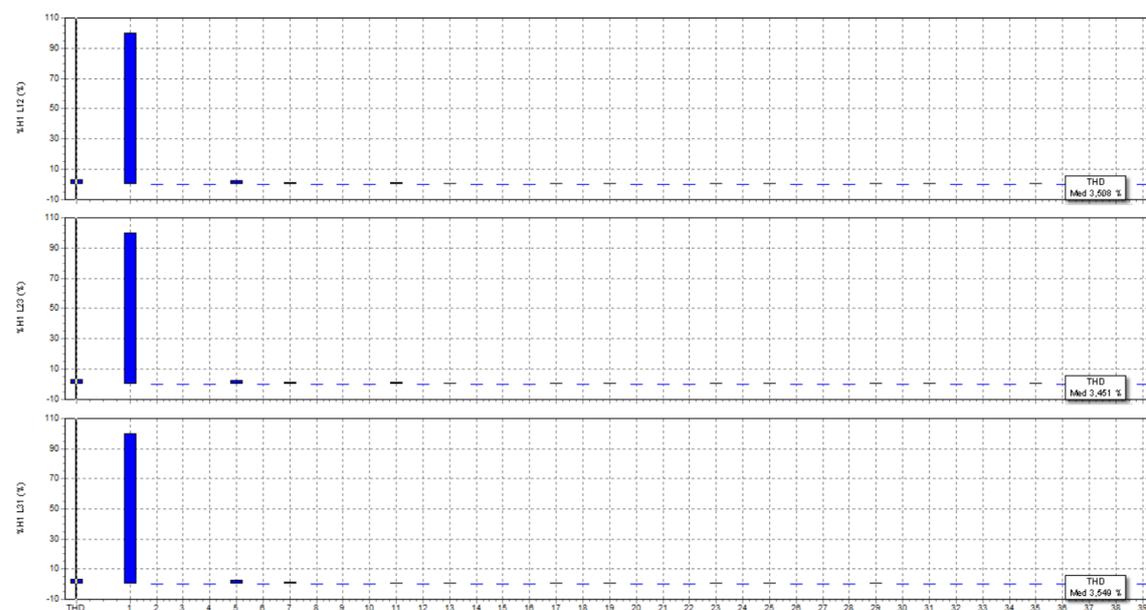


Figura 4-6: Armónicos de tensión en motor de imán permanente

Analizando ahora los armónicos de corriente tenemos las siguientes mediciones:

THD motor de inducción mostrada en la figura 4-7:

- Fase 1: 7,918%
- Fase 2: 8,457%
- Fase 3: 8,385%

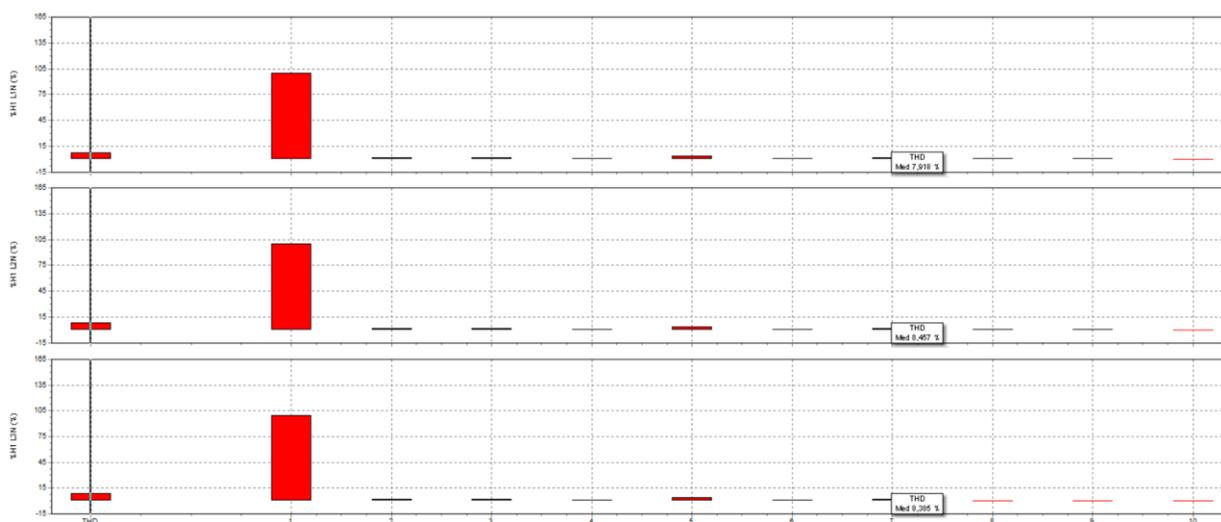


Figura 4-7: Armónicos de corriente de motor convencional

THD de corriente para motor de imán permanente mostrado en la figura 4-8:

- Fase 1: 206,45%
- Fase 2: 207,09%
- Fase 3: 206,55%

Estos valores indican la cantidad de distorsión armónica presente en la forma de onda de la corriente que está consumiendo el instrumento conectado a la salida del variador de frecuencia, por lo que los resultados medidos de corriente y por lo tanto de potencia eléctrica son erróneos. Motivo por el cual la potencia de consumo del motor de imán permanente da muy por debajo de la potencia del motor de inducción.

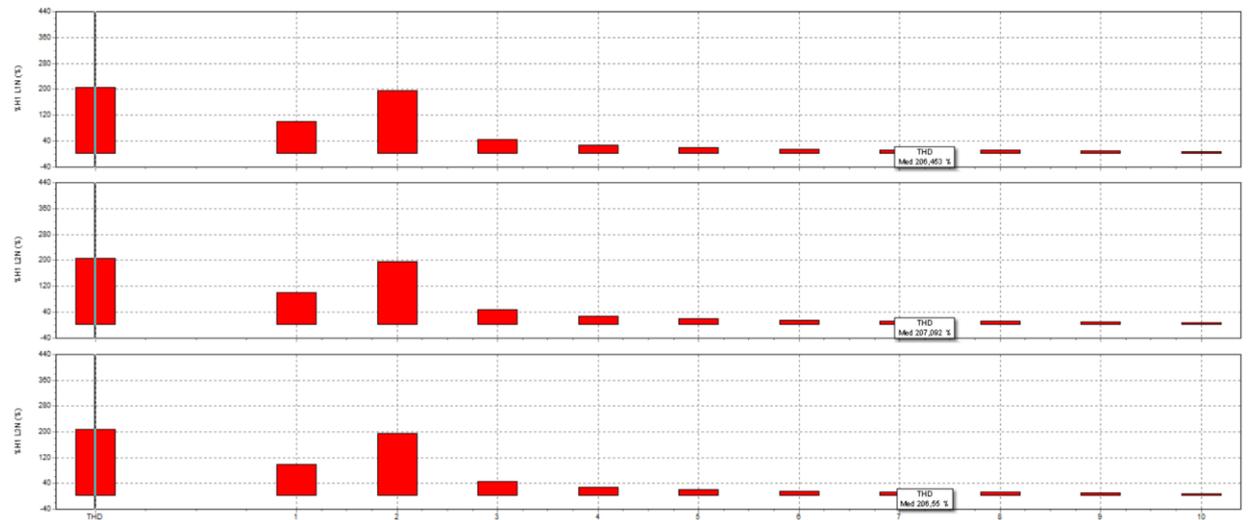


Figura 4-8: Armónicos de corriente para motor de imán permanente

4.4 Reducción de huella de carbono

Se observó que el consumo promedio de un motor de inducción en los pozos del Golfo San Jorge es de 30Kwh aproximadamente. Considerando el reemplazo del motor por uno de imán permanente y asumiendo un ahorro del 15% será factible decir que:

Consumo de energía de un MIP:

$$30Kwh \times 0,85 = 25,5 kWh$$

Ecuación 4-2

Calculando el consumo anual se tiene:

$$25,5 kWh \times 8760 = 223,38 \frac{MW}{año}$$

Ecuación 4-3

Lo que implica un ahorro de:

$$(30 \text{ kWh} \times 8760) - 223,38 \frac{\text{MW}}{\text{año}} = 39,42 \frac{\text{MW}}{\text{año}}$$

Ecuación 4-4

Considerando un factor de emisión de CO₂ de **233 gr/kWh** obtenido por la gerencia de energía a partir de la eficiencia de la planta del ciclo combinado y de la calidad del gas utilizado para la generación como indica la siguiente ecuación

$$\text{CO}_2 \left(\frac{\text{Kg}}{\text{kWh}} \right) = \text{Cont. de C del gas natural} \left(\frac{\text{kgCH}_4}{\text{kWh}} \right) * \frac{\text{Factor de emision GWP}}{\text{Eficiencia Ciclo Combinado}}$$

Ecuación 4-5

Obtenemos entonces:

$$233 \frac{\text{gr}}{\text{kWh}} \times 39,42 \frac{\text{MW}}{\text{año}} = 9,18 \frac{\text{Ton}}{\text{Equipo}}$$

Ecuación 4-6

Utilizando motores de imán permanente en los 2700 pozos AIB del Golfo San Jorge se obtiene una reducción de CO₂ total de:

$$9,18 \text{ Ton} \times 2700 = \mathbf{24800 \frac{\text{Ton}}{\text{año}}}$$

Ecuación 4-7

Esto sin duda alguna es un beneficio a la situación climática que atraviesa el planeta.

5 Conclusiones

5.1 Conclusiones

El motor de imán permanente tiene muchas ventajas por sobre el motor de inducción, como el descarte de todo el sistema de transmisión de potencia, el bajo costo de mantenimiento y el control preciso entre las más importantes. Pero hasta que no se logró el avance tecnológico necesario para utilizar los variadores de frecuencia, estos motores no se podían aplicar a situaciones industriales de mediana potencia.

Los devanados del estator de los motores PM no tienen que transportar la corriente de excitación o magnetización que, si necesita el motor de inducción, por lo que un devanado determinado puede transportar una corriente de trabajo mayor sin generar más calor, aumentando así la carga eléctrica y la potencia específica de salida.

La refrigeración del rotor es difícil de mantener estable en cualquier maquina cerrada porque, en principio requiere que ese calor salga hacia afuera y se disipe en el estator. La ausencia de corriente en el rotor de un motor de imán permanente no solo mejora la eficiencia al reducir la pérdida total del cobre del rotor, sino que también facilita el problema de la refrigeración.

Si se instala un convertidor electrónico de potencia entre la red eléctrica y el motor ya sea sincrónico (de rotor excitado o de imanes permanentes) o asincrónico, resultan nuevos niveles de rendimientos y salvando la mayoría de los inconvenientes que aparecen cuando el motor está conectado directamente en la red eléctrica.

Lo más obvio del convertidor de frecuencia variable es que libera al motor sincrónico de la limitación de la velocidad fija impuesta por la frecuencia de la red. La ventaja visible sobre el motor de inducción alimentado por un variador es que la velocidad del motor síncrono viene determinada exactamente por la frecuencia de alimentación, mientras que el motor de inducción

siempre tiene que funcionar con un deslizamiento finito. La desventaja es que el motor de rotor excitado pierde la capacidad de variar el factor de potencia según la fuente de alimentación.

La llegada de los variadores de frecuencia y la posibilidad de alimentar el motor con la red eléctrica permitió a los fabricantes tener más libertad para crear diseños a medida, adaptados para un fin específico. El par de un motor de imán permanente depende en gran medida del volumen del rotor, pudiendo seleccionarse por su tamaño. Mientras que la inercia depende de la cuarta potencia de su radio por lo que, si se pretende que el motor minimice los cambios no deseados de velocidad causados por los cambios de carga, la inercia debería maximizarse con un rotor corto y de mayor diámetro.

Esto sin duda deja en claro que el motor de imán permanente ahora compite directamente con los motores de inducción. Estén destinados a aplicaciones generales en las que el mayor coste inicial se ve compensado por su mayor rendimiento y alta densidad de potencia. La pérdida de calor en el rotor de imanes permanentes es mucho menor que en el motor de inducción correspondiente, por lo que el rotor funciona más frío, pudiendo ser una ventaja en aspectos como la vida útil de los rodamientos.

5.2 Recomendaciones o Trabajos futuros

La principal actualización que incrementará aún más la eficiencia de la tecnología del MIP es la utilización de variadores de frecuencia con módulos de regeneración de energía. Esto permitirá evitar que esa energía dirigida desde el motor al variador se pierda en forma de calor mediante la resistencia de frenado y pueda ser aprovechada reinyectándola a la red de suministro eléctrico.

Los motores de imán permanente no solo pueden ser utilizados en el sistema de extracción de bombeo mecánico, sino también en otros sistemas de extracción como es el sistema de

bombeo electrosumergible (BES) el cual consiste en una bomba centrífuga multietapa ubicada en el fondo del pozo que impulsa el fluido hacia la superficie.

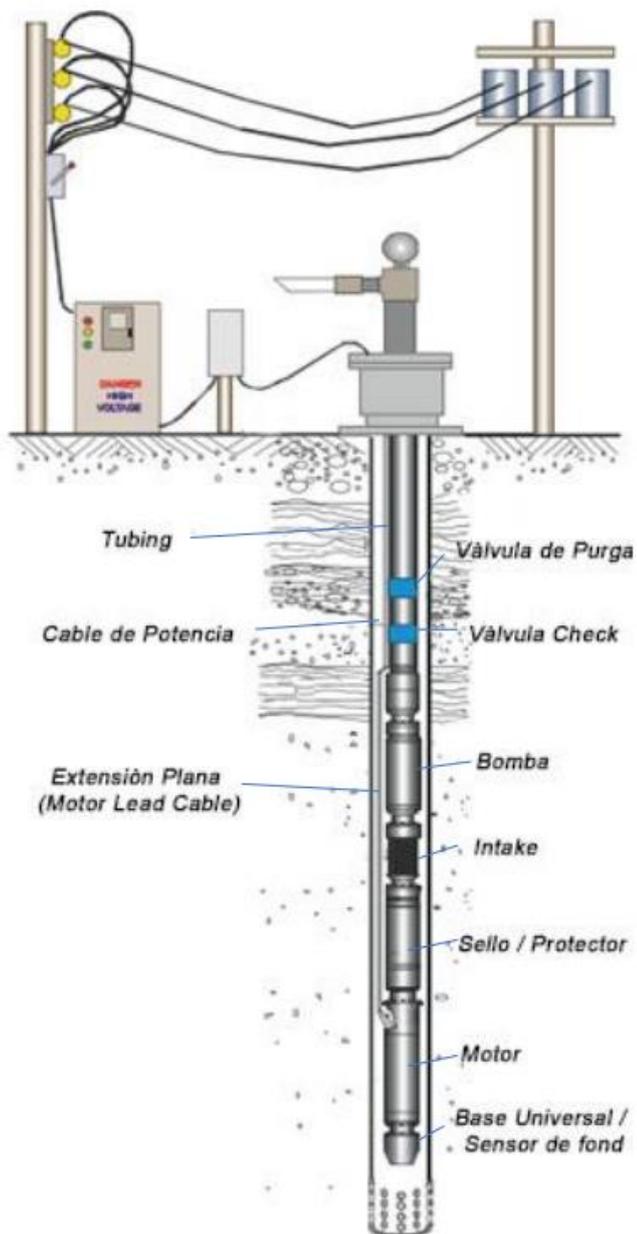


Figura 5-1: Esquema de instalación BES- Pan American Energy. Manual de Operaciones Upstream (2020)

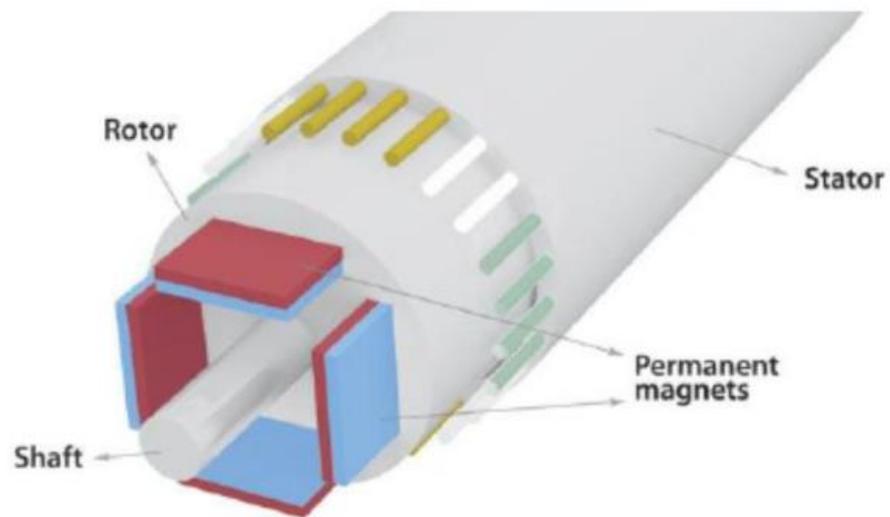


Figura 5-2: Esquema de motor de imán permanente en BES- Pan American Energy. Manual de Operaciones Upstream (2020)

Otro sistema de extracción que permite implementar la tecnología de imán permanente es el sistema de bombeo por cavidades progresivas (PCP) la cual consiste de dos piezas longitudinales en forma de hélice, una que gira en contacto permanente dentro de la otra que está fija, formando un engranaje helicoidal.



Figura 5-3: Partes de una bomba de cavidades progresivas- Pan American Energy. Manual de Operaciones Upstream (2020)

La fuente de energía primaria es un motor eléctrico conectado a la red el cual, mediante un sistema de transmisión de potencia, transfiere la energía al cabezal de rotación.

Los motores de imanes permanentes pueden ser utilizados en estos sistemas nuevamente con ventajas como liberar a la bomba del sistema de transmisión de potencia.

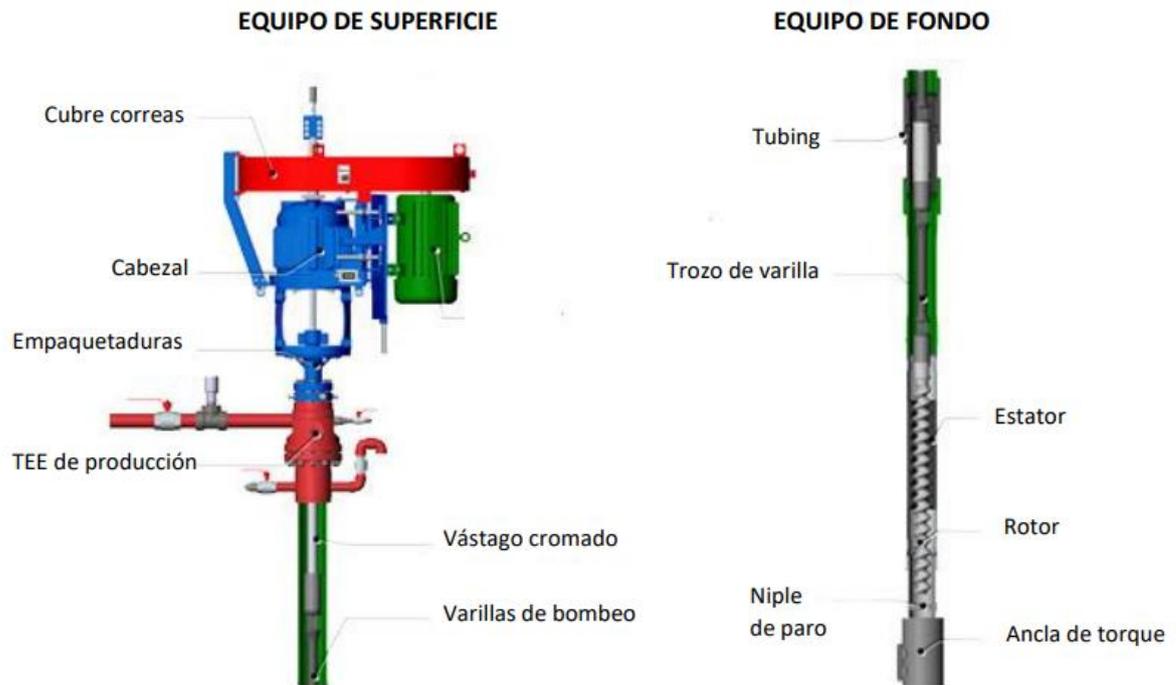


Figura 5-4: Instalación de fondo y superficie de un sistema PCP- Pan American Energy. Manual de Operaciones Upstream (2020)



Figura 5-5: Motor imán permanente en PCP-Schlumberger (2020)- recuperado de <https://www.slb.com/>

Los sistemas de PCP, bombeo mecánico y bombeo electrosumergible son los sistemas principales utilizados para la extracción de fluidos con poca presencia de gas. Todos tienen a la electricidad como energía primaria que alimentan a los motores entregando el torque necesario para el bombeo de fluidos. La Figura 5-6 muestra una comparación de eficiencia de los distintos sistemas de extracción de hidrocarburos. El área de ingeniería de producción tiene como labor estudiar cual de estos sistemas es el más productivo para implementarlo en un determinado pozo. Esto depende del área donde este el pozo y el tipo de fluido y la profundidad a la que trabajará la bomba.

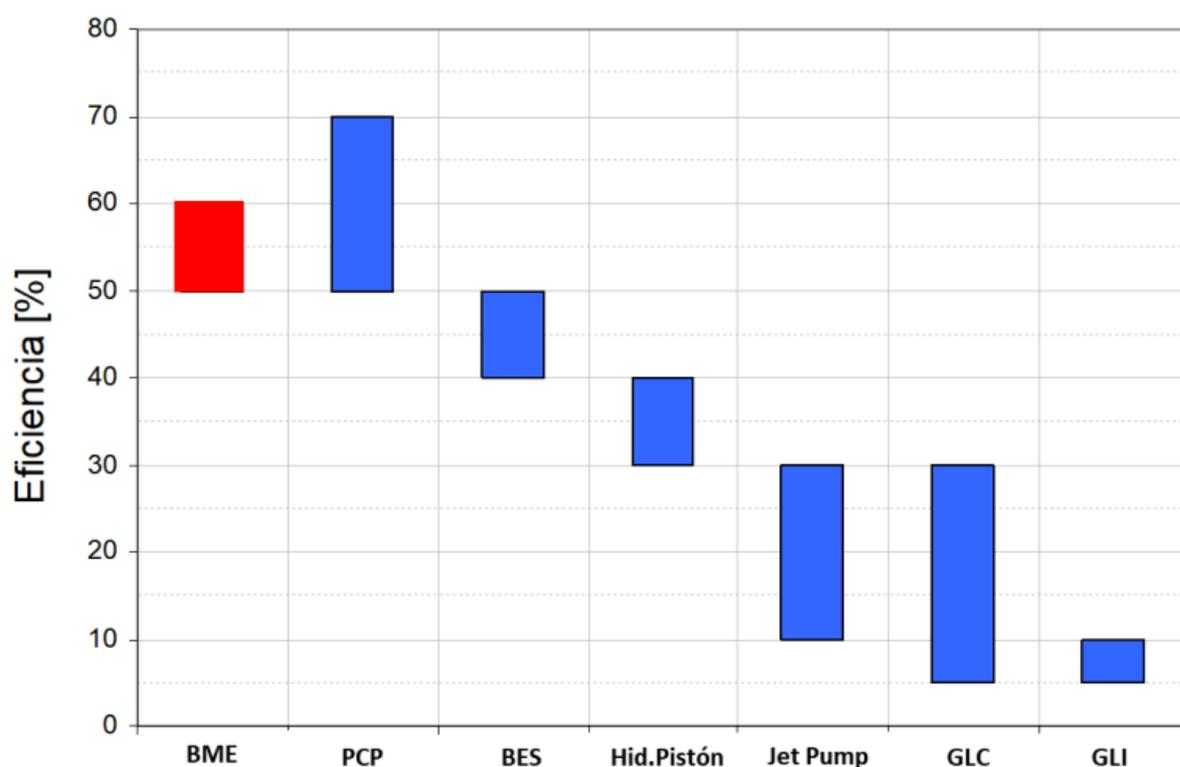


Figura 5-6: Eficiencia energética de sistemas de levantamiento artificial - Pan American Energy. Manual de Operaciones Upstream (2020)

Cambiar los motores asíncronos convencionales por la tecnología de imanes permanentes permitirá aumentar aún más la eficiencia general del yacimiento, reduciendo el consumo energético y el costo de downtime por mantenimiento.

6 Bibliografía

- 1- Maquinas Eléctricas – 3era Edición – Stephen Chapman
- 2- Maquinas Eléctricas – Jesus Fraile Mora (5ta Edición)
- 3- Archivos Motor imán permanente YPF
- 4- Manual de producción de Pan American Energy
- 5- Presentación motor imán permanente proveedor CIPOR.SRL
- 6- Hughes A., Drury B. Electric Motors and Drives. Fundamentals, Types and Applications 5ed 2019