

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA EN GEOLOGÍA Y PETRÓLEOS**

### **ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE EL SISTEMA DE BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE CON MOTOR DE INDUCCIÓN Y EL SISTEMA DE BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE CON MOTOR DE IMÁN PERMANENTE EN EL CAMPO SACHA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERAS EN PETRÓLEOS**

**DIANA ESTÉFANI ARELLANO DÍAZ**

**GINA CECILIA GUAJALA MOROCHO**

**diana\_arellano.91@outlook.es**

**gina.guajala@epn.edu.ec**

**DIRECTOR: MSc. VINICIO RENÉ MELO GORDILLO**

**vinicio.melo@epn.edu.ec**

**Quito, mayo 2019**

## DECLARACIÓN

Nosotras, Diana Estéfani Arellano Díaz, Gina Cecilia Guajala Morocho, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

**DIANA ARELLANO DÍAZ**

---

**GINA GUAJALA MOROCHO**

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Diana Estéfani Arellano Díaz y Gina Cecilia Guajala Morocho, bajo mi supervisión.

---

**MSc. VINICIO MELO GORDILLO**  
**DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

## AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirnos culminar esta etapa de nuestras vidas, pues sin su ayuda y la fe que tenemos en Él, no lo habiéramos logrado.

A PETROAMAZONAS EP y NOVOMET ECUADOR por acogernos en sus instalaciones y brindarnos el apoyo necesario.

A la Escuela Politécnica Nacional y a sus profesores por impartirnos los conocimientos adquiridos en nuestra etapa estudiantil.

Al MSc. Vinicio Melo por su apoyo y participación en el desarrollo de este trabajo de titulación. En especial por su disposición al impartirnos sus conocimientos y brindarnos el asesoramiento técnico oportuno en nuestro trabajo.

A los ingenieros Pablo V., Guillermo C. Alejandra R. y Santiago L que de una u otra manera colaboraron con sus conocimientos, con sus experiencias y con la invaluable ayuda y confianza brindada durante el desarrollo de este trabajo.

A nuestras amigas Eva, Isa, Katy, Liz, Maritza y Mónica, por su amistad y por todos los momentos de alegría y tristeza compartidos.

### **Gina**

A mis padres Gloria y Arturo por todo su inmenso amor y cariño, por apoyarme en cada momento y siempre alentarme a cumplir mis objetivos.

A mis hermanos Mayra, Cinthya, Daniel y Santiago por todo su apoyo, cariño y ánimo brindado para llegar a este momento.

### **Diana**

A mis padres Edith y Luis por su amor, a mis hermanos Lourdes y Luis por su confianza.

A mi novio Santiago por su amor, compañía y todo su apoyo en esta etapa de mi vida.

*Más gracias sean dadas a Dios, que nos da la victoria por medio de nuestro Señor Jesucristo.*

*1 Corintios 15:57*

## **DEDICATORIA**

Gina

El presente trabajo está dedicado a:

Mis padres, por ser el motor de mis sueños y anhelos, por ser un ejemplo de trabajo y sacrificio, por guiarme y apoyarme en todo momento hasta llegar a culminar esta gran meta.

A mis hermanos por ser mi compañía y apoyo, por siempre brindarme ánimos y no dejar que me rinda nunca. Los quiero mucho.

Diana

Dedicado a mis padres por estar siempre a mi lado y apoyarme.

## CONTENIDO

DECLARACIÓN .....	II
CERTIFICACIÓN .....	III
AGRADECIMIENTOS .....	IV
DEDICATORIA.....	V
CONTENIDO.....	VI
LISTA DE TABLAS.....	IX
LISTA DE FIGURAS .....	XII
SIMBOLOGÍA.....	XV
RESUMEN .....	XVIII
PRESENTACIÓN.....	XIX
CAPÍTULO 1 .....	1
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 TEMA DE INVESTIGACIÓN.....	2
1.2 OBJETIVO GENERAL.....	2
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
1.4 GENERALIDADES RELEVANTES DEL CAMPO SACHA Y REFERENCIAL TEÓRICO .....	3
1.4.1 BREVE RESEÑA HISTÓRICA.....	3
1.4.2 UBICACIÓN .....	3
1.4.3 DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA.....	4
1.4.4 ESTRATIGRAFÍA DEL CAMPO SACHA.....	4
1.4.5 PROPIEDADES PVT DE LOS YACIMIENTOS DEL CAMPO SACHA	5
1.4.6 PRODUCCIÓN DEL CAMPO SACHA .....	7
1.4.7 CONCEPTOS GENERALES.....	9
1.4.8 FUNDAMENTOS ELÉCTRICOS.....	11
1.4.9 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LOS MOTORES ELÉCTRICOS .....	12
CAPÍTULO 2 .....	16
2 DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS Y METODOLOGÍA .....	16
2.1 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DE SUPERFICIE DEL SISTEMA BES.....	16
2.1.1 CABEZAL DEL POZO.....	16
2.1.2 CAJA DE VENDEO .....	16
2.1.3 TRANSFORMADOR .....	16

2.1.4	TABLERO DE CONTROL .....	16
2.1.5	VARIADORES DE FRECUENCIA (VDF) PARA LOS EQUIPOS BES CON MOTOR DE INDUCCIÓN .....	16
2.1.6	VARIADOR DE FRECUENCIA (VDF) PARA LOS EQUIPOS BES CON MOTOR DE IMÁN PERMANENTE .....	17
2.2	DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DE SUBSUELO DEL SISTEMA BES CON MOTOR DE INDUCCIÓN .....	17
2.2.1	SENSOR DE FONDO .....	18
2.2.2	MOTOR DE INDUCCIÓN.....	18
2.2.3	PROTECTORES O SELLANTES.....	19
2.2.4	INTAKE O SEPARADOR DE GAS.....	20
2.2.5	BOMBA ELECTROSUMERGIBLE .....	20
2.2.6	CABLE DE POTENCIA .....	22
2.3	DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DE SUBSUELO DEL SISTEMA DE BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE CON MOTOR DE IMÁN PERMANENTE .....	23
2.3.1	MOTORES DE IMÁN PERMANENTE .....	23
2.3.2	BOMBA ELECTROSUMERGIBLE POWER SAVE .....	24
2.4	COMPARACIÓN ENTRE EL SISTEMA BES CON MOTOR DE INDUCCIÓN Y EL SISTEMA BES CON MOTOR DE IMÁN PERMANENTE .....	25
2.4.1	VENTAJAS DE LOS MOTORES DE IMÁN PERMANENTE .....	26
2.4.2	DESVENTAJAS DE LOS MOTORES DE IMÁN PERMANENTE.....	27
2.4.3	VENTAJAS DE LA NUEVA TECNOLOGÍA DEL SISTEMA BES CON MOTOR DE IMÁN PERMANENTE .....	27
2.5	METODOLOGÍA .....	27
2.5.1	TIPO DE ESTUDIO .....	27
2.5.2	ESTUDIO TÉCNICO .....	28
2.5.3	COMPORTAMIENTO DE AFLUENCIA DEL RESERVORIO .....	29
2.5.4	ANÁLISIS NODAL.....	33
2.5.5	DISEÑO DEL SISTEMA DE BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE CON MOTOR DE IMÁN PERMANENTE .....	36
2.5.6	LEYES DE AFINIDAD .....	49
CAPÍTULO 3 .....		50
3	ANÁLISIS COMPARATIVO .....	50
3.1	POZOS CON SISTEMA BES CON MOTOR DE INDUCCIÓN.....	50
3.1.1	POZO SACHA-247.....	50
3.1.2	POZO SACHA-395.....	68
3.1.3	POZO SACHA-137.....	77
3.1.4	POZO SACHA-481.....	85

3.2	COMPARACIÓN ENTRE EL SISTEMA BES CON MOTOR DE INDUCCIÓN Y EL SISTEMA BES CON MOTOR DE IMÁN PERMANENTE. ....	94
3.2.1	ESTUDIO COMPARATIVO PARA EL POZO SACHA-247 .....	94
3.2.2	ESTUDIO COMPARATIVO PARA EL POZO-395.....	96
3.2.3	ESTUDIO COMPARATIVO PARA EL POZO SACHA-137 .....	97
3.2.4	ESTUDIO COMPARATIVO PARA EL POZO SACHA-481 .....	98
3.2.5	ANÁLISIS DEL CONSUMO ENERGÉTICO .....	99
3.3	POZOS CON SISTEMA BES CON MOTOR DE IMÁN PERMANENTE..	101
3.3.1	POZO SACHA-239.....	101
3.3.2	POZO SACHA-228.....	107
3.3.3	POZO SACHA-231.....	113
3.3.4	POZO SACHA 425.....	119
3.4	ANÁLISIS ECONÓMICO .....	125
3.4.1	CONCEPTOS GENERALES.....	126
3.4.2	ANÁLISIS COMPARATIVO DE COSTOS DE CONSUMO DE ENERGÍA .....	127
3.4.3	ANÁLISIS COMPARATIVO DE COSTOS DE INSTALACIÓN .....	134
CAPÍTULO 4 .....		139
4	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	139
4.1	CONCLUSIONES .....	139
4.2	RECOMENDACIONES.....	142
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....		143
ANEXOS .....		147

## LISTA DE TABLAS

N°	DESCRIPCIÓN	PÁGINA
1.1	PVT final para el reservorio U Inferior	5
1.2	PVT final para el reservorio T Inferior	6
1.3	PVT final para el reservorio Hollín Inferior	6
1.4	PVT final para el reservorio Hollín Superior	7
1.5	Promedio diario y mensual de la producción de gas en el campo Sacha al mes de octubre del 2018	9
2.1	Comparación entre el sistema BES con motor de inducción y el sistema BES con motor de imán permanente	25
2.2	Pozos seleccionados para el estudio	28
3.1	Datos de prueba del pozo Sacha-247	51
3.2	Datos de comportamiento de flujo del pozo Sacha 247	52
3.3	Descripción del equipo instalado en el pozo Sacha-247	52
3.4	Datos del pozo Sacha-247	53
3.5	Bombas Power Save	58
3.6	Especificaciones de la bomba NHV(790-1000)H	59
3.7	Descripción de la bomba seleccionada	59
3.8	Parámetros del motor seleccionado	63
3.9	Parámetros operativos del motor	64
3.10	Variables calculadas en el software Novomet Sel Pro	65
3.11	Selección de equipos de fondo y superficie	65
3.12	Condiciones de diseño	67
3.13	Especificaciones de la bomba NHV (790-1000) H	67
3.14	Aplicación de las leyes de afinidad	67
3.15	Datos de la prueba de pozo Sacha 395	68
3.16	Datos de capacidad de flujo del pozo Sacha 395	69
3.17	Descripción del equipo BES Sacha-395	69
3.18	Datos del pozo Sacha-395	70
3.19	Resultado de las variables calculadas del pozo Sacha-395	71
3.20	Variables calculadas para la simulación	72
3.21	Parámetros calculados por el software	72
3.22	Parámetros para la selección del equipo de superficie	74
3.23	Equipos de fondo y superficie seleccionados	75
3.24	Datos de prueba de pozo Sacha-137	77
3.25	Datos de capacidad de flujo del pozo Sacha 137	77
3.26	Equipo BES del pozo Sacha-137 UI	78
3.27	Datos del pozo Sacha-137	78
3.28	Resultado de las variables calculadas del pozo Sacha-137	79
3.29	Variables calculadas para la simulación	80
3.30	Parámetros calculados por el software	80
3.31	Parámetros para la selección del equipo de superficie	82
3.32	Equipos de fondo y superficie seleccionados	82

<b>N°</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>PÁGINA</b>
3.33	Datos de una prueba del pozo Sacha-481	85
3.34	Datos de capacidad de flujo del pozo Sacha 481	85
3.35	Equipo BES del pozo Sacha-481 TI	86
3.36	Datos del pozo Sacha-481	87
3.37	Resultados de las variables calculadas del pozo Sacha-481	88
3.38	Variables calculadas para la simulación	88
3.39	Parámetros calculados por el software	89
3.40	Parámetros para la selección del equipo de superficie	91
3.41	Equipo de fondo y superficie seleccionados	91
3.42	Análisis comparativo del pozo Sacha-247	95
3.43	Análisis comparativo del pozo Sacha-395	96
3.44	Análisis comparativo del pozo Sacha-137	97
3.45	Análisis comparativo del pozo Sacha-481	98
3.46	Datos de una prueba del pozo Sacha-239	101
3.47	Datos de capacidad de flujo del pozo Sacha 239 -HS	102
3.48	Descripción del equipo BES Sacha-239	102
3.49	Datos del pozo Sacha-239	103
3.50	Parámetros calculados por el software	104
3.51	Datos de una prueba del pozo Sacha-228	107
3.52	Datos de capacidad de flujo del pozo Sacha 228	108
3.53	Descripción del equipo BES Sacha-228	108
3.54	Datos del pozo Sacha-228	109
3.55	Parámetros calculados por el software	110
3.56	Datos de una prueba del pozo Sacha-231	113
3.57	Datos de capacidad de flujo del pozo Sacha 231	114
3.58	Descripción del equipo de fondo- Sacha-231	114
3.59	Datos del pozo Sacha-231	115
3.60	Parámetros calculados por el software	116
3.61	Datos de una prueba del pozo Sacha-425	119
3.62	Datos de capacidad de flujo del pozo Sacha 425	119
3.63	Datos del equipo BES pozo Sacha-425 UI	120
3.64	Datos del pozo Sacha-425 UI	121
3.65	Parámetros calculados por el software	122
3.66	Sistemas de generación eléctrica del campo Sacha	127
3.67	Tasa de declinación exponencial de los 8 pozos seleccionados	130
3.68	Consumo de potencia kW para los 8 pozos seleccionados	130
3.69	Consumo de energía de los equipos BES propuestos	131
3.70	Costos del consumo de kWh/ día del sistema BES con motor de inducción	131
3.71	Consumo y costo energético del pozo Sacha-247 con el motor de inducción	132
3.72	Consumo y costo energético del pozo Sacha-247 con el uso del motor de imán permanente	132

<b>N°</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>PÁGINA</b>
3.73	Costos de energía eléctrica del sistema BES con motor de inducción y el sistema BES con motor de imán permanente	133
3.74	Trabajos de reacondicionamiento de pozos asociados a gastos de capital	134
3.75	Trabajos de reacondicionamiento de pozos asociados a gastos operativos	135
3.76	Análisis económico en el pozo Sacha-481 con un precio de 40.00 USD por barril	136
3.77	Análisis económico en el pozo Sacha-481 con un precio de 50.05 USD por barril	137
3.78	Análisis económico en el pozo Sacha-481 con un precio de 60.05 USD por barril	137

## LISTA DE FIGURAS

N°	DESCRIPCIÓN	PÁGINA
1.1	Mapa de ubicación del campo Sacha	3
1.2	Columna Tectono-Estratigráfica y eventos Geodinámicas que controlaron el desarrollo de la cuenca oriente y de sus sistemas petrolíferos	4
1.3	Pozos según el sistema de levantamiento artificial en el campo Sacha al mes de octubre de 2018	8
1.4	Inventario de pozos al mes de octubre de 2018	8
1.5	Motor de inducción	13
2.1	Sistema de bombeo electrosumergible	17
2.2	Sensor de fondo	18
2.3	Partes de un motor de inducción	19
2.4	Bomba electrosumergible	20
2.5	Etapa de una bomba	21
2.6	Etapa para flujo radial y mixto	22
2.7	Cables eléctricos	22
2.8	Estator de un motor de imán permanente	23
2.9	Procedimiento para la elaboración de etapas	24
2.10	Representación del IP constante	29
2.11	Curva IPR obtenida por el método de Vogel	30
2.12	Curva IPR compuesta	31
2.13	Nodos de un sistema de producción	33
2.14	Interfaz del Software Pipesim	35
2.15	Proceso para cargar los datos	35
2.16	Interfaz de Novomet ESP Calculator	36
2.17	Comportamiento de la bomba	43
2.18	Curva tornado de la bomba NHV (790-1000) H	44
2.19	Caída de voltaje del cable	47
3.1	Curva IPR Sacha 247	52
3.2	Análisis nodal en Pipesim pozo Sacha-247	53
3.3	Comportamiento de la bomba seleccionada	58
3.4	Curva tornado de la bomba NHV (790-1000) H	60
3.5	Curva de comportamiento de la bomba NHV(790-1000)H	61
3.6	Curva de tornado de la bomba NHV (790-1000) H	62
3.7	Análisis nodal con la bomba (NHV 790-1000) H	66
3.8	Análisis de sensibilidades pozo Sacha 247 TI	68
3.9	Curva IPR del pozo Sacha 395-UI	69
3.10	Análisis nodal en el pozo Sacha 395-UI	71
3.11	Comportamiento de la bomba NBV (160-250) H	73
3.12	Curva de tornado de la bomba NBV (160-250) H	74
3.13	Análisis nodal en el pozo Sacha 395-UI con la bomba propuesta	75
3.14	Análisis de frecuencias	76

N°	DESCRIPCIÓN	PÁGINA
3.15	Análisis de sensibilidades del pozo 395 con la bomba NBV (160-250) H	76
3.16	Curva IPR del pozo Sacha 137-UI	77
3.17	Análisis nodal en el pozo Sacha 137-UI	79
3.18	Comportamiento de la bomba NFV (310-630) H	81
3.19	Curva de tornado de la bomba NFV (310-630) H	81
3.20	Análisis nodal en el pozo Sacha 137-UI con la bomba propuesta	83
3.21	Análisis de frecuencias	84
3.22	Análisis de sensibilidades del pozo 137 con la bomba NFV (310-630) H	84
3.23	Curva IPR del pozo Sacha 481-UI	86
3.24	Análisis nodal en el pozo Sacha 481-UI	87
3.25	Comportamiento de la bomba NFV (310-630) H	90
3.26	Curva de tornado de la bomba NFV (310-630) H	90
3.27	Análisis nodal en el pozo Sacha 481-UI con la bomba propuesta	92
3.28	Análisis de frecuencias	93
3.29	Análisis de sensibilidades del pozo 481 con la bomba NFV (310-630) H	93
3.30	Producción de los pozos seleccionados para el diseño	99
3.31	Corriente consumida por el motor	99
3.32	KVA de la operación	100
3.33	Consumo de energía kWh	100
3.34	Potencia kW por BFPD	101
3.35	Curva IPR del pozo Sacha 239-HS	102
3.36	Análisis nodal en el pozo Sacha 239-HS	104
3.37	Curva de rendimiento de la bomba NH (1600-2300)	105
3.38	Curva de tornado de la bomba NH (1600-2300)	105
3.39	Análisis de frecuencias	106
3.40	Análisis de sensibilidades del pozo 239 con la bomba NHV (1600-2300) H	107
3.41	Curva IPR del pozo Sacha 228 HI	108
3.42	Análisis nodal en el pozo Sacha 228	110
3.43	Curva de rendimiento de la bomba NFV(310-630)H	111
3.44	Curva de tornado de la bomba NFV (310-630) H	112
3.45	Análisis de frecuencias	112
3.46	Análisis de sensibilidades del pozo 239 con la bomba NFV (310-630) H	113
3.47	Curva IPR del pozo Sacha 231	114
3.48	Análisis nodal en el pozo Sacha 231	116
3.49	Curva de rendimiento de la bomba NHV (790-1000)H	117
3.50	Curva de tornado de la bomba NHV (790-1000)H	117
3.51	Análisis de frecuencias	118
3.52	Análisis de sensibilidades del pozo 231 con la bomba NHV (790-1000) H	118

<b>N°</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>PÁGINA</b>
3.53	Curva IPR del pozo Sacha 425 UI	120
3.54	Análisis nodal en el pozo Sacha 425 UI	122
3.55	Curva de rendimiento de la bomba NFV (310-630) H	123
3.56	Curva de tornado de la bomba NFV (310-630) H	124
3.57	Análisis de frecuencias	124
3.58	Análisis de sensibilidades del pozo 239 con la bomba NFV (310-630) H	125
3.59	kW generados por cada sistema de generación	128
3.60	Costos de consumo de energía eléctrica	134
3.61	Comparación de los costos de instalación	135
3.62	Costos operativos para el campo Sacha	135

## SIMBOLOGÍA

SÍMBOLO	SIGNIFICADO	DIMENSIONES
A	Amperios	
AWG	american wire gauge	
BAPD	Barriles de agua por día	$L^3/t$
BFPD	Barriles de fluido por día	$L^3/t$
BPPD	Barriles de petróleo por día	$L^3/t$
$B_g$	Factor volumétrico del gas	
$B_o$	Factor volumétrico del petróleo	
BY/BN	Barriles de yacimiento sobre barriles de superficie	
BES	Bombeo electrosumergible	
BEP	Punto de mejor eficiencia (best efficiency point)	
BSW	Porcentaje de agua y sedimentos	%
cp	Centipoises	$M/Lt$
CA	Corriente Alterna	$L^{-2}M^{-1}t^4I^2$
CC	Corriente Continua	
CD	Diferencia entre la presión de fondo fluyente de la curva compuesta y la curva de Vogel	$M/Lt^2$
CG	Diferencia entre el caudal total de la curva compuesta y el caudal de petróleo de curva de Vogel	$L^3$
f	Frecuencia en ciclos por segundo	$t^{-1}$
GOR	Relación Gas Petróleo	$L^3/L^3$
HP	Horse Power (potencia)	$ML^2/t^3$
Hz	Hertz	$t^{-1}$
I	Corriente en amperios	I
IP	Índice de productividad.	$L^4t/M$
IPR	Inflow performance relationship	
km	Kilómetro	L
kVAR	Potencia reactiva	$ML^2t^{-3}$
kVA	Kilo Voltio Amperio	$ML^2t^{-3}$

kW	Kilovatios o Potencia real	$ML^{2t^{-3}}$
kWh	Kilo vatio hora	
Lb/pie <sup>3</sup>	Libra por pie cúbico	$M/L^3$
MIP	Motor de imán permanente	
MLE	Motor Lead Extension	
MPCN	Miles de pies cúbicos normales	$L^3$
MPC/D	Miles de pies cúbicos por día	$L^3$
MPC/M	Miles de pies cúbicos por mes	$L^3$
MPE	Mejor Punto de eficiencia	
N	Velocidad del rotor	$L/t$
P	Número de polos magnéticos del motor	
p	Presión	$M/Lt^2$
P <sub>b</sub>	Presión de burbuja	$M/Lt^2$
P <sub>wh</sub>	Presión de cabeza	$M/Lt^2$
P <sub>wf</sub>	Presión de fondo fluyente	$M/Lt^2$
P <sub>r</sub>	Presión de fondo de reservorio	$M/Lt^2$
psi	Libras fuerza por pulgada cuadrada	$M/Lt^2$
psia	Libras fuerza por pulgada cuadrada absolutas	$M/Lt^2$
pies	pies	L
PIP	Pressure Intake Pump (presión de succión de la bomba)	$L^4t/M$
P	Potencia	$ML^{2t^{-3}}$
PCN	Pies cúbicos normales	$L^3$
PF	Factor de potencia	
PIP	Pump intake pressure (Presión de succión de la bomba)	$M/Lt^2$
PPH	Hydraulic Pumping Production (Producción de bombeo hidráulico)	
PPS	Sumersible Pumping Production (Producción de bombeo electro sumergible)	
P <sub>ump</sub>	Profundidad de la bomba propuesta	
PVT	Presión - Volumen – Temperatura	

$Q_b$	Caudal en el punto de burbuja	$L^3$
$Q_{o\max}$	Caudal de máximo de petróleo	$L^3$
$Q_{t\max}$	Caudal de máximo de fluido	$L^3$
$SG_g$	Gravedad específica del gas	
$SG_o$	Gravedad específica del petróleo	
$SG$	Gravedad específica de la mezcla	
$R_s$	Razón de gas disuelto- petróleo	
RPM	Revoluciones por minuto	
R	Resistencia	$L^2Mt^{-3}l^{-2}$
TDH	Altura dinámica total	L
TVD	Profundidad vertical verdadera	
T fondo	Temperatura de fondo	T
V	voltaje	$ML^2t^{-3}l^{-1}$
VDF	Variador de Frecuencia	
$\mu_o$	Viscosidad de petróleo	
$\mu_g$	Viscosidad del gas	
$\rho$	Densidad	$M/L^3$
°F	Grados Fahrenheit	T
°API	Grados API	
%	Tanto por ciento	

## RESUMEN

El presente proyecto consiste en comparar de manera técnica y económica el sistema de bombeo electrosumergible con motores de inducción y el sistema de bombeo electrosumergible con la innovación de motores de imán permanente.

Esta comparación tiene como objetivo determinar: las condiciones de operación, características de funcionamiento, parámetros de aplicación y ventajas y desventajas de cada uno del sistema BES con diferente motor eléctrico.

Para el estudio de esta nueva tecnología se seleccionó varios pozos del campo Sacha, que se encuentran completados con el sistema de bombeo electrosumergible con motor de inducción y con motor de imán permanente.

En el capítulo I se describe la ubicación, geología y estratigrafía del campo Sacha, se analizan las propiedades PVT de los diferentes reservorios y la producción de gas y fluido actualizada. Además, se incluye los fundamentos eléctricos del sistema de bombeo electrosumergible y el principio de funcionamiento de los motores eléctricos de inducción y los motores eléctricos de imán permanente.

En el capítulo II se describe, el sistema de bombeo electrosumergible con motor de imán permanente y el sistema de bombeo electrosumergible con motor de inducción: sus principales componentes y características de funcionamiento. Posteriormente se explica: la metodología usada para el análisis comparativo, el tipo estudio, conceptos del comportamiento de afluencia del reservorio, estudio del análisis nodal y procedimiento general para el diseño del sistema BES convencional, ajustando a los equipos y tecnología con motores de imán permanente y bombas Power Save.

Para realizar la comparación del sistema BES con motor de imán permanente y el sistema BES con motor de inducción, en el capítulo III se realiza un nuevo diseño del sistema BES para los pozos que se encuentran completados con el sistema BES con motor de inducción, implementando la tecnología de motor de imán permanente y se analizan las principales diferencias en el diseño, en la instalación y en las condiciones operativas del motor. Además, se simula el comportamiento actual de los equipos BES con motor de imán permanente que ya se encuentran instalados actualmente en pozos del Campo Sacha y se incluye un análisis económico en el que se observa los costos de consumo de energía eléctrica para cada una de las tecnologías y la viabilidad económica para un cambio de sistema BES con motor de inducción o motor de imán permanente, cuando sea requerido.

Finalmente, en el capítulo IV se presentan las conclusiones y recomendaciones obtenidas en el estudio comparativo.

## PRESENTACIÓN

El campo Sacha está ubicado en el Oriente Ecuatoriano, tiene una producción mensual de alrededor de 69 000 BPPD. El 88 % de los pozos en producción, lo hacen, mediante el sistema de levantamiento artificial BES, el consumo eléctrico representa gastos elevados, ya que se requiere la generación eléctrica. En general los esfuerzos de las operadoras están encaminados a la búsqueda de nuevas tecnologías que sean eficientes y que ayuden en la reducción del consumo energético.

El sistema de levantamiento artificial BES es eficiente y ha cobrado mayor importancia debido a su numerosa aplicación. En la actualidad se busca mejorar la tecnología del equipo BES en temas importantes como: ahorro de energía, manejo de gas, mayor rango de operación, durabilidad de los equipos, etc. La compañía Rusa Novomet ha evolucionado la tecnología del equipo BES y entre lo más destacado está: el uso del motor de imán permanente en el equipo, mejor calidad de las etapas de la bomba y diámetros de los equipos más reducidos. Para la selección de las nuevas tecnologías es necesario incluir tanto el análisis de la tecnología en sí, como la comparación con otras.

El presente trabajo de titulación analiza y compara de manera técnica y económica el sistema de bombeo electrosumergible instalado en 8 pozos del Campo Sacha, que se encuentran produciendo con el sistema de levantamiento artificial BES, 4 pozos con el sistema BES con motor de inducción y 4 pozos con el sistema BES con motor de imán permanente, para analizar las posibles ventajas y desventajas de la instalación de cada sistema BES y evaluar los parámetros que rigen su aplicación y poder determinar diferencias operativas y de diseño.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

Actualmente la mayoría de los yacimientos de petróleo en el Ecuador no cuentan con suficiente presión para producir los fluidos de fondo a superficie. Para dar solución a este problema se instalan diferentes sistemas de levantamiento artificial que proporcionan energía adicional para permitir levantar los fluidos de la formación hasta superficie (Petroamazonas E.P. 2016)

El método de levantamiento artificial por bombeo electrosumergible impulsa el fluido del fondo del pozo a la superficie mediante la rotación centrífuga de la bomba. La potencia requerida por la bomba es suministrada por un motor eléctrico y la fuente eléctrica necesaria para el funcionamiento del motor, es abastecida por el cable de potencia que viene desde la superficie. Los componentes principales del equipo de subsuelo del sistema de bombeo electrosumergible son: sensor de fondo, motor, sección sellante, separador de gas, bomba electrosumergible y cable de potencia (Bearden, 2006).

El sistema BES con motor de inducción, se ha instalado desde hace muchos años atrás y con el paso del tiempo la mayoría de pozos utilizan este sistema, por su alta eficiencia y aplicabilidad. El funcionamiento de este sistema inicia con la energización del motor eléctrico, proporcionándole movimiento a la bomba electrosumergible multietapa, que tiene la función de elevar el fluido por medio de las etapas de la bomba. Posee una gran variedad de diseños, para amplios rangos de caudales, sus equipos se acoplan a otros equipos convencionales de diferente marca. Requieren un gran consumo de energía eléctrica para el funcionamiento del sistema y presentan mayores pérdidas de energía en los equipos (ESP OIL Engineering Consultants, 2004).

Frente a esta tecnología, el sistema BES con motor de imán permanente ofrece un ahorro en el consumo de energía de hasta el 25 %, por la implementación de imanes permanentes en el rotor del motor. Presenta menores pérdidas de energía en el sistema total, reducción de dimensiones en los equipos de fondo, permitiendo su instalación en casing de menores diámetros. Aunque el motor de imán permanente requiere equipos de superficie adecuados para su funcionamiento que aumentan el costo del sistema BES (NOVOMET PRODUCT CATALOG, 2018).

El funcionamiento del sistema BES con motor de imán permanente es similar al funcionamiento del sistema BES con motor de inducción, únicamente varía el principio de operación del motor.

El sistema BES con motor de imán permanente estaría en ventaja frente al sistema de BES con motor de inducción en los siguientes aspectos: permite ahorrar hasta un 25% del consumo total de energía del sistema BES con motor de inducción, el diseño de las etapas de la bomba Power Save tienen una geometría diferente y son más eficientes. Cuando se presentan pozos que poseen tuberías de producción con diámetros más pequeños el sistema de BES con motor de inducción sería inaplicable en dichos pozos, ya que no manejan diámetros pequeños (Valencia, 2017).

La experiencia ha demostrado que el diseño y la aplicación adecuada de los equipos de bombeo electrosumergible se basan en tres pilares:

- Comprender la productividad del pozo.
- Comprender el comportamiento de fase de los fluidos producidos por el pozo.
- Análisis cuidadoso de las actividades en el diseño e instalación del sistema BES.

La necesidad de lograr que los pozos sean producidos en su capacidad óptima y de una manera rentable, sumado a la necesidad de reducir los costos operativos, aumentar la producción de petróleo y aumentar el ingreso neto de los pozos, requiere un análisis integrado del rendimiento del sistema BES y de la interacción del reservorio y el pozo (McCoy. J, et al., 2000).

El presente trabajo de titulación realiza una comparación entre el sistema BES con motor de inducción y el sistema BES con motor de imán permanente en los pozos del Campo Sacha, para determinar la viabilidad de un cambio de tecnología cuando sea requerido en dichos pozos, o su aplicación en pozos nuevos. Además, permite determinar qué sistema BES es el más adecuado dependiendo de las características de los pozos.

## **1.1 TEMA DE INVESTIGACIÓN**

Estudio comparativo entre el sistema de bombeo electrosumergible con motor de inducción y el sistema de bombeo electrosumergible con motor de imán permanente en el Campo sachá.

## **1.2 OBJETIVO GENERAL**

Comparar técnica y económicamente el sistema de bombeo electrosumergible con motor de inducción y el sistema de bombeo electrosumergible con motor de imán permanente.

## **1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Describir las tecnologías del sistema BES con motor de inducción y del sistema BES con motor de imán permanente.
- Simular el comportamiento de producción mediante las curvas IPR, si se adopta el sistema BES con motor de imán permanente.
- Determinar los efectos en la producción, por el cambio del sistema BES con motor de inducción al sistema BES con motor de imán permanente.
- Analizar la viabilidad técnica y económica del cambio del sistema BES con motor de inducción por el sistema BES con motor de imán permanente cuando sea requerido por el pozo.

## 1.4 GENERALIDADES RELEVANTES DEL CAMPO SACHA Y REFERENCIAL TEÓRICO

En 1969 se perforó el primer pozo exploratorio en el Campo Sacha, alcanzó los 10,160 pies de profundidad y produjo un crudo de 30°API procedente de la formación Hollín. El Campo Sacha, fue puesto en producción en 1972 con una producción promedio diaria de 29,269 BPPD. Actualmente el Campo Sacha produce 67,000 BPPD y sus reservas están estimadas en 350 millones, este Campo es considerado como uno de los más productivos e importantes del país (Baby, Rivadeneira, & Barragán, 2004).

### 1.4.1 BREVE RESEÑA HISTÓRICA

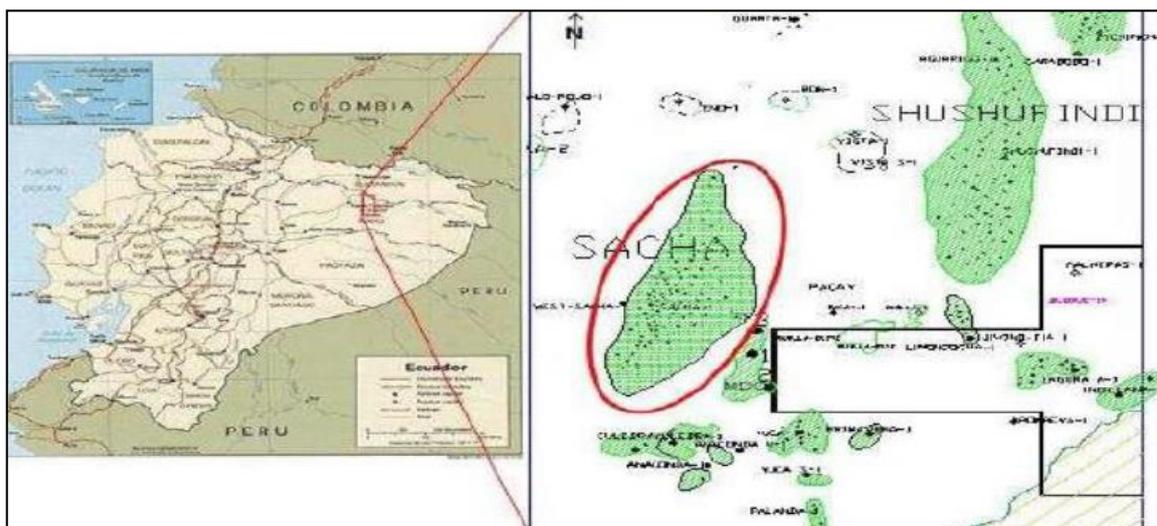
En 1969 se perforó el primer pozo exploratorio en el Campo Sacha, alcanzó los 10160 ft de profundidad y produjo un crudo de 30°API procedente de la formación Hollín. El Campo Sacha, fue puesto en producción en 1972 con una producción promedio diaria de 29 269 BPPD. Actualmente el Campo Sacha produce 67.000 BPPD y sus reservas están estimadas en 350 millones, este campo es considerado como uno de los más productivos e importantes del país (Baby et al., 2004).

### 1.4.2 UBICACIÓN

El Campo SACHA se encuentra ubicado en el cantón Joya de los Sachas, provincia Francisco de Orellana al nororiente de la región amazónica, aproximadamente a 112 millas (180 km), en línea recta desde Quito, en dirección sur-este. Sus coordenadas geográficas son aproximadamente 76°46'00''W a 76°54'00'' W (Longitud); 0°10'00''S a 0°26'00''S (Latitud) y cuenta con un área aproximada de 300 km<sup>2</sup>.

El Campo Sacha está delimitado al norte por las estructuras: Palo Rojo, Eno, Ron y Vista; al sur por los Campos Culebra-Yulebra, al este por los Campos Shushufindi-Aguarico y al oeste por los Campos Pucuna, Paraíso y Huachito (Baby et al., 2004). En la figura 1.1 se muestra la ubicación y la estructura del Campo Sacha.

**FIGURA 1.1 MAPA DE UBICACIÓN DEL CAMPO SACHA**



Fuente: Petroamazonas EP  
Elaborado por: Departamento Río Napo

### 1.4.3 DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA

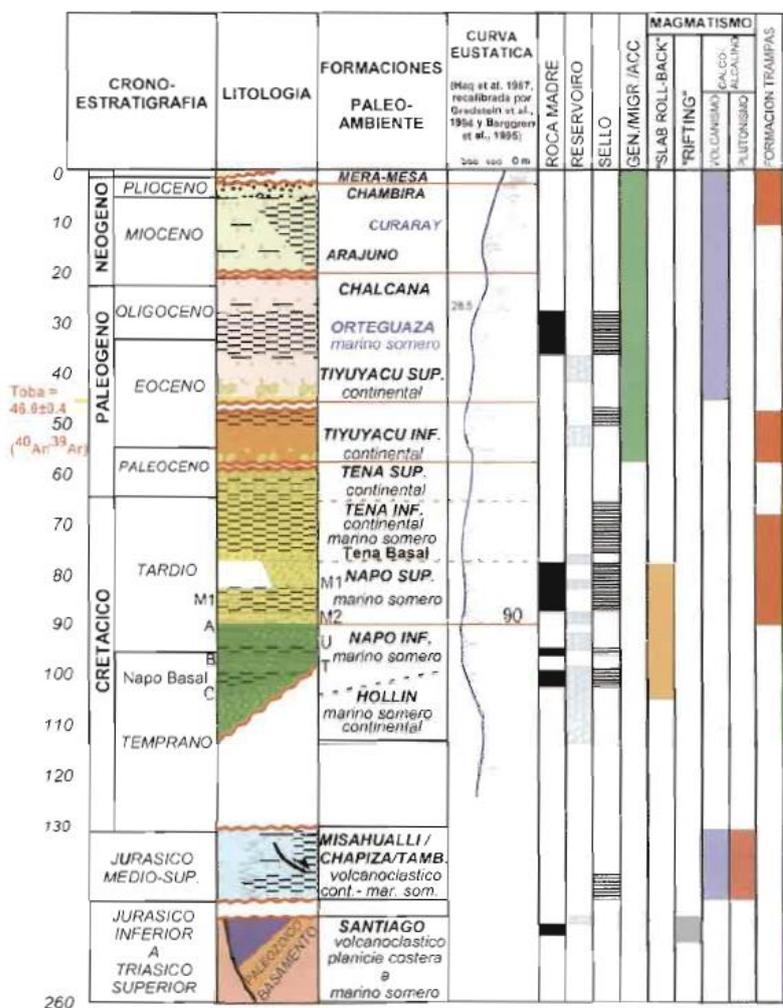
Geológicamente el Campo Sacha constituye un anticlinal asimétrico fallado al oeste. Esta falla llega hasta la caliza M-2 con un salto de falla al nivel de la formación Hollín de 10 a 35 pies al norte en el centro del Campo 10 pies y al sur de 20 a 35 pies.

Su eje principal está en dirección NE-SO y su eje secundario bajo un cierre vertical contra la pendiente regional de la cuenca. Posee un sistema de fallas secundarias orientadas en dirección sureste-noroeste que dividen a algunos de sus yacimientos (Baby et al., 2004).

### 1.4.4 ESTRATIGRAFÍA DEL CAMPO SACHA

El Campo Sacha corresponde a una disposición estratigráfica generalizada de la Cuenca Oriente Ecuatoriana, que se muestra en la figura 1.2.

**FIGURA 1.2 COLUMNA TECTONO-ESTRATIGRÁFICA Y EVENTOS GEODINÁMICOS QUE CONTROLARON EL DESARROLLO DE LA CUENCA ORIENTE Y DE SUS SISTEMAS PETROLÍFEROS**



Fuente: La cuenca oriente geología y petróleos  
Elaborado por: Baby, Rivadeneira, & Barragán

### Formación “T” Inferior.

Se encuentra constituida de una arenisca cuarzosa, su tamaño de grano es de medio a fino, color café claro, cemento silicio, usualmente su color varía entre gris y marrón, pero por la presencia de glauconita en algunos lugares se muestra un color verduzco. Su espesor varía de entre 30 y 110 pies.

### Formación Tena.

Se constituye de una arenisca cuarzosa de grano fino, fluorescencia amarillo-blanquecina. Es considerado como un reservorio secundario, su espesor varía entre 1640 a 3280 pies.

### Formación Hollín Inferior

Esta formación consiste en una arenisca compacta, cuarzosa de color pardo oscura blanca. Su tamaño varía de grano fino a grueso, tiene una buena selección de matriz y cemento silicio, también se encuentran inclusiones de carbón, ámbar y caolín. Su ambiente de depósito es de tipo fluvial. Cuenta con una saturación buena de hidrocarburos, con una porosidad promedio de 17.1%.

### Formación Hollín Superior

Es una arenisca consolidada, de grano fino, cuarzosa parda oscura, gris oscura o verdosa, su matriz es arcillosa, cemento silicio, con inclusiones de glauconita y clorita. Su ambiente de depositación es de tipo estuario por presencia de mareas. Presenta una porosidad de alrededor 14.2%, y con una saturación en un espesor de 12 pies en el centro.

### Formación “U” Inferior

Es una formación que se encuentra conformada por una arenisca cuarzosa de color café claro, el tamaño del grano varía de medio a fina, cemento silícico, fluorescencia amarillo-blanquecina. Cuenta con un espesor promedio de 23 pies, con una porosidad de 16.7%.

## 1.4.5 PROPIEDADES PVT DE LOS YACIMIENTOS DEL CAMPO SACHA

En las tablas 1.1, 1.2, 1.3 y 1.4 se muestran las propiedades PVT del Campo Sacha para los reservorios: U inferior, T inferior, Hollín inferior y Hollín superior.

**TABLA 1.1**  
**PVT FINAL PARA EL RESERVORIO U INFERIOR**

Presión (psia)	B <sub>o</sub> (BY/BN)	R <sub>s</sub> (PCN/BN)	μ <sub>o</sub> (cP)	B <sub>g</sub> (BY/MPCN)	μ <sub>g</sub> (cP)
14.7	1.1251	0	5.942	-	-
214.7	1.1476	55	4.259	15.079	0.0119
414.7	1.1675	91	3.925	7.7014	0.0125
614.7	1.1846	123	3.737	5.1538	0.0128
814.7	1.1991	153	3.609	3.8661	0.013
1014.7	1.211	181	3.516	3.0901	0.0132

**TABLA 1.1 CONTINUACIÓN**

1185.2	1.2199	203	3.454	2.6371	0.0134
1309.7	1.218	203	3.489		
1529.7	1.2147	203	3.554		
2014.7	1.2107	203	3.708		
2514.7	1.2066	203	3.884		
3014.7	1.2025	203	4.077		
3514.7	1.1984	203	4.287		
4014.7	1.1943	203	4.515		
4514.7	1.1902	203	4.759		
5014.7	1.1861	203	5.021		

Fuente: Petroamazonas E.P.

Elaborado por: Dirección de operaciones Activo Sacha

**TABLA 1.2  
PVT FINAL PARA EL RESERVORIO T INFERIOR**

Presión (psia)	B <sub>o</sub> (BY/BN)	R <sub>s</sub> (PCN/BN)	μ <sub>o</sub> (cP)	B <sub>g</sub> (BY/MPCN)	μ <sub>g</sub> (cP)
14.7	1.0964	0	3.047	234.866	0.0071
214.7	1.1403	81.3	1.8611		0.0195
414.7	1.1785	132.3	1.6489	7.527	0.0321
614.7	1.2112	177	1.5338	5.018	0.0451
814.7	1.2382	218	1.4564	3.754	0.0583
1014.7	1.2597	256.5	1.4119	2.994	0.0718
1194.7	1.2764	289	1.3919	2.530	0.0842
1264.7	1.2755	289	1.3963		
1404.7	1.2739	289	1.4051		
1514.7	1.2726	289	1.4121		
2014.7	1.2666	289	1.4447		
2514.7	1.2607	289	1.4785		
3014.7	1.2548	289	1.5136		
3514.7	1.2488	289	1.5499		
4014.7	1.2429	289	1.5875		
4514.7	1.237	289	1.6263		
5014.7	1.231	289	1.6663		

Fuente: Petroamazonas E.P.

Elaborado por: Dirección de operaciones Activo Sacha.

**TABLA 1.3  
PVT FINAL PARA EL RESERVORIO HOLLÍN INFERIOR**

Presión (psia)	B <sub>o</sub> (BY/BN)	R <sub>s</sub> (PCN/BN)	μ <sub>o</sub> (cP)	B <sub>g</sub> (BY/MPCN)	μ <sub>g</sub> (cP)
14.7	1.0007558	0	6.93796344	234.629701	0.0089
46.7	1.0812038	1	3.84993324	72.2303884	0.0098
76.7	1.1566238	8	2.98994088	43.5605652	0.0102
110.7	1.15360783	8	2.98656739		
156.7	1.1493959	8	3.00346203		

**TABLA 1.3 CONTINUACIÓN**

230.7	1.14472601	8	3.03063521		
1014.7	1.12627548	8	3.3181336		
1514.7	1.12089728	8	3.50111453		
2014.7	1.11676323	8	3.68380525		
2514.7	1.11298183	8	3.86620575		
3014.7	1.10920043	8	4.04831603		
3514.7	1.10541903	8	4.2301361		
4014.7	1.10163763	8	4.41166596		
4514.7	1.09785623	8	4.5929056		
5014.7	1.09407483	8	4.77385502		

Fuente: Petroamazonas E.P.

Elaborado por: Dirección de operaciones Activo Sacha.

**TABLA 1.4**  
**PVT FINAL PARA EL RESERVORIO HOLLÍN SUPERIOR**

Presión (psia)	B <sub>o</sub> (BY/BN)	R <sub>s</sub> (PCN/BN)	μ <sub>o</sub> (cP)	B <sub>g</sub> (BY/MPCN)	μ <sub>g</sub> (cP)
3563	151	1.1182		2.476	
3013	151	1.1223		2.402	
2513	151	1.1262		2.335	
2013	151	1.1305		2.268	
1513	151	1.1352		2.201	
1013	151	1.1403		2.134	
813	151	1.1425		2.106	
703	151	1.1438		2.093	
513	119	1.1259	0.0342	2.218	0.01228
413	103	1.1164	0.0427	2.317	0.01195
313	81	1.105	0.0565	2.446	0.01163
213	58	1.0912	0.0825	2.622	0.01127
123	37	1.0761	0.1389	2.81	0.01092
13	0	1.0605	0.747	3.111	0.00983

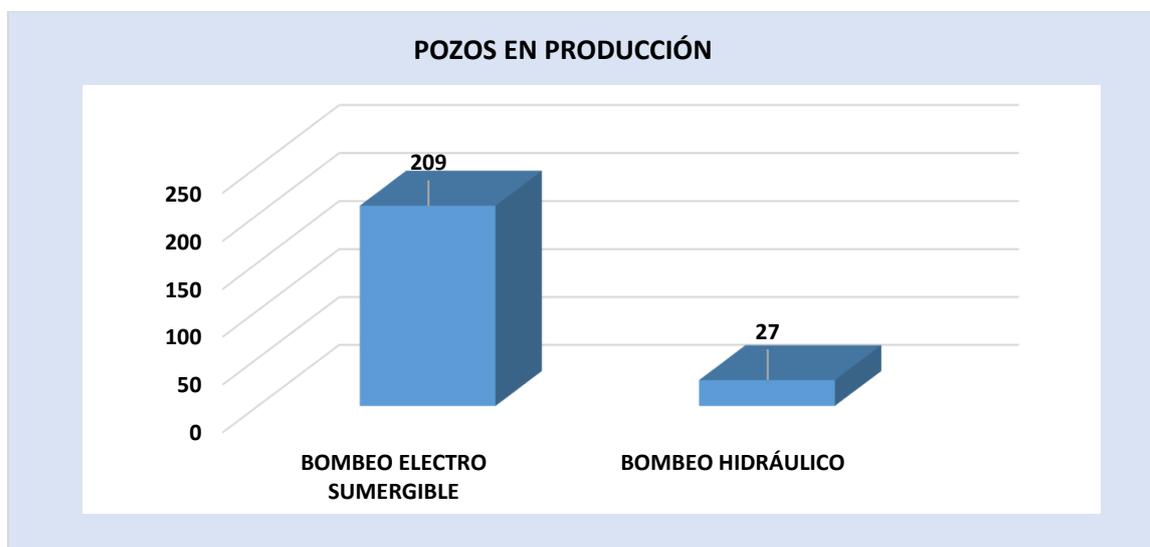
Fuente: Petroamazonas E.P.

Elaborado por: Dirección de operaciones Activo Sacha

#### 1.4.6 PRODUCCIÓN DEL CAMPO SACHA

El Campo Sacha cuenta en la actualidad con 236 pozos en producción de los cuales; 27 pozos se encuentran produciendo por bombeo hidráulico (PPH), 209 pozos por bombeo electrosumergible (PPS). En la figura 1.3 se muestra el inventario de pozos productores según el sistema de levantamiento artificial (Activo Sacha, 2018).

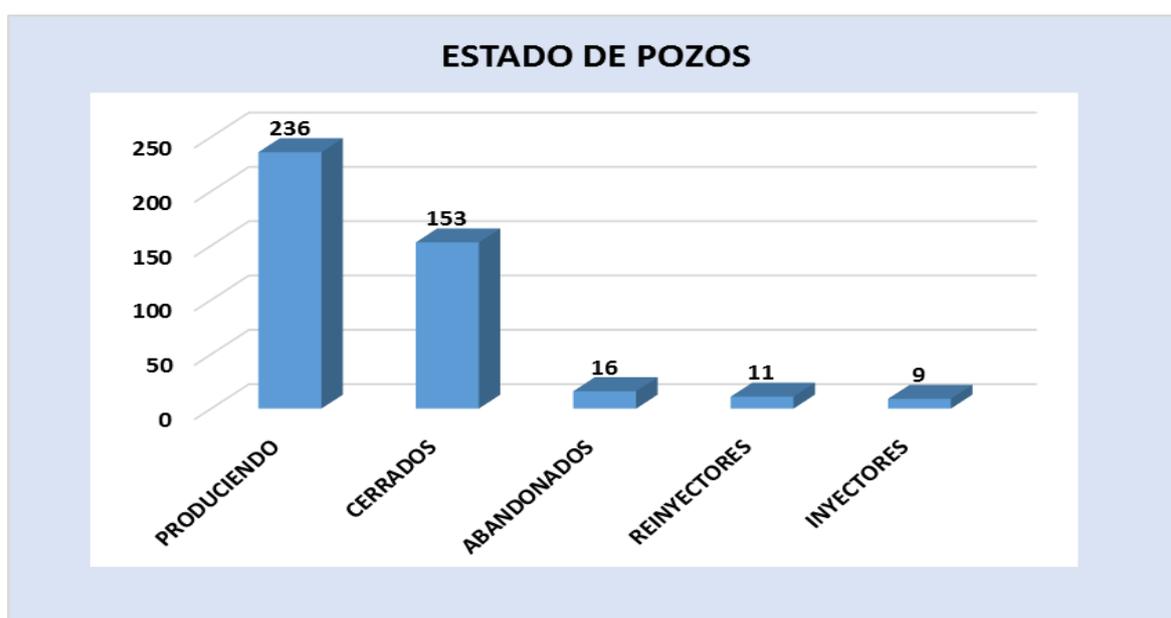
**FIGURA 1.3 POZOS SEGÚN EL SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL EN EL CAMPO SACHA AL MES DE OCTUBRE DE 2018**



Fuente: PETROAMAZONAS E.P.  
Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

El Campo Sacha se tienen: 153 pozos cerrados, 16 pozos abandonados, 9 pozos inyectoros y 11 pozos reinyectores, sumando un total de 425 pozos perforados. La producción promedio diaria del Campo Sacha para el mes de octubre 2018, fue de 66,488.80 BPPD. En la figura 1.4 se muestra el inventario de los pozos según su estado operativo en el Campo Sacha (Activo Sacha, 2018).

**FIGURA 1.4 INVENTARIO DE POZOS AL MES DE OCTUBRE DE 2018**



Fuente: PETROAMAZONAS E.P.  
Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

El Balance de producción de Gas del Campo Sacha al mes de octubre, se detalla en la tabla 1.5.

**TABLA 1.5**  
**PROMEDIO DIARIO Y MENSUAL DE LA PRODUCCIÓN DE GAS EN EL CAMPO SACHA AL MES DE OCTUBRE DEL 2018**

CAMPO SACHA	Promedio diario MPC/D	Promedio mensual MPC/M
	Octubre 31 de octubre	Octubre 31 de octubre
Gas de formación (producido)	13 590.43	421 303.33
Gas combustible	3 556.16	110 240.96
Gas Quemado	10 034.27	311 062.37

Fuente: PETROAMAZONAS E.P

Elaborado por: Ingeniería de Operaciones Campo Sacha

#### 1.4.7 CONCEPTOS GENERALES

##### Densidad

La densidad del petróleo crudo se define como la masa de una unidad de volumen de crudo a determinada temperatura y presión, generalmente se expresa en lb/pie<sup>3</sup> (BAKER HUGHES CENTRILIFT, 2009).

##### Gravedad específica

La gravedad específica de un petróleo crudo, se define como la relación entre la densidad del petróleo y la densidad del agua, ambas medidas en condiciones estándar a 60°F y presión atmosférica. Para gases, es la relación entre la densidad del gas y la densidad del aire en condiciones estándar de presión y temperatura (BAKER HUGHES CENTRILIFT, 2009).

$$SG_0 = \frac{141.5}{131.5 + API^\circ} \quad (1.1)$$

##### Gradiente de presión

Es el diferencial de presión por unidad de longitud, el gradiente de presión del agua dulce es 0.433 psi/pie, quiere decir que en una columna de agua dulce la presión se incrementa con la profundidad en 0.433 psi por cada pie (BAKER HUGHES CENTRILIFT, 2009).

##### Viscosidad

La viscosidad es una medida de la resistencia interna de un líquido al flujo, tal resistencia es provocada por la fricción interna que resulta de los efectos combinados de cohesión y adhesión. La viscosidad de los productos derivados del petróleo se expresa comúnmente en centipoises (cp) (Cengel & Boles, 2006).

##### Fricción en tuberías

La fricción en la tubería variará con el tamaño, la capacidad, la longitud de la tubería y la viscosidad de fluido. (BAKER HUGHES CENTRILIFT, 2009).

## **Presión**

Es la fuerza por unidad de área y puede considerarse un esfuerzo compresivo. La unidad más común para designar presión es libras por pulgada cuadrada (psi).

La presión absoluta es la presión real en una determinada localización geográfica y se mide respecto al vacío absoluto, es decir, presión cero absoluta. Sin embargo, todos los dispositivos para medir la presión se calibran a cero en la atmósfera. La Presión atmosférica o barométrica se define como el peso del aire que se halla arriba de un sitio por área superficial unitaria, por otro lado, la presión manométrica es la diferencia entre la presión absoluta y la atmosférica local (CENGEL & BOLES, 2006).

### **Presión hidrostática**

La presión hidrostática es la presión que ejerce una columna de fluido a una determinada profundidad (BAKER HUGHES CENTRILIFT, 2009).

### **Presión de succión de la bomba (PIP)**

Es la presión de succión necesaria para alimentar adecuadamente la bomba y evitar la cavitación o el bloqueo de gas (BAKER HUGHES CENTRILIFT, 2009).

### **Cavitación**

En una bomba centrífuga cuando un líquido entra en el impulsor de la bomba, se produce un aumento en la velocidad. Este aumento de la velocidad se acompaña de una reducción de la presión. Si la presión cae por debajo de la presión de burbuja correspondiente a la temperatura del líquido, el líquido se evapora, por lo que los resultados serán líquidos más gas. A medida que el fluido fluye más a través del impulsor y los impulsores compañeros, el líquido alcanza una región de mayor presión y las burbujas de vapor colapsan. Los efectos más evidentes de la cavitación son el ruido y la vibración. Esto se debe al colapso de las burbujas de vapor cuando alcanzan el lado de alta presión del impulsor. Este ruido y vibración puede causar roturas del eje y otras fallas de fatiga en la bomba, aunque, en la bomba sumergible del campo petrolífero, la cavitación es una ocurrencia rara. Nunca debe ser un problema si la bomba está diseñada adecuadamente y tiene una presión de admisión suficiente (BAKER HUGHES CENTRILIFT, 2009).

### **Bloqueo de gas**

El bloqueo de gas en una bomba sumergible en un campo petrolífero es mucho más común cuando hay una cantidad excesiva de gas libre en el fluido que se bombea en la entrada de la bomba. El bloqueo de gas puede considerarse una forma de cavitación, ya que hay gas libre presente. En un pozo, donde hay un exceso de gas libre presente, se debe mantener una cierta presión de succión para controlar la cantidad de gas libre manejado por la bomba para evitar el bloqueo del gas (BAKER HUGHES CENTRILIFT, 2009).

## 1.4.8 FUNDAMENTOS ELÉCTRICOS

### Voltaje

Se lo llama también diferencia de potencial o tensión, y es la fuerza o presión denominada fuerza electromotriz que se usa para separar los electrones que normalmente están distribuidos en toda la sustancia de los átomos y permitir que fluyan en una dirección definida. La unidad para medir esta fuerza electromotriz es el voltio (BAKER HUGHES CENTRILIFT, 2009).

### Corriente

Está definida como la circulación de cargas o electrones a través de un circuito eléctrico cerrado. La corriente fluirá siempre y cuando exista un diferencial de potencial. El flujo de electrones es medido en Amperios que representa el flujo de los culombios de carga por segundo y se la mide en un amperímetro. La corriente eléctrica se presenta de dos maneras:

**Corriente continua:** Es el flujo de electrones que fluye siempre en la misma dirección del polo – al polo + que los atrae.

**Corriente alterna:** Es la corriente o flujo de electrones que no fluye siempre en la misma dirección, alterna su flujo fluye primero en una dirección y luego se invierte y fluye hacia la otra dirección (Takács, 2009).

### Frecuencia

La frecuencia del voltaje o de la corriente está definida como el número de ciclos generados cada segundo y está expresada en ciclos por segundo. Su unidad de medida es el Hertz. Cuanto mayor sea el número de ciclos por segundo, más alta es la frecuencia. Para un motor: la siguiente fórmula expresa la relación entre la frecuencia generada (f) en Hertz, la velocidad del rotor (N) en RPM y el número de polos en el motor (P).

$$f \text{ (hertz)} = \frac{NP}{120} \quad (1.2)$$

Donde

f=Frecuencia generada (Hz)

N= Velocidad del rotor

P=Número de polos del motor

### Ley de Ohm

La relación existente entre el voltaje, la corriente y la resistencia en un circuito eléctrico se denomina la Ley de Ohm. La corriente es directamente proporcional al voltaje e inversamente proporcional a la resistencia. Puede ser descrita por la siguiente ecuación:

$$V = RI \quad (1.3)$$

Donde:

V= Diferencia de potencial en voltios [V]

I= Corriente en amperios [A]

R= Resistencia [Ohm]

### **Potencia Real**

Está definida como la cantidad de trabajo que una carga puede realizar en un tiempo determinado, representa la energía necesaria para mantener el flujo de corriente. Su unidad de medida es el Watt (W) o vatio que representa la potencia consumida cuando un Amperio de corriente fluye a través de una diferencia de potencial de un Volt. Se puede decir que la potencia real es la encargada de realizar el “trabajo útil” en el sistema eléctrico. Y se la encuentra con las siguientes fórmulas:

$$P = VI \quad (1.4)$$

Con la ley de Ohm:

$$P = \frac{V^2}{R} = I^2R \quad (1.5)$$

### **Potencia reactiva (kVAR)**

Es la encargada de mantener el campo electromagnético para poder operar los equipos de tipo inductivo. Esta potencia no realiza un trabajo útil, únicamente sirven para mantener los campos electromagnéticos. Su unidad fundamental es el voltio-Amperio reactivo kVAR.

### **Potencia aparente (kVA)**

Es el resultado de la suma vectorial de la potencia activa y la potencia reactiva, se la denota con la letra S. Su unidad fundamental es el voltio-Amperio.

### **Factor de potencia**

El factor de potencia se define como la relación existente entre la potencia real y la potencia aparente.

$$FP = \cos\theta = \frac{kW}{kVA} \quad (1.6)$$

Este factor indica la eficiencia con la que se está usando la energía eléctrica en un circuito. Un factor de potencia alto indica beneficio para la compañía de suministro de energía y para el consumidor, y un factor de potencia bajo indica que la energía eléctrica no se está usando eficientemente (ESP OIL Engineering Consultants, 2004).

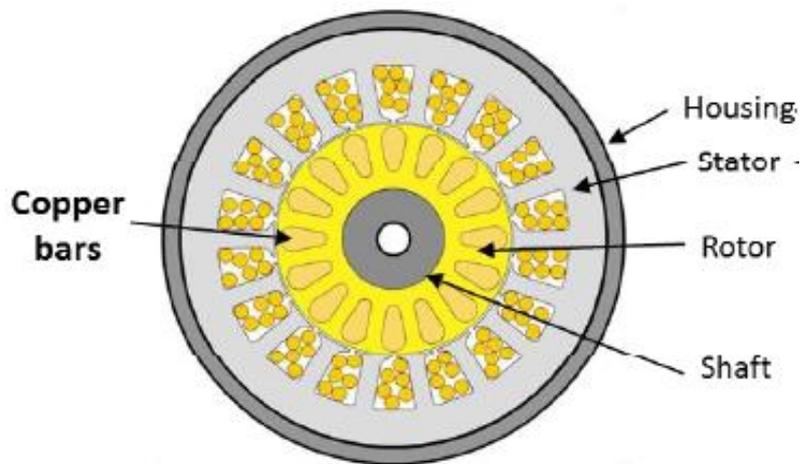
## **1.4.9 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LOS MOTORES ELÉCTRICOS**

El motor eléctrico convierte la energía eléctrica a energía mecánica a través de la acción de campos magnéticos. En el sistema de bombeo electrosumergible el motor transmite movimiento rotatorio al eje de la bomba centrífuga, es colocado por encima de las perforaciones y recibe la energía a través de un cable desde una fuente superficial (Takács, 2009).

## Motor de inducción o asíncrono

Es un motor eléctrico de corriente alterna, se lo llama motor asíncrono porque la velocidad con la que gira el rotor es diferente a la velocidad del campo magnético provocado por el estator. Es llamado motor de inducción porque el voltaje del rotor es inducido en los devanados del rotor por inducción magnética en lugar de estar físicamente conectados a través de cables. Se compone principalmente de dos conjuntos de piezas, en la figura 1.5 se muestra la disposición de sus partes (Takács, 2009).

**FIGURA 1.5 MOTOR DE INDUCCIÓN**



Fuente: Permanent Magnet Motor application for ESP Artificial Lift SPE, 2013  
 Elaborado por: A. Refaie, H A.M. Abdou, A. Seleim, G Biasin, A Pet Co, W Reda, Novomet Company

**Estator:** Es la armadura del motor, se refiere a todo el grupo de partes inmóviles donde operan las fuerzas electromotrices.

**Rotor:** Es la contraparte de la armadura, contiene todas las partes giratorias del motor, se trata de un sistema polar que se excita por inducción.

El funcionamiento del motor se basa en el principio de la inducción electromagnética, que establece que se induce una corriente eléctrica en cualquier conductor que se mueva en relación con un campo magnético. Una vez que se energiza el estator con corriente alterna trifásica se genera el campo magnético giratorio en el estator, este campo gira alrededor del rotor en estado de reposo e induce corriente en el mismo que producirá un campo magnético que seguirá el movimiento del campo estático produciendo un par motor que hace que gire el rotor.

Los polos magnéticos del campo del rotor son atraídos o repelidos por los polos diferentes o similares respectivamente del estator y el rotor mantiene la rotación continua del eje del motor. El rotor siempre debe girar a una velocidad inferior a la velocidad síncrona del motor, de lo contrario no habría inducción y el rotor no produciría el par motor (Takács, 2009).

Existen dos tipos de rotores que se pueden usar dentro del estator del motor de inducción:

**Rotor jaula de ardilla:** Consisten en una serie de barras conductoras dispuestas entre ranuras labradas en la cara del rotor y cortocircuitados en cada extremo por anillos de cortocircuitado.

**Rotor de devanado:** Este rotor tiene un grupo completo de devanados trifásicos que son las imágenes reflejadas de los devanados del estator. Las fases de los devanados están conectadas en Y, los extremos de los tres alambres del rotor están unidos a anillos rozantes dispuestos sobre el eje del rotor, en corto circuito por medio de escobillas montadas sobre los anillos de rozamiento (Colorado M, 2016).

Los motores de inducción trifásico tipo jaula de ardilla de dos polos son los más utilizados en el sistema de bombeo electrosumergible. La construcción de este tipo de motores es la más simple entre los motores eléctricos, son los motores más confiables porque su rotor no está conectado con la fuente eléctrica.

La velocidad del motor se puede calcular de la siguiente ecuación:

$$N = \frac{(120 f)}{p} \quad (1.7)$$

Donde:

N= Velocidad en RPM

f= Frecuencia en ciclos por segundo

P= Números de polos magnéticos del motor.

Los motores eléctricos utilizados en el sistema de bombeo electro sumergible se llenan con aceite dieléctrico. Su voltaje de operación está entre 230 y 5000 volts. El amperaje varía entre 12 y 200 amperes (ESP OIL Engineering Consultants, 2004).

### **Motor de imán permanente o síncrono**

El motor de imán permanente al igual que el motor de inducción transforma la energía eléctrica en energía mecánica. Se lo llama motor síncrono ya que la velocidad del rotor y la velocidad del campo magnético del estator son iguales, no poseen deslizamiento.

En los motores de imán permanente la fabricación del estator es similar al motor de inducción con la diferencia que el rotor tiene imanes permanentes en lugar del devanado de cobre. Los imanes permanentes tienen la capacidad de almacenar energía magnética por largo tiempo y no sufren degradación significativa. Al montar los imanes en el rotor, el flujo del rotor ahora es suministrado por los imanes evitando el uso del suministro de energía eléctrica para generar este campo (Gad et al., 2017).

El funcionamiento de los imanes permanentes crea un campo magnético uniforme al devanado del rotor de tal manera que interactúe con el campo formado por el bobinado y así origina el movimiento del rotor por la interacción de los campos magnéticos (Colorado M, 2016).

Estos motores funcionan bajo el principio de cohesión de fluidos magnéticos entre imanes permanentes ubicados en el rotor y el flujo generado en el estator por el campo magnético, requiere un variador de frecuencia modificado especialmente para este tipo de motores ya que en el VDF se instala un rectificador y un convertidor que alimentarán al sistema. La tecnología del variador de frecuencia varía ligeramente del variador típico que usualmente usa un sistema con motor de inducción (Refai et al., 2013).

## **CAPÍTULO 2**

### **DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS Y METODOLOGÍA**

#### **2.1 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DE SUPERFICIE DEL SISTEMA BES**

Los componentes en superficie para el sistema BES con motor de imán permanente y el sistema BES con motor de inducción operan de forma similar, a excepción del variador de frecuencia.

##### **2.1.1 CABEZAL DEL POZO**

Es el equipo superficial que tiene la función de soportar el peso total del equipo de fondo incluyendo: Tubería de producción, cable de potencia, herramientas especiales, etc. Para pozos con el sistema BES, el cabezal en el Tubing es un tipo hidratante o empaque cerrado el cual brinda un sello alrededor del cable y la tubería (Ace International, 2014).

##### **2.1.2 CAJA DE VENTEO**

En este equipo se conecta el cable de energía del equipo de superficie y el cable del equipo de subsuelo. El gas del pozo que fluye a través del cable es venteado a la atmósfera, evitando que llegue al panel y se ocasione una explosión.

##### **2.1.3 TRANSFORMADOR**

Este equipo está diseñado para convertir el voltaje primario de la línea eléctrica en el voltaje que pueda requerir el motor correspondiente cambia el voltaje de un sistema de corriente alterna a corriente continua. Generalmente el centro y los alambres son sumergidos en aceite, que sirve como aislante y ayuda a enfriar el transformador (Ace International, 2014).

##### **2.1.4 TABLERO DE CONTROL**

Constituye el comando de la instalación y su función es la de proteger y controlar las operaciones en el pozo. Consta de interruptores para arranque y parada, botones selectores de voltaje, fusibles, amperímetros, luces de señales, etc.

##### **2.1.5 VARIADORES DE FRECUENCIA (VDF) PARA LOS EQUIPOS BES CON MOTOR DE INDUCCIÓN**

Es un controlador de motor que permite operar el sistema BES en un rango amplio de frecuencia en vez de estar limitado a la frecuencia de línea. Así la tasa de producción, la carga o ambos se pueden ajustar, dependiendo de la aplicación, al variar la velocidad de la bomba, sin modificaciones en el equipo de fondo.

El propósito principal para usar el VDF en el sistema BES es la flexibilidad en el bombeo, pero también se obtienen otros beneficios tales como la extensión de la vida útil del equipo de fondo, arranque suave, velocidad controlada automáticamente, supresión de transitorios de línea y eliminación de estrangulamientos superficiales.

### 2.1.6 VARIADOR DE FRECUENCIA (VDF) PARA LOS EQUIPOS BES CON MOTOR DE IMÁN PERMANENTE

En la actualidad, la tecnología de motor imán permanente cuenta con VDF en el rango de 75 a 315 kVA y sistemas más potentes con capacidad de hasta 600 kVA. Una de las características más importantes los VDF de Novomet es su compatibilidad con motores asíncronos y permanentes (NOVOMET PRODUCT CATALOG, 2018)

#### CARACTERÍSTICAS:

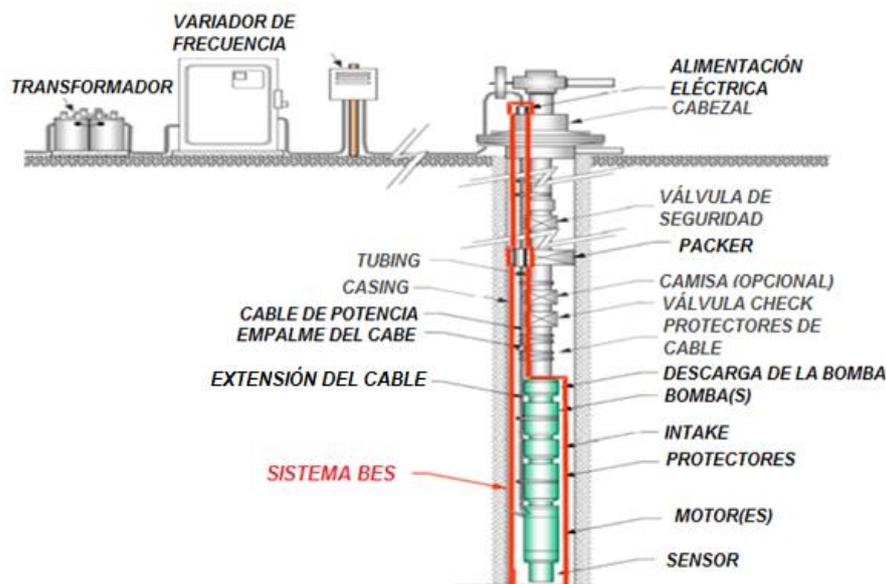
- Protección precisa y de alta velocidad del inversor y el motor contra modos anormales: sobrecarga o cortocircuito.
- Componentes electrónicos de calidad utilizados en las placas de circuitos.

### 2.2 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DE SUBSUELO DEL SISTEMA BES CON MOTOR DE INDUCCIÓN

El equipo de fondo es un conjunto de componentes que se encuentran acoplados en el final de la tubería de producción y se encarga de levantar la columna de fluidos a través de la rotación centrífuga de la bomba, desde el fondo del pozo hasta la superficie. En la figura 2.1, se muestran sus componentes principales:

- Sensor de fondo
- Motor eléctrico (Inducción)
- Protectores o sellantes
- Intake o separador de gas
- Bomba electrosumergible
- Cable de potencia

**FIGURA 2.1 SISTEMA DE BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE**



Fuente: F. Alhanati, S.Sollanki & A. Zahacy. C-FERTechnologies  
Modificado por: Diana Arellano y Gina Guajala.

### 2.2.1 SENSOR DE FONDO

Es un dispositivo electrónico, capaz de tolerar altas condiciones de presión y temperatura. Se encuentra conectado en la parte inferior del motor por medio de un cable de alimentación y un cable de señal. Recibe pulsos de corriente continua de +/- 120 Voltios. Este dispositivo envía la señal sensada en el anillo de presión hacia superficie, traduciéndola a una señal eléctrica por medio de un cable de potencia. (Colorado, 2016). Es capaz de detectar información de:

- Presión y Temperatura de entrada de la bomba
- Presión, Temperatura en la descarga de la bomba y vibraciones.
- Temperatura del bobinado del motor y el aceite dieléctrico, corrientes de fugas

En la figura 2.2 se muestra el sensor de fondo de un equipo BES y su acople al motor.

### FIGURA 2.2 SENSOR DE FONDO



Fuente: Schlumberger, ESP Training, Artificial Lift  
Elaborado por: Schlumberger

### 2.2.2 MOTOR DE INDUCCIÓN

En el sistema de bombeo electrosumergible se usa principalmente el motor eléctrico de inducción de corriente alterna tipo jaula de ardilla, que va ubicado sobre el sensor de fondo. A una profundidad sobre las perforaciones por encima del fluido entrante tomando en cuenta que no exista una alta pata de perro (dog leg) (ESP OIL Engineering Consultants, 2004).

La energía necesaria para su funcionamiento es suministrada desde la superficie a través de un cable eléctrico, en este cable pueden ocurrir pérdidas de voltaje, cuando la caída de voltaje es grande, se debe tomar en cuenta un motor de más alto voltaje y menos amperaje.

#### Componentes del motor

A continuación, se describen las principales partes que están conformando un motor de inducción (BAKER HUGHES CENTRILIFT, 2009).

**Carcasa del motor:** Se refiere a la armadura del motor la que cubre todos los elementos internos del motor, puede venir en distintos materiales como: acero ferrítico y acero inoxidable.

**Estator:** Está compuesto por las partes inmóviles de motor, está constituido por un tubo cilíndrico de láminas de hierro y silicio, está diseñado para trabajar a distintas condiciones de temperatura, también se le denomina bobinado del motor electrosumergible posee tres bobinas separadas  $120^\circ$  entre sí. Las mismas que forman una especie de electroimanes.

**Rotor:** Se refiere a la contraparte del estator es un elemento interno del motor constituido por un tubo cilíndrico de láminas de hierro y silicio, va ubicado sobre el eje y fijo frente al campo magnético inducido por el estator. Se encarga de generar los HP caballos de potencia de un motor.

**Cojinetes del motor:** Pertenecen a la parte estática del motor electrosumergible, son elementos internos que fijan y centran el conjunto de rotores, ayudan a reducir la fricción y facilitan el giro del rotor.

**Zapata del motor:** Se encuentra instalado en la parte superior del motor, su función principal es soportar la carga axial del conjunto de rotores, puede tener una configuración direccional o bidireccional. También se lo conoce como cojinete de empuje.

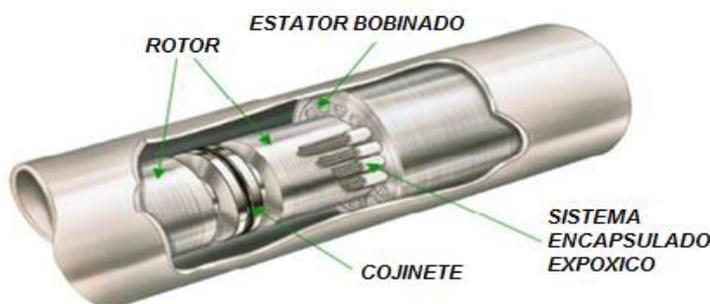
**Eje:** Es un componente interno encargado de hacer girar a todo el sistema, internamente es hueco para permitir la circulación del aceite dieléctrico a lo largo del motor.

**Bujes:** Son componentes internos ubicados entre el eje y el cojinete y el elemento dinámico que gira junto al rotor.

**Aceite dieléctrico:** Es un aceite mineral o sintético diseñado para trabajar en distintas condiciones de temperatura. Proporciona lubricación y enfriamiento a los elementos internos del motor.

El esquema del motor de inducción se presenta en la figura 2.3.

### FIGURA 2.3 PARTES DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN



Fuente: Manual Baker Hughes Centrilift  
Modificado por: Diana Arellano y Gina Guajala

### 2.2.3 PROTECTORES O SELLANTES

Son aquellos que se encuentran conectados mecánicamente entre el motor y la bomba electrosumergible, transmiten el torque desarrollado por el motor al eje de la bomba y cumplen las siguientes funciones:

- Aseguran que durante la operación del sistema la carga de empuje axial que se desarrolla en la bomba sea transmitido al eje del motor.
- Aísla el aceite dieléctrico que contiene el motor en su interior de la migración de fluidos del pozo y evita que cualquier fluido del pozo ingrese al motor durante su operación
- Igualan la presión anular de la tubería de revestimiento con la presión interna del aceite dieléctrico eliminando la migración de fluidos del pozo hacia el motor (Takács, 2009).

#### 2.2.4 INTAKE O SEPARADOR DE GAS

El intake es una sección de aproximadamente 30 a 40 cm que se instala para permitir el paso de los fluidos del pozo hacia la bomba siempre y cuando no exista la presencia de gas libre en altos volúmenes de lo contrario se debe instalar un separador de gas. Según el principio operativo de las bombas centrífugas, si el gas libre ingresa a la bomba, la succión deteriora el rendimiento de la bomba. Esto se debe a la diferencia de gravedad específica entre líquidos y gases (Colorado Mónica, 2016).

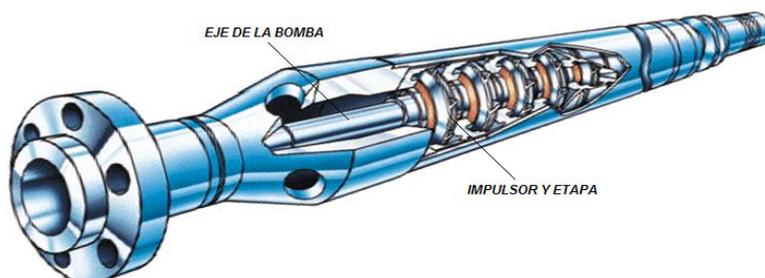
El separador está ubicado entre los protectores y la bomba, varios separadores pueden ser conectados en tándem para mejorar la eficiencia de separación en volúmenes altos de producción. Existe dos tipos de separadores: los separadores estáticos o de flujo inverso y separadores centrífugos o rotativos (Takács, 2009).

#### 2.2.5 BOMBA ELECTROSUMERGIBLE

Es una máquina que puede transferir energía a un fluido en forma de potencia hidráulica, es de tipo centrífuga multietapa, cada etapa consta de un impulsor giratorio y un difusor estático. El eje de la bomba está conectado mediante un acoplamiento mecánico al separador de gas o intake. El número de etapas es determinado de acuerdo con las condiciones de producción del pozo, la presión generada por la bomba y la potencia requerida dependerá de este número de etapas y el tamaño de las etapas determina el volumen de fluido a producirse (Guerrón, J & Robalino, D, 2013).

La longitud de la bomba depende del número de etapas, en la figura 2.4 se observa la disposición de las etapas en la bomba.

**FIGURA 2.4 BOMBA ELECTROSUMERGIBLE**

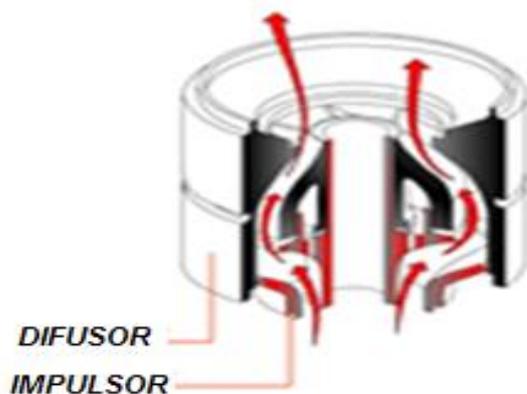


Fuente: Presentación Bombas Electrosumergibles BES, 2015  
Modificado por: Diana Arellano y Gina Guajala

## Principio de funcionamiento

Es accionada por un motor de inducción trifásico que transmite movimiento al eje de la bomba. El fluido del pozo fluye hacia la primera etapa, pasa a través de un impulsor y se centrifuga radialmente hacia afuera, adquiriendo energía cinética, como se puede ver en la figura 2.5. Una vez que pasa por el impulsor el fluido realiza un giro brusco para ingresar al difusor que direcciona el fluido al próximo impulsor. Mientras pasa por esta sección, el fluido se difunde y la energía cinética se convierte en presión proporcionándole altura al fluido. El fluido que ingresó en la primera etapa ahora tiene una presión más alta y se dirige a la segunda etapa para repetir el proceso, el fluido atravesará todas las etapas de la bomba adquiriendo más presión en cada una de ellas hasta llegar a la presión total necesaria de descarga y permitir el bombeo del fluido hasta la superficie. (Von Flatern, 2015).

**FIGURA 2.5 ETAPA DE UNA BOMBA**



Fuente: Presentación Schlumberger  
Modificado por: Diana Arellano y Gina Guajala

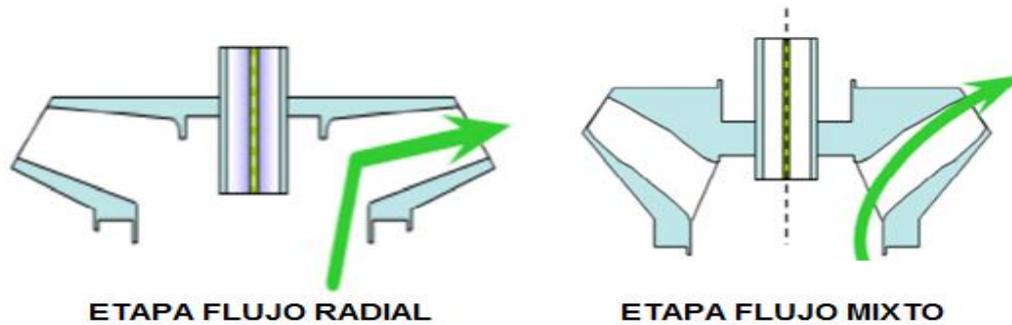
Las etapas se clasifican de acuerdo con la geometría de la trayectoria de flujo en:

### Etapas de flujo radial

En estas etapas la trayectoria de fluido es perpendicular al eje de la bomba y la presión se desarrolla en su totalidad por la fuerza centrífuga. Las bombas que utilizan este tipo de etapas funcionan con caudales menores a 1200 BFPD, a una eficiencia menor a 60%.

### Etapas de flujo mixto

En estas etapas la trayectoria del fluido es perpendicular y radial en relación con el eje de la bomba y la presión se desarrolla por la fuerza centrífuga y por la elevación que el impulsor le da al fluido. Las bombas que usan este tipo de etapas funcionan con caudales mayores a 1700 BFPD a una eficiencia del 70%. (Colorado M, 2016). En la figura 2.6 se muestra la forma de flujo para una etapa radial y mixta.

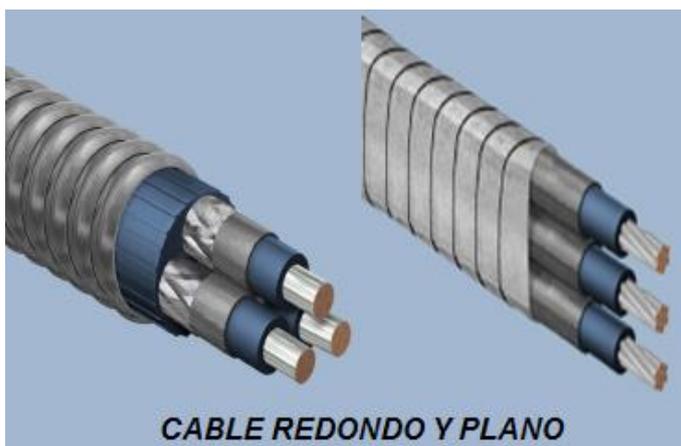
**FIGURA 2.6 ETAPA PARA FLUJO RADIAL Y MIXTO**

Fuente: Baker Hughes Centrilift  
 Modificado por: Diana Arellano y Gina Guajala

### 2.2.6 CABLE DE POTENCIA

Es un cable alimentación trifásica, encargada de suministrar la energía eléctrica proveniente de la superficie al motor de fondo. Este tipo de cables suelen ser de tipo sólido o trenzados como se muestra en la figura 2.7 y deben poseer las siguientes características:

- Tener diámetros capaces de encajar en el anular a lo largo del tubing del pozo y poder adaptarse a los requisitos del motor.
- Tener la capacidad de mantener sus propiedades dieléctricas en altas temperaturas, ambiente agresivo y presencia de gases e hidrocarburos.
- Deben estar protegidos contra los daños mecánicos durante la operación del sistema (Takács, 2009).

**FIGURA 2.7 CABLES ELÉCTRICOS**

Fuente: Presentación Artificial Lift Schlumberger  
 Modificado por: Diana Arellano y Gina Guajala

Pueden ser redondos o planos para poder encajar en el Tubing del pozo. Están fabricados en acero galvanizado, acero inoxidable o monel, actualmente se puede instalar el cable de potencia con un tubo capilar que facilita la inyección de químicos desde la superficie. (Centrilift, BAKER HUGHES, 1975).

## 2.3 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DE SUBSUELO DEL SISTEMA DE BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE CON MOTOR DE IMÁN PERMANENTE

En el sistema BES con motor de imán permanente el sensor de fondo, protectores, intake y cable de potencia cumplen la misma función y operan de igual manera que en el equipo BES con motor de inducción.

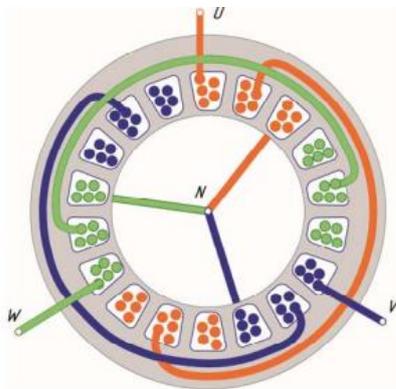
El desarrollo de la tecnología Power Save integra dos componentes decisivos en el rendimiento del sistema BES, estos son: el motor de imán permanente y la geometría de las etapas de la bomba.

### 2.3.1 MOTORES DE IMÁN PERMANENTE

Al igual que el motor de inducción se alimenta de corriente alterna trifásica para energizar los devanados del estator, la principal diferencia con los motores de inducción es que el rotor tiene imanes permanentes en lugar del bobinado de cobre, elaborados en aleaciones para un alto nivel de inducción del imán (Xiao & Lastra, 2018).

El motor MIP está compuesto de un estator con devanado trifásico, un rotor con imanes permanentes, cabeza y base. En el cual las fases del bobinado están ubicadas a  $120^\circ$  y conectado e "Y", como se muestra en la figura 2.8.

**FIGURA 2.8 ESTATOR DE UN MOTOR DE IMÁN PERMANENTE**



Fuente: Permanent Magnet Motor application for ESP Artificial Lift SPE, 2013  
Elaborado por: A. Refaie, H A.M. Abdou, A. Seleim, G Biasin, A Pet Co, W Reda, Novomet Company

La construcción del motor MIP se ha simplificado mediante la implementación de imanes permanentes en el rotor, que crean un flujo constante en el entrehierro del equipo, esto elimina la necesidad de un rotor bobinado (Colorado M, 2016).

El núcleo del estator se compone de placas de acero, con revestimiento resistente al calor. El devanado del estator está fabricado en alambre de cobre resistente a calor. El eje del motor es hueco para la circulación del aceite dieléctrico. Su funcionamiento se basa en la interacción electromagnética entre dos campos estator y rotor.

El campo magnético del estator se crea con la alimentación de corriente trifásica AC en los dos tipos de motores. En el caso del MIP, el rotor tiene su propio campo magnético y la interacción generada entre el rotor y campos magnéticos crean el par electromagnético que hace que el rotor gire. Los imanes permanentes están protegidos con elementos de diseño especial (Refai et al., 2013).

### 2.3.2 BOMBA ELECTROSUMERGIBLE POWER SAVE

#### Etapas

Las etapas diseñadas para la bomba son fabricadas usando pulvimetalurgia. Las etapas de la bomba generan: mayor rendimiento, menores pérdidas hidráulicas y aumento de eficiencia. La eficiencia por etapa mejora hasta en un 70% y disminuye la potencia requerida por etapa (Refai et al., 2013).

La fabricación de las etapas, comprende operaciones de mezcla, moldeo y sinterización del polvo. La característica de diseño, es la trayectoria que sigue el flujo a través de cada etapa. El procedimiento de fabricación es capaz de crear detalles con formas complicadas en la etapa (Catálogo Novomet 2018).

De manera general el procedimiento para la elaboración de las etapas empieza con la recolección de la materia prima: Polvo de hierro, polvo de grafito y polvo de cobre. En la en la figura 2.9 se observa los pasos para la elaboración de etapas.

**FIGURA 2.9 PROCEDIMIENTO PARA LA ELABORACIÓN DE ETAPAS**



Fuente: Catálogo NOVOMET, 2018  
Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

## Tipos de etapas de la bomba electrosumergible

### a. Etapa tipo panqueque (diseño centrífugo del impulsor)

Es un diseño estándar cuando la elevación del líquido es ocasionada por la acción de fuerzas centrífugas. Permite un contenido de máximo 25 % de gas (NOVOMET, 2018).

### b. Etapa de flujo mixto (diseño centrífugo del impulsor)

Toman características de las etapas de flujo radial como de flujo axial, a medida que el fluido fluye a través del impulsor de una bomba de flujo mixto empujan el líquido hacia afuera desde el eje de la bomba y hacia la succión de la bomba en un ángulo mayor de 90°, este diseño permite aumentar la elevación por etapa (NOVOMET, 2018).

### c. Etapa de vórtice (diseño de vórtice centrífugo)

Este tipo de etapa presenta un diseño mejorado del impulsor. Maneja mayor cantidad de gas en la succión de la bomba, por la manipulación de gas en corona vortex (NOVOMET, 2018).

## 2.4 COMPARACIÓN ENTRE EL SISTEMA BES CON MOTOR DE INDUCCIÓN Y EL SISTEMA BES CON MOTOR DE IMÁN PERMANENTE

En la tabla 2.1 se observan los principales componentes que conforman el equipo de fondo y superficie del sistema BES con motor de inducción en comparación con los equipos del sistema BES con motor de inducción.

**TABLA 2.1**  
**COMPARACIÓN ENTRE EL SISTEMA BES CON MOTOR DE INDUCCIÓN Y EL SISTEMA BES CON MOTOR DE IMÁN PERMANENTE**

Nombre del Componente	TABLA COMPARATIVA	
	BES CON MOTOR DE INDUCCIÓN	BES CON MOTOR DE IMÁN PERMANENTE
<b>Equipo de Superficie</b>		
Cabezal del pozo	El cabezal para los equipos es el mismo no se requiere alguna variación.	
Caja de venteo	Es la misma y no se requiere variaciones.	
Transformador	Siempre usa Shifting transformer	No usa Shifting transformer cuando la energía es proporcionada por un generador
Variadores de frecuencia (VDF)	Un VDF convencional no se puede usar para controlar un MIP ya que ocasiona un bajo rendimiento en el motor y posibles daños integrales.	Es compatible con motores asíncronos.

**TABLA 2.1 CONTINUACIÓN**

<b>Equipo de fondo</b>		
Cable de potencia	Debe cumplir las mismas especificaciones que en cualquier equipo electrosumergible.	
Bomba electrosumergible	Amplios rangos de operación. Equipos de mayor longitud	Disminución en las dimensiones y peso de los equipos Etapas con mejor construcción y de mejor material.
Intake o separador de gas	Maneja hasta 70% de gas.	Más resistentes a la abrasión y corrosión. Maneja alto contenidos de sólidos. Maneja hasta 85% de gas
Protectores	En la mayoría de los casos se necesita usar dos.	Son más eficientes
Motor eléctrico	Consumen mayor energía eléctrica. Tiene menor velocidad	Los motores de imán permanente no son máquinas de arranque automático por lo que necesita un algoritmo especial de control y un VDF especial.
Sensor de fondo	Se puede usar el mismo	
PROCESO DE INSTALACIÓN	La rotación del eje es libre y suave. Se necesita la instalación de camisas de enfriamiento, por lo que alarga la intervención del trabajo de Reacondicionamiento hasta 24 horas	La rotación del eje se restringe y presenta arrastre. Instalación del equipo más rápida.

Fuente: PETROAMAZONAS E.P

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

**2.4.1 VENTAJAS DE LOS MOTORES DE IMÁN PERMANENTE**

- Los MIP ofrecen mayor factor de potencia casi igual a 1 y mayor eficiencia (88-94%).
- Los imanes permanentes proporcionan mayor flujo magnético obtenido mayor densidad de potencia.
- La potencia por volumen de rotor para los MIP es generalmente el doble que la de los motores de inducción.
- Para el mismo requerimiento de potencia se puede fabricar motores más pequeños, más cortos y menos pesados que los motores asíncronos.
- Mayor eficiencia del motor MIP, ya que no existe voltaje ni corriente inducida porque no necesita energía para magnetizar el rotor entonces tenemos cero pérdidas por efecto Joule.
- El control de RPM permite reducir el peso del motor y mejora la vida útil del motor.

- Aplicado a pozos con petróleos de alta viscosidad, flujo inestable y ambientes severos.
- Aumento significativo de la potencia de un solo motor.
- Disminución del consumo de energía.
- Reducción de la distorsión armónica
- Mayores rangos de regulación de frecuencia 100-1000, 1000-4200, 3000-6000 RPM
- Menor tamaño de cable y menor potencia nominal para transformador y VDF (Gad et al., 2017).

#### **2.4.2 DESVENTAJAS DE LOS MOTORES DE IMÁN PERMANENTE**

- Requieren VDF con capacidad de determinación de posición del rotor para su funcionamiento.
- Para los motores de imán permanente la corriente de carga baja es alta y puede ser difícil proteger el motor con el control de corriente.
- Los imanes tienen un alto costo representan el 25 – 30% del valor del motor.
- A baja carga la eficiencia del MIP cae significativamente, por esto los motores de imán permanente no pueden utilizarse por debajo de 50-60% de su carga (Xiao & Lastra, 2018).

#### **2.4.3 VENTAJAS DE LA NUEVA TECNOLOGÍA DEL SISTEMA BES CON MOTOR DE IMÁN PERMANENTE**

- Menor consumo de energía eléctrica que implica menor costo de producción
- Dimensiones de equipos menores a los equipos convencionales.
- Menor costo del trabajo de reacondicionamiento.
- Mayor tiempo de producción por la reducción del tiempo de inactividad ya que es capaz de detectar problemas en las condiciones de operación.
- Mayor rango de velocidad proporciona mayor flexibilidad en el uso de los motores, reduciendo posibles fallas en el equipo y prolongando su vida útil (Refai et al., 2013).

## **2.5 METODOLOGÍA**

### **2.5.1 TIPO DE ESTUDIO**

Este estudio tiene un enfoque mixto ya que se trata de una investigación que: recolecta, analiza y vincula datos cualitativos y cuantitativos. Para obtener un mejor entendimiento del tema se realiza un análisis descriptivo de los dos sistemas BES y los parámetros de diseño involucrados en cada tecnología.

#### **Selección de los pozos**

El sistema BES con motor de imán permanente es una tecnología nueva que se está abriendo camino frente a la demanda de equipos BES, el campo con mayor cantidad de pozos con esta nueva tecnología es el Campo Sacha.

Al 31 de octubre de 2018 el Campo Sacha cuenta con 209 pozos productores con el sistema de levantamiento de bombeo electrosumergible, se seleccionaron 8 pozos para este trabajo de acuerdo a los siguientes criterios:

**Tiempo de vida útil o Run Life.** Se seleccionó los pozos que se encuentran en un Run Life de 100 a 400 días. Debido a que los pozos que presentan alto Run Life podrían entrar un trabajo de reacondicionamiento. De un total 209 pozos, 80 estarían dentro de este rango.

Nota: Para el 31 de octubre del 2018 en el campo Sacha, el promedio de run life de los equipos BES con motor de imán permanente es de 500 días, mientras que el promedio de run life para los equipos con motor de inducción es de 513 días.

**Caudal.** Se seleccionó caudales inferiores a 2300 BFPD debido a que las bombas con imán permanente instaladas en el Campo Sacha se encuentran dentro de este rango y el objetivo es realizar una selección de pozos en condiciones similares.

De los 8 pozos seleccionados 4 pozos se encuentran con el sistema BES con motor de inducción y cuatro pozos con la nueva tecnología de motor de imán permanente. En la tabla 2.2 se muestra los datos de pruebas de pozo realizado a los pozos seleccionados.

**TABLA 2.2**  
**POZOS SELECCIONADOS**

POZO	BFP D	BPP D	BAP D	MSC F	BS W	GO R	TIPO BOMBA	API	FRE C	P CABEZA	PIP
SCHA-137 UI	435	409	26	65.44	5.98	160	D460N	21. 4	55.0	135	527
SCHAP- 481TI	364	328	36	112.1 8	9.89	342	RC 1000	29. 9	58.0	30	340
SCHAG- 395UI	233	231	2	43.89	0.86	190	D460N	19. 2	52.0	30	288
SCHF-247TI	808	751	57	256.8 0	7.05	342	RC 1000	29. 4	61.5	85	441
SCHH- 239HS	2172	348	1824	52.85	84.0	151	NH(1600- 2300)H	25. 0	140. 0	40	216 4
SCHH-228HI	495	257	238	3.85	48.1	15	NFV(310-630)H	27. 8	154. 0	20	664
SCHAJ- 425UI	297	294	3	45.57	1.0	155	NFV(310-630)H	18. 9	57.0	70	537
SCHH- 231HS	1013	243	770	36.69	76.0	129	NHV(790- 1000)H	30. 2	142. 0	45	135 7

Fuente: PETROAMAZONAS E.P

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

## 2.5.2 ESTUDIO TÉCNICO

El estudio comparativo entre el sistema BES con motor de imán permanente y con motor de inducción se lo desarrolla de la siguiente manera:

- Recopilación de la información necesaria de los 8 pozos seleccionados, proporcionada por Petroamazonas EP.
- Revisión y clasificación de la información obtenida para determinar condiciones de operación actual de los equipos, condiciones del reservorio y de producción.
- Análisis nodal de los 8 pozos seleccionados para evaluar la condición de producción y predecir posibles problemas de operación.

- d) Diseño del equipo BES para 4 pozos con sistema BES motor de inducción implementando el uso de los motores de imán permanente.
- e) Descripción de condiciones operativas en los 4 pozos seleccionados con sistemas BES con motor de imán permanente.
- f) Análisis de sensibilidades en los 8 pozos para determinar futuras condiciones operativas en base a la variación de frecuencia del equipo de fondo y de esta manera determinar efectos en la producción.

### 2.5.3 COMPORTAMIENTO DE AFLUENCIA DEL RESERVORIO

El influjo de los fluidos desde la formación hacia el pozo, indica el potencial o la capacidad de producción que tiene el pozo, requisito básico para el diseño adecuado del sistema BES, no se puede seleccionar los componentes del sistema BES sin el dato del caudal de producción junto con el nivel dinámico del pozo. Estos dos parámetros se encuentran interrelacionados y se los puede calcular con la curva IPR.

#### Índice de Productividad (IP O J)

Es una medida utilizada para estimar la capacidad de producción que tiene un pozo, se define como la relación existente entre la caudal producción y el diferencial de presión del yacimiento ( $P_r$ ) y la presión de fondo fluyente ( $P_{wf}$ ) originada para producir este caudal. Cuando la presión de fondo fluyente  $P_{wf}$  es mayor a la presión en el punto de burbuja, el fluido que ingresa al pozo será monofásico y tendrá un IP constante que viene dado por la siguiente ecuación:

$$IP = \frac{Q_o}{P_r - P_{wf}} \quad (2.1)$$

Donde:

$Q_o$ = Caudal de petróleo producido

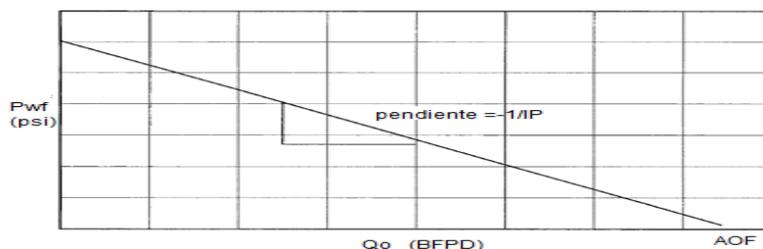
IP=Índice de productividad

$P_r$ =Presión de reservorio

$P_{wf}$ = Presión de fondo fluyente

El flujo del líquido en el pozo es directamente proporcional a la diferencia de presión como se muestra en la figura 2.10. La anterior ecuación se adecua perfectamente cuando tenemos un flujo monofásico, pero tenemos pozos que presentan una fase de gas libre en el reservorio y aquí ya no es aplicable esta ecuación (Brown, 1984).

#### FIGURA 2.10 REPRESENTACIÓN DEL IP CONSTANTE



Fuente: Kermit Brown, 1984

Elaborado por: Kermit Brown, 1984

### Método de Vogel para IPR

Vogel realizó varios estudios para analizar la producción de los pozos que se depletan en condiciones de presión de fondo fluyente menores a la presión del punto de burbuja. Realizó varias mediciones y encontró que todas las curvas IPR calculadas exhibían la misma forma general y llegó a determinar la siguiente ecuación:

$$\frac{Q_o}{(Q_o)_{\max}} = 1 - 0.2 \left( \frac{P_{wf}}{P_r} \right) - \left( \frac{P_{wf}}{P_r} \right)^2 \quad (2.2)$$

Donde:

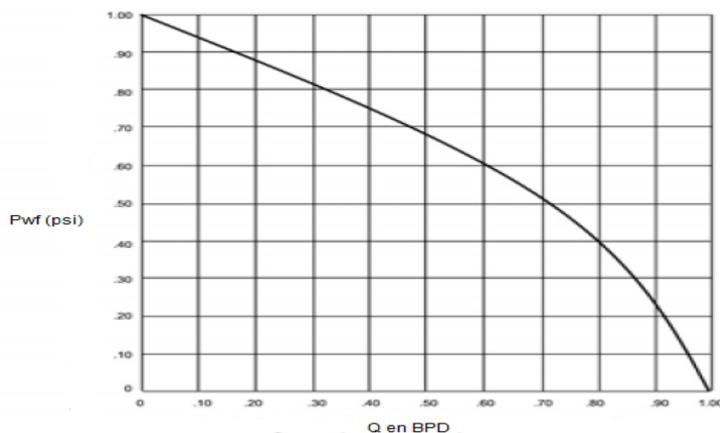
$Q_o$ =Caudal de petróleo a la  $P_{wf}$  [BFD/día]

$(Q_o)_{\max}$ .=Máximo caudal de petróleo cuando  $P_{wf}=0$

$P_r$ =Presión de reservorio [psi]

$P_{wf}$ = Presión de fondo fluyente [psi]

### FIGURA 2.11 CURVA IPR OBTENIDA POR EL MÉTODO DE VOGEL



Fuente: Kermit Brown, 1984

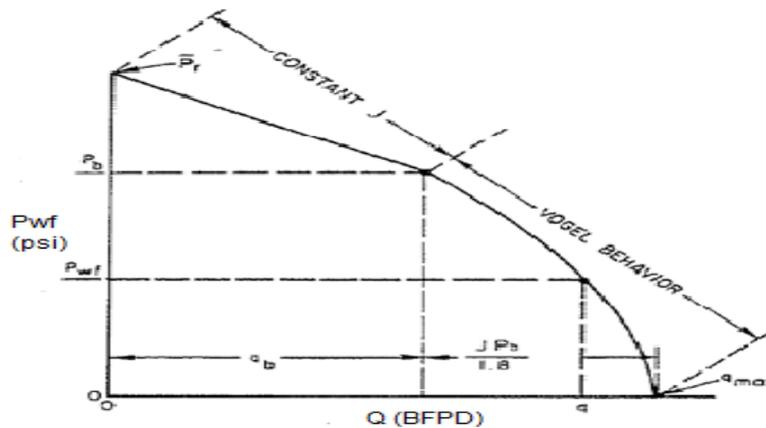
Elaborado por: Kermit Brown, 1984

### IPR Compuesta

Este método se lo usa para determinar la curva IPR para pozos con producción de agua. Este método fue determinado por Petrobras y está basado en la combinación de la ecuación de Vogel para el flujo de petróleo y el índice de productividad para el flujo de agua, en la figura 2.12 se muestra un ejemplo de curva IPR compuesta.

Las ecuaciones para determinar las curvas IPR compuestas, se pueden determinar en base al cálculo de la presión de fondo fluyente a ciertos caudales totales.

**FIGURA 2.12 CURVA IPR COMPUESTA**



Fuente: Kermit Brown, 1984

Elaborado por: Kermit Brown, 1984

### Yacimientos subsaturados $P_r \geq P_b$

La IPR compuesta puede ser dividida en tres intervalos como son:

- Primer intervalo entre  $0 < q_t < q_b$

En este intervalo se produce una relación lineal entre la tasa flujo y la presión de fondo fluente, la presión de fondo fluente a este caudal total se lo puede determinar así:

$$P_{wf} = P_r - \frac{Q_t}{IP} \quad (2.3)$$

- Segundo intervalo entre  $q_b < q_t < q_o \text{ máx}$

En este intervalo entre la caudal de flujo en el punto de burbuja al caudal de flujo máximo de petróleo la presión de fondo fluente está definida por:

$$P_{wf} = f_w \left( P_r - \frac{Q_t}{IP} \right) + f_o (0.125 (P_b) \left[ -1 + \sqrt{81 - 80 \left\{ \frac{Q_t - Q_b}{Q_o \text{ máx} - Q_b} \right\}} \right]) \quad (2.4)$$

Donde:

$P_{wf \text{ oil}}$  =  $P_{wf}$  del petróleo en la curva IPR

$f_o$  = Fracción de petróleo

$f_w$  = Fracción de agua

$P_{wf \text{ water}}$  =  $P_{wf}$  del agua en la curva IPR

De la ecuación de Vogel la  $P_{wf \text{ oil}}$  puede ser calculada con la siguiente ecuación:

$$P_{wf \text{ oil}} = 0.125 (P_b) \left[ -1 + \sqrt{81 - 80 \left\{ \frac{Q_t - Q_b}{Q_o \text{ máx} - Q_b} \right\}} \right] \quad (2.5)$$

- Tercer intervalo entre  $q_o \text{ máx} < q_t < q_t \text{ máx}$

En este intervalo la IPR compuesta tendría una pendiente constante, ya que la curva se ve más afectada por agua.

Tomar un caudal muy pequeño al del caudal máximo de petróleo

$$Q_t = 0.999Q_{o\text{máx}} \quad (2.6)$$

Del triángulo que se forma se tiene:

$$\tan \beta_1 = \frac{CD}{CG} \quad \tan \alpha_1 = \frac{CG}{CD}$$

$$CD = P_{wFD} - P_{wFC}$$

$$P_{wFC} = P_{wFG} = f_w \left( P_r - \frac{Q_{o\text{máx}}}{IP} \right)$$

$$P_{wFD} = f_w \left( P_r - \frac{0.999 Q_{o\text{máx}}}{IP} \right) + f_o \cdot (0.125) \cdot P_b \cdot \left\{ 81 - 80 \left[ \frac{0.999 Q_{o\text{máx}} - Q_b}{Q_{o\text{máx}} - Q_b} \right] \right\} \quad (2.7)$$

En conclusión, se obtiene

$$CD = f_w \left( P_r - \frac{0.001 Q_{o\text{máx}}}{IP} \right) + f_o \cdot (0.125) \cdot P_b \cdot \left\{ -1 + \sqrt{81 - 80 \left[ \frac{0.999 Q_{o\text{máx}} - Q_b}{Q_{o\text{máx}} - Q_b} \right]} \right\}$$

$$CG = Q_{o\text{máx}} - 0.999 Q_{o\text{máx}} = 0.001 Q_{o\text{máx}}$$

Ya que se puede calcular la  $\tan \beta_1$  y la  $\tan \alpha_1$ . Por lo tanto, en este tercer intervalo la presión de fondo fluente al caudal entre el caudal máximo de petróleo y el caudal máximo total de fluido se lo determina con la siguiente ecuación:

$$P_{wf} = f_w \left( P_r - \frac{Q_o \text{ máx}}{IP} \right) - \left( Q_t - \frac{Q_o \text{ máx}}{IP} \right) (\tan \beta) \quad (2.8)$$

Construcción de la IPR compuesta a partir de los datos de prueba. Las variables que se necesitan para construir las curvas IPR compuesta son: La presión de reservorio, presión en el punto de burbuja, la presión de fondo fluente el caudal total y la fracción de agua Se puede aplicar las siguientes ecuaciones:

$$IP = \frac{Q_{\text{test}}}{P_r - P_{w\text{test}}} \quad (2.9)$$

$$Q_b = IP(P_r - P_b) \quad (2.10)$$

$$Q_o \text{ máx} = Q_b + \frac{IP P_b}{1.8} \quad (2.11)$$

$$Q_t \text{ máx} = Q_o \text{ máx} + F_w \left( P_r - \frac{Q_o \text{ máx}}{IP} \right) (\tan \alpha) \quad (2.12)$$

$$P_{w\text{test}} < P_b$$

Para determinar  $Q_b$ ,  $Q_o \text{ máx.}$  y  $Q_t \text{ máx.}$  el índice de productividad debe ser calculado con la siguiente ecuación para estas condiciones:

$$IP = \frac{Q_{\text{test}}}{f_o \left\{ P_r - P_b + \frac{P_b A}{1.8} \right\} + f_w \{ P_r - P_{w\text{test}} \}} \quad (2.13)$$

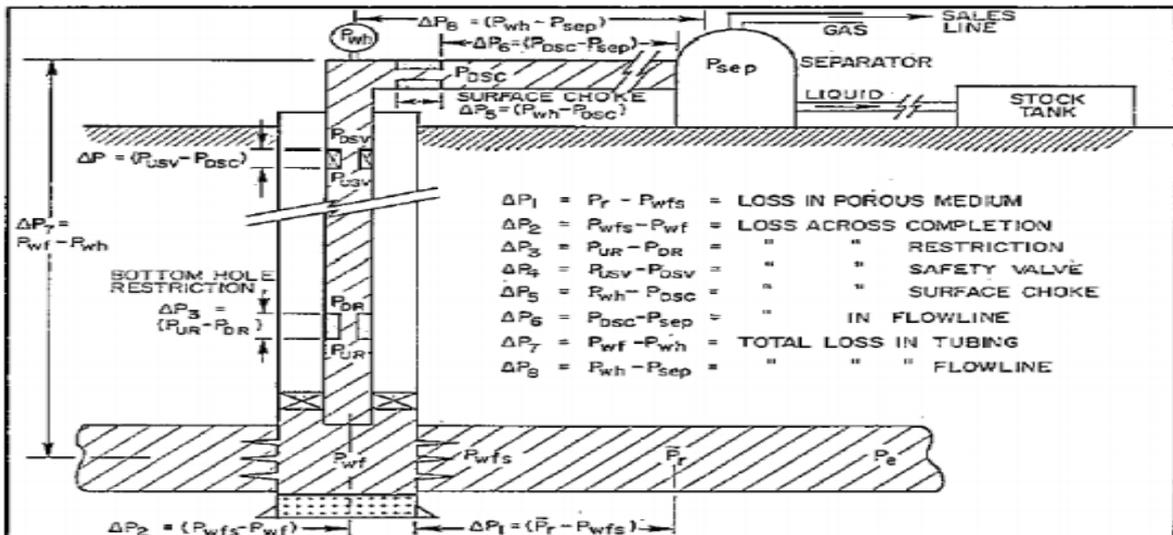
$$A = 1 - 0.2 \left\{ \frac{P_{wf \text{ test}}}{P_b} \right\} - 0.8 \left\{ \frac{P_{wf \text{ test}}}{P_b} \right\}^2 \quad (2.14)$$

$$Q_{t \text{ máx}} = Q_{o \text{ máx}} + F_w \left( P_r - \frac{Q_{o \text{ máx}}}{IP} \right) (\tan \alpha) \quad (2.15)$$

## 2.5.4 ANÁLISIS NODAL

El análisis nodal de un sistema de producción, realizado en forma sistemática, permite determinar el comportamiento actual y futuro de un pozo productor de hidrocarburos, el análisis consiste en dividir el sistema de producción en nodos de solución para calcular caídas de presión y evaluar el flujo a través del medio poroso, de la tubería vertical y horizontal y en los separadores, para poder determinar las curvas de comportamiento de afluencia y el potencial de producción de un yacimiento (Camargo et al., 2009). En la figura 2.13 se muestra los nodos principales del sistema de producción

**FIGURA 2.13 NODOS DE UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN**



Fuente: Kermit Brown, 1984

Elaborado por: Kermit Brown, 1984

Un sistema de producción tiene tres componentes básicos que son: el medio poroso (Yacimiento), el flujo a través de la tubería vertical y el flujo a través de la tubería horizontal, en donde se cuantifica las restricciones que el fluido producido presenta. El análisis nodal comprende la asignación de nodos en varias de las posiciones claves dentro del sistema de producción, empleando métodos y correlaciones de flujo multifásico que dependen de las características de los fluidos (Brown, 1984).

Por lo general en un sistema de producción se conocen siempre dos presiones, las cuales se consideran constantes para fines de cálculo, siendo éstas la presión estática del yacimiento ( $P_r$ ) y la presión de separación en la superficie ( $P_{sep}$ ). El análisis nodal se basa en calcular la caída de presión entre dos nodos, los cálculos pueden iniciar con cualquiera de ellas, para después determinar la presión en los nodos de solución intermedios entre estas posiciones de partida, se debe tener en

cuenta que, para utilizar el concepto nodal, al menos se deberá conocer la presión en el punto de partida.

### Correlación de flujo multifásico

El flujo multifásico es el movimiento simultáneo de dos fases: líquida (petróleo y agua) y gaseosa, para predecir el comportamiento en una tubería vertical se usa la correlación de Hagedorn y Brown debido a que tiene el mejor rendimiento para predecir la caída de la presión y presenta porcentajes de error inferiores en relación de las demás correlaciones (Ruiz, Brito, & Márquez, 2014).

La correlación es generalmente optimista en pronosticar el mínimo caudal estable de flujo, Hagedorn y Brown encontraron que el colgamiento del líquido podría ser correlacionado hasta en cuatro parámetros adimensionales.

$$\text{El número de velocidad del líquido.} \quad N_{LV} = 1.938 V_{SL} \left( \frac{\rho_L}{\sigma_L} \right)^{-4} \quad (2.16)$$

$$\text{El número de velocidad del gas.} \quad N_{GV} = 1.938 V_{SLG} \left( \frac{\rho_L}{\sigma_L} \right)^{-4} \quad (2.17)$$

$$\text{El número del diámetro de la tubería.} \quad N_d = 120.872 d \left( \frac{\rho_L}{\sigma_L} \right)^{-2} \quad (2.18)$$

$$\text{El número de la viscosidad líquida.} \quad N_L = 0.15726 \mu_L \left( \frac{1}{\rho_L \sigma_L^3} \right)^{-4} \quad (2.19)$$

Donde:

$V_{SL}$  = La velocidad superficial líquida [(pies)/s]

$V_{SLG}$  = La velocidad superficial líquida de gas [(pies)/s]

$\rho_L$  == La densidad del líquido [(lbm)/pie<sup>3</sup> ]

$\sigma_L$  = La tensión interfacial [(dina)/cm]

$\mu_L$  = La viscosidad del líquido [centipoise]

$d$  = El diámetro de la tubería [pies]

$$144 \frac{\Delta p}{\Delta h} = \bar{\rho}_m + \frac{f q_L^2 M^2}{2.9652 \times 10^{11} D^5 \bar{\rho}_m} + \bar{\rho}_m \frac{\Delta \left( \frac{v_m^2}{2gc} \right)}{\Delta h} \quad (2.20)$$

Donde

$$\bar{\rho}_m = \rho_L H_L + \rho_g (1 - H_L) \quad (2.21)$$

$$\frac{1}{\sqrt{F}} = -2 \log \left( \frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (2.22)$$

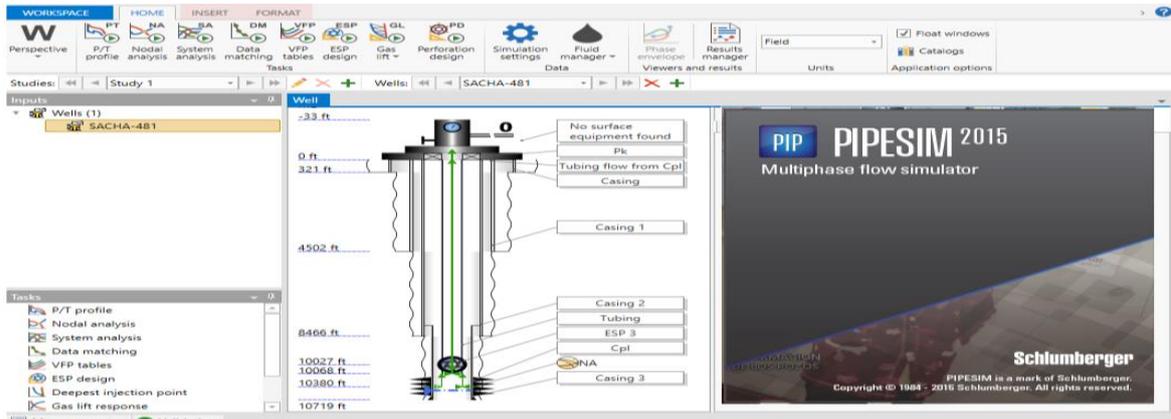
$$Re = 2.2 * 10^{-2} \frac{q_L}{D \mu_L^{HL} \mu_g^{(1-H_L)}} \quad (2.23)$$

### Software Pipesim

Este software de la compañía Schlumberger permite la construcción y el análisis de modelos de flujo multifásico, en este caso se lo realiza en el fondo del pozo. Luego

se compara el punto de operación actual con el punto óptimo que resulta de la intersección de la outflow con la inflow. Para determinar los posibles problemas en el pozo. El simulador incluye modelos de tres fases, mejoras en el modelado de transferencia de calor y opciones integrales de modelado PVT. En la figura 2.14 se muestra la interfaz del software Pipesim (Schlumberger, 2017).

**FIGURA 2.14 INTERFAZ DEL SOFTWARE PIPESIM**



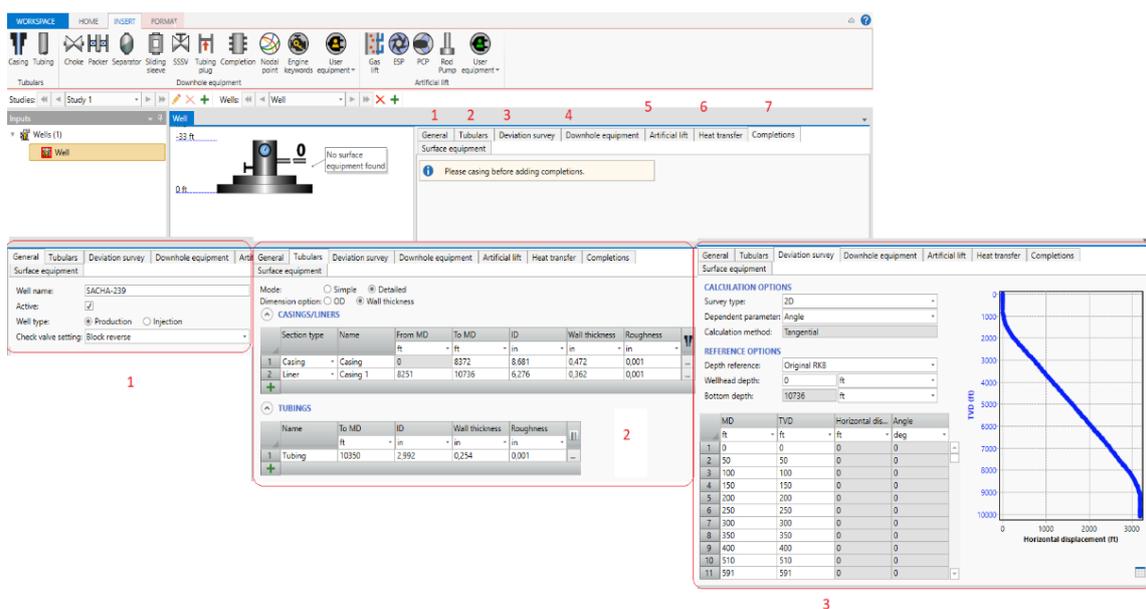
Fuente: PETROAMAZONAS E.P  
Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

**Procedimiento para el análisis nodal**

Con los datos recolectados, se procede a ingresar la información en el software de la siguiente manera:

- Se inicia el programa en la parte de well y se selecciona new, en la interfaz los datos se cargan en el orden de las pestañas, como en la figura 2.15.

**FIGURA 2.15 PROCESO PARA CARGAR LOS DATOS**



Fuente: PETROAMAZONAS E.P  
Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

- En la pestaña ARTIFICIAL LIFT se selecciona la bomba y se ingresa los datos operativos del equipo. Para el caso de las bombas de la compañía Schlumberger, estas se encuentran en el catálogo del programa. En el caso de las bombas de Novomet se carga las nuevas bombas, con el uso de la herramienta de Novomet ESP Calculator, con esta herramienta se puede leer los factores de potencia y de eficiencia de la bomba, al pasar el cursor sobre las curvas indica el caudal que se tiene a determinada eficiencia y potencia, como se muestra en la figura 2.16.

**FIGURA 2.16 INTERFAZ DE NOVOMET ESP CALCULATOR**



Fuente: Novomet-Ecuador S.A.

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

- Se completa la última pestaña con los datos de la formación y el PVT de fluidos.
- Se selecciona la correlación de Hagedorn y Brown en la parte de SIMULATION SETTINGS se inicia el análisis nodal
- En la parte de System Analysis se evalúa los posibles escenarios de incremento de frecuencia
- Por último, se realiza el análisis de la sensibilidad de frecuencias en la parte de NODAL ANALYSIS.

### 2.5.5 DISEÑO DEL SISTEMA DE BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE CON MOTOR DE IMÁN PERMANENTE

Para iniciar el diseño adecuado del sistema BES se necesita recopilar la mayor cantidad de información referente al pozo. Estos datos permiten realizar cálculos confiables de los parámetros necesarios para la selección del equipo BES.

La recolección de datos confiables y precisos permiten la selección de una bomba adecuada, que opere dentro del límite recomendado y evite una mala selección del equipo ocasionando problemas como: sobrecarga o baja carga en el motor, daño a la formación por diferencial de presión muy alto o que el equipo no sea capaz de proporcionar la energía adecuada para la producción deseada. (Carranza C, 2010)

## **Procedimiento para el diseño del sistema BES**

El procedimiento para el diseño del sistema BES se realizó bajo la norma estándar API Recommended Practice 11U (RP 11U) "Recommended Practice for Sizing and Selection of Electric Submersible Pump Installations". (API,1986).

Para la simulación del funcionamiento de los equipos BES se usó el software Novomet Sel Pro.

### **a) Información necesaria para el diseño del sistema BES**

La información proporcionada para el estudio proviene de historiales de producción, BUP, historiales de reacondicionamiento, pruebas PVT, IMPUT para el diseño, potenciales de pozos actualizados y diagramas de completaciones finales.

Los datos necesarios para realizar el diseño del equipo BES se describen a continuación:

#### **Datos del pozo y yacimiento**

- Tamaño, tipo y peso del Casing
- Tamaño, tipo y peso de la tubería de producción (tubing)
- Profundidad de los disparos
- Profundidad del pozo
- Temperatura de fondo del pozo
- Comportamiento del yacimiento IPR

La descripción detallada del estado mecánico de cada pozo se encuentra en el Anexo No 1.

#### **Datos de producción**

- Tasa de producción
- Presión de reservorio
- Presión de fondo fluyente
- % BSW
- Presión de cabeza
- Relación gas-petróleo (GOR)
- Tasa de producción deseado

Esta información se obtiene de los IMPUT de cada pozo, potencial mensual y pruebas de producción.

#### **Características de los Fluidos y Propiedades PVT**

- Gravedad API del petróleo
- Gravedad específica del agua
- Gravedad específica del gas
- Viscosidad del petróleo
- Presión de burbuja
- Salinidad del fluido
- Viscosidad del petróleo

Esta información proviene de pruebas de laboratorio o BUILDUP.

### Datos de Energía Eléctrica

- Voltaje primario disponible
- Frecuencia

#### b) Capacidad de producción del pozo

Se calcula la IPR aplicando las ecuaciones del método de la IPR compuesta, con los datos de una prueba de producción, la presión de reservorio y la presión de burbuja y se obtiene el caudal máximo de producción total del pozo.

#### c) Cálculo de la presión de fondo fluyente

Se obtiene de las ecuaciones descritas para el método de la IPR compuesta, considerando el intervalo en el que se encuentre el caudal deseado, se aplica las ecuaciones correspondientes para cada caso. También se puede leer directamente de la curva IPR del pozo.

#### d) Cálculo de la gravedad específica y el gradiente de presión del fluido

La gravedad específica del fluido se obtiene de la siguiente ecuación:

$$SG = (1 - f_w) SG_0 + f_w SG_w \quad (2.24)$$

Donde:

La gravedad específica del petróleo se la obtiene de la siguiente ecuación:

$$SG_0 = \frac{141.5}{131.5 + \text{°API}} \quad (2.25)$$

SG: Gravedad específica del fluido

SG<sub>0</sub>: Gravedad específica del petróleo

SG<sub>w</sub>: Gravedad específica del agua

f<sub>w</sub>: Fracción de agua

El gradiente de presión de fluido se obtiene con la siguiente ecuación:

$$\nabla P = SG \times 0.433 \frac{\text{psi}}{\text{pies}} \quad (2.26)$$

#### e) Profundidad de asentamiento de la bomba

La profundidad de la bomba es la diferencia entre la profundidad de los perforados en TVD y el nivel estático del pozo.

$$\text{Nivel estático del pozo } H_d = \frac{P_{wf}}{\nabla P}$$

$$\text{Nivel dinámico del pozo } \text{ Nivel dinámico} = \text{Profundidad(perforaciones)} - H_d$$

$$\text{Profundidad}_{\text{bomba}} = \text{Nivel dinámico} + \Delta h_d \text{ (sumergencia)}$$

Donde:

H<sub>d</sub>: Nivel estático de fluidos

Profundidad<sub>perforaciones</sub>: Profundidad de los perforados en TVD

P<sub>wf</sub>: Presión de fondo fluyente

∇P: Gradiente del fluido

### Nota

Para determinar la profundidad final a la que se asentará la bomba se analiza el survey para asegurar que la inclinación máxima sea de 56° y el dog leg máximo sea de 1.2 [°/1000 pies]

Para el diseño se determina un valor de Δhd (sumergencia) de aproximadamente 700 a 1000 pies considerando que se debe asentar a una profundidad donde la fracción de gas sea mínima.

#### f) Presión de succión de la bomba

Para determinar la presión de entrada de la bomba (PIP) se considera la gravedad específica del fluido y la presión de fondo fluyente al caudal deseado desde el punto medio de perforaciones hasta la profundidad de la bomba.

$$PIP = P_{wf} - (\text{Profundidad}_{\text{perforaciones}} - \text{Profundidad}_{\text{bomba}})\nabla P \quad (2.27)$$

Donde:

PIP: Presión de succión de la bomba

P<sub>perf</sub>: Punto medio de las perforaciones

∇P: Gradiente del fluido

P<sub>wf</sub>: Presión de fondo fluyente al caudal deseado

- Si PIP es menor que Pb entonces existe presencia de gas libre
- Si PIP mayor que Pb entonces no existe presencia de gas libre

#### g) Cálculo de las propiedades de los fluidos y las condiciones del fluido en la succión de la bomba

##### Relación Gas petróleo- Petróleo en solución (Standing)

Es la medida del volumen de gas que se encuentra disuelto en el petróleo, a las condiciones que tiene el yacimiento en un momento dado. Si se calcula la presión de succión de la bomba se puede determinar la existencia de gas libre en la succión de la bomba para este propósito se debe calcular la relación gas petróleo en la succión de la bomba de la siguiente manera:

$$R_s = SG_g \left( \frac{PIP}{18} \times \frac{10^{0.0125 \cdot \text{API}}}{10^{0.00091T}} \right)^{1.2048} \quad (2.28)$$

Donde:

PIP= Presión de succión [psi]

T= Temperatura de succión. °F

$SG_g$  = Gravedad específica del gas

API= Gravedad API del petróleo

### Factor volumétrico del petróleo

El factor volumétrico de petróleo se define como el volumen ocupado de fluido a condiciones de yacimiento por cada barril de petróleo a condiciones de superficie. Se lo puede determinar con la siguiente ecuación:

$$\beta_o = 0.972 + 1.47 \times 10^{-4} F^{1.175} \quad (2.29)$$

$$F = R_s \left( \frac{SG_g}{SG_o} \right)^{0.5} + 1.25 T \quad (2.30)$$

Donde:

$\beta_o$  = Factor volumétrico del petróleo

T= Temperatura de fondo del pozo

$SG_g$  = Gravedad específica del gas

$SG_o$  = Gravedad específica del petróleo

### Factor volumétrico del gas

Expresa la cantidad de gas que existe a condiciones de yacimiento por cada pie cúbico en superficie. Se lo puede obtener con la siguiente ecuación:

$$\beta_g = 0.0283 \frac{Z(T^\circ+460)}{PIP} \left[ \frac{\text{bbl}}{\text{Mstf}} \right] \quad (2.31)$$

Donde:

$\beta_g$  = Factor volumétrico del gas

Z = Compresibilidad del gas

PIP. Presión de succión (psi)

T: Temperatura del yacimiento (°R)

### Cálculo del Z computarizado

$$T_{pr} = \frac{T + 460}{175 + 307\gamma_g} \quad P_{pr} = \frac{P}{701 + 47\gamma_g}$$

$$A = -0.101 - 0.36 T_{pr} + 1.3868 (T_{pr} - 0.919)^{0.5}$$

$$B = 0.021 + \frac{0.04275}{T_{pr} - 0.65}$$

$$D = 0.6222 - 0.224 T_{pr}$$

$$E = \frac{0.0657}{T_{pr} - 0.86} - 0.037$$

$$F = 0.32e^{-19.53(T_{pr}-1)}$$

$$B = B_{pr} \left( 2.2e^{-1.1(T_{pr}-1)} P_{pr} \right)$$

$$Z = A + BP_{pr} + (1 - A)e^{-c} - H \left( \frac{P_{pr}}{10} \right)^4$$

### Factor volumétrico del agua

Cantidad de agua del yacimiento que existe por cada barril de agua producido en superficie

$$\beta_w = 1 + 1.2 \times 10^{-4}(T - 60) + 1 \times 10^{-6}(T - 60)^2 - 3.33 \times 10^{-6}PIP \quad (2.32)$$

Donde:

$\beta_w$  = Factor volumétrico del agua

T = Temperatura de fondo

### h) Cálculo de la tasa de flujo total en la succión de la bomba

$$Q_{tot} = Q_I (f_w \beta_w + (1 - f_w) \beta_o + ((1 - f_w)(GOR - R_s) + f_w R_{sw}) B_g) \quad (2.33)$$

Se asume que el agua de formación no tiene gas en solución  $R_{sw}=0$

Donde:

$Q_{tot}$ : Caudal de fluido total

GOR: Relación gas disuelto producido

### i) Fracción de gas en la succión de la bomba

Fracción de gas a producir con respecto al volumen total producido por la bomba.

$$f_g = \frac{((1 - f_w)(GOR - R_s) + f_w R_{sw}) \beta_g}{f_w \beta_w + (1 - f_w) \beta_o + ((1 - f_w)(GOR - R_s) + f_w R_{sw}) \beta_g} 100 \% \quad (2.34)$$

Si el valor de la fracción de gas en la admisión es mayor a 10% se instala un separador de gas.

### j) Fracción de gas que ingresa a la bomba

El separador de gas deja un gas remanente que termina ingresando a la bomba, el cual se calcula con la siguiente ecuación:

$$f_g^{\text{succión de la bomba}} = (1 - E_{sep}) f_g \quad (2.35)$$

### k) Tasa de flujo volumétrico que ingresa a la bomba

Para determinar la cantidad de flujo volumétrico que ingresa a la bomba, se determina con la siguiente ecuación:

$$Q_{\text{tot}} = Q_l (f_w \beta_w + (1 - f_w) \beta_o + (1 - E_{\text{sep}}) ((1 - f_w) (\text{GOR} - R_s) + f_w R_{\text{sw}}) B_g ) \quad (2.36)$$

### l) Cálculo de la altura dinámica total

Representa la altura que tendrá que vencer el fluido de producción para llegar a superficie. El cálculo de la altura dinámica total es esencial para determinar el número de etapas requeridas por la bomba que se ha seleccionado de acuerdo al catálogo de cada fabricante.

Este cálculo toma en cuenta las pérdidas por fricción en el tubing, el levantamiento neto vertical del pozo y la presión de cabeza en pies. Se obtiene con la siguiente ecuación:

$$\text{TDH} = \text{Pwh} + \text{Pf} + \text{LNV}$$

TDH: Altura dinámica total

Pwh: Presión de cabeza en pies

Pf: Pérdidas por fricción en el tubing

LNV: Levantamiento neto total

#### Levantamiento Neto LNV (pies)

Es la profundidad vertical del nivel dinámico de los fluidos, es decir la distancia que el fluido debe recorrer para llegar a superficie, se lo calcula con la siguiente ecuación:

$$\text{NVL (pies)} = \text{Profundidad}_{\text{bomba}} - \frac{\text{PIP}}{0.433 \text{SGO}} \quad (2.37)$$

PIP: Presión de succión de la bomba

Profundidad<sub>bomba</sub> = Profundidad de asentamiento de la bomba

#### Pérdidas por fricción (pies)

Para determinar las pérdidas por fricción en el tubing, se usa la figura del Anexo No. 2 y la siguiente ecuación.

$$\text{Pérdidas por fricción total} = \frac{\Delta h_{\text{fr}} \text{ Lt}}{1000} \quad (2.38)$$

Donde

$\Delta h_{\text{fr}}$  = Pérdidas por fricción por cada 1000 pies de tubing

Lt=Longitud del tubo a la profundidad de la bomba

### Presión de cabeza P<sub>wh</sub> en pies

Conocida también como presión de descarga del tubing, se puede calcular usando la siguiente ecuación:

$$P_{wh} \text{ (ft)} = \frac{P_{wh}}{\nabla P} \quad (2.39)$$

Donde:

$P_{wh}$  = Presión de cabeza

$\nabla P$  = Gradiente de presión del fluido

### m) Selección de la bomba electrosumergible Power Save

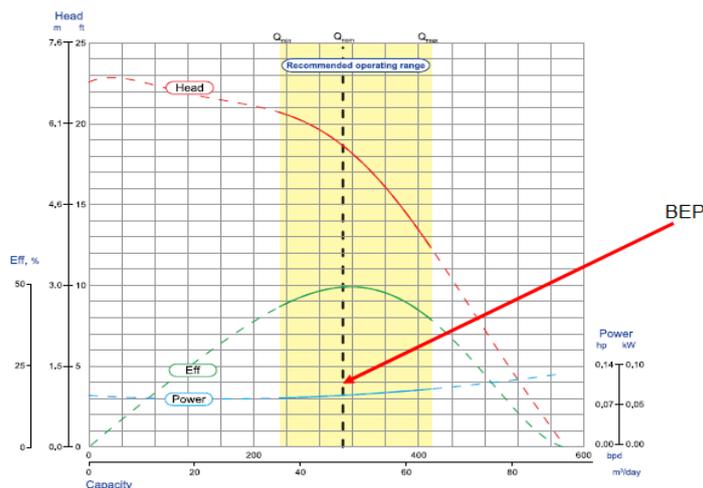
La selección de una bomba electrosumergible con motor de imán permanente, se realiza en base a las tablas de ingeniería del catálogo Novomet 2018 que se encuentran en el Anexo No 3.

Los datos requeridos para la selección son:

- Diámetro del casing
- Caudal deseado
- Altura dinámica total TDH

Del catálogo se selecciona una bomba que cumpla con las especificaciones de diámetro y caudal requerido. Considerando que el caudal requerido se encuentre dentro el rango de operación de la bomba y cerca del mejor punto de eficiencia. En la figura 2.17 se observa el comportamiento de una bomba Power Save y el rango operativo de la misma:

**FIGURA 2.17 COMPORTAMIENTO DE LA BOMBA**



Fuente: Catálogo Novomet, 2018

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

Para la selección de la bomba se elige la bomba de mayor eficiencia de acuerdo a las especificaciones del catálogo o a su vez la de mayor diámetro. En los diseños BES que se use motores de imán permanente y no se disponga de la bomba con

el rango de operación más adecuado, se puede seleccionar una bomba con menor rango de operación que opere a mayor frecuencia. (Presentaciones Novomet, 2017).

#### n) Cálculo del número de etapas

Se realiza en función de la TDH, el caudal deseado y los pies por etapa que levanta la bomba, de acuerdo a las especificaciones del catálogo de Novomet con el Anexo No 4 se puede calcular la altura que levanta cada etapa de la siguiente manera:

Se divide la altura total que levantan las etapas para el número de etapas que contiene cada carcasa.

$$\frac{\text{Head}}{\text{STG}} = \frac{1929}{88} = 21.9 \text{ pies/etapa} \quad (2.40)$$

Luego se obtiene el número de etapas requerido por la bomba con la siguiente ecuación:

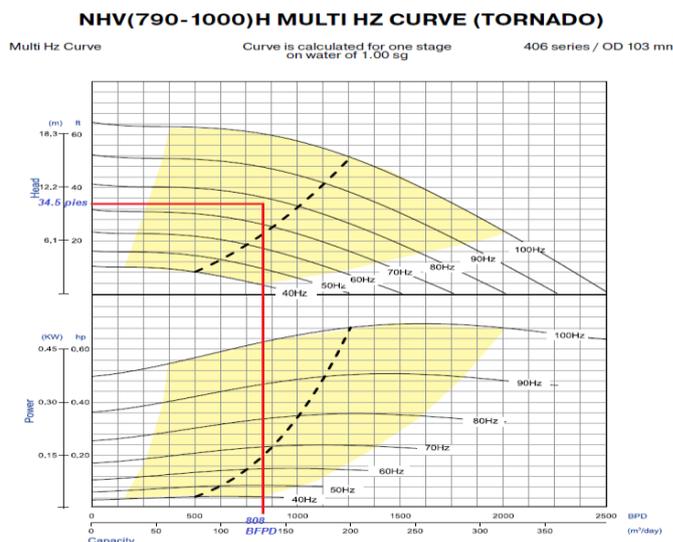
$$\# \text{ Etapas} = \frac{\text{TDH}}{\text{pies/etapa}} \quad (2.41)$$

Una vez obtenido el número de etapas requeridas, se evalúa el tipo de carcasa disponible para cada bomba. Debido a la implementación de las bombas power save diseñadas para trabajar en amplios rangos de velocidad y los motores de imán permanente que operan hasta 6000 RPM se puede seleccionar una bomba que opere a mayor frecuencia.

En el Anexo No 3 se observa las especificaciones de una bomba power save, para obtener el número de pies por etapa que levanta la bomba a mayor frecuencia.

Para determinar la frecuencia de operación de la bomba se utiliza la curva de tornado que representa el comportamiento de la bomba a diferentes frecuencias. Se ingresa con los pies por etapa y el caudal de diseño, el punto de intersección representa la frecuencia aproximada de operación como en la figura 2.18.

**FIGURA 2.18 CURVA TORNADO DE LA BOMBA NHV (790-1000) H**



Fuente: PETROAMAZONAS EP  
Modificado por: Diana Arellano y Gina Guajala

### o) Cálculo de la potencia requerida por el motor

Para estimar la potencia requerida del motor se toma en cuenta el número de etapas calculadas para la bomba, la potencia que consume el separador, la potencia del protector más el 15% del total como un factor de seguridad.

#### Potencia consumida por la bomba

La potencia consumida por la bomba se calcula con la siguiente ecuación:

$$\text{HP bomba} = \frac{\text{HP}}{\text{etapas}} \times \text{número de etapas} \times \text{SG} \quad (2.42)$$

Donde:

Número de etapas = Número de etapas calculadas

SG = Gravedad específica de la mezcla

$\frac{\text{BHP}}{\text{etapas}}$  = Potencia por etapa (de las especificaciones de cada bomba)

### p) Selección del motor

Para seleccionar un motor adecuado se toman en cuenta los siguientes criterios:

- Que sea compatible con el diámetro interno del casing y con la temperatura del fondo del pozo
- Se recomienda escoger una serie estándar: serie de motor-serie de bomba (Levantamiento artificial BES, 2015).

De acuerdo al catálogo de Novomet, para los motores de imán permanente se aplica la siguiente ecuación para determinar los HP requeridos por la bomba:

$$N_{\text{motor}} = (nN_{\text{máx stage}}\rho k^2)1.1 \quad (2.43)$$

Donde:

n = Número de etapas

$N_{\text{máx stage}}$  = Máximo potencia por etapas

$\rho$  = Densidad del fluido

$$k = \frac{fx}{fn} = 1$$

### q) Selección del sello o protector

Debido a la importancia de las funciones que realizan los sellos o protectores, se selecciona los sellos en base a los siguientes criterios:

- La serie del motor, la potencia y la temperatura que va a tolerar.
- El diámetro externo adecuado para que coincida con el OD del motor y bomba seleccionados a pesar que existen excepciones en la que se cuentan con dispositivos para adaptarse a los diferentes diámetros.

- El eje protector debe ser capaz de transferir la potencia requerida
- La capacidad de expansión del aceite debe ser lo suficientemente grande (Takács, 2009)

#### **r) Selección del intake**

Este dispositivo se lo selecciona para dar paso al ingreso de fluidos a la bomba. En el catálogo se puede encontrar el tamaño de los dispositivos y especificaciones según las condiciones del pozo. La serie del intake va de acuerdo a la serie de la bomba seleccionada y el eje de este dispositivo debe ser igual al diámetro del eje de la bomba.

#### **Selección del separador de gas**

La selección del separador se la realiza en base al porcentaje de gas libre que existe en la succión de la bomba, si se tiene un valor mayor al 10 % de gas libre es necesario instalar un separador de gas.

Por lo general la serie del separador es la misma que la serie de la bomba, si el pozo contiene un alto contenido de gas y sólidos se puede implementar la bomba multifásica en lugar de un separador de gas.

#### **s) Selección del cable de potencia y MLE**

Para una buena selección del cable de potencia y el MLE se consideran el AWG, la longitud del MLE y el rango de temperatura

##### **Longitud del cable**

La longitud del cable de potencia se determina a partir de la profundidad de asentamiento de la bomba de la siguiente manera:

$$\text{Longitud del Cable} = \text{Profundidad bomba} + 160 \text{ pies} - \text{Longitud MLE}$$

Se adicionan 160 pies para la conexión segura del equipo de superficie.

La longitud del MLE se la obtiene de la suma de las longitudes del equipo de fondo desde el protector hasta el tope de la bomba superior más 15 pies por seguridad.

Longitud del MLE = Longitud Protector + Longitud Separador + Longitud Bombas + 15 pies

##### **Tamaño del cable**

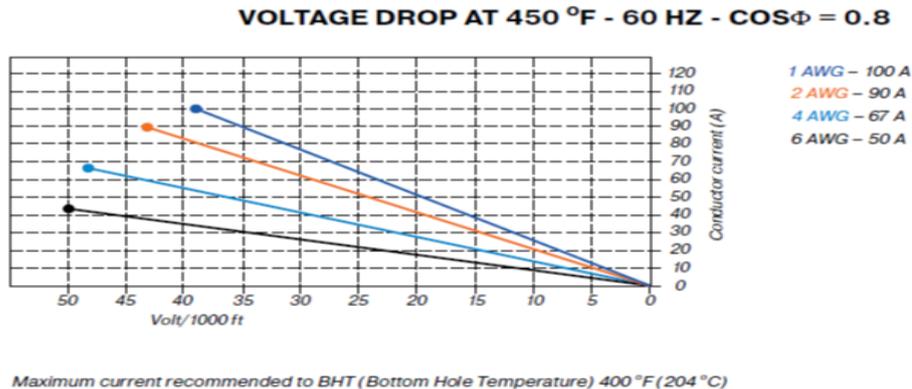
Las principales consideraciones para seleccionar el tamaño de cable son:

- La caída de voltaje a lo largo del cable
- Requerimientos de voltaje y amperaje del motor de fondo
- El tamaño debe elegirse de manera que el cable encaje el anular entre el casing y el tubing.
- Debe tomar en cuenta la temperatura de fondo y los fluidos que se encuentran en él.

Para las condiciones de temperatura y amperaje del motor es necesario tener una caída de potencia menor a 30 voltios/1000 pies para asegurar el transporte de corriente del cable.

La caída de tensión que se produce en el cable se lee en la gráfica de la figura 2.19 y está en función del tamaño del conductor, el amperaje del motor y la temperatura de fondo del pozo

**FIGURA 2.19 CAÍDA DE VOLTAJE DEL CABLE**



Fuente: NOVOMET, 2013

Modificado por: Diana Arellano y Gina Guajala

Para las pérdidas de voltaje se usa la siguiente ecuación:

$$\Delta \text{Voltaje} = \frac{\Delta \text{Volt}^{\circ\text{F}}}{1000} \text{Longitud cable} \quad (2.44)$$

Donde:

$\Delta \text{Voltaje}$  = Pérdidas de voltajes a lo largo del cable

$\Delta \text{Volt a } ^{\circ}\text{F}$  = Caída de tensión leída en la gráfica

#### t) Selección del sensor de fondo

Se observa en el catálogo los modelos disponibles con los parámetros a monitorear requeridos, tomando en cuenta la serie del motor que se ajuste dentro del casing de revestimiento.

#### u) Voltaje requerido en superficie

Para seleccionar los transformadores es necesario conocer el voltaje requerido en superficie, voltaje primario disponible en la red eléctrica y la potencia requerida. Para calcular el voltaje requerido en superficie se usa la siguiente ecuación:

$$\text{Voltaje Superficie} = \text{Voltaje motor} + \Delta \text{Voltaje} \quad (2.45)$$

Donde:

Voltaje Superficie = Voltaje en superficie

$\Delta \text{Voltaje}$  = Caída de voltaje a lo largo del cable

Voltaje motor = Voltaje del motor de fondo

Para la selección del variador de frecuencia se usan los datos nominales y operativos del motor seleccionado. A continuación, se detallan los parámetros del motor que se consideran para la selección del variador de frecuencia.

- Voltaje del motor,
- Voltaje primario, V
- Corriente del Motor

Para calcular los parámetros operativos del motor se usan las siguientes ecuaciones:

$$\text{Factor de frecuencia} = \frac{\text{Frecuencia operativa}}{\text{Frecuencia Nominal}} \quad (2.46)$$

Voltaje operativa del motor = Factor de frecuencia × Voltaje nominal del motor

$$\frac{S}{U} \text{ Tap Voltaje} = \text{Pérdidas en el cable} \times \text{Voltaje operativo} \quad (2.47)$$

Este TAP se lo corrige con la ayuda de una hoja de excel y se obtiene el valor más aproximado que requiere el transformador, para mejorar la relación de transformación.

$$\text{Relación de transformación} = \frac{\text{Voltaje secundario}}{\text{Voltaje primario}} \quad (2.48)$$

Con los datos de operación y nominales del motor, se calcula la corriente requerida por el variador de frecuencia con la siguiente ecuación:

$$I_{VDF} = I_{\text{motor}} \times \text{relación de transformación} \times 1.4 \quad (2.49)$$

Donde

$I_{VDF}$  = Corriente requerida por el VDF

$I_{\text{motor}}$  = Corriente nominal del motor

Con el valor de corriente calculado y el voltaje de suministro primario proporcionado, se observa en la tabla de especificaciones de los variadores de frecuencia del catálogo y se selecciona un variador de frecuencia que resista la corriente calculada.

#### v) Selección de transformadores

Para seleccionar los transformadores es necesario determinar la potencia máxima de trabajo (kVA), la misma que se la puede obtener con la siguiente ecuación:

$$\text{kVA} = \frac{\sqrt{3} \times \frac{S}{U} \text{ Voltaje secundario} \times \text{Amp Motor} \times 1.3}{1000} \quad (2.50)$$

Donde:

$\text{Volt}_{\text{superficie}}$  = Voltaje en superficie

Amp Motor = Amperaje del motor

Los transformadores cumplen la función de elevar o reducir el voltaje dependiendo de las condiciones de trabajo.

### 2.5.6 LEYES DE AFINIDAD

Permiten predecir el comportamiento de una bomba electrosumergible, cuando se varía la velocidad o frecuencia partiendo de una velocidad determinada.

Las leyes de afinidad indican que la variación del caudal y las RPM del eje del motor tienen una relación directamente proporcional a la frecuencia, el cambio en la altura dinámica es proporcional a la relación de frecuencias al cuadrado y el cambio en la potencia es proporcional a la relación de frecuencias a la tercera potencia (BAKER HUGHES CENTRILIFT, 2009).

Estas leyes están descritas con las siguientes ecuaciones:

$$Q_2 = Q_1 \times \left(\frac{N_2}{N_1}\right) \quad (2.51)$$

$$H_2 = H_1 \times \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 \quad (2.52)$$

$$BHP_2 = BHP_1 \times \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^3 \quad (2.53)$$

Donde

Q1= Caudal inicial producido [BFPD]

H1= Altura dinámica inicial [pies]

BHP1= Potencia al freno inicial [HP]

N1= Velocidad inicial

## **CAPÍTULO 3**

### **ANÁLISIS COMPARATIVO**

Analizando las condiciones actuales de los pozos seleccionados, se realizó el diseño del sistema BES con motor de imán permanente para los pozos con el sistema BES con motor de inducción y en los pozos con el sistema BES con motor de imán permanente, se realizó la simulación del equipo de fondo

#### **3.1 POZOS CON SISTEMA BES CON MOTOR DE INDUCCIÓN**

En los siguientes pozos: Sacha-247, Sacha-395, Sacha-137, Sacha-481 se desarrolló el diseño del equipo BES descrito en la metodología del capítulo II, implementando el uso de las bombas Power Save y el motor de imán permanente, luego se simuló el comportamiento del equipo propuesto y se determinó las características operativas que tendría el diseño.

A continuación, se presenta un ejemplo de cálculo para el diseño del pozo Sacha-247 y para los tres pozos restantes con motor de inducción se presenta lo siguiente:

- Análisis de la curva IPR.
- Análisis nodal del pozo a condiciones actuales.
- Resultados del diseño propuesto del equipo BES con motor de imán permanente.
- Curvas de comportamiento de la bomba propuesta.
- Descripción de los componentes de fondo y superficie del equipo BES diseñado.
- Análisis nodal con el equipo propuesto.
- Análisis de sensibilidades del equipo propuesto.

##### **3.1.1 POZO SACHA-247**

El pozo Sacha-247 es un pozo direccional perforado el 2 de febrero del 2013 y completado el 13 de marzo del mismo año para producir de la arena U inferior. En el último trabajo de reacondicionamiento del 24 de julio del 2018, se realizó un cambio de equipo BES Reda D460N de 353 etapas, que estaba operando en la zona upthrust, por el equipo BES Reda RC1000 de 259 etapas, para producir de la arena T Inferior. (Petroamazonas, 2018).

##### **Comportamiento de afluencia del reservorio**

De los datos de la tabla 3.1 se calcula el caudal máximo de producción del pozo Sacha-247 mediante el método de la IPR compuesta.

**TABLA 3.1**  
**DATOS DE PRUEBA DEL POZO SACHA-247**

Pozo	Pr psi	Pb psi	Fluido (BFPD)	Petróleo (BPPD)	Agua (BAPD)	BSW %
SACHA 247	1600	1192.7	808	751	57	7.05
	PIP psi	Pwf psi	°API	Tipo bomba	Etapas	Frecuencia Hz
	441	597.08	29.4	RC 1000	259	61.5

Fuente: PETROAMAZONAS EP, octubre 2018

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

El punto de la prueba de producción se encuentra en la región saturada y el IP en este punto se lo encuentra aplicando la ecuación 2.13 y 2.14.

$$A = 1 - 0.2 \left( \frac{597.08 \text{ psi}}{1194.7 \text{ psi}} \right) - 0.8 \left( \frac{594.08 \text{ psi}}{1194.7 \text{ psi}} \right)^2 = 0.70$$

$$IP = \frac{808 \text{ BFPD}}{0.93 \left( 1600 \text{ psi} - 1194.7 \text{ psi} + \frac{1194.7 \text{ psi} \times 0.703}{1.8} \right) + 0.07(1600 \text{ psi} - 594.2 \text{ psi})}$$

$$IP = 0.92 \text{ [BFPD/PSI]}$$

Se calcula el caudal en el punto de burbuja y el caudal máximo de petróleo con la ecuación de Vogel (ecuación 2.10 y 2.11).

$$Q_b = 0.92 \frac{\text{BFPD}}{\text{psi}} (1600 \text{ psi} - 1194.7 \text{ psi}) = 374.11 \text{ [BFPD]}$$

$$Q_{\text{omáx}} = 374.11 \text{ [BFPD]} + 0.92 \frac{\text{BFPD}}{\text{psi}} \left( \frac{1194.7 \text{ psi}}{1.8} \right) = 986.77 \text{ [BPPD]}$$

### Cálculo de $\tan \beta$ y $\tan \alpha$

$$CD = 0.07 \left( 1600 \text{ psi} - \frac{0.001 \times 986.7 \text{ BFPD}}{0.92} \right) + 0.93 \times 0.125$$

$$\times 1194.7 \text{ psi} \left[ -1 + \sqrt{81 - 80 \left( \frac{0.999 (987.7) - 374.1}{987.77 - 374.11} \right)} \right]$$

$$CD = 8.751$$

$$CG = 986.77 - 0.999(986.77) = 0.986$$

$$\tan \alpha = \frac{0.986}{8.751} = 0.113$$

$$\tan \beta = \frac{8.751}{0.986} = 8.87$$

### Caudal total máximo de fluido

$$Q_{\text{tmáx}} = 986.77 \text{ [BFPD]} + 0.07 \left[ 1600 \text{ [BFPD]} - \frac{986.77 \text{ [BFPD]}}{0.92 \left[ \frac{\text{BFPD}}{\text{psi}} \right]} \right] 0.113 = 990.96 \text{ [BFPD]}$$

$$Q_{\text{tmáx}} = 990.96 \text{ [BFPD]}$$

Aplicando las ecuaciones del método de la IPR compuesta, se obtiene los valores de la tabla 3.2. Se calcula la Pwf para cada caudal en el intervalo correspondiente y se obtiene la curva IPR, que se muestra en la figura 3.1.

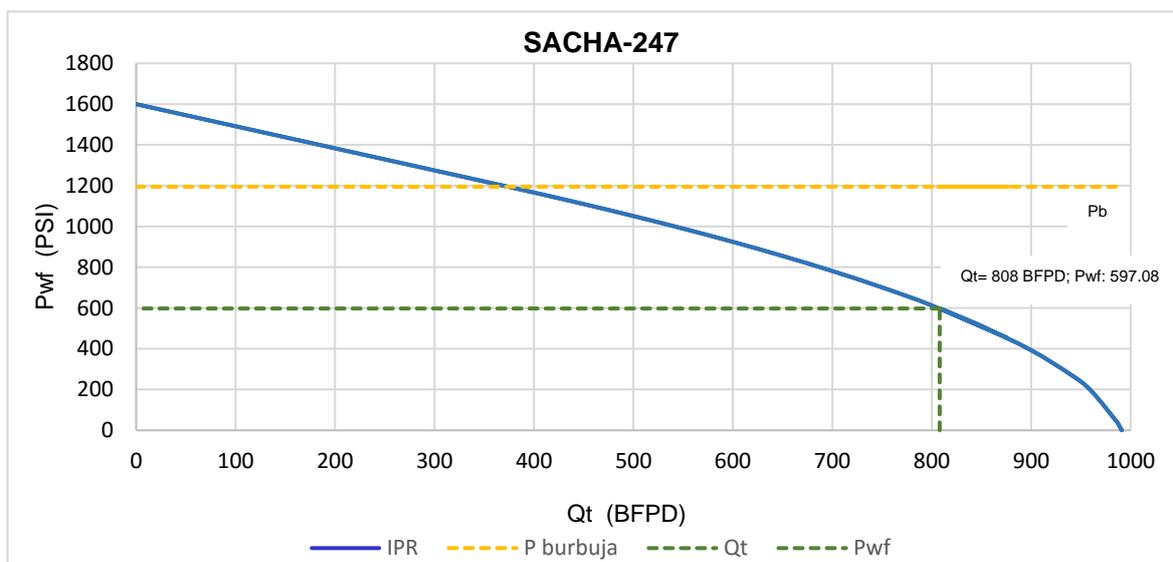
**TABLA 3.2**  
**DATOS DE COMPORTAMIENTO DE FLUJO DEL POZO SACHA 247**

Pozo Sacha	Pr psi	Pb psi	IP BFPD/ PSI	Qb BPPD	Qo máx BFPD	Tan β %	Tan α %	Qt máx psi
247 TI	1600	1194.7	0.92	374.11	986.77	8.87	0.113	990.96

Fuente: PETROAMAZONAS EP, octubre 2018

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

**FIGURA 3.1 CURVA IPR SACHA 247**



Fuente: PETROAMAZONAS EP, octubre 2018

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

### Descripción del equipo instalado y análisis nodal

Actualmente se encuentra instalado el sistema BES con motor de inducción. En la tabla 3.3 se describe de manera general el equipo instalado.

**TABLA 3.3**  
**DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO INSTALADO EN EL POZO SACHA-247**

DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO BES CON MOTOR DE INDUCCIÓN			Longitud (pies)
EQUIPO DE FONDO	Válvula de descarga	BODH serie 400 - 3 1/2" EUE - Redalloy	0.75
	Bomba Superior	RC1000 CR-CT 59 STG 400/400 RLOY BTHD	13.38
	Bomba	RC1000 CR-CT 100 STG 400/400 RLOY BTHD	21.82
	Bomba	RC1000 CR-CT 100 STG 400/400 RLOY BTHD	21.82
	Manejador de gas	AGH: D20-60 CR-CT 400/400 RLOY VTHD	6.35
	Separador de gas	INTAKE: VGSA D20-60, 400/400 RLOY	3.33
	Protector	MAXIMUS, BSBSL-UT, 400/400, NTB/HL	8.03
	Protector	:MAXIMUS, BSBSL-UT, 400/400, NTB/HL	8.03
	MOTOR	MOTOR: 456, 12, 4125, MAXIMUS, RA-S, RLOY, AS, M-TRM, 180HP	15.48
	Sensor de fondo	BASE GAUGE: XT150 TYPE 1	1.87
	MLE	MLE: 456 120FT, KELB M, 5KV, 6/1, P/I	120
	Cable de potencia	CABLE: REDALEAD, 5KV, 4 SOL, FLAT, GALV	10 441.2

**TABLA 3.3 CONTINUACIÓN**

EQUIPO DE SUPERFICIE	SDT	400 kVA	N/A
	VDF	390 kVA	N/A
	SUT	400 kVA	N/A

Fuente: PETROAMAZONAS EP, octubre 2018

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

Se realiza el análisis nodal para determinar el comportamiento actual del pozo. En la tabla 3.4 se muestran los datos necesarios para realizar el análisis nodal en el software Pipesim.

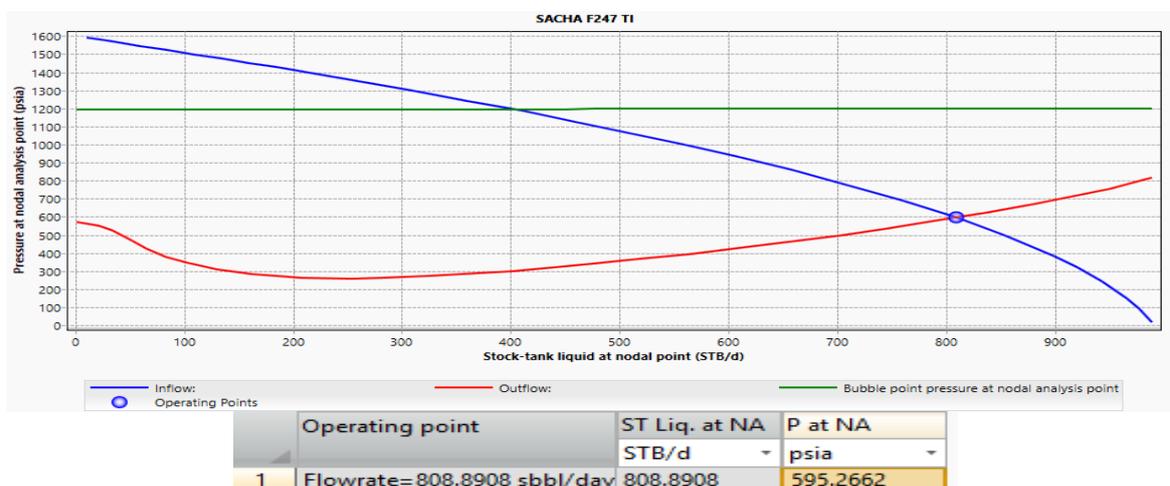
**TABLA 3.4 DATOS DEL POZO SACHA-247**

CAMPO				SACHA		
RESERVORIO				T INFERIOR		
POZO				SACHA-247 TI		
API	T fondo	Pb	GOR	SGg	Sga	$\mu_w$ (CP)
29.4	216 °F	1194.7 psi	342 PCS/BF	1.38	1.03	1 cp
Producción		808 BFPD		P anular	15 psi	
Tipo de pozo		Direccional		IP	0.92 BFPD/psi	
P reservorio		1600 psi		Tubing	3 ½ pulgadas hasta 10 436 pies	
P cabeza		85 psi		Casing	9 5/8 pulgadas a 6307 pies	
% BSW		7%		Casing	7pulgadas hasta 11 025 pies	
Profundidad bomba		10 395 pies		Tope de perforados	10 860pies	

Fuente: PETROAMAZONAS EP, octubre 2018

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

Los datos de la tabla 3.1 de la prueba de pozo Sacha-247 y la tabla 3.4 se ingresan al software Pipesim y se simula el análisis nodal. El punto de intersección de la curva de inflow y outflow es: 808.89 BFPD y 595.26 psi, lo que significa que la modelación del pozo representa la realidad de las condiciones operativas. Los resultados de la simulación se observan en la figura 3.2.

**FIGURA 3.2 ANÁLISIS NODAL EN PIPESIM POZO SACHA-247**

Fuente: PIPESIM, 2015

Modificado por: Diana Arellano y Gina Guajala

## Diseño y selección del equipo BES con motor de imán permanente

El estudio comparativo no pretende realizar una optimización de las condiciones actuales del sistema de producción, por esta razón el caudal de diseño es el mismo caudal al que se encuentra produciendo el pozo en el mes de octubre del 2018.

A continuación, se detalla cada uno de los pasos para el diseño del Sistema BES implementando motores de imán permanente.

### a) Información necesaria para el diseño

Para realizar el diseño del sistema BES se consideró las condiciones actuales del pozo y yacimiento. A continuación, se describen los datos del pozo Sacha-247 requeridos para el diseño:

#### Datos del pozo y yacimiento

- Casing: 9 5/8pulgadas, 47 lb/pie
- Liner :7pulgadas, 26 lb/pie
- Tubing: 3.5pulgadas, 9.3 lb/pie
- Profundidad de los disparos: (TVD; Tope: 9737.57 pies y Base: 9752.45 pies)
- Profundidad del pozo (TVD: 10049.19 pies, MD: 11210 pies)

#### Datos de producción

- Presión de cabeza: 80 psi
- Tasa de producción deseado:808 BFPD

#### Características de los Fluidos y Propiedades PVT

- Gravedad API del petróleo: 29.4° API
- Gravedad específica del agua :1.03
- Gravedad específica del gas:1.38
- Viscosidad del petróleo:1.39 cp
- Presión de burbuja: 1194.7 psi
- % BSW: 7 %
- GOR: 342 PCS/BF

#### Datos de Energía Eléctrica

- Voltaje primario disponible: 480 V
- Frecuencia 60 Hz

### b) Cálculo de la presión de fondo fluyente al caudal deseado

El caudal deseado  $Q_d=808$  BFPD es mayor al caudal en el punto de burbuja  $Q_b=371.704$  BFPD, por lo que la  $P_{wf}$  al caudal deseado se calcula con la ecuación 2.4.

$$P_{wf} = 0.07 \left( 1600 - \frac{808}{0.92} \right) + 0.93 \times 0.125 \times 1194.7 \left[ -1 + \sqrt{81 - 80 \left( \frac{808 - 374.11}{986.77 - 374.11} \right)} \right]$$

$$P_{wf} = 597.08 \text{ psi}$$

Esta presión de fondo fluyente también se la puede obtener de la curva IPR para el valor de caudal deseado.

**c) Cálculo de la gravedad específica y el gradiente de presión del fluido**

$$SG_0 = \frac{141.5}{131.5 + 29.4 \text{ } ^\circ\text{API}} = 0.879$$

$$SG = 0.879 \left(1 - \frac{7}{100}\right) + 1.03 \left(\frac{7}{100}\right) = 0.89$$

$$\nabla P = 0.89 \times 0.433 = 0.385 \frac{\text{psi}}{\text{pies}}$$

**d) Presión de succión de la bomba y profundidad de asentamiento de la bomba.**

- Se determina el nivel estático y dinámico del pozo:

Nivel estático del pozo

$$H_m = \frac{597.08 \text{ psi}}{0.385 \text{ psi/pies}} = 1549.78 \text{ pies}$$

Nivel dinámico del pozo

$$\text{Nivel dinámico} = 10049.19 - 1549.78 = 8499.41 \text{ pies}$$

- Se selecciona el  $\Delta h_d$  (sumergencia) considerando que se debe asentar a una profundidad donde la fracción de gas sea mínima.

$$\text{Profundidad}_{\text{bomba}} = 8499.42 + 846 \text{ pies}$$

$$P_{\text{pump}} = 9345.40 \text{ TVD pies}$$

$$P_{\text{pump}} = 10400 \text{ MD pies}$$

- Para el cálculo de la Presión de succión:

$$\text{PIP} = 597.08 \text{ psi} - 0.385 \frac{\text{psi}}{\text{pies}} (9745.01 \text{ pies} - 9345.40 \text{ pies})$$

$$\text{PIP} = 443.12 \text{ psi}$$

**e) Cálculo de las propiedades PVT y condiciones de fluido en succión de la bomba**

- Relación Gas petróleo (Standing)

$$R_s = 1.38 \left[ \frac{443.1}{18} \times \frac{10^{0.0125 (29.4)}}{10^{0.00091 T(216)}} \right]^{1.2048}$$

$$R_s = 105.19 \text{ PCS/BF}$$

- Factor volumétrico del petróleo

$$F = 105.19 \left( \frac{1.38}{0.879} \right)^{0.5} + 1.25 (216)$$

$$F = 401.78$$

$$\beta_o = 0.972 + 1.47 \times 10^{-4} \times 401.78^{1.175}$$

$$\beta_o = 1.140 \text{ BLS/BF}$$

- Factor volumétrico del gas

Se obtuvo el Z computarizado

$$P_{pr} = \frac{443.12}{701 + (41 \times 1.38)} = 0.689$$

$$T_{pr} = 1.11 ; A = 0.128; B = 0.1102; D = 0.369 ; E = 0.207 ; F = 0.02;$$

$$C = 0.37 \quad H = 0.0283 ; z = 0.80$$

$$\beta_g = 0.0283 \times \frac{0.80(216 + 460)^\circ\text{R}}{443.12 + 14.7 \text{ psi}}$$

$$\beta_g = 0.033 \left[ \frac{\text{PCS}}{\text{PCSS}} \right]$$

- Factor volumétrico del agua (correlación Standing)

$$\beta_w = 1 + 1.2 \times 10^{-4} (216 - 60) + 1 \times 10^{-6} (216 - 60)^2 - 3.33 \times 10^{-6} (\text{PIP})$$

$$\beta_w = 1.041 \text{ BLS/BF}$$

#### f) Cálculo de la tasa de flujo total en la succión de la bomba

$$Q_{\text{tot}} = 808 \left( 0.07 \times 1.041 + (1 - 0.07)1.143 + ((1 - 0.07)(342 - 105.19) + 0.07 \cdot 0) \frac{0.0337}{5.615} \right)$$

Se asume que el agua de formación no tiene gas en solución  $R_{sw}=0$

$$Q_{\text{tot}} = 1984.80 \text{ BPPD}$$

#### g) Cálculo de la fracción de gas en la succión de la bomba

$$f_g = \frac{((1 - 0.07)(342 - 105.19) + 0) \frac{0.034}{5.615}}{0.07 \times 1.041 + (1 - 0.07)1.143 + ((1 - 0.07)(342 - 105.19) + 0) \frac{0.0637}{5.615}} \times 100 \%$$

$$f_g = 53.84\%$$

La fracción de gas libre en la admisión de la bomba es mayor a 10%, se necesita instalar un separador de gas

**h) Fracción de gas que ingresa a la bomba**

$$f_g \text{ entra a la bomba} = (1 - E_{\text{sep}})f_g$$

$$f_g \text{ entra a la bomba} = (1 - 0.90)53.94 \%$$

$$f_g \text{ entra a la bomba} = 5.38\%$$

**i) Tasa de flujo volumétrico que ingresa a la bomba**

$$Q_{\text{tot}} = 808 \left( 0.07 \cdot 1.041 + (1 - 0.07) \cdot 1.143 + (1 - 0.85) \left( (1 - 0.07)(345 - 109.755) - 0.07 \times 0 \right) \frac{0.0637}{5.615} \right)$$

$$Q_{\text{tot}} = 1022.9 \frac{\text{BFPD}}{\text{día}}$$

**j) Cálculo de la altura dinámica total****Levantamiento Neto LVN (pies) o presión hidrostática**

$$\text{LVN (pies)} = 9345.40 \text{ pies} - \frac{443.12 \text{ psi}}{0.385 \frac{\text{psi}}{\text{pies}}}$$

$$\text{LVN (pies)} = 8181.30 \text{ pies}$$

**Pérdidas por fricción Pf (pies)**

Para determinar las pérdidas de fricción se usa el Anexo No 1. En la gráfica se determina que para este caso no existen pérdidas por fricción.

$P_f=0$

- **Presión de cabeza Pwh en pies**

$$\text{Presión de cabeza (ft)} = \frac{85 \text{ psi}}{0.385 [\text{psi/pies}]}$$

$$\text{Presión de cabeza (ft)} = 220.5 \text{ pies}$$

se calcula la TDH:

$$\text{TDH} = 8181.30 \text{ pies} + 0 \text{ pies} + 220.5 \text{ pies}$$

$$\text{TDH} = 8401.8 \text{ pies}$$

**k) Selección de la bomba electrosumergible**

Los parámetros que se toman en cuenta para la selección de la bomba son:

- Diámetro del casing = 7 pulgadas
- Caudal deseado = 808 BFPD
- TDH = 8401.8 pies

De acuerdo al diámetro interno de la bomba de 6.151 pulgadas, para este tamaño de drift, Novomet ofrece bombas de las siguientes series:

- NA (2.72 pulgadas)
- NB (3.19 pulgadas)
- NF (3.62pulgadas)
- NH (4.06 pulgadas)
- NP (5.35 pulgadas)

Para el caudal requerido en este diseño, las bombas que cumplen con el objetivo de producir 808 BFPD, con un casing de 7 pulgadas de diámetro se presentan en la tabla 3.5. De acuerdo al catálogo de Novomet, se elige la bomba que tenga mayor eficiencia.

**TABLA 3.5**  
**BOMBAS POWER SAVE**

BOMBA	OD (pulgadas)	Rango (BFPD)
NA (630-1300)	2.72	805-1207
NB(630-1000)	3.19	660-1128
NF(900-1300)	3.62	716-1609
NH(790-1000)	4.06	302-1620

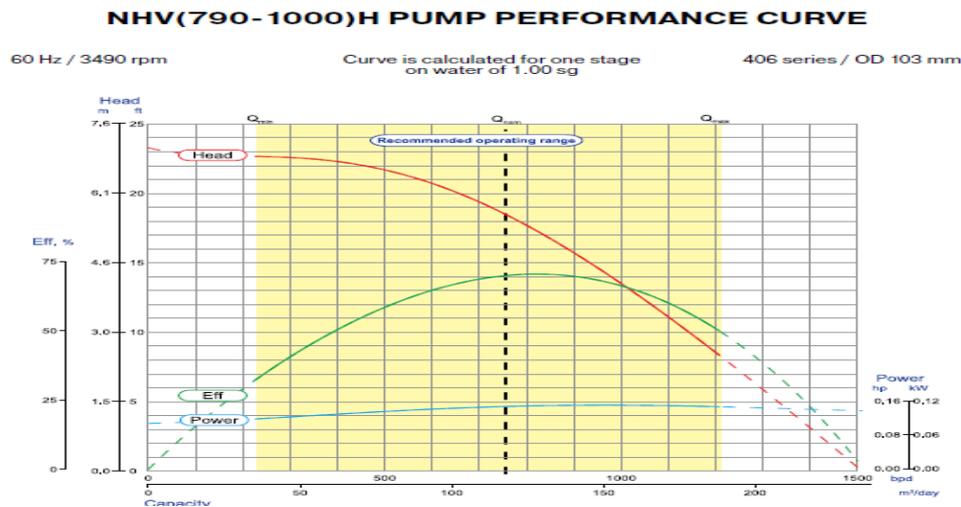
Fuente: PETROAMAZONAS EP, octubre 2018  
Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

Para este caso se selecciona la bomba:

### NHV (790-1000) H CMP

En la figura 3.3 se observa el comportamiento de la bomba NHV (790-1000) H, para el caudal requerido en el diseño la bomba, se encuentra en rango y cerca del mejor punto de eficiencia.

**FIGURA 3.3 COMPORTAMIENTO DE LA BOMBA SELECCIONADA**



Fuente: PETROAMAZONAS EP  
Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

Con las tablas de ingeniería del catálogo de Novomet (Anexo No 3), se determinan las RPM que permitan producir 808 BFPD dentro del rango operativo.

De acuerdo a la tabla 3.6 de la bomba NHV (790-1000) H, se determina que para producir 808 BFPD, la bomba puede operar a una velocidad de 4660 RPM utilizando el motor de imán permanente. A esta velocidad la bomba levantará 34.5 pies por etapa, valor con el que se calcula del número de etapas requerido por la bomba.

$$\# \text{ Etapas} = \frac{8401 \text{ pies}}{34.5 \text{ pies/etapa}}$$

$$\# \text{ Etapas} = 243 \text{ etapas}$$

Se obtiene el número de etapas finales de acuerdo al número de carcasa que tiene cada bomba (Anexo No 4).

$$\text{Número de Etapas por carcasa} = 216 \text{ etapas}$$

**TABLA 3.6**  
**ESPECIFICACIONES DE LA BOMBA NHV(790-1000)H**

Modelo	Velocidad de rotación	Rango operativo recomendado	Capacidad en el BEP	Potencia por etapa	Altura por etapa
H/ SERIE 406 (OD 4.06 in)					
<b>NHV (790-1000) H</b>	2910	188-1006	629	0.09	13.5
	3490	226-1207	755	0.16	19.3
	3640	232-1258	786	0.18	21
	4070	264-1409	880	0.25	26.3
	4660	302-1610	1005	0.37	34.5

Fuente: Catálogo Novomet, 2018

En la tabla 3.7 se describe la bomba que ha sido seleccionada de acuerdo a las especificaciones del catálogo de Novomet.

**TABLA 3.7**  
**DESCRIPCIÓN DE LA BOMBA SELECCIONADA**

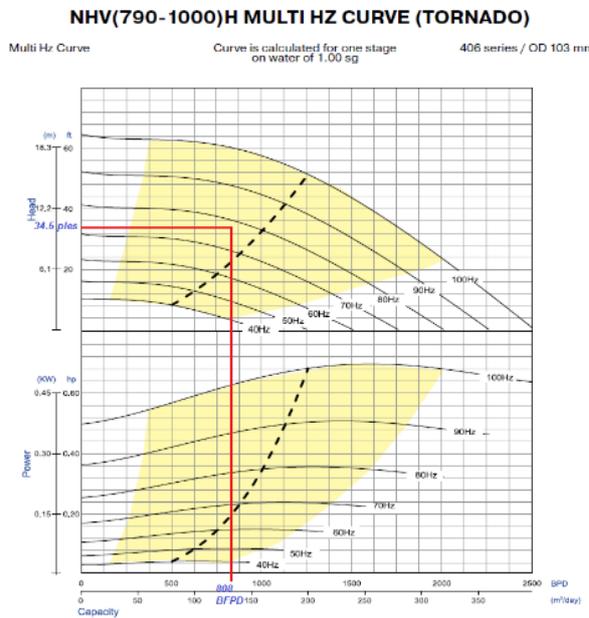
BOMBA SELECCIONADA	NHV (790-1000) H CMP
Serie de la Bomba	406
Configuración de la Bomba (carcasa)	72 / 72/ 72 etapas
Diseño de la bomba	Compresora
Diseño de las etapas	Tipo panqueque con corona tipo vortex/metalurgia de polvos
Número de etapas	216

Fuente: Novomet, 2018

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

Para determinar la frecuencia operativa de la bomba, se utiliza la figura 3.4. En esta figura se ingresa con los pies por etapa de las especificaciones de la bomba y el caudal de diseño y se determina la posible frecuencia de operación de la bomba.

**FIGURA 3.4 CURVA TORNADO DE LA BOMBA NHV (790-1000) H**



Fuente: PETROAMAZONAS EP

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

La frecuencia de operación aproximadamente sería 78 a 80 Hz, el valor final se lo obtendrá del resultado de la simulación en el software Novomet Sel pro.

### I) Requerimiento de potencia para el motor

#### Potencia consumida por la bomba

Para calcular esta potencia se toma en cuenta característica de la bomba y fluido

$$\frac{\text{HP}}{\text{etapas}} = 0.37$$

$$\text{HP} = 0.37 \times 216 \times 0.890 = 81.13 \text{ HP}$$

A este valor se le suma la potencia consumida por el separador y protector sumado un 15% del total de potencia por seguridad.

$$\text{HP} = 81.13 \text{ HP} + 5 \text{ hp} + 5 \text{ HP} = 91.13 \text{ HP}$$

### m) Selección del motor

Las características para la selección del motor son:

- Diámetro interno del casing: 6.151 pulgadas
- Temperatura de fondo del pozo = 216° F
- Serie de la bomba = 406

Para la selección de un motor de imán permanente se aplica la siguiente ecuación:

$$N_{\text{motor}} = (216 \times 0.37 \times 0.889 \times 1^2) \times 1.1 = 78.3 \text{ HP}$$

Se calcula la carga del motor en operación normal con la siguiente ecuación:

$$\text{Carga del motor} = 100 \times \frac{88}{94} = 92.01\%$$

Si el motor presenta un valor de carga muy elevado, se elige un motor de mayor capacidad, de acuerdo al catálogo de Novomet se selecciona el siguiente motor:

MOTOR: N406 PM 110 2600 V 6.0 RPM

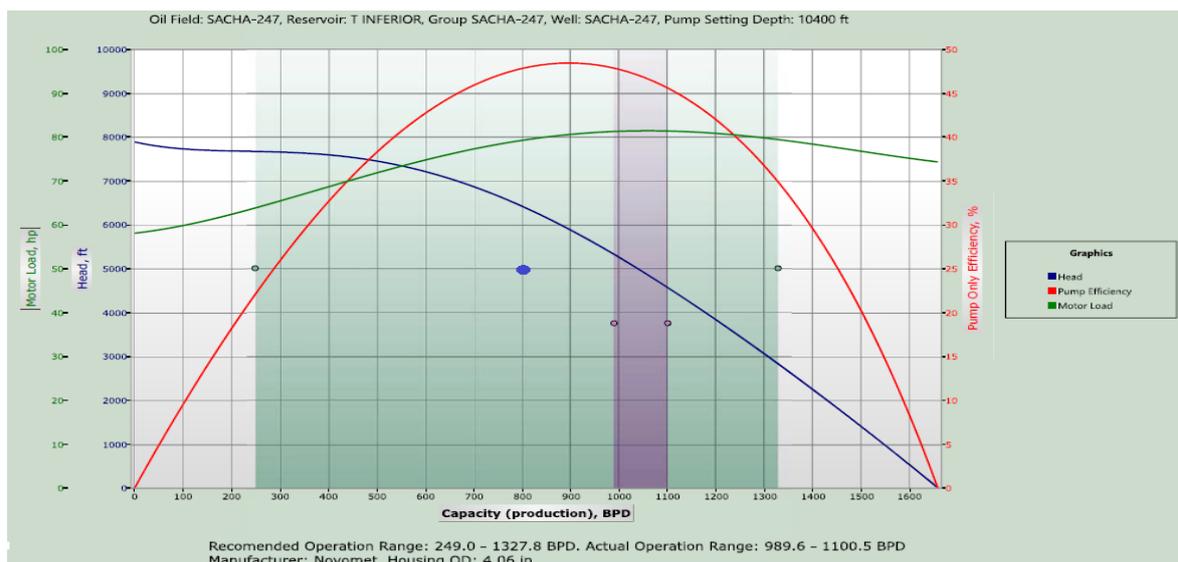
#### n) Simulación de los equipos propuestos en el Software Novomet Sel Pro

Con la selección de la bomba electrosumergible, el motor de imán permanente y la frecuencia de operación se inicia la simulación en el Software Novomet Sel Pro.

De la simulación se obtienen las curvas de comportamiento de la bomba y la curva de tornado a diferentes frecuencias de operación. Con los cálculos realizados para el pozo Sacha-247 se obtienen las figuras 3.5 y 3.6, en las que se observan el comportamiento de la bomba propuesta a las condiciones actuales del pozo.

En la figura 3.5 se observa el comportamiento de la bomba propuesta a la frecuencia establecida, para el caudal de 808 BFPD la bomba está trabajando dentro del rango operativo y cerca del mejor punto de eficiencia, considerando que el rango de caudal de operación es de 226 BFPD -1207 BFPD

**FIGURA 3.5 CURVA DE COMPORTAMIENTO DE LA BOMBA NHV(790-1000)H**

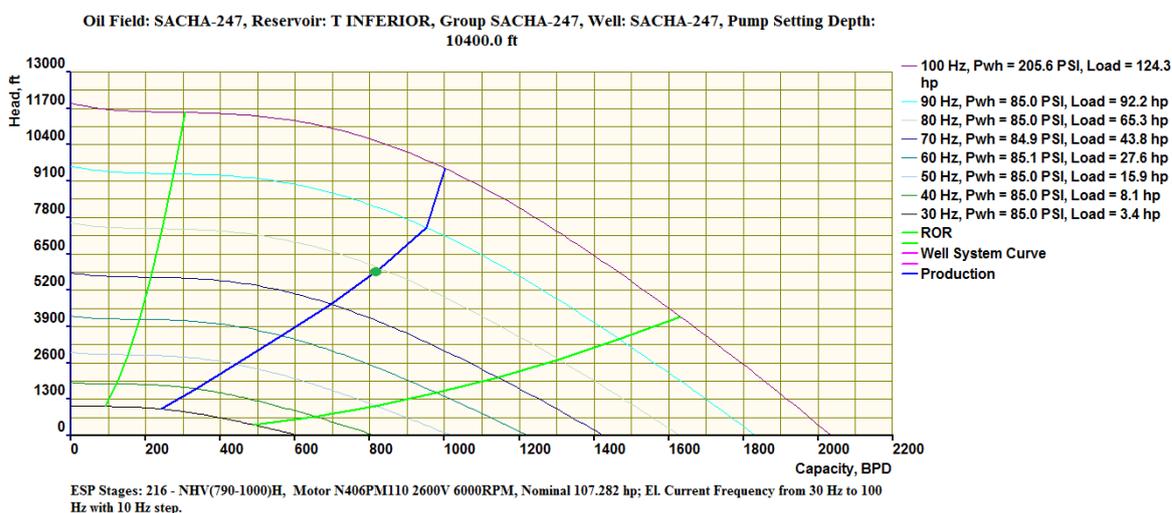


Fuente: Novomet Sel Pro, 2015

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

En la figura 3.6 se observa que la bomba está operando a una frecuencia de 78 Hz y se encuentra dentro del rango operativo, cerca del MPE, de acuerdo a la gráfica de tornado estándar de la bomba que se puede ver en el Anexo No 6.

**FIGURA 3.6 CURVA DE TORNADO DE LA BOMBA NHV (790-1000)H**



Fuente: Novomet Sel Pro, 2015

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

Una vez seleccionada la bomba y el motor adecuado para el correcto funcionamiento del sistema BES se selecciona el resto del equipo de fondo y superficie.

#### **o) Selección del protector**

Para la bomba de serie 406, se observan los diferentes modelos de protectores que se pueden seleccionar de acuerdo a las condiciones del pozo y a las especificaciones del catálogo Novomet se selecciona un protector:

N406 TMP LSBPB-SBPBSL

#### **p) Selección del separador de gas**

La cantidad de gas libre presente en la succión de la bomba es mayor al 10% permitido, debido a esto se debe instalar un separador de gas de la misma serie de la bomba, de acuerdo al catálogo de Novomet 2018. Se selecciona el separador de gas:

N406 3800, AR2, CR3, S14

#### **q) Selección del cable de potencia y MLE**

Primero se determina la longitud del cable de potencia:

$$\text{Longitud del Cable} := 10409 \text{ pies} + 160 \text{ pies} - \text{Longitud MLE}$$

Longitud del MLE

3 cuerpos de bomba Power Save de 216 etapas carcasa número 5 = 29.4 pies

1 separador de gas= 2.58 pies

1 protector modular =7.56 pies

$$\text{Longitud del MLE} = 29.4 + 2.58 + 7.56 + 15 \text{ pies} = 55.54 \text{ pies}$$

La longitud del cable MLE es 54.54 pies y tomando en cuenta que el MLE es siempre plano se selecciona un MLE de la tabla de especificaciones del catálogo Novomet 2018.

MLE, 4kv, 400 °F, flat, AWG#4, BY PRYSMIAN

$$\text{Longitud del Cable} := 10400 \text{ pies} + 160 \text{ pies} - 52.6 \text{ pies}$$

$$\text{Longitud del Cable} := 10516.4 \text{ pies}$$

Con el amperaje del motor seleccionado 20.5 Amperios, se obtiene la caída de voltaje, este valor debe ser menor a 30 voltios/1000 pies para asegurar la capacidad de transporte de corriente.

Con el catálogo Novomet 2018, se selecciona un cable de potencia

POWER CABLE, DW, 4kv, 450 F, flat, AWG#4, BY PRYSMIAN

El cable seleccionado tiene una tolerancia de 67 Amperios, se observa en el Anexo No 5.

#### r) Selección del sensor de fondo

Se determina los parámetros de fondo que se desean controlar en superficie y se selecciona un sensor de la misma serie del motor o de la bomba, del catálogo de Novomet se selecciona el sensor:

N DS2 406 DES2 5800PSI CR2 MOD0 HT

Una vez seleccionado el equipo de fondo se puede diseñar el equipo de superficie considerando las características del motor seleccionado.

#### s) Selección de VDF y Transformadores

Para la selección de estos equipos, se usan los datos nominales y operativos del motor seleccionado. En la tabla 3.8, se detallan los datos nominales del motor seleccionado:

**TABLA 3.8**  
**PARÁMETROS DEL MOTOR SELECCIONADO**

PARÁMETROS	VALOR NOMINAL
Motor seleccionado	N406 3800, AR2, CR3, S14
Voltaje del motor,	2600 V
Voltaje primario, V	480 V
Corriente del Motor	20.5

Fuente: NOVOMET Sel Pro, 2013

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

Para calcular los parámetros operativos del motor se usan las ecuaciones descritas en la metodología del capítulo II y se presentan en la tabla 3.9.

**TABLA 3.9**  
**PARÁMETROS OPERATIVOS DEL MOTOR**

<b>PÁRAMETROS</b>	<b>CÁLCULO DE PARÁMETROS</b>
Factor de frecuencia	Factor de frecuencia =156/200= 0.78
Voltaje operativo del motor	Volt operativo motor=0.78 x 2600=2028
Pérdidas en el cable, V	Pérdidas en el cable= 152.32 V
S/U TAP voltaje, V	S/U voltaje =152.32+ 2028 = 2180.32 V
S/U TAP voltaje secundario	2945
Relación de transformación	Relación de transformación=2945/440=6.69

Fuente: NOVOMET Sel Pro, 2013

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

Con los datos de operación y nominales del motor, se calcula la corriente requerida por el variador de frecuencia, para su selección.

$$I_p = 20.5 \times 6.69 \times 1.4 = 192.09 \text{ [A]}$$

Con el valor de corriente calculado y el voltaje de suministro primario proporcionado, se observa en la tabla de especificaciones al catálogo de Novomet y se selecciona un variador de frecuencia que resista la corriente calculada. El VDF seleccionado es:

NVDS 200 kVA 480 V 60 Hz, 6 P, SWF NSP

Se determina la potencia máxima en la que operaran lo equipos

$$\text{kVA} = \frac{\sqrt{3} \cdot 2945 \text{ [V]} \cdot 20.5 \text{ [A]} \times 1.3}{1000}$$

$$\text{kVA} = 135.93 \text{ kVA}$$

La selección de los transformadores depende de 3 factores:

- Suministro de energía primaria disponible: 13.8 kV
- Requerimiento de voltaje secundario: 2820V
- kVA requeridos: 128.26 kVA

Con los resultados obtenidos se busca en el catálogo los transformadores que se ajusten a estas características y se seleccionan:

XFMR, 200kVA 13800V PRI / MULTI TAP SEC

XFMR,200kVA 480V PRI / MULTI TAP SEC

#### **t) CAJA DE VENDEO**

El voltaje nominal de la caja de venteo debe exceder el voltaje nominal del transformador elevador. De acuerdo a las características del transformador elevador se selecciona:

JB 3KV N3R

#### **u) RESULTADOS POZO SACHA-247**

Después de la simulación, el software emite un reporte con los parámetros, que el pozo estará operando, estos parámetros están resumidos en la tabla 3.10.

**TABLA 3.10**  
**VARIABLES CALCULADAS EN EL SOFTWARE NOVOMET SEL PRO**

<b>POZO SACHA-247</b>		
<b>PARÁMETROS DE LEVANTAMIENTO</b>		
Profundidad de asentamiento de la bomba	10400	pies
Índice de productividad	0.92	BFPD/ psi
Presión de reservorio	1600	psi
Corte de agua	7	%
Presión de descarga de la bomba	2359.30	psi
Presión de fondo fluyente	600	psi
Nivel dinámico MD	5962.32	pies
<b>DATOS DE LA BOMBA</b>		
Consumo de potencia	63	hp
Frecuencia operativa	79	Hz
<b>DATOS DEL MOTOR</b>		
Carga del motor	74	%
Eficiencia	91.7	%
Temperatura del devanado	340	°F
Corriente eléctrica	15.6	A
<b>LÍNEA DEL CABLE</b>		
Temperatura del MLE aceptado	320	°F
Longitud de MLE resistente al calor	82.01	pies
Temperatura máxima del MLE	252	°F

Fuente: NOVOMET Sel Pro, 2013

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

### **SELECCIÓN DEL EQUIPO DE FONDO Y SUPERFICIE**

La selección del equipo final con la tecnología de motor de imán permanente, se resume en la tabla 3.11, la longitud total del equipo de fondo es 54.85 pies.

**TABLA 3.11**  
**SELECCIÓN DE EQUIPOS DE FONDO Y SUPERFICIE**

<b>EQUIPO BES CON MOTOR DE IMÁN PERMANENTE</b>			<b>Longitud en pies</b>
<b>EQUIPO DE FONDO</b>	Subdescarga	DISCHARGE PRESURE SUB 3 1/2"	0.89
	Descarga	BOLT-ON HEAD -3 1/2"- 8RD EUE-406 SERIES	0.56
	Bomba Superior	NHV (790-1000) H, CMP, AR2, CR2C, S14, 72STG, HSG #5	9.8
	Bomba media	NHV (790-1000) H, CMP, AR2, CR2C, S14, 72STG, HSG #5	9.8
	Bomba Inferior	NHV (790-1000) H, CMP, AR2, CR2C, S14, 72STG, HSG #5	9.8
	Separador de gas	GAS SEPARATOR, N406 3800, AR2, CR3, S14	2.58
	Protector	PROTECTOR N406TMP LSBPB-SBPBSL CR2C S13 HT HL	7.56
	MOTOR	MOTOR, N406PM, 6000RPM, 110HP/2600V/20.5A, CR2, HT, SGL	11.8
	Sensor de fondo	NDS2 406 DES2 5800PSI CR2 MOD0 HT	2.06

**TABLA 3.11 CONTINUACIÓN**

<b>EQUIPO DE SUPERFICIE</b>	MLE	ZTS, Sub-Line, 5kV, 450 F, flat, AWG#5	54.54
	Cable de potencia	POWER CABLE, 4KV, 450F, FLAT, AWG#4 BY PRISMIAN	10505.46
	SDT	XFMR, 200 kVA 13800V PRI / MULTI TAP SEC	N/A
	VDF	NVDS 130 kVA 480 V 60 Hz, 6 P, SWF NSP	N/A
	SUT	XFMR,200 kVA 480V PRI / MULTI TAP SEC	N/A

Fuente: PETROAMAZONAS E.P

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

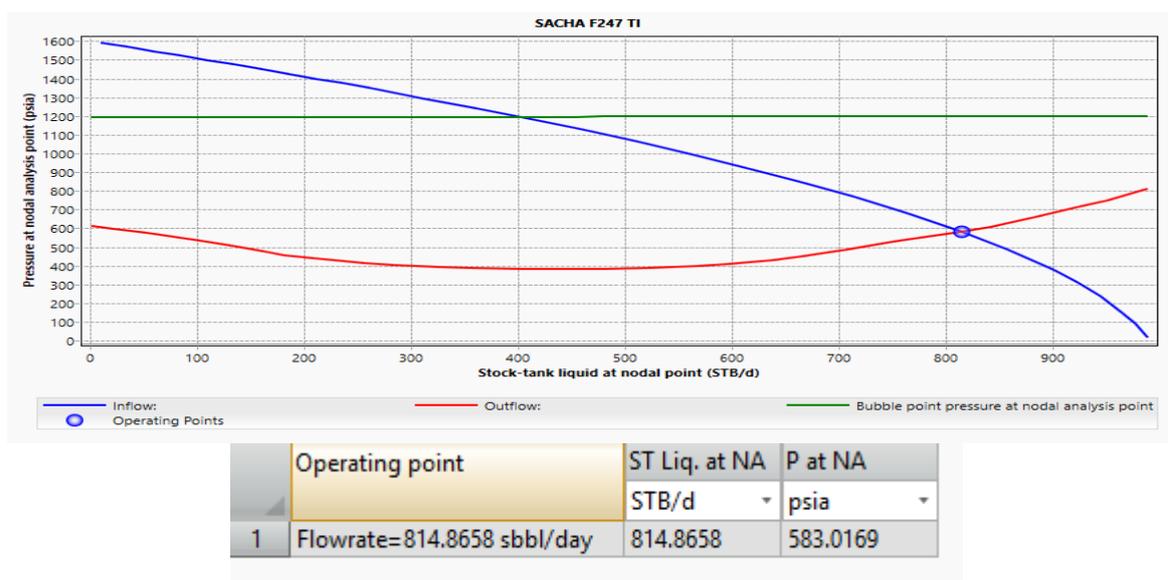
### **Análisis nodal y sensibilidad de frecuencia del equipo propuesto**

#### **Análisis nodal de la bomba propuesta**

Se realiza el análisis nodal para evaluar el comportamiento del pozo con la bomba propuesta y con los datos actuales del pozo.

En la figura 3.7 se observa la capacidad de producción es  $Q_t=814.86$  BFPD y  $P_{wf}=583.019$  psi a una frecuencia operativa de 78 Hz. Lo que significa que con la bomba propuesta produciría aproximadamente el mismo caudal.

**FIGURA 3.7 ANÁLISIS NODAL CON LA BOMBA (NHV 790-1000) H**



Fuente: PIPESIM, 2015

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

Para determinar el valor máximo de frecuencia que se podría incrementar al equipo BES propuesto, se considera el rango de operación de la bomba seleccionada y la capacidad de producción del pozo.

En la tabla 3.14 se calcula el rango de frecuencias en las que trabajaría el equipo, mediante las leyes de afinidad, considerando las especificaciones de la bomba descritas en la tabla 3.13, y los datos de la tabla 3.12

**TABLA 3.12**  
**CONDICIONES DE DISEÑO**

<b>Q actual</b>	814.7	BFPD	<b>Potencia</b>	87	HP
<b>Frecuencia</b>	78	Hz	<b>TDH</b>	8401	pies

Fuente: PETROAMAZONASE.P

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

En la tabla 3.13 se observa el rango de producción de la bomba NHV(790-1100)H a diferentes frecuencias.

**TABLA 3.13**  
**ESPECIFICACIONES DE LA BOMBA NHV (790-1000) H**

Velocidad de operación RPM	Rango de operación recomendado	Frecuencia HZ
2910	188-1006	50
3490	226-1207	60
3640	232-1258	62
4070	264-1409	70
4660	301-1610	80

Fuente: PETROAMAZONAS E.P

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

**TABLA 3.14**  
**APLICACIÓN DE LAS LEYES DE AFINIDAD**

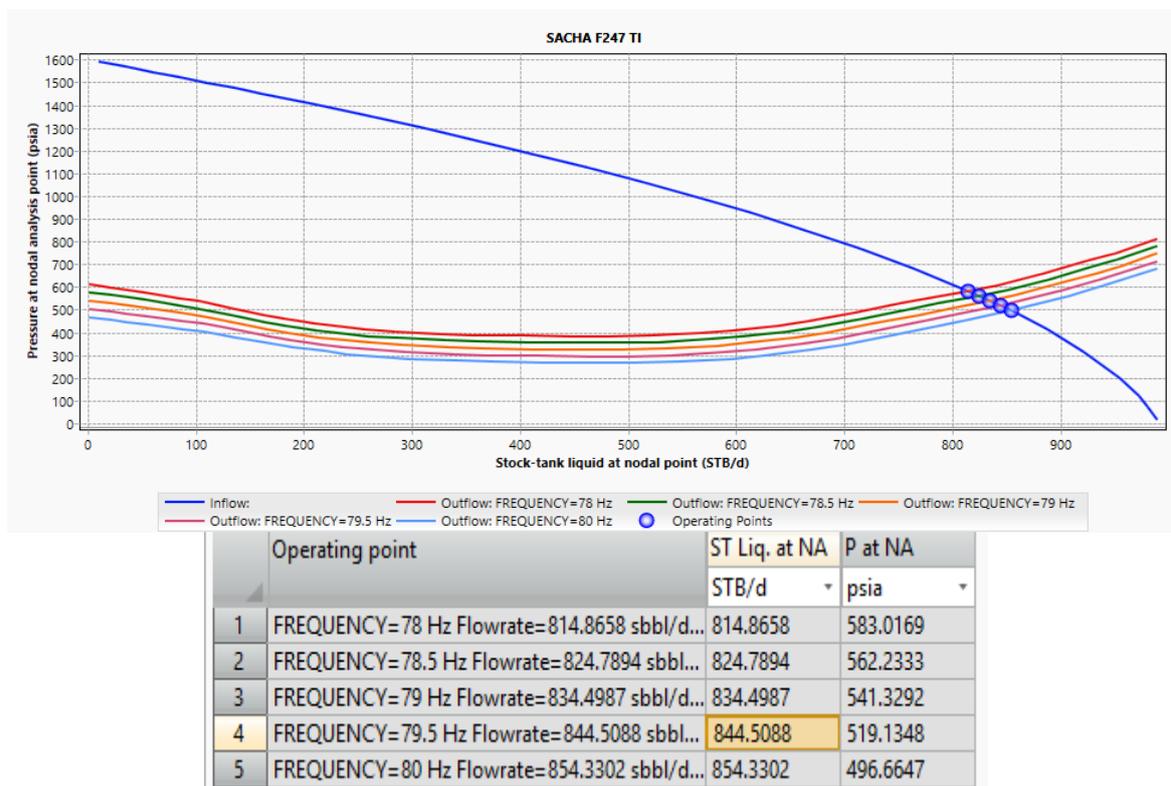
Frecuencia	Q2	Potencia	TDH
Hz	BFPD	HP	pies
50	517.95	22.92	5385.26
60	621.54	39.60	6462.31
62	642.26	43.69	6677.72
70	725.13	62.88	7539.36
75	776.92	77.34	8077.88
76	787.28	80.48	8185.59
77	797.64	83.70	8293.29
78	808.00	87.00	8401.00
79	818.36	90.39	8508.71
80	828.72	93.87	8616.41

Fuente: PETROAMAZONAS E.P

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

De acuerdo a las leyes de afinidad y por especificaciones de la bomba, el análisis de sensibilidades se lo realizará incrementado la frecuencia hasta 80 Hz. En la figura 3.8, se observa el análisis de sensibilidades conforme aumenta la frecuencia aumenta la producción y para el límite máximo de frecuencia en la que la bomba trabaría en rango, se obtiene un caudal del 854.33 BFPD.

**FIGURA 3.8 ANÁLISIS DE SENSIBILIDADES POZO SACHA 247 TI**



Fuente: PIPESIM, 2015

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

### 3.1.2 POZO SACHA-395

El pozo Sacha-395, es un pozo direccional perforado el 13 de mayo de 2014. Se encuentra produciendo de la arena U inferior en el intervalo de 11210 pies a 11 237 pies. En el último trabajo de reacondicionamiento del 14 de enero del 2018 se realizó un cambio de equipo BES Reda D800N de 254 etapas por el equipo BES Reda D460N de 325 etapas (Petroamazonas, 2017).

#### Comportamiento de afluencia del reservorio

Para calcular el caudal máximo de producción del pozo Sacha-395 se usó los datos de la prueba de producción, expuesta en la tabla 3.15, mediante el método de la IPR compuesta.

**TABLA 3.15  
DATOS DE LA PRUEBA DE POZO SACHA 395**

Pozo	Pr psi	Pb psi	Fluido (BFPD)	Petróleo (BPPD)	Agua (BAPD)	BSW %
SACHA 395 UI	900	930	233	231	2.0	0.86
	PIP psi	Pwf psi	°API	Tipo bomba	Etapas	Frecuencia Hz
	288	430.7	19.2	D460N	360	52

Fuente: PETROAMAZONAS EP, octubre 2018

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

Aplicando las ecuaciones descritas del método de la IPR compuesta, se obtuvo los resultados de la tabla 3.16 y con estos valores se traza la curva IPR del pozo presentada en la figura 3.9.

**TABLA 3.16**  
**DATOS DE CAPACIDAD DE FLUJO DEL POZO SACHA 395**

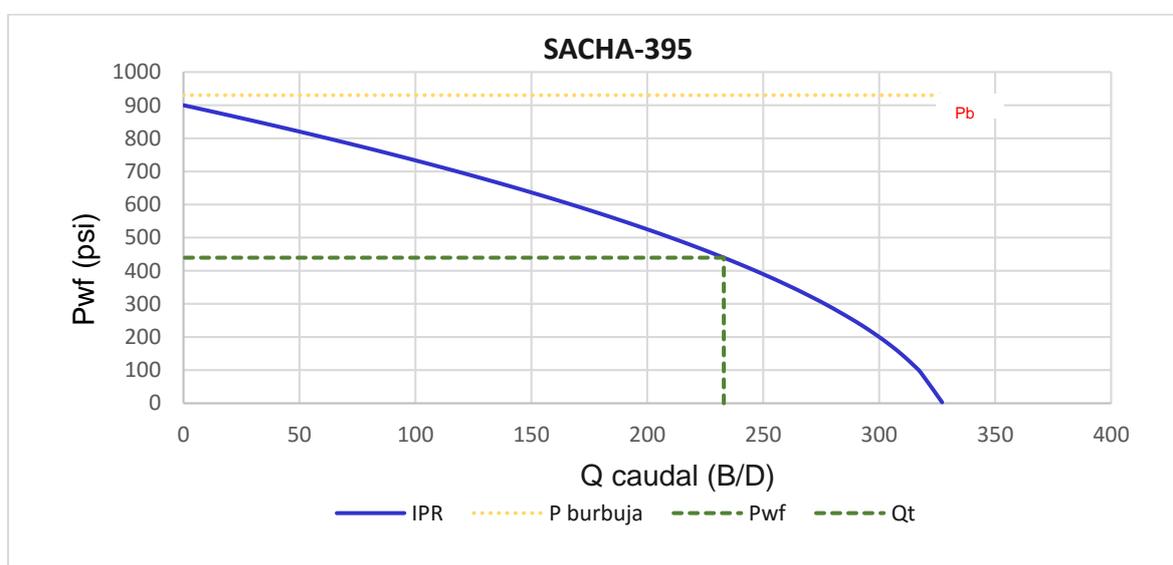
Pozo	Pr	Pb	IP	Qb	Q omáx	Tan $\beta$	Tan $\alpha$	Qt máx
Sacha	psi	psi	BFPD/ PSI	BPPD	BFPD	%		psi
395 UI	900	930	0.65	0	327.08	13.39	0.07	327.33

Fuente: PETROAMAZONAS EP, octubre 2018

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

La curva IPR del pozo SACHA-395 muestra la capacidad de producción máxima del pozo.

**FIGURA 3.9 CURVA IPR DEL POZO SACHA 395-UI**



Fuente: PETROAMAZONAS E.P.

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

### Descripción del equipo instalado y análisis nodal

En el pozo Sacha-395 se encuentra instalado un equipo BES con motor de inducción, en la tabla 3.17 se describen los equipos de fondo y superficie que se encuentran instalados.

**TABLA 3.17**  
**DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO BES SACHA-395**

DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO BES CON MOTOR DE INDUCCIÓN			Longitud (pies)
EQUIPO DE FONDO	Válvula de descarga	DISCHARGE PHOENIX PRESSURE, SERIE 400	0.62
	Cabeza de descarga	HEAD BOLT ON DISCHARGE PMP 400	0.78
	MLE	MLE 456 MAXLOK 400, 5 KV, 6	78
	Cable de potencia	FLAT/CAP 4 SOL C/C CAP 3/8pulgadas	10 709
	Bomba Superior	BOMBA D460N, SERIE 400, STG 164, RLOY, MONEL	17.62
	Bomba	BOMBA D460N, SERIE 400, STG 164, RLOY, MONEL	17.62
	Separador de gas	VGSA D20-60, SERIE 400, STG 32, RLOY, MONEL	3.36
	Protector	BPBSL-UT-RLOY-AFL-MAX, SERIE 400	8.03

**TABLA 3.17 CONTINUACIÓN**

	Protector	BPBSL-LT-RLOY-AFL-MAX, SERIE 400	8.03
	Motor	RA-S-RLOY-MAX, SERIE 456, 120 HP, 1508 V, 52 AMP	15.50
	Sensor de fondo	XT150 TYPE 1 SERIE 450	1.87
<b>EQUIPO DE SUPERFICIE</b>	SDT	RVR, 400 kVA, 13800 V, 480 V	N/A
	VDF	S7+C420KCDS, 200 kVA, 480 V	N/A
	SUT	BAKER HUGHES, 400 kVA, 480 V, 1107V-3210 V	N/A

Fuente: PETROAMAZONAS EP, octubre 2018

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

Los equipos descritos en la tabla 3.17 se encuentran operando a las condiciones de la prueba de producción de la tabla 3.15 y sus equipos se encuentran en rango, pero se simulará un nuevo diseño con motores de imán permanente para identificar las principales diferencias de diseño, operación y características de funcionamiento.

Se realiza el análisis nodal para determinar el comportamiento actual del pozo y el potencial del yacimiento. En la tabla 3.18 se muestran los datos necesarios para realizar el análisis nodal en el software Pipesim.

**TABLA 3.18  
DATOS DEL POZO SACHA-395**

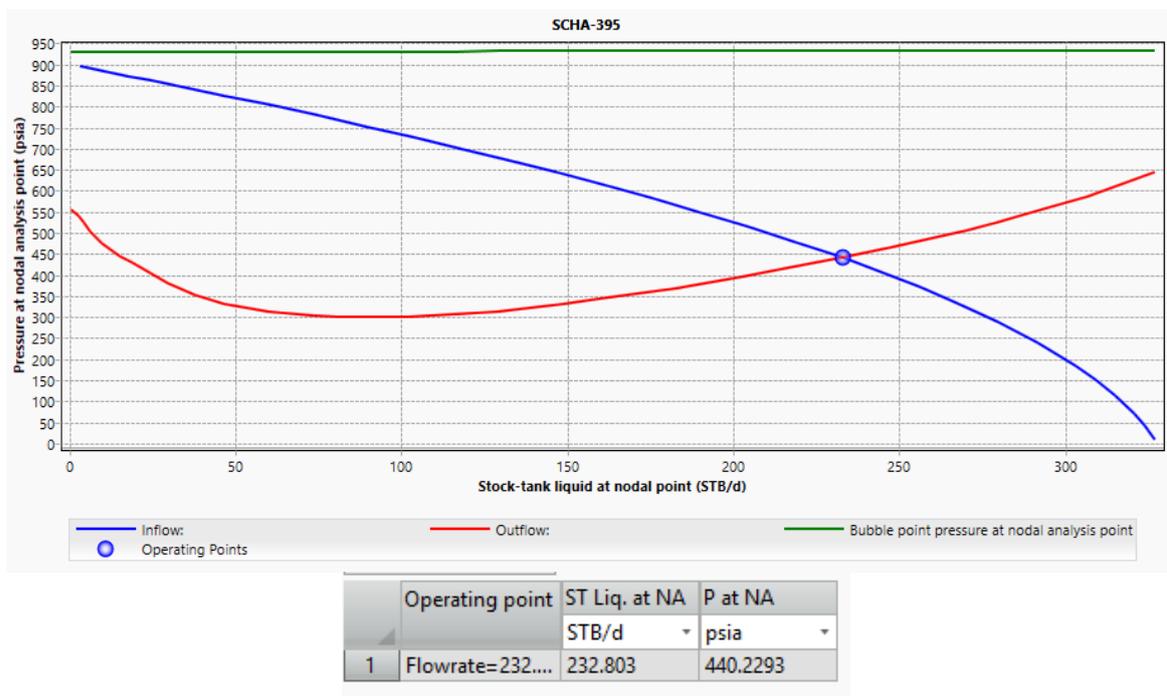
<b>CAMPO</b>				<b>SACHA</b>		
<b>RESERVORIO</b>				<b>U INFERIOR</b>		
<b>POZO</b>				<b>SACHA-395 UI</b>		
API	T fondo	PB	GOR	SGg	Sga	$\mu_w$ (CP)
19.2	216 °F	930 psi	190	1.1	1.01	1 cp
Producción		233 BFPD		P anular	20 psi	
Tipo de pozo		Direccional		IP	0.65 BFPD/psi	
P reservorio		900 psi		Tubing	3 1/2pulgadas hasta 10 841 pies	
P cabeza		30 psi		Casing	9 5/8pulgadas a 10145 pies	
% BSW		0.86		Liner	7pulgadas desde 10 007 a 11 768 pies	
Profundidad bomba		10 850 pies		Tope de perforados	11 210 pies	

Fuente: PETROAMAZONAS EP, octubre 2018

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

Con los datos de la tabla 3.15 y 3.18 se obtiene la curva de  $P_{wf}$  Vs  $Q$  y se determina el punto óptimo de producción de fluidos. La gráfica resultante se observa en la figura 3.10, y se observa la curva de desempeño de influjo del yacimiento (inflow), que interseca a la curva de salida del sistema (outflow). El punto donde se intersecan las curvas es 232.803 BFPD y 440.229 psi, lo que significa que la modelación del pozo representa la realidad actual de las condiciones operativas del pozo.

**FIGURA 3.10 ANÁLISIS NODAL EN EL POZO SACHA 395-UI**



Fuente: PETROAMAZONAS E.P.  
Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

### Diseño y selección del equipo BES con motor de imán permanente

Del análisis nodal se consideró el caudal operativo como caudal requerido para el nuevo equipo BES. Con los datos de las tablas 3.15 y 3.18 se calculan los parámetros de diseño en una hoja de excel siguiendo el procedimiento descrito en el capítulo II y se obtienen los resultados expuestos en la tabla 3.19.

**TABLA 3.19  
RESULTADO DE LAS VARIABLES CALCULADAS DEL POZO SACHA-395**

PARÁMETROS DE DISEÑO CALCULADOS			UNIDAD
Presión de reservorio	Pr	900	psi
Índice de productividad	IP	0.65	BFPD/psi
Porcentaje de Agua	%BSW	0.86	%
Caudal máximo de fluido	Qt máx	327.34	BFPD
Caudal deseado	Qd	233	BFPD
Presión de fondo fluyente	Pwf	439.67	psi
Gravedad específica del petróleo	GE <sub>o</sub>	0.939	-
Gravedad específica de la mezcla	GE	0.939	-
Gradiente de presión del fluido	ΔP	0.406	psi/pies
Presión de succión de la bomba	PIP	287.99	psi
Profundidad de asentamiento de la bomba	Hb	10 800 MD 9182 TVD	pies
Relación Gas petróleo	GOR	190	PCS/BF
Factor volumétrico del agua	β <sub>w</sub>	1.04	BLS/BF
Factor volumétrico del petróleo	β <sub>o</sub>	1.09	BLS/BF
Factor volumétrico del gas	β <sub>g</sub>	0.05	PCS/BF
Tasa de flujo total en la succión	Qtot	630.14	BFPD

**Tabla 3.19 CONTINUACIÓN**

Fracción de gas en la succión de la bomba	fg	59.51	%
Fracción de gas que ingresa a la bomba	fg in	11.90	%
Tasa de flujo volumétrico que ingresa a la bomba	Qtot	330.12	BFPD
Altura dinámica total	TDH	8547	pies

Fuente: PETROAMAZONAS EP, octubre 2018

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

Con los datos calculados en la tabla 3.19 se selecciona la bomba electrosumergible en base a las tablas de ingeniería del catálogo de Novomet (Anexo No 3). Con la información detallada en estas tablas, se calcula el número de etapas requeridas por el sistema, la potencia requerida para la selección del motor y la frecuencia a la que trabajará la bomba. En la tabla 3.20 se observa los valores calculados.

**TABLA 3.20  
VARIABLES CALCULADAS PARA LA SIMULACIÓN**

<b>BOMBA SELECCIONADA</b>	<b>NBV (160-250) H SCMP</b>
Serie de la Bomba	319
Etapas calculadas	231
Etapas por carcasa	228
Potencia requerida por el motor	75 HP
Frecuencia operativa	78 Hz

Fuente: Novomet, 2018

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

Con los valores obtenidos en la tabla 3.20 y las características del pozo, fluido y reservorio descritas en la tabla 3.18 se simula en el software Novomet Sel pro el nuevo diseño del pozo Sacha-395. El software proporciona un reporte de la simulación, en el que se evidencia parámetros de la operación de los equipos de fondo seleccionados y las posibles condiciones de producción del pozo. En la tabla 3.21 se detallan los parámetros evaluados por el software.

**TABLA 3.21  
PARÁMETROS CALCULADOS POR EL SOFTWARE**

<b>POZO SACHA-395</b>		
<b>PARÁMETROS DE LEVANTAMIENTO</b>		
Profundidad de asentamiento de la bomba	10800	pies
Índice de productividad	0.65	BFPD/ psi
Presión de reservorio	900	psi
Producción	238.30	BFPD
Corte de agua	0.9	%
Presión de descarga de la bomba	2556.56	psi
Presión de cabeza	30.05	psi
Presión de casing	20	psi
Presión de fondo fluyente	440.5	psi
Nivel dinámico MD	9300.46	pies
<b>DATOS DE LA BOMBA</b>		
Consumo de potencia	27,53	hp

TABLA 3.21 CONTINUACIÓN

Frecuencia operativa	78	Hz
<b>DATOS DEL MOTOR</b>		
Carga del motor	41.8	%
Eficiencia	88.32	%
Temperatura del devanado	257..21	°F
Corriente eléctrica	14.56	A
<b>LINEA DEL CABLE</b>		
Temperatura del MLE aceptada	449.6	°F
Longitud de MLE resistente al calor	82.02	pies
Temperatura máxima del MLE	272.7	°F
Pérdidas de voltaje en la línea del cable	196.45	V

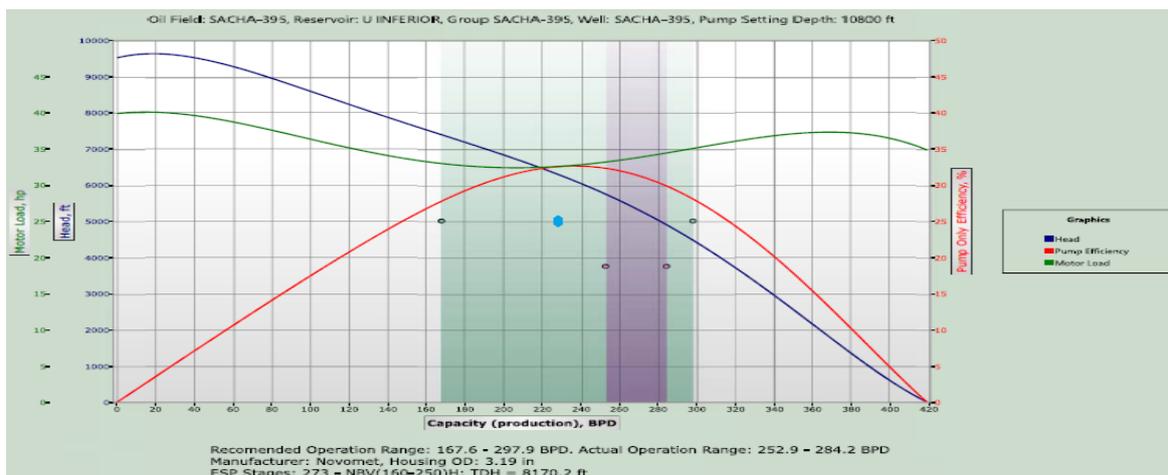
Fuente: NOVOMET Sel Pro, 2015

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

A continuación, se presentan las curvas del comportamiento de la bomba en la figura 3.11 y 3.12 de acuerdo a los datos calculados por el software.

En la figura 3.11 se observa que para el caudal de diseño de 233 BFPD la bomba NBV (160-250) H se encuentra dentro del rango de operación, cerca del mejor punto de eficiencia.

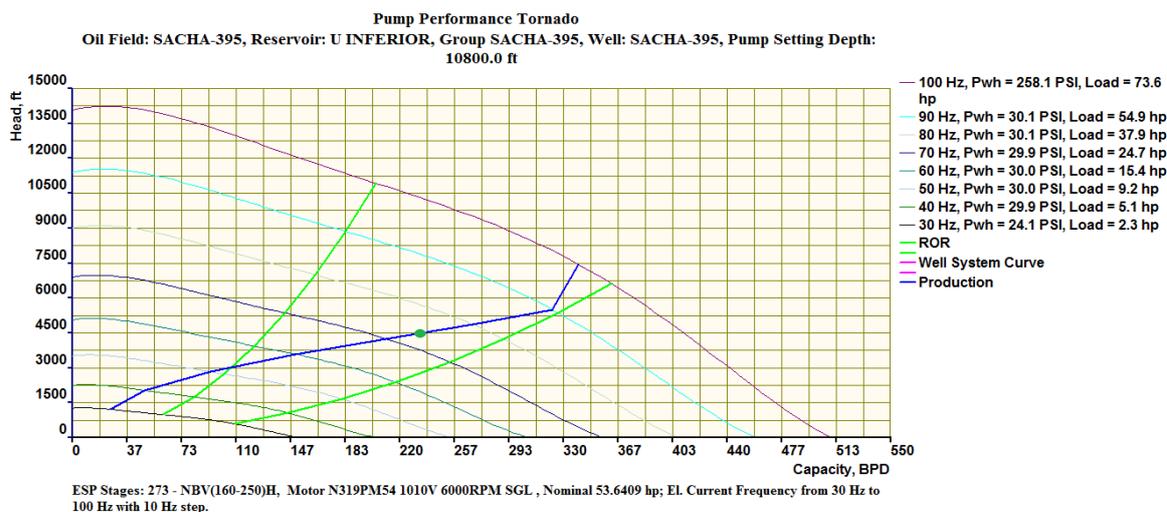
FIGURA 3.11 COMPORTAMIENTO DE LA BOMBA NBV (160-250) H



Fuente: Novomet Sel Pro, 2016

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

En la figura 3.12 se observa el comportamiento de la bomba a diferentes frecuencias, en este caso para el caudal deseado que es 233 BFPD la bomba se encuentra dentro del rango operativo a 74 Hz, se puede ver en la curva de tornado estándar de la bomba del Anexo No 6 que para el caudal de diseño la bomba se encuentra cerca del mejor punto operativo.

**FIGURA 3.12 CURVA DE TORNADO DE LA BOMBA NBV (160-250) H**

Fuente: Novomet Sel Pro, 2016

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

Con los resultados de la simulación se define que el pozo Sacha 395 puede operar con la bomba propuesta NBV (160-250) H a 74 Hz.

Para el correcto funcionamiento de los motores de imán permanente, se debe tomar en cuenta las características de amperaje y voltaje del motor para la selección del VDF. Los parámetros necesarios para la selección del equipo de superficie se encuentran en la tabla 3.22.

**TABLA 3.22**  
**PARÁMETROS PARA LA SELECCIÓN DEL EQUIPO DE SUPERFICIE**

PARÁMETROS	VALOR NOMINAL
Voltaje del motor	1010 V
Voltaje primario V	13.8 KV
Corriente del motor	27
<b>CÁLCULO DE PARÁMETROS</b>	
Factor de frecuencia	Factor de frecuencia = $148200 = 0.74$
Voltaje operativo del motor	Volt operativo motor = $0.72 \times 1010 = 747.4$
Pérdidas en el cable, V	Pérdidas en el cable = 196.33 V
S/U Tap voltaje, V	S/U voltaje = $196.33 + 747.4 = 943.73$ [V]
S/U TAP voltaje secundario	1200
Relación de transformación	Relación de transformación = $1200/440 = 2.72$
Corriente requerida para el VDF	103.09 [A]
Voltaje requerido en superficie	1206.33 [V]
kVA requeridos	72.95 kVA

Fuente: NOVOMET Sel Pro, 2015

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

Luego de obtener los cálculos requeridos para la selección de los principales equipos de fondo y superficie del sistema BES, se realiza la selección de acuerdo al catálogo de Novomet, en la tabla 3.23 se detallan los equipos seleccionados para el sistema BES con motor de imán permanente.

**TABLA 3.23**  
**EQUIPOS DE FONDO Y SUPERFICIE SELECCIONADOS**

EQUIPO BES CON MOTOR DE IMÁN PERMANENTE			Longitud en pies
EQUIPO DE FONDO	Subdescarga	DISCHARGE PRESURE SUB 3 1/2" -8 RD EUE	0.89
	Descarga	BOH 2-7/8pulgadas-8RD EUE-319SERIES CR0	0.56
	MLE	MLE ZTS, SUBLINE, 450F AWG#5 5KV 53 FT	52.4
	Cable de potencia	Prysmian, Deviline, 5Kv, 400 F, flat, AWG#4	10907.7
	Bomba Superior	NBV (160-250) H, CMP, AR2, CR2C,7STG, HSG #4	9.8
	Bomba media	NBV (160-250) H, CMP, AR2, CR2C, 91STG, HSG #4	9.8
	Bomba Inferior	NBV (160-250) H, CMP, AR2, CR2C, 91STG, HSG #4	9.8
	Separador de gas	GAS SEPARATOR, N319GS1050 DES2 AR2 CR1	2.58
	Protector	PROTECTOR N319 TMP BPB-SBPB CR0 HT HL	7.56
	Protector	PROTECTOR N319 TMP BPB-SBPB CR0 HT HL	7.56
	<b>MOTOR</b>	MOTOR, N319PM, 6000RPM,54 HP/1010V/27A,	12.7
<b>Sensor de fondo</b>	NDS2,319, DES2, 5800 PSI CR3 MOD HT	2.9	
EQUIPO DE SUPERFICIE	<b>SDT</b>	XFMR, 200kVA 13800V PRI / MULTI TAP SEC	N/A
	<b>VDF</b>	NVDS 130 kVA 480 V 60 Hz, 6 P, SWF NSP	N/A
	<b>SUT</b>	XFMR,200kVA 480V PRI / MULTI TAP SEC	N/A

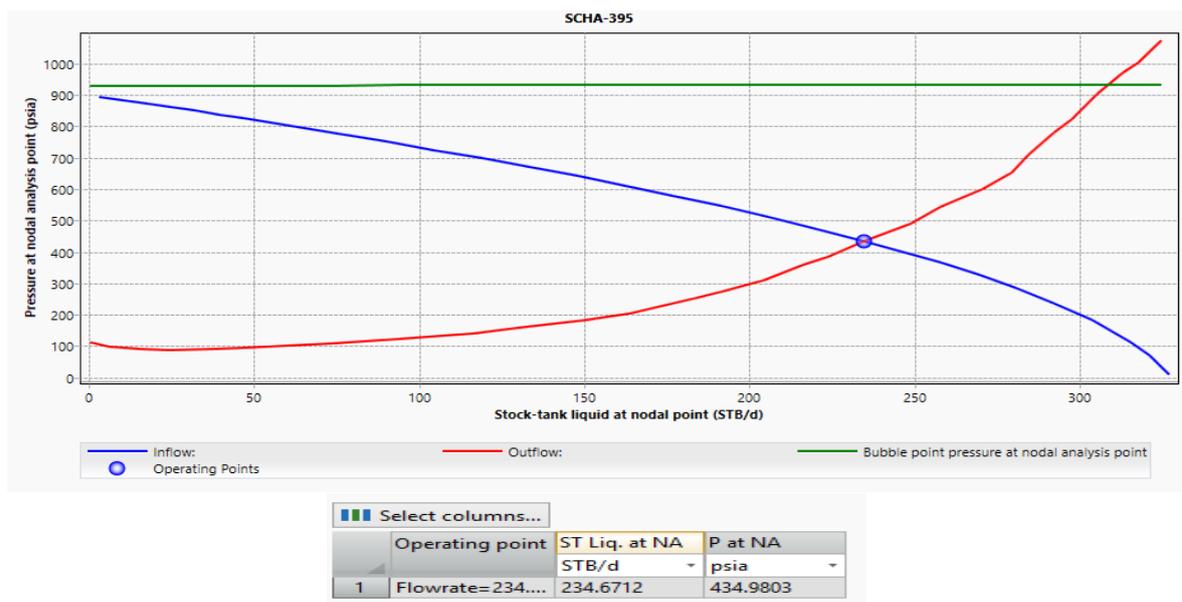
Fuente: PETROAMAZONAS E.P

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

### Análisis nodal y de sensibilidades del equipo propuesto

Con el nuevo diseño propuesto del sistema BES con motor de imán permanente y las condiciones de operación determinadas en la simulación, se realiza el análisis nodal con los datos del reservorio y pozo de las tablas 3.15 y 3.18. En la figura 3.13 se observa el análisis nodal con la bomba propuesta NBV (160-250) H. Y se observa que el punto operativo del pozo con la bomba propuesta es 234.67 BFPD y 434.9 psi.

**FIGURA 3.13 ANÁLISIS NODAL EN EL POZO SACHA 395-UI CON LA BOMBA PROPUESTA**



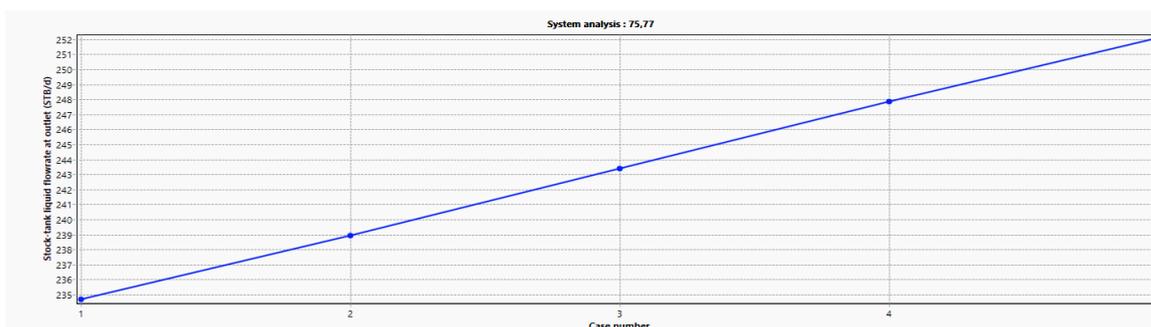
Fuente: PETROAMAZONAS E.P.

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

## ESTUDIO DE FRECUENCIAS CON EL NUEVO EQUIPO BES

Para determinar la frecuencia operativa que tendría el sistema BES con motor de imán permanente propuesto, se realiza un estudio para diferentes escenarios con incrementos en los valores de frecuencia desde 74 Hz, se incrementa 1 Hz en cada escenario como se muestra en la figura 3.14. Cada escenario corresponde a un valor de frecuencia diferente y para cada frecuencia se tiene el caudal de producción estimado, de acuerdo a estos valores se determina hasta que valor de frecuencia se podrá operar dentro del rango operativo de la bomba.

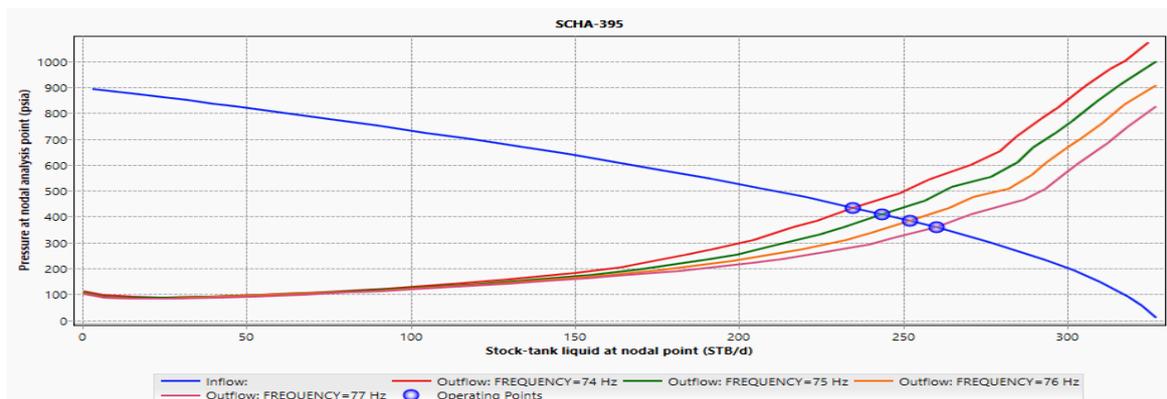
**FIGURA 3.14 ANÁLISIS DE FRECUENCIAS**



Fuente: PETROAMAZONAS EP, 2018  
Modificado por: Diana Arellano y Gina Guajala

En la figura 3.15 se observa el comportamiento de producción del pozo a las diferentes frecuencias propuestas previamente. En este caso se puede incrementar la frecuencia hasta 76 Hz, para que el equipo trabaje dentro del rango operativo recomendado que es 149 BFPD a 257BFPD.

**FIGURA 3.15 ANÁLISIS DE SENSIBILIDADES DEL POZO 395 CON LA BOMBA NBV (160-250) H**



Operating point		ST Liq. at NA	P at NA
		STB/d	psia
1	FREQUENCY= 74 Hz Flowrate...	234.6712	434.9803
2	FREQUENCY= 75 Hz Flowrate...	243.4014	409.7525
3	FREQUENCY= 76 Hz Flowrate...	252.1346	383.2333
4	FREQUENCY= 77 Hz Flowrate...	260.0291	357.9761

Fuente: PETROAMAZONAS EP, 2018  
Modificado por: Diana Arellano y Gina Guajala

### 3.1.3 POZO SACHA-137

El pozo Sacha-137 es un pozo vertical que fue completado el 28 de noviembre de 1994. Actualmente produce de la arena T inferior y en el último trabajo de reacondicionamiento del 27 de junio del 2018 se realizó un fracturamiento hidráulico en la arena U inferior y empieza a producir del intervalo 9416 pies a 9438 pies con la bomba D460N (Petroamazonas, 2018).

#### Comportamiento de afluencia del reservorio

Para calcular el caudal máximo de producción del pozo Sacha-137, se usó los datos de la prueba de producción expuestos en la tabla 3.24.

**TABLA 3.24**  
**DATOS DE PRUEBA DE POZO SACHA-137**

Pozo SACHA 137 UI	Pr	Pb	Fluido	Petróleo	Agua	BSW
	psi	psi	(BFPD)	(BPPD)	(BAPD)	%
	1100	930	435	409	26.0	5.98
PIP	Pwf	°API	Tipo bomba	Etapas	Frecuencia	
psi	psi				Hz	
527	648.5	21.4	D460N	328	55	

Fuente: PETROAMAZONAS EP, octubre 2018

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

Aplicando las ecuaciones descritas del método de la IPR compuesta, se obtuvo los resultados de la tabla 3.25 y con estos valores se traza la curva IPR del pozo expuesta en la figura 3.16.

**TABLA 3.25**  
**DATOS DE CAPACIDAD DE FLUJO DEL POZO SACHA 137**

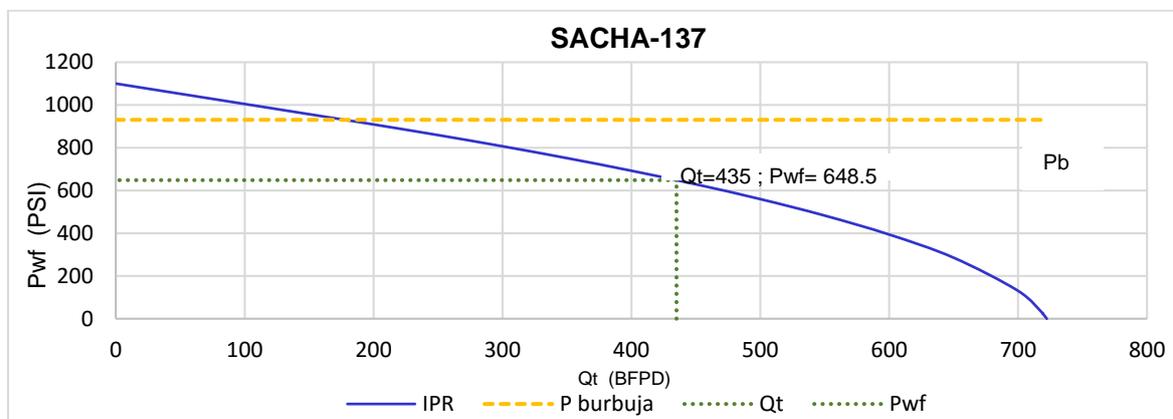
Pozo Sacha	Pr	Pb	IP	Qb	Q omáx	Tan $\beta$	Tan $\alpha$	Qt máx
	psi	psi	BFPD/ PSI	BPPD	BFPD	-	-	BFPD
137 UI	1100	930	1.04	177.63	717.49	7.95	0.126	720.59

Fuente: PETROAMAZONAS EP, octubre 2018

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

La curva IPR del pozo SACHA-137 muestra la capacidad de producción máxima del pozo.

**FIGURA 3.16 CURVA IPR DEL POZO SACHA 137-UI**



Fuente: PETROAMAZONAS E.P.

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

### Descripción del equipo instalado y análisis nodal

En el pozo Sacha-137 se encuentra instalado un equipo BES con motor de inducción, en la tabla 3.26 se describen los equipos de fondo que se encuentran instalados en el pozo actualmente.

**TABLA 3.26**  
**EQUIPO BES DEL POZO SACHA-137 UI**

DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO BES CON MOTOR DE INDUCCIÓN			Longitud (pies)
	Bomba Superior	D460N CR-CT 164 STG 400/400 110 RLOY	17.6
	Bomba	D460N CR-CT 164 STG 400/400 110 RLOY	17.6
	Bomba	AGH: D5-21 CR-CT 400/400 RLOY VTHD,	6.35
	Succión / Separador de gas	INTAKE: VGSA D20-60, 400/400 RLOY .87 INC, M-TRM, ES	3.20
	Protector superior	PROTECTOR: MAXIMUS, BPBSL-UT, 400/400, NTB/HL, .87 HS INC, RLOY	8.9
	Motor	MOTOR: 456, 12, 4125, MAXIMUS, RA-S,-180HP	19.7
	Sensor de fondo	SENSOR PHOENIX SERIE 450, S/N	1.90
	MLE	MLE: 456 120FT, KELB M, 5KV, 6/1, P/I	120
	Cable de potencia	CABLE: REDALEAD, 5KV, 4 SOL, FLAT,	

Fuente: PETROAMAZONAS EP, octubre 2018

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

Los equipos descritos en la tabla 3.26 se encuentran operando a las condiciones de la prueba de producción de la tabla 3.24 y se encuentran en rango. Se realizó el análisis nodal del pozo para determinar el comportamiento actual del pozo y el potencial del yacimiento. En la tabla 3.27 se muestran los datos necesarios para realizar el análisis nodal en el software Pipesim.

**TABLA 3.27**  
**DATOS DEL POZO SACHA-137**

<b>CAMPO</b>				SACHA		
<b>RESERVORIO</b>				U INFERIOR		
<b>POZO</b>				SACHA-137 UI		
API	T fondo	PB	GOR	SGg	Sga	$\mu_w$ (CP)
21.4	221	930	161	0.903	1.03	1 cp
Producción		435 BFPD		P anular	15 psi	
Tipo de pozo		Vertical		IP	1.043 BFPD/psi	
P reservorio		1100 psi		Tubing	3 1/2pulgadas hasta 9 158.8 pies	
P cabeza		135 psi		Casing	7pulgadas a 9968 pies	
% BSW		5.98%		Casing	10 3/4pulgadas a 2678 pies	
Profundidad bomba		9120 pies		Tope de perforados	9416 pies	

Fuente: PETROAMAZONAS EP, octubre 2018

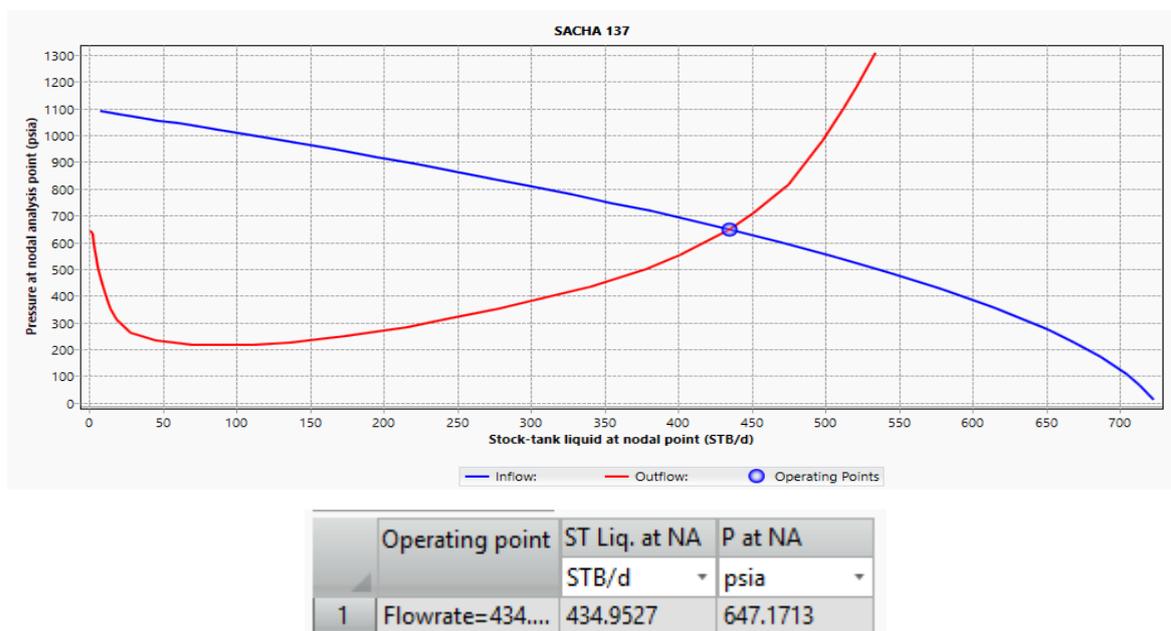
Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

Con los datos de las tablas 3.24 y 3.27 se obtiene la curva de  $P_{wf}$  Vs  $Q$  y se determina el punto óptimo de producción de fluidos. La gráfica del análisis nodal se observa en la figura 3.17.

En el análisis nodal se observa la curva de desempeño de influjo del yacimiento (inflow), que interseca la curva de salida del sistema (outflow). El punto donde se intersecan las curvas es 434.95 BFPD y 647.17 psi, lo que significa que la

modelación del pozo representa la realidad actual de las condiciones operativas del pozo

**FIGURA 3.17 ANÁLISIS NODAL EN EL POZO SACHA 137-UI**



Fuente: PETROAMAZONAS E.P.

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

### Diseño y selección del equipo BES con motor de imán permanente

Del análisis nodal se toma el dato del caudal operativo para el diseño del nuevo equipo BES y con los datos de las tablas 3.24 y 3.27 se calculan los parámetros de diseño en una hoja de excel siguiendo el procedimiento descrito en el capítulo II y se obtienen los resultados expuestos en la tabla 3.28

**TABLA 3.28  
RESULTADOS DE LAS VARIABLES CALCULADAS DEL POZO SACHA-137**

PARÁMETROS DE DISEÑO CALCULADOS			UNIDAD
Presión de reservorio	Pr	1100	psi
Índice de productividad	IP	1.04	BFPD/psi
Porcentaje de Agua	%BSW	5.98	%
Caudal máximo de fluido	Qt máx	720.53	BFPD
Caudal deseado	Qd	435	BFPD
Presión de fondo fluyente	Pwf	647.08	psi
Gravedad específica del petróleo	GE <sub>o</sub>	0.92	-
Gravedad específica de la mezcla	GE	0.93	-
Gradiente de presión del fluido	$\Delta P$	0.403	psi/pies
Presión de succión de la bomba	PIP	527	psi
Profundidad de asentamiento de la bomba	Hb	9120	pies
Relación Gas petróleo	GOR	160	PCS/BF
Factor volumétrico del agua	$\beta_w$	1.043	BLS/BF
Factor volumétrico del petróleo	$\beta_o$	1.110	BLS/BF
Factor volumétrico del gas	$\beta_g$	0.033	PCS/BF

**TABLA 3.28 CONTINUACIÓN**

Tasa de flujo total en la succión	Qtot	711.62	BFPD
Fracción de gas en la succión de la bomba	fg	32.3	%
Fracción de gas que ingresa a la bomba	fg in	6.47	%
Tasa de flujo volumétrico que ingresa a la bomba	Qtot	527.27	BFPD
Altura dinámica total	TDH	8149	pies

Fuente: PETROAMAZONAS EP, octubre 2018

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

Con los datos calculados en la tabla 3.28 se selecciona la bomba electrosumergible en base a las tablas de ingeniería del catálogo de Novomet. Y se calcula el número de etapas requeridas por el sistema, la potencia requerida para la selección del motor y la frecuencia a la que trabajará la bomba. En la tabla 3.29 se observa los parámetros calculado y seleccionados

**TABLA 3.29  
VARIABLES CALCULADAS PARA LA SIMULACIÓN**

<b>BOMBA SELECCIONADA</b>	<b>NFV (310-630) H SCMP</b>
Serie de la Bomba	362
Etapas calculadas	271
por carcasa	260, carcasa #7
Potencia requerida por el motor	62 HP
Frecuencia operativa	77 Hz

Fuente: Novomet, 2018

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

Con los valores obtenidos en la tabla 3.28 y las características del pozo, fluido y reservorio descritas en la tabla 3.27 se simula en el software Novomet Sel pro el nuevo diseño del pozo Sacha-395. En la tabla 3.30 se detallan los parámetros evaluados por el software.

**TABLA 3.30  
PARÁMETROS CALCULADOS POR EL SOFTWARE**

<b>POZO SACHA-137</b>		
<b>PARÁMETROS DE LEVANTAMIENTO</b>		
Profundidad de asentamiento de la bomba	9120	pies
Índice de productividad	1.043	BFPD/ psi
Presión de reservorio	1100	psi
Producción	435.84	BFPD
Corte de agua	5.98	%
Presión de descarga de la bomba	3214	psi
Presión de casing	15	psi
Presión de fondo fluyente	646.01	psi
Nivel dinámico MD	7302.83	pies
<b>DATOS DE LA BOMBA</b>		
Consumo de potencia	37.86	hp
Frecuencia operativa	77	Hz
<b>DATOS DEL MOTOR</b>		
Carga del motor	62.11	%
Eficiencia	91.28	%
Temperatura del devanado	287.7	°F
Corriente eléctrica	12.64	A

TABLA 3.30 CONTINUACIÓN

LINEA DEL CABLE		
Temperatura del MLE aceptada	450	°F
Temperatura máxima del MLE	246.77	°F
Pérdidas de voltaje en la línea del cable	58.34	V

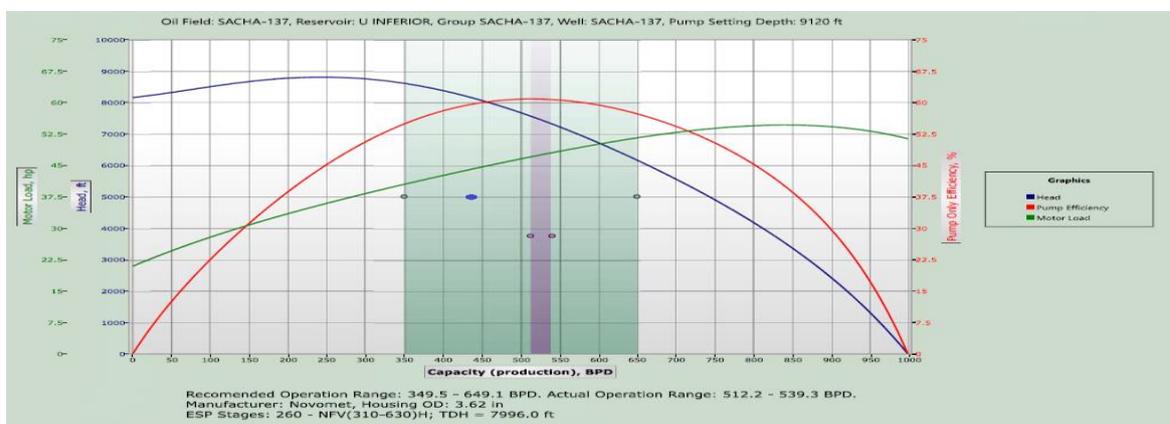
Fuente: NOVOMET Sel Pro, 2015

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

A continuación, en las figuras 3.18 y 3.19 se presentan las gráficas del comportamiento de la bomba de acuerdo a los datos calculados por el software.

En la figura 3.18 se observa que para el caudal de diseño de 435 BFPD la bomba NFV (310-630)H se encuentra dentro del rango de operación.

FIGURA 3.18 COMPORTAMIENTO DE LA BOMBA NFV (310-630) H

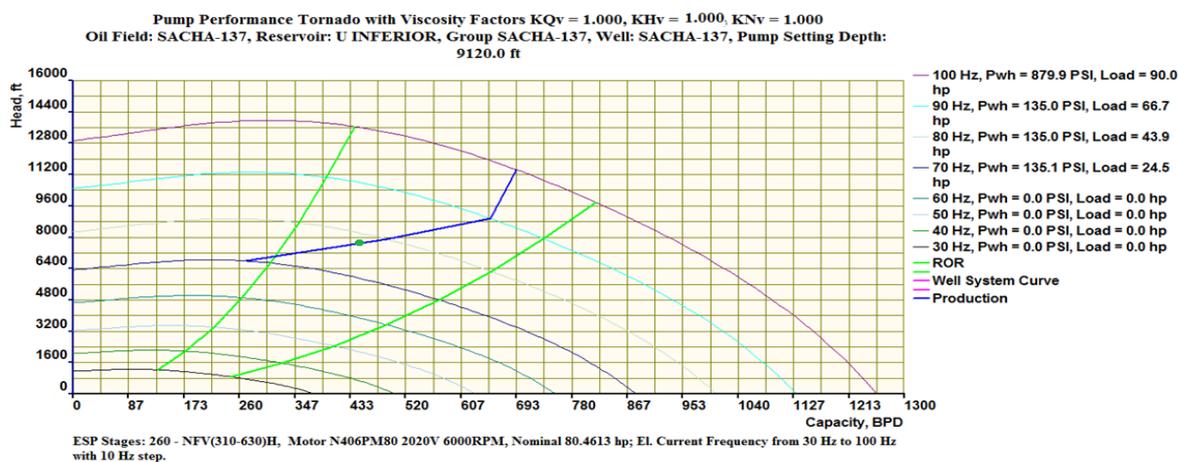


Fuente: Novomet Sel Pro, 2016

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

En la figura 3.19 se presenta el comportamiento de la bomba a distintas frecuencias, a la frecuencia operativa de 77 Hz, la bomba se encuentra dentro del rango operativo y cerca de su mejor punto de eficiencia.

FIGURA 3.19 CURVA DE TORNADO DE LA BOMBA NFV (310-630) H



Fuente: Novomet Sel Pro, 2016

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

Con los resultados de la simulación se define que el pozo Sacha 137 puede operar con la bomba Power Save propuesta NFV(310-630)H a 77 Hz. Para el correcto funcionamiento de los motores de imán permanente, se debe tomar en cuenta las características de amperaje y voltaje del motor para la selección del VDF. Los parámetros necesarios para la selección del equipo de superficie se encuentran en la tabla 3.31.

**TABLA 3.31  
PARÁMETROS PARA LA SELECCIÓN DEL EQUIPO DE SUPERFICIE**

PARÁMETROS	VALOR NOMINAL
Voltaje del motor	2020 V
Voltaje primario V	480 V
Corriente del motor	19.1
CÁLCULO DE PARÁMETROS	
Factor de frecuencia	Factor de frecuencia =152/200= 0.77
Voltaje operativo del motor	Volt operativo motor=0.77 x 2020=1555.4
Pérdidas en el cable, V	Pérdidas en el cable= 133.81 V
S/U Tap voltaje, V	S/U voltaje =133.33+ 1555.4 = 1688.72 [V]
S/U TAP voltaje secundario	2360
Relación de transformación	Relación de transformación=2360/440=5.36
Corriente requerida para el VDF	143.42 [A]
Voltaje requerido en superficie	2153.81 [V]
kVA requeridos	101.49 kVA

Fuente: NOVOMET Sel Pro, 2015

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

Luego de obtener los cálculos requeridos para la selección de los principales equipos de fondo y superficie del sistema BES, se realiza la selección de acuerdo al catálogo de Novomet y las tablas de ingeniería.

En la tabla 3.32 se detallan los equipos para el sistema BES con motor de imán permanente.

**TABLA 3.32  
EQUIPOS DE FONDO Y SUPERFICIE SELECCIONADOS**

EQUIPO BES CON MOTOR DE IMÁN PERMANENTE			Longitud en pies
EQUIPO DE FONDO	Subdescarga	DISCHARGE PRESURE SUB 3 1/2pulgadas	0.82
	Descarga	BOH 3-1/2pulgadas-8RD EUE-362SERIES CR0	0.72
	Bomba Superior	NF (310-630)H, SCMP, AR2, CR2C,130 STG, HSG #7	13.1
	Bomba Inferior	NF (310-630)H, SCMP, AR2, CR2C,130 STG, HSG #7	13.1
	Separador de gas	GAS SEPARATOR, N406 3800, AR2, CR3, S14	2.58
	Protector	PROTECTOR N406 TMP LSBPB-SBPBSL CR2C S13	7.56
	Motor	MOTOR, N406PM, 6000RPM, 80HP/2020V/19,2A	9.9
	Sensor de fondo	NDS2 406 DES2 5800PSI CR2 MOD0 HT	2.06
	MLE	ZTS, SUB- line, 5kV, 450 F, Flat, AWG# 5, 51.34 pies	51.34
	Cable de potencia	Prysmian, Devi- line, 5kV, 400 F, Flat, AWG# 4	9228.66
EQUIPO DE SUPERFICIE	SDT	XFMR, 200kVA 13800V PRI / MULTI TAP SEC	N/A
	VDF	NVDS 200 kVA 480 V 60 Hz, 6 P, SWF NSP	N/A
	SUT	XFMR,200kVA 480V PRI / MULTI TAP SEC	N/A

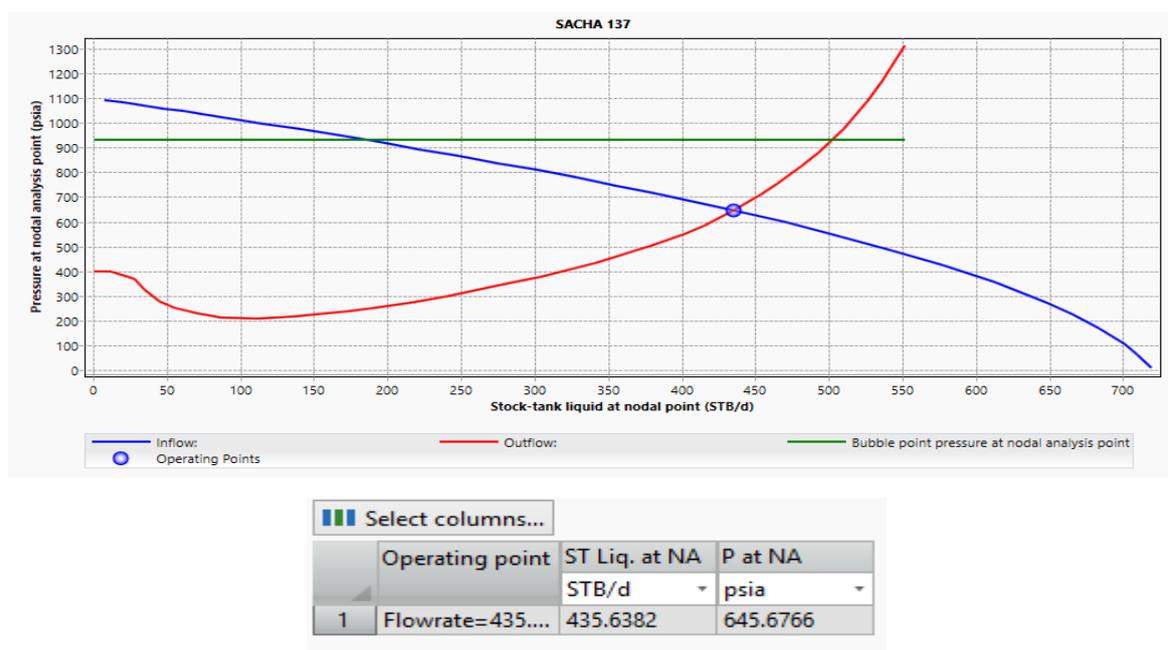
Fuente: PETROAMAZONAS E.P

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

## Análisis nodal y de sensibilidades del equipo propuesto

Con el nuevo diseño propuesto del sistema BES con motor de imán permanente y las condiciones de operación determinadas en la simulación, se realiza el análisis nodal con los datos del reservorio y pozo presentados en las tablas 3.24 y 3.27, actualizando el equipo BES propuesto y las condiciones de operación. En la figura 3.20 se observa el análisis nodal con la bomba propuesta NFV (310-630) H y se determina que el punto operativo es 435.63 BFPD y 645.67 psi

**FIGURA 3.20 ANÁLISIS NODAL EN EL POZO SACHA 137-UI CON LA BOMBA PROPUESTA**



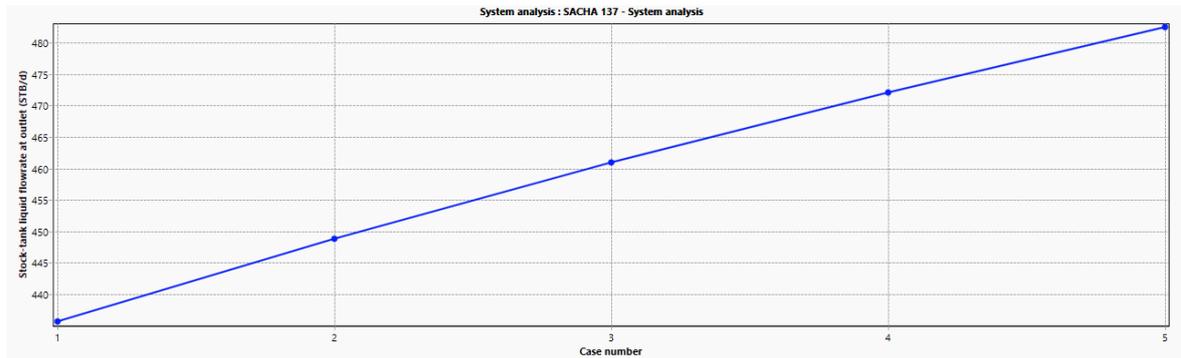
Fuente: PETROAMAZONAS E.P.  
Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

## ESTUDIO DE FRECUENCIAS CON EL NUEVO EQUIPO BES

Para determinar el límite de frecuencia operativa que tendría el sistema BES con motor de imán permanente propuesto, se realiza un análisis para diferentes escenarios con incrementos en los valores de frecuencia de 1 Hz en cada escenario desde 77 HZ, como se muestra en la figura 3.21, para cada frecuencia se tiene el caudal de producción estimado, de acuerdo a estos valores se determina hasta que valor de frecuencia se podrá operar en el rango operativo de la bomba.

De la figura 3.21 se determina que se podrá incrementar la frecuencia hasta 81 Hz, ya que para valores mayores de frecuencia la bomba empieza a trabajar en la zona del upthrust, tomando en cuenta que la capacidad de la bomba dentro del rango operativo es desde 263 BFPD a 490 BFPD

**FIGURA 3.21 ANÁLISIS DE FRECUENCIAS**

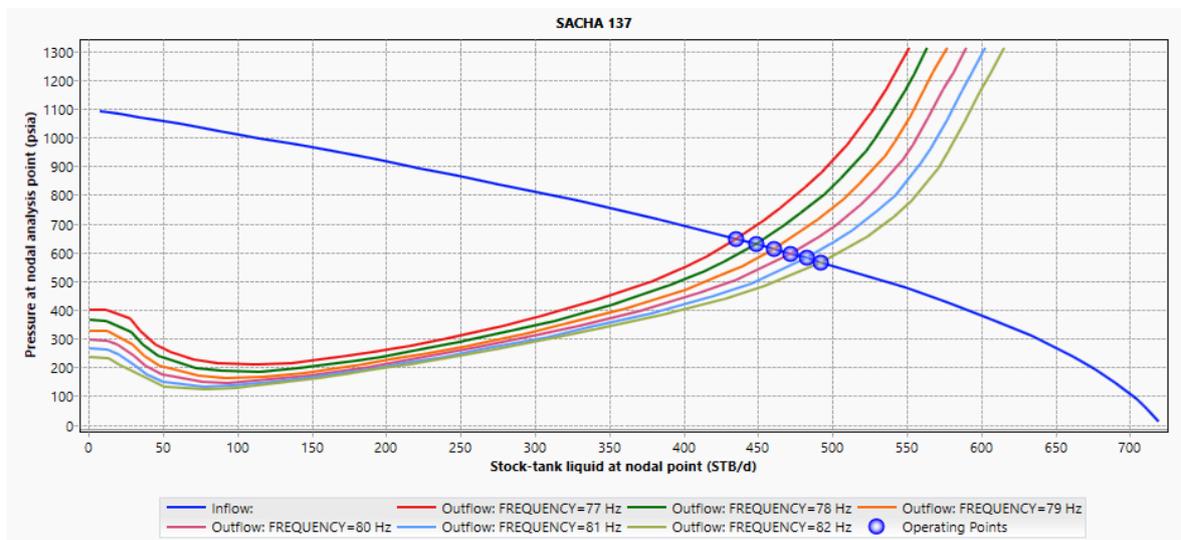


Fuente: PETROAMAZONAS EP, 2018  
 Modificado por: Diana Arellano y Gina Guajala

Se obtiene el análisis de sensibilidades para las frecuencias determinadas. En la figura 3.22 se observa el comportamiento del pozo a las diferentes frecuencias.

Del resultado del análisis de sensibilidades se observa un incremento en el valor de la producción para cada frecuencia, la frecuencia máxima de operación va a ser 81 Hz aumentando la producción a 482.59 BFPD

**FIGURA 3.22 ANÁLISIS DE SENSIBILIDADES DEL POZO 137 CON LA BOMBA NFV (310-630) H**



Operating point	ST Liq. at NA	P at NA
	STB/d	psia
1 FREQUENCY=77 Hz Flowrate...	435.6382	645.6766
2 FREQUENCY=78 Hz Flowrate...	448.7982	627.8508
3 FREQUENCY=79 Hz Flowrate...	460.9221	611.0559
4 FREQUENCY=80 Hz Flowrate...	472.1398	595.176
5 FREQUENCY=81 Hz Flowrate...	482.5973	580.0586
6 FREQUENCY=82 Hz Flowrate...	492.2978	565.7474

Fuente: PETROAMAZONAS EP, 2018  
 Modificado por: Diana Arellano y Gina Guajala

### 3.1.4 POZO SACHA-481

El pozo Sacha-481, es un pozo direccional que fue perforado en agosto del 2014. En el último trabajo de reacondicionamiento de febrero del 2018, se realizó una fractura en la arena Ti y se instaló el equipo BES REDA RC 1000 con 259 etapas (Petroamazonas, 2018).

#### Comportamiento de afluencia del reservorio

Para calcular la capacidad de flujo del pozo Sacha-481 se usó el método de la IPR compuesta, y los datos de una prueba de producción presentados en la tabla 3.33.

**TABLA 3.33**  
**DATOS DE UNA PRUEBA DEL POZO SACHA-481**

Pozo SACHA 481 TI	Pr	Pb	Fluido (BFPD)	Petróleo (BPPD)	Agua (BAPD)	BSW %
		1350	1194.7	364	328	36
	PIP	Pwf	°API	Tipo bomba	Etapas	Frecuencia
	psi	psi				Hz
	340	476.75	29.9	RC 1000	259	58

Fuente: PETROAMAZONAS EP, octubre 2018

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

Aplicando las ecuaciones descritas del método de la IPR compuesta, se obtuvo los datos de capacidad de flujo del pozo presentes en la tabla 3.34, con estos valores se realiza la curva IPR del pozo expuesta en la figura 3.23.

**TABLA 3.34**  
**DATOS DE CAPACIDAD DE FLUJO DEL POZO SACHA 481**

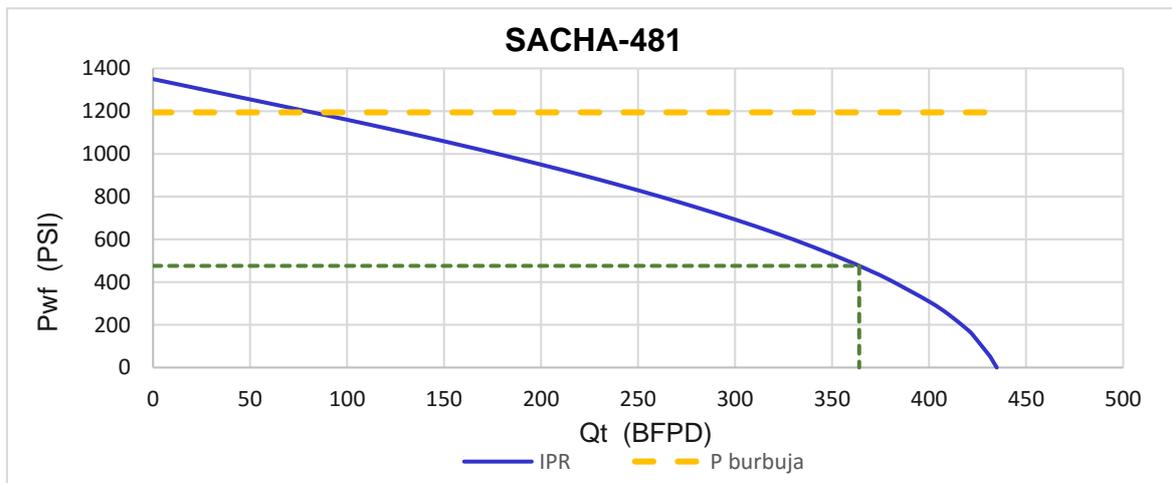
Pozo Sacha 481 TI	Pr	Pb	IP	Qb	Q omáx	Tan $\beta$	Tan $\alpha$	Qt máx
		psi	psi	BFPD/PSI	BPPD	BFPD	-	-
	1350	1194.7	0.52	81.80	431.40	15.21	0.066	434.85

Fuente: PETROAMAZONAS EP, octubre 2018

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

La curva IPR del pozo SACHA-481 muestra la capacidad de producción máxima del pozo.

**FIGURA 3.23 CURVA IPR DEL POZO SACHA 481-UI**



Fuente: PETROAMAZONAS E.P.  
Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

### Descripción del equipo instalado y análisis nodal

El sistema que se encuentra instalado en el pozo Sacha-481 es un equipo BES convencional con motor de inducción, en la tabla 3.35 se describen los equipos de fondo y superficie que se encuentran instalados en el pozo.

**TABLA 3.35**  
**EQUIPO BES DEL POZO SACHA-481 TI**

DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO BES CON MOTOR DE INDUCCIÓN			Longitud (pies)
<b>EQUIPO DE FONDO</b>	Bomba superior	RC10000 CR-CT 59 STG 400/400 RLOY, ARZ	13.37
	Bomba media	RC10000 CR-CT 100 STG 400/400 RLOY, ARZ	21.81
	Bomba inferior	RC10000 CR-CT 100 STG 400/400 RLOY, ARZ	21.81
	Manejador de Gas	AGH D5-21 RLOY ES	6.35
	Protector superior	MAXIMUS, LSBPB-UT, 400, RLOY, AFL, M-TRM,	8.03
	Protector inferior	MAXIMUS, LSBPB-UT, 400, RLOY, AFL, M-TRM,	8.03
	Motor	Motor: 456, 4083, MAXIMUS, RA-S, RLOY, AS, AFLAS, 120 HP	15.47
	Sensor de fondo	BASE GAUGE: XT150 TYPE 1	1.87
	MLE	KELB,5KV-6/1-MAXLOK-400	100
	Cable Sup	4/1 ELB G5F WT 3/8pulgadas	4033.04
Cable Inf.	4/1 ELB G5F WT 3/8	4840	
<b>EQUIPO DE SUPERFICIE</b>	SDT	RVR, 300 kVA, 13 800,480V/480 V	N/A
	VDF	S7+C439KCCS, 390 kVA, 480V, 12 pulsos	N/A
	SUT	RVR, 200 kVA, 480 V, 1100 /3810 V	N/A

Fuente: PETROAMAZONAS EP, octubre 2018  
Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

A continuación, se realiza el análisis nodal del pozo para determinar el comportamiento actual del pozo y el potencial del yacimiento. En la tabla 3.36 se muestran los datos necesarios para realizar el análisis nodal en el software Pipesim.

**TABLA 3.36**  
**DATOS DEL POZO SACHA-481**

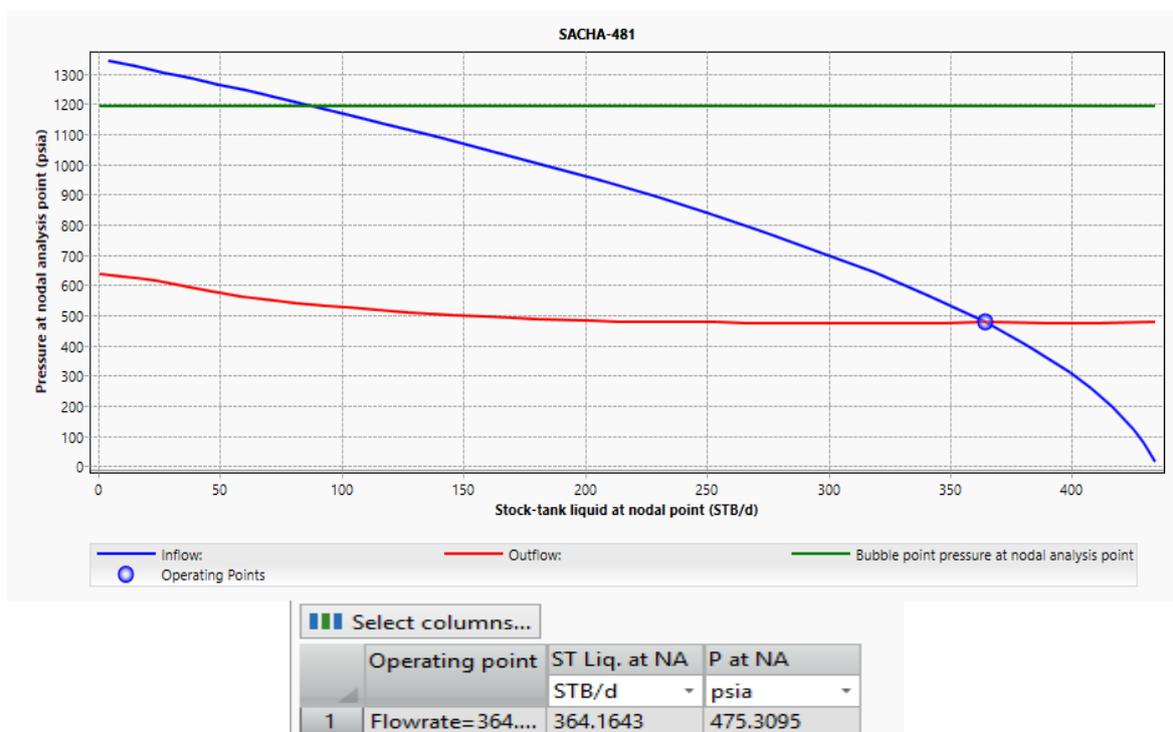
CAMPO				SACHA		
RESERVORIO				T INFERIOR		
POZO				SACHA-481 D		
API	T fondo	PB	GOR	SGg	SGa	$\mu_w$ (CP)
29.9	222	1194.7	342	1.38	1.03	1 cp
Producción		364 BFPD		P anular	15 psi	
Tipo de pozo		Direccional		IP	0.52 BFPD/psi	
P reservorio		1350 psi		Tubing	3 ½" hasta 10 068.51 pies	
P cabeza		30 psi		Casing	7" a 10 686.4 pies	
% BSW		5.98%		Casing	9 5/8" a 8466.S pies	
Profundidad bomba MD		10 027.31 pies		Tope de perforados MD	10 380 pies	

Fuente: PETROAMAZONAS EP, octubre 2018

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

Con los datos de las tablas 3.33 y 3.36 se obtiene la curva de Pwf Vs Q y se determina el punto óptimo de producción. La gráfica resultante se observa en la figura 3.24, en la que se muestra la curva de desempeño de influjo del yacimiento (inflow), que interseca a la curva de salida (outflow). El punto donde se intersecan las curvas es en  $Q_t=364.16$  BFPD y  $P_{wf}=475.30$  psi.

**FIGURA 3.24 ANÁLISIS NODAL EN EL POZO SACHA 481-UI**



Fuente: PETROAMAZONAS E.P.

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

### Diseño y selección del equipo BES con motor de imán permanente

Del análisis nodal realizado se toma el dato del caudal operativo para convertirlo en el caudal de diseño del nuevo equipo BES y se sigue el procedimiento descrito

hasta obtener la altura dinámica total, Con los datos de las tablas 3.33 y 3.36 se calculan los parámetros de diseño en una hoja de excel y se obtienen los resultados de la tabla 3.37

**TABLA 3.37**  
**RESULTADOS DE LAS VARIABLES CALCULADAS DEL POZO SACHA-481**

PARÁMETROS DE DISEÑO CALCULADOS			UNIDAD
Índice de productividad	IP	0.52	BFPD/psi
Porcentaje de Agua	%BSW	9.89	%
Caudal máximo de fluido	Qt máx	434.85	BFPD
Caudal deseado	Qd	364	BFPD
Presión de fondo fluyente	Pwf	475.9	psi
Gravedad específica del petróleo	GE <sub>o</sub>	0.87	-
Gravedad específica de la mezcla	GE	0.89	-
Gradiente de presión del fluido	$\Delta P$	0.386	psi/pies
Presión de succión de la bomba	PIP	339.2	psi
Profundidad de asentamiento de la bomba	Hb	10028	pies
Relación Gas petróleo	GOR	342	PCS/BF
Factor volumétrico del agua	$\beta_w$	1.04	BLS/BF
Factor volumétrico del petróleo	$\beta_o$	1.12	BLS/BF
Factor volumétrico del gas	$\beta_g$	0.04	PCS/BF
Tasa de flujo total en la succión	Qtot	1136.6	BFPD
Fracción de gas en la succión de la bomba	fg	64.17	%
Fracción de gas que ingresa a la bomba	fg in	9,62	%
Tasa de flujo volumétrico que ingresa a la bomba	Qtot	516.58	BFPD
Altura dinámica total	TDH	8594.78	pies

Fuente: PETROAMAZONAS EP, octubre 2018

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

Con los datos calculados en la tabla 3.37 se selecciona la bomba electrosumergible en base a las tablas de ingeniería del catálogo de Novomet (Anexo No 3).

Se calcula el número de etapas requeridas por el sistema, la potencia requerida para la selección del motor y la frecuencia a la que trabajará la bomba. En la tabla 3.38 se observa los valores calculados

**TABLA 3.38**  
**VARIABLES CALCULADAS PARA LA SIMULACIÓN**

BOMBA SELECCIONADA	NFV (310-630) H SCMP
Serie de la Bomba	362
Etapas calculadas	330
Etapas por carcasa	332
Potencia requerida por el motor	62 HP
Frecuencia operativa	66

Fuente: Novomet, 2018

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

Con los valores obtenidos en la tabla 3.37 y las características del pozo, fluido y reservorio descritas en la tabla 3.36 se simula en el software Novomet Sel pro el nuevo diseño del pozo Sacha-481. El software proporciona un reporte de la simulación, en el que se evidencia distintos parámetros de operación de los equipos

de fondo seleccionados y las posibles condiciones de producción del pozo. En la tabla 3.39 se detallan los parámetros evaluados por el software.

**TABLA 3.39**  
**PARÁMETROS CALCULADOS POR EL SOFTWARE**

<b>POZO SACHA-481</b>		
<b>PARÁMETROS DE LEVANTAMIENTO</b>		
Profundidad de asentamiento de la bomba	10027	pies
Índice de productividad	0.52	BFPD/ psi
Presión de reservorio	1350	psi
Producción	367.1	BFPD
Corte de agua	9.9	%
Presión de descarga de la bomba	3025	psi
Presión de cabeza	30	psi
Presión de fondo fluyente	475.3	psi
Nivel dinámico MD	7592	pies
<b>DATOS DE LA BOMBA</b>		
Consumo de potencia	30	hp
Frecuencia operativa	64	Hz
<b>DATOS DEL MOTOR</b>		
Carga del motor	66.817	%
Eficiencia	91.53	%
Temperatura del devanado	261.73	°F
Corriente eléctrica	13.286	A
<b>LINEA DEL CABLE</b>		
Temperatura del MLE aceptada	450	°F
Longitud de MLE resistente al calor	82.021	pies
Temperatura máxima del MLE	238.034	°F
Pérdidas de potencia en el cable	2.353	HP
Pérdidas de voltaje en la línea del cable	66.86	V

Fuente: NOVOMET Sel Pro, 2015

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

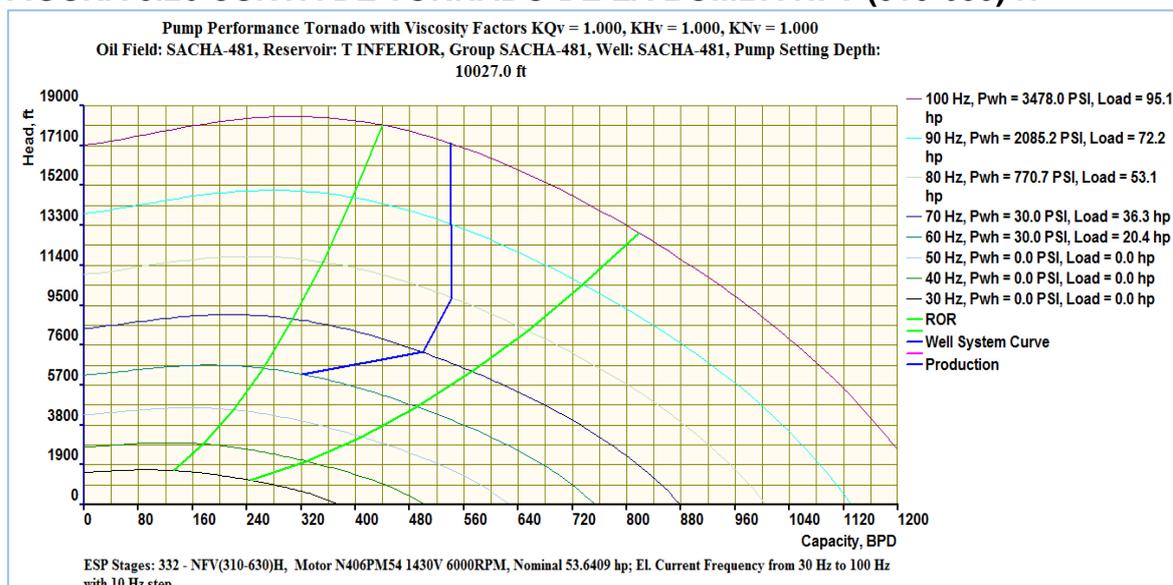
A continuación, se presentan las figuras 3.25 y 3.26 del comportamiento de la bomba de acuerdo a los datos calculados por el software,

De la figura 3.25 se observa que para el caudal de diseño de 264 BFPD la bomba NFV (310-630) H se encuentra dentro del rango de operación, cerca del mejor punto de eficiencia

**FIGURA 3.25 COMPORTAMIENTO DE LA BOMBA NFV (310-630)H**

Fuente: Novomet Sel Pro, 2016  
Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

En la figura 3.26 se observa el comportamiento de la bomba a diferentes frecuencias, en este caso para el caudal deseado que es 264 BFPD la bomba se encuentra dentro del rango operativo a 66 Hz.

**FIGURA 3.26 CURVA DE TORNADO DE LA BOMBA NFV (310-630) H**

Fuente: Novomet Sel Pro, 2016  
Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

Para el correcto funcionamiento de los motores de imán permanente, se debe tomar en cuenta las características de amperaje y voltaje del motor para la selección del VDF. Los parámetros necesarios para la selección del equipo de superficie se encuentran en la tabla 3.40.

**TABLA 3.40**  
**PARÁMETROS PARA LA SELECCIÓN DEL EQUIPO DE SUPERFICIE**

PARÁMETROS	VALOR NOMINAL
Voltaje del motor	1720
Voltaje primario V	480
Corriente del motor	19.3
CÁLCULO DE PARÁMETROS	
Factor de frecuencia	Factor de frecuencia = $132/200 = 0.66$
Voltaje operativo del motor	Volt operativo motor = $0.66 \times 1720 = 1135.2$
Pérdidas en el cable, V	Pérdidas en el cable = 151.82 V
S/U Tap voltaje, V	S/U voltaje = $151.82 + 1135.2 = 1287.027$ [V]
S/U TAP voltaje secundario	1680
Relación de transformación	Relación de transformación = $1680/440 = 3.8$
Corriente requerida para el VDF	103.16 [A]
Voltaje requerido en superficie	1871.82 [V]
kVA requeridos	73.08 kVA

Fuente: NOVOMET Sel Pro, 2015

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

Luego de obtener los cálculos requeridos para la selección de los principales equipos de fondo y superficie del sistema BES, de acuerdo al catálogo de Novomet se realiza la selección, en la tabla 3.41 se detallan los equipos para el sistema BES con motor de imán permanente.

**TABLA 3.41**  
**EQUIPO DE FONDO Y SUPERFICIE SELECCIONADOS**

EQUIPO BES CON MOTOR DE IMÁN PERMANENTE			Longitud en pies
<b>EQUIPO DE FONDO</b>	Subdescarga	DISCHARGE PRESURE SUB 3 1/2pulgadas -8 RD EUE BO	0.82
	Descarga	DISCHARGE PRESURE SUB 3 1/2pulgadas -8 RD EUE BO	0.72
	Bomba Superior	NF(310-630)H, SCMP, AR2, CR2C, S14, 166 STG, HSG #8	16.4
	Bomba Inferior	NF(310-630)H, SCMP, AR2, CR2C, S14, 166 STG, HSG #8	16.4
	Separador de gas	GAS SEPARATOR, N406 3800, AR2, CR3, S14	2.58
	Protector	PROTECTOR N406 TMP LSBPB-SBPBSL CR2C S13 HT	7.56
	Protector	PROTECTOR N406 TMP LSBPB-SBPBSL CR2C S13 HT	7.56
	MOTOR	MOTOR, N406PM, 6000RPM, 67HP/1720V/19,3A, CR2	8.9
Sensor de fondo	NDS2 406 DES2 5800PSI CR2 MOD0 HT	2.06	
MLE	ZTS, SUB- line, 5kV, 450 F, Flat, AWG# 5, 51.34 pies	65,5	
Cable de potencia	Prysmian, Devi- line, 5kV, 400 F, Flat, AWG# 4	10121.81	
<b>EQUIPO DE SUPERFICIE</b>	SDT	XFMR, 200kVA 13800V PRI / MULTI TAP SEC	N/A
	VDF	NVDS 130 kVA 480 V 60 Hz, 6 P, SWF NSP	N/A
	SUT	XFMR, 200kVA 480V PRI / MULTI TAP SEC	N/A

Fuente: PETROAMAZONAS E.P

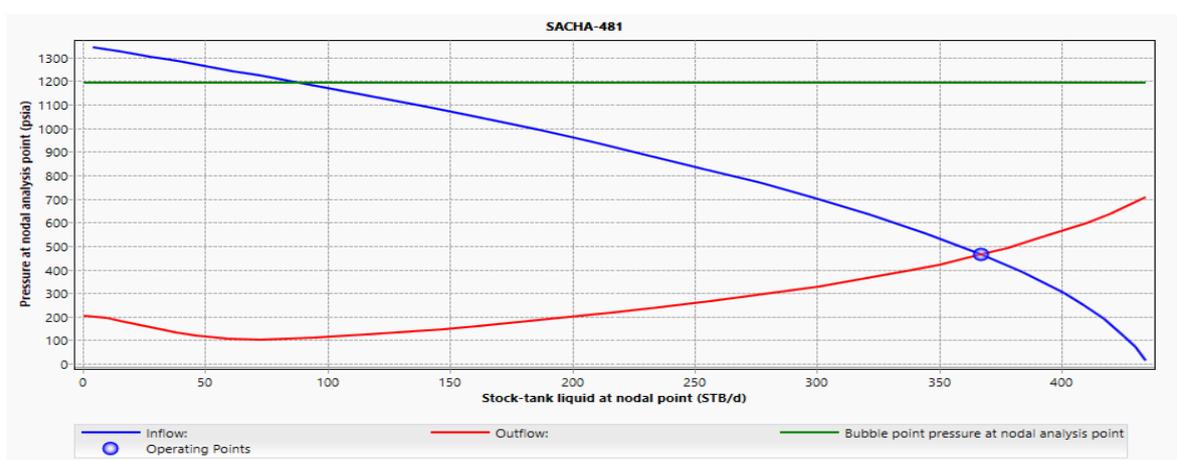
Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

## Análisis nodal y de sensibilidades del equipo propuesto

Con el diseño propuesto del sistema BES con motor de imán permanente y las condiciones de operación determinadas en la simulación, se realiza el análisis nodal con los datos del reservorio y pozo presentados en las tablas 3.33 y 3.36, actualizando el equipo BES propuesto y las condiciones de operación.

En la figura 3.27 se observa el análisis nodal con la bomba propuesta NFV (310-630)H. En el que se observa que el punto operativo del pozo con la bomba propuesta es 367.23 BFPD y 462.58 psi. Por lo tanto, el diseño de la bomba de imán permanente estaría en las mismas condiciones de producción que el equipo instalado actualmente

**FIGURA 3.27 ANÁLISIS NODAL EN EL POZO SACHA 481-UI CON LA BOMBA PROPUESTA**



Bubble point:

View operating envelope:

Select columns...

Operating point	ST Liq. at NA	P at NA
	STB/d	psia
1	Flowrate=367....	367.2268
		462.5837

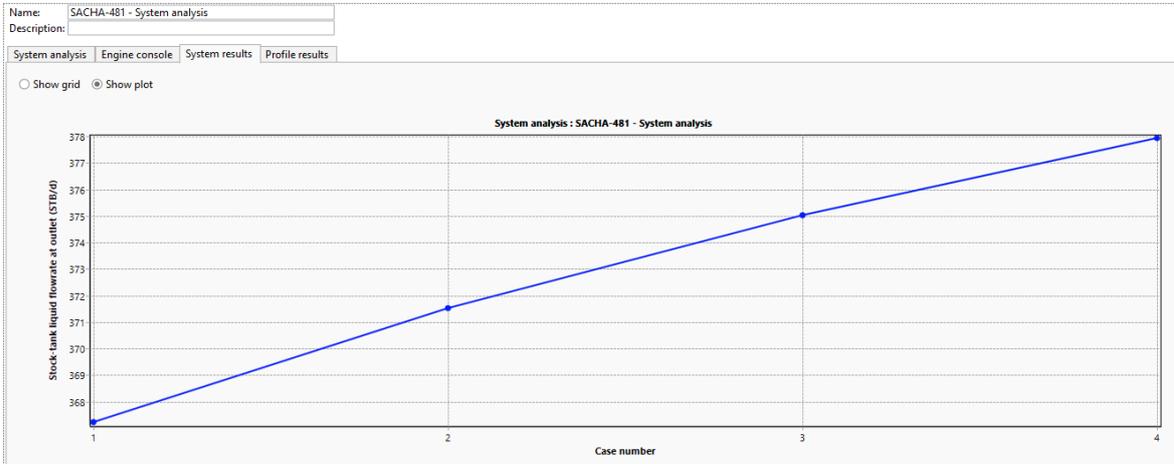
Fuente: PETROAMAZONAS E.P.

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

## ESTUDIO DE FRECUENCIAS CON EL NUEVO EQUIPO BES

Se realizó un estudio de sensibilidades para observar el comportamiento del equipo si se incrementa la frecuencia. De acuerdo a la figura 3.28 se observan diferentes escenarios a diferentes frecuencias desde 66 Hz hasta 70 Hz.

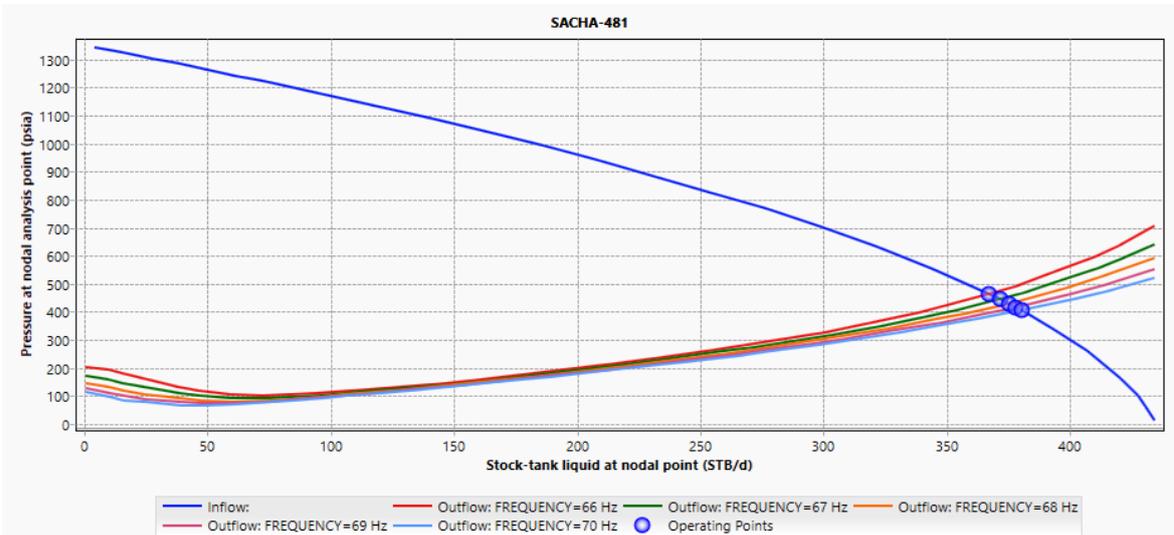
**FIGURA 3.28 ANÁLISIS DE FRECUENCIAS**



Fuente: PETROAMAZONAS EP, 2018  
 Modificado por: Diana Arellano y Gina Guajala

En base a este análisis de incremento de frecuencia se obtiene el análisis de sensibilidades para las frecuencias determinadas. En la figura 3.29 se observa el comportamiento del pozo a las diferentes frecuencias.

**FIGURA 3.29 ANÁLISIS DE SENSIBILIDADES DEL POZO 481 CON LA BOMBA NFV (310-630) H**



Operating point	ST Liq. at NA	P at NA	
		STB/d	psia
1	FREQUENCY=66 Hz Flowrate...	367.2268	462.5837
2	FREQUENCY=67 Hz Flowrate...	371.507	444.3248
3	FREQUENCY=68 Hz Flowrate...	375.0433	428.7958
4	FREQUENCY=69 Hz Flowrate...	377.935	415.7741
5	FREQUENCY=70 Hz Flowrate...	380.3435	404.6897

Fuente: PETROAMAZONAS EP, 2018  
 Modificado por: Diana Arellano y Gina Guajala

### **3.2 COMPARACIÓN ENTRE EL SISTEMA BES CON MOTOR DE INDUCCIÓN Y EL SISTEMA BES CON MOTOR DE IMÁN PERMANENTE.**

Se realizó un análisis comparativo de las características que determinan el consumo energético en el sistema BES con motor de imán permanente y el sistema BES con motor de inducción para los cuatro pozos en los que se realizó el diseño implementando el uso de motores de imán permanente.

#### **3.2.1 ESTUDIO COMPARATIVO PARA EL POZO SACHA-247**

En la tabla 3.42 se observa, una descripción del motor y la bomba seleccionada, con parámetros de operación del motor como: el voltaje, frecuencia operativa, amperaje, revoluciones por minuto, además se presenta la eficiencia operativa del motor y la carga.

De acuerdo a las curvas de comportamiento que se encuentran contenidas en la tabla para cada uno de los diseños, la bomba se encuentra dentro del rango operativo y en la curva de tornado para el caudal requerido, se encuentra operando cerca del mejor punto de eficiencia. Según los datos de operación del motor y el cálculo de los kVA requeridos el motor de imán permanente presenta menor consumo de energía.

TABLA 3.42

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL POZO SACHA-247

EQUIPO DE FONDO	EQUIPO DE FONDO (MOTOR Y BOMBA)	
	SISTEMAS CON MOTOR DE INDUCCIÓN	SISTEMAS CON MOTOR DE IMÁN PERMANENTE
BOMBA ELECTROSUMERGIBLE	RC1000 CR-CT 400/400 RLOY	NHV (790-1000) H, CMP, AR2, CR2C, S14
NÚMERO DE ETAPAS	259	216
MOTOR ELÉCTRICO	MOTOR: 456, MAXIMUS, RA-S, RLOY,180HP	MOTOR, N406PM, 6000RPM, 110HP/2600V/20.5A
LONGITUD DEL EQUIPO DE FONDO	101.42 pies	54.85 pies
<b>CONDICIONES OPERATIVAS DEL MOTOR</b>		
FRECUENCIA OPERATIVA	61.5 Hz	79 Hz
VOLTAJE DEL MOTOR	2562 V	2054 V
AMPERAJE DEL MOTOR	27.1 A	15.7 A
RPM DEL MOTOR	3434 RPM	4740 RPM
EFICIENCIA OPERATIVA	83%	91.70%
CARGA OPERATIVA	63%	74%
FACTOR DE POTENCIA	0.85	0.95
VOLTAJE EN SUPERFICIE	2710 V	2757.67 V
KVA	92.54 KVA	55.23 KVA
KW/h	78.66 KW/h	52.47 KW/h
KW/día	1887.84 KW/día	1259.28 KW/día
<b>PRODUCCIÓN</b>		
PRODUCCIÓN TOTAL	808 BFPD	814 BFPD
KW/ BFPD	2.34 KW/ BFPD	1.547 KW/BFPD
COMPORTAMIENTO DE LA BOMBA ELECTROSUMERGIBLE		
	COMPORTAMIENTO A DIFERENTES FRECUENCIAS	

Fuente: PETROAMAZONAS E.P y Novomet Sel Pro

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

### 3.2.2 ESTUDIO COMPARATIVO PARA EL POZO-395

En la tabla 3.43 se muestra el estudio comparativo de las condiciones de operación del motor de inducción y el motor de imán permanente para el sistema BES del pozo Sacha 395. En la tabla 3.43 se observa que el motor de imán permanente trabajaría a mayor frecuencia reduciendo el número de etapas requeridas por la bomba y por ende la longitud del equipo. Además, que los kVA estimados para la operación del equipo serían mayores en el motor de inducción y por ende consumirán más kWh por barril.

Para el caudal esperado de 233 BFPD, los dos equipos están operando dentro del rango, con el equipo propuesto con motores de imán permanente trabajaría a una velocidad mayor en RPM, consumiendo menor amperaje y voltaje, el equipo se encuentra dentro del rango operativo y cerca del mejor punto de eficiencia

**TABLA 3.43**

### ANÁLISIS COMPARATIVO DEL POZO SACHA-395

EQUIPO DE FONDO (MOTOR Y BOMBA)		
EQUIPO DE FONDO	SISTEMA BES CON MOTOR DE INDUCCIÓN	SISTEMA BES CON MOTOR DE IMÁN PERMANENTE
BOMBA ELECTROSUMERGIBLE	PUMP D460N 164 STG 400/400 RLOY ARZ	NBV (160-250) H SCMP
NÚMERO DE ETAPAS	328	228
MOTOR ELÉCTRICO	MAXIMUS 456 - 120HP/ 1508V / 52 A	N319 PM84 , 1280V, 6000RPM SGL
LONGITUD DEL EQUIPO	82.44 pies	60.45 pies
CONDICIONES OPERATIVAS DEL MOTOR		
FRECUENCIA OPERATIVA	52 Hz	78 Hz
VOLTAJE DEL MOTOR	1307 V	998.4 V
AMPERAJE DEL MOTOR	26 A	14.65 A
RPM DEL MOTOR	3240.85 RPM	4680
EFICIENCIA OPERATIVA	82.51%	88.37 %
CARGA OPERATIVA	50.00%	41.70%
FACTOR DE POTENCIA	0.86	0.95
VOLTAJE EN SUPERFICIE	1344.2 V	1208.663 V
KVA OPERANDO	53.54 KVA	36.46 KVA
KW/h	45.51 KW/h	35.002 KW/h
KW /día	1092.24 KW/día	875.04 KW/día
PRODUCCIÓN		
PRODUCCIÓN TOTAL	233 BFPD	238.34
KW/ BFPD	4.68 KW/BFPD	3.61
COMPORTAMIENTO DE LA BOMBA ELECTROSUMERGIBLE		
COMPORTAMIENTO DE LA BOMBA A DIFERENTES FRECUENCIAS		

Fuente: PETROAMAZONAS E.P y Novomet Sel Pro  
Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

### 3.2.3 ESTUDIO COMPARATIVO PARA EL POZO SACHA-137

En la tabla 3.44 se muestran las características de operación del motor de imán permanente y el motor de inducción para el sistema BES del pozo SACHA-137.

La bomba electrosomergible para cada caso utiliza un número de etapas diferentes debido a que el sistema con motor de imán permanente trabaja a una frecuencia elevada, incrementando los pies por etapa que puede levantar la bomba. Por lo tanto, la longitud del equipo de fondo es mucho mayor para el sistema con motor de inducción

De acuerdo a las características operativas del motor, se observa que el diseño propuesto con motor de imán permanente consume menos corriente para su funcionamiento, por lo que sus kVA de operación también son menores.

**TABLA 3.44**

### ANÁLISIS COMPARATIVO DEL POZO SACHA-137

EQUIPO DE FONDO (MOTOR Y BOMBA)		
EQUIPO DE FONDO	SISTEMA BES CON MOTOR DE INDUCCIÓN	SISTEMA BES CON MOTOR DE IMÁN PERMANENTE
BOMBA ELECTROSOMERGIBLE	D460N CR-CT 164 STG 400/400 110 RLOY BTHD	NFV (310-630) H SCMP
NÚMERO DE ETAPAS	328	260
MOTOR ELÉCTRICO	MAXIMUS 456 - 180HP / 2520V / 46A	MOTOR, N406PM, 6000RPM, 80HP/2020V/19,2A,
LONGITUD DEL EQUIPO	85.49 pies	49.84 pies
CONDICIONES OPERATIVAS DEL MOTOR		
FRECUENCIA OPERATIVA	50 Hz	77 Hz
VOLTAJE DEL MOTOR	2100 V	1555.4 V
AMPERAJE DEL MOTOR	28 A	12.64 A
RPM DEL MOTOR	2814.7 RPM	4620 RPM
EFICIENCIA OPERATIVA	83.80%	91.28%
CARGA OPERATIVA	61.00%	62.11%
VOLTAJE EN SUPERFICIE	2269 V	2153.81 V
KVA REQUERIDOS	92.65 KVA	53.7 KVA
KW/h	78.75 KW/h	51.55 KW/h
KW /día	1890 KW/día	1237,2 KW/ día
PRODUCCIÓN		
PRODUCCIÓN TOTAL	435 BFPD	435.84 BFPD
KW/ BFPD	4.34 KW/BFPD	2.84 BFPD
COMPORTAMIENTO DE LA BOMBA ELECTROSOMERGIBLE		

Fuente: PETROAMAZONAS E.P y Novomet Sel Pro  
 Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

### 3.2.4 ESTUDIO COMPARATIVO PARA EL POZO SACHA-481

En la tabla 3.45 se presenta una comparación de las condiciones operativas para un sistema BES, con un motor de inducción y con un motor de imán permanente. Actualmente el pozo se encuentra operando con un motor de inducción y está produciendo un caudal de 364 BFPD a las condiciones actuales. Según la tabla 3.45 se puede ver que el motor de inducción consume más corriente y energía que el motor de imán permanente, y que los kVA estimados para el funcionamiento son menores, lo que implica un menor kW por barril producido. Además, para el caudal requerido las dos bombas estarían dentro del rango de operación, para el diseño propuesto la curva de tornado y del comportamiento de la bomba se encuentra cerca del mejor punto de eficiencia.

**TABLA 3.45**  
**ANÁLISIS COMPARATIVO DEL POZO SACHA-481**

ANÁLISIS COMPARATIVO SACHA-481		
EQUIPO DE FONDO (MOTOR Y BOMBA)		
EQUIPO DE FONDO	SISTEMA BES CON MOTOR DE INDUCCIÓN	SISTEMA BES CON MOTOR DE IMÁN PERMANENTE
BOMBA ELECTROSUMERGIBLE	RC1000 CR-CT 59 STG 400/400 RLOY, ARZ	NFV (310-630) H SCMP
NÚMERO DE ETAPAS	259	332
MOTOR ELÉCTRICO	MAXIMUS 456 - 120HP/ 1508V / 52 A	MOTOR, N406PM, 6000RPM, 67HP/1720V/19,3A
LONGITUD DEL EQUIPO		63
CONDICIONES OPERATIVAS DEL MOTOR		
FRECUENCIA OPERATIVA	58	66
VOLTAJE DEL MOTOR	1458	1135.2
AMPERAJE DEL MOTOR	43	13.28
RPM DEL MOTOR	3770	3960
EFICIENCIA OPERATIVA	84.25	91.53
CARGA OPERATIVA	83.00%	66.81%
FACTOR DE POTENCIA	0.86	0.958
VOLTAJE EN SUPERFICIE	1513	1333.16
KVA REQUERIDOS	98.76	42.92
KW/h	84	41
KW /DIA	2014.8	988.8
PRODUCCIÓN		
PRODUCCIÓN TOTAL	364	367.06
KW/ BARRIL	5.535164835	2.69383752
COMPORTAMIENTO DE LA BOMBA ELECTROSUMERGIBLE	<p>Actual Pump Performance REDA 400 RC1000 259 Stages 3417.2 RPM 59.20 Hz</p>	<p>Oil Field SACHA-481, Reservoir: T INTERIOR, Group SACHA-481, Well SACHA-481, Pump Setting Depth: 10027 ft</p>
GRÁFICA DE TORNADO, COMPORTAMIENTO A DIFERENTES FRECUENCIAS	<p>SIB RC1000 291 Stages</p>	<p>Pump Performance Tornado with Velocity Factors K<sub>20</sub> = 1.000, K<sub>30</sub> = 1.000, K<sub>40</sub> = 1.000 Oil Field SACHA-481, Reservoir: T INTERIOR, Group SACHA-481, Well SACHA-481, Pump Setting Depth: 10027 ft</p>

Fuente: PETROAMAZONAS E.P y Novomet Sel Pro  
Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

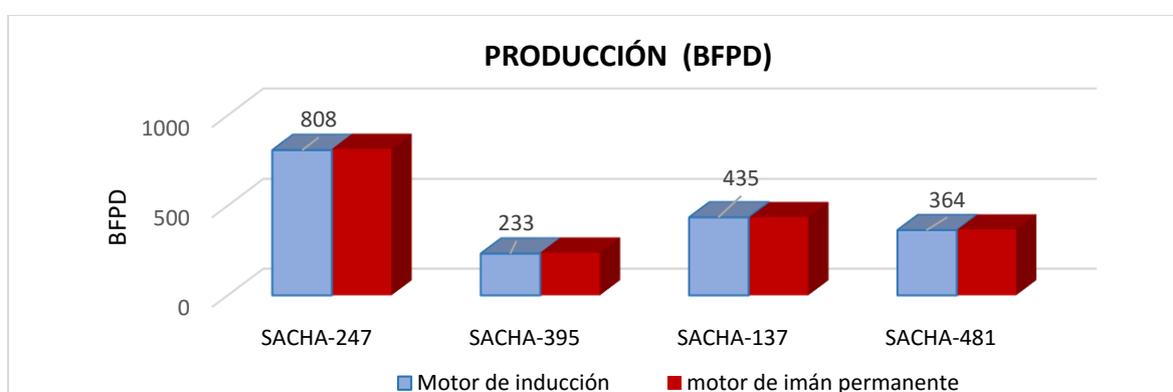
### 3.2.5 ANÁLISIS DEL CONSUMO ENERGÉTICO

Se evaluaron los factores de consumo eléctrico kW, kVA tomando en cuenta la producción de cada uno de los pozos para realizar el análisis energético del sistema BES con motor de imán permanente y el sistema BES con motor de inducción.

A continuación, se observan las gráficas comparativas del consumo energético para los 4 pozos en los que se realizó el diseño con motores de imán permanente.

En la figura 3.30 se observa la gráfica de producción de los 4 pozos con el sistema BES instalado y con el sistema BES con motor de imán permanente. Se observa que para los 4 pozos el caudal de producción es similar al caudal que se va a obtener con el diseño propuesto de bombas Power Save y motor de imán permanente.

**FIGURA 3.30 PRODUCCIÓN DE LOS POZOS SELECCIONADOS PARA EL DISEÑO**

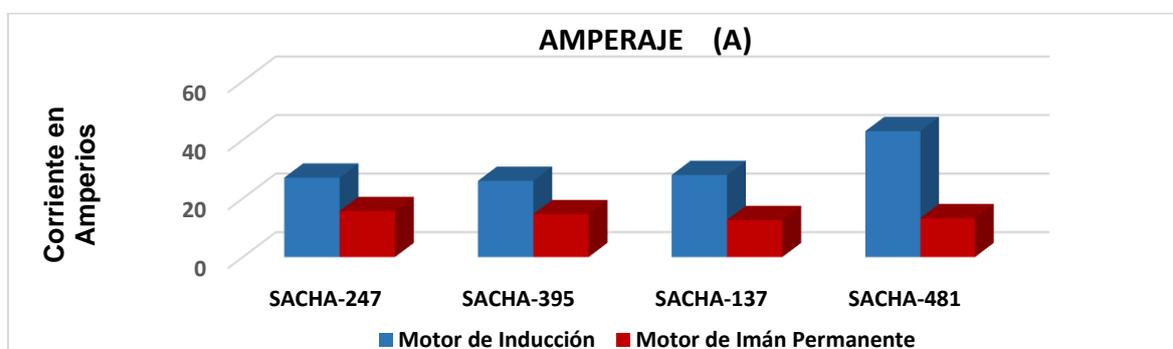


Fuente: PETROAMAZONAS EP

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

A continuación, se presentan las figuras 3.31, 3.32, 3.33 y 3.34 que representan la corriente consumida por los motores de imán permanente y el consumo de kVA. Como se observa en la figura 3.31 para los pozos con el motor de imán permanente, la corriente consumida es baja en comparación con los motores de inducción.

**FIGURA 3.31 CORRIENTE CONSUMIDA POR EL MOTOR**

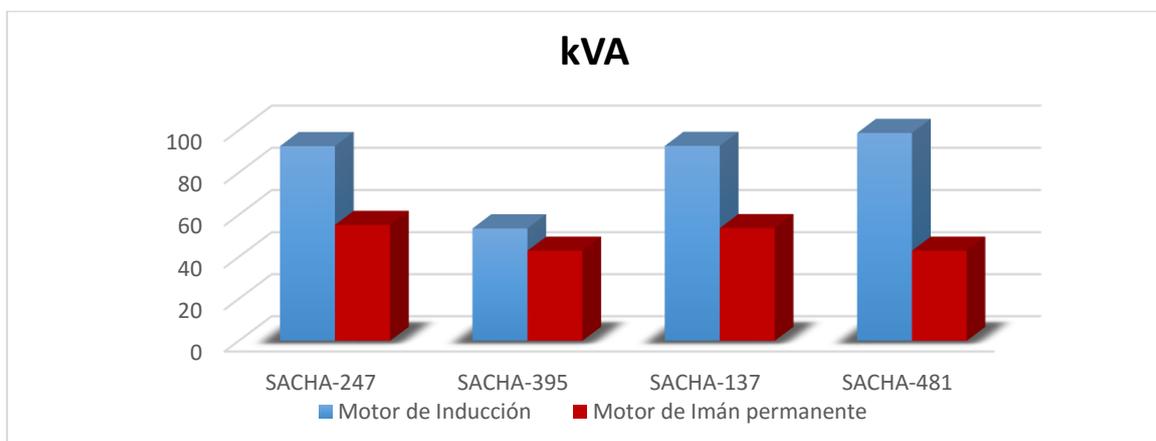


Fuente: PETROAMAZONAS EP

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

En la figura 3.32 se observa la potencia requerida por el sistema usando las dos tecnologías de motor de inducción y motor de imán permanente y se observa que el Sistema BES con motor de imán permanente requiere menos kVA para su desempeño.

**FIGURA 3.32 kVA DE LA OPERACIÓN**

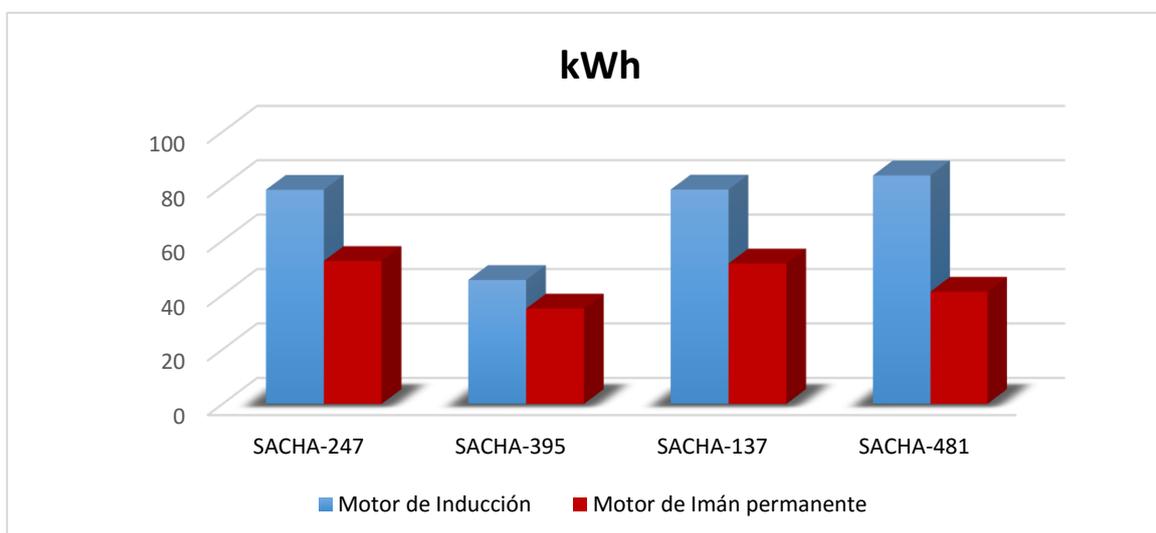


Fuente: PETROAMAZONAS EP

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

Cuando se estima los kVA a los que operará el equipo BES, se puede calcular los kWh consumidos como se indica en la siguiente figura 3.33 y una vez obtenido los kWh con el dato de producción de BFPD, se puede estimar los kW/Barril.

**FIGURA 3.33 CONSUMO DE ENERGÍA kWh**

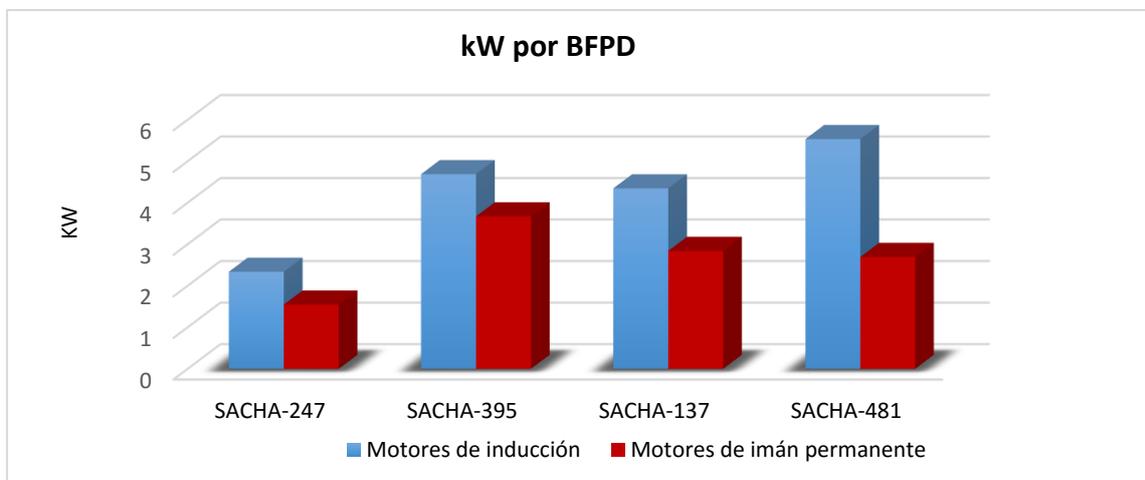


Fuente: PETROAMAZONAS EP

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

En la figura 3.34 se observa el consumo en KW por barril de fluido

**FIGURA 3.34 POTENCIA kW por BFPD**



Fuente: PETROAMAZONAS EP

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

### 3.3 POZOS CON SISTEMA BES CON MOTOR DE IMÁN PERMANENTE

En los pozos seleccionados con el sistema BES con motor de imán permanente se realizó el análisis nodal, para evaluar las condiciones actuales de producción, luego se simuló en el software Novomet Sel Pro, a condiciones actuales el comportamiento de los equipos de fondo y finalmente se realizó un análisis de sensibilidades variando la frecuencia de operación para observar el comportamiento de producción de cada uno de los pozos.

#### 3.3.1 POZO SACHA-239

El pozo Sacha-239 es un pozo direccional perforado el 25 de octubre del 2012. Se encuentra produciendo de la arena Hollín Superior en el intervalo de 10516 pies a 11 566 pies. En el último trabajo de reacondicionamiento del 13 de junio del 2018 se realizó un pulling al equipo BES NF (1300-2000) H. (Petroamazonas, 2016).

#### Comportamiento de afluencia del reservorio

De los datos de la tabla 3.46 se calcula el caudal máximo de producción del pozo Sacha-239 mediante el método de la IPR compuesta

**TABLA 3.46  
DATOS DE UNA PRUEBA DEL POZO SACHA-239**

Pozo Sacha	Fluido	Petróleo	BSW	PIP	Fr	Pwf	Salin	Bomba	Etapas
	BFPD	BPPD	%	psi	Hz	psi	ppm	REDA	#
239 HS	2172	348	84	2164	70	2257.9	2000	NH(1600-2300)H	200

Fuente: PETROAMAZONAS EP, octubre 2018

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

Aplicando las ecuaciones descritas del método de la IPR compuesta, se obtuvo los resultados de la tabla 3.47 y con estos valores se traza la figura 3.35 que representa la curva IPR del pozo.

**TABLA 3.47**

**DATOS DE CAPACIDAD DE FLUJO DEL POZO SACHA 239 -HS**

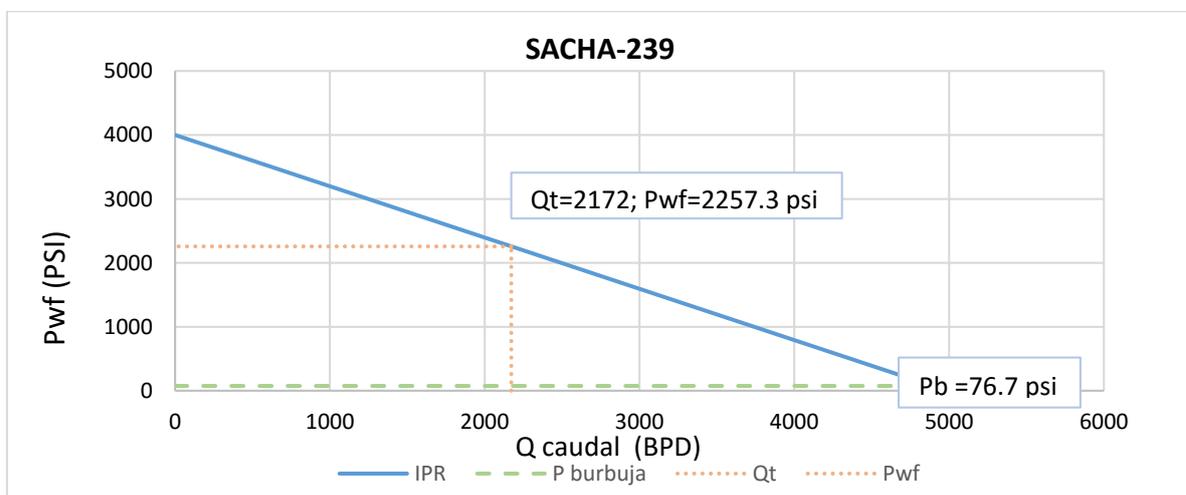
Pozo Sacha	Pr psi	Pb psi	IP BFPD/ PSI	Qb BPPD	Q omáx BFPD	Tan $\beta$	Tan $\alpha$	Qt máx BFPD
239 HS	4000	76.7	1.25	4891.4	4944.6	1.26	0.79	4967.2

Fuente: PETROAMAZONAS EP, octubre 2018

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

La curva IPR del pozo SACHA-239 muestra la capacidad de producción máxima del pozo.

**FIGURA 3.35 CURVA IPR DEL POZO SACHA 239-HS**



Fuente: PETROAMAZONAS E.P.

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

**Descripción del equipo instalado y análisis nodal**

El pozo Sacha-239 se encuentra completado con un equipo BES con motor de imán permanente, en la tabla 3.48 se describen los principales componentes del sistema.

**TABLA 3.48**

**DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO BES SACHA-239**

DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO BES CON MOTOR DE IMÁN PERMANENTE			Longitud (pies)
Equipo de fondo	Bomba Superior	NH (1600-2300) H, CMP, AR2, CR2C, 50STG, HSG#5	9.41
	Bomba Media 1	NH (1600-2300) H, CMP, AR2, CR2C, 50STG, HSG#5	9.41
	Bomba media 2	NH (1600-2300) H, CMP, AR2, CR2C, 50STG, HSG#5	9.41
	Bomba Inferior	PUMP, NH (1600-2300) H, CMP, AR2, CR2C, 50STG, HSG#5	9.41
	Separador de gas	GAS SEPARATOR, N406 3800, AR2, CR3, S14	2.91

**TABLA 3.48 CONTINUACIÓN**

<b>Equipo de fondo</b>	Motor	MOTOR, N512PM, 6000RPM, 620HP/4070V/74,6A, CR2	22.83
	Sensor de fondo	NDS2, 406, DES 2 5800PSI, CR2, MOD0 HT	2.01
	MLE	MLE TYPE3 450F AWG#5 4KV SS	70
	Cable superior	CABLE 1AWG SOL 1WT 3/8 (BH)	2310
	Cable Medio	CABLE 2AWG SOL 1WT 3/8 (BH)	3640
	Cable Inferior	CABLE 2AWG SOL 1WT 3/8 (BH)	4280
<b>EQUIPO DE SUPERFICE</b>	SDT	XFMR 600 kVA 480V REDUCTOR	N/A
	VDF	'NVSD 490 kVA 480V 60HZ 6P NIF-B NSWF-B NSP-B	N/A
	SUT	XFMR, 520kVA 480V PRI/MULTI TAP SEC	N/A
	Caja Choke	NCU CHOKE UNIT	N/A

Fuente: PETROAMAZONAS EP, octubre 2018

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

Con la descripción de los equipos y las condiciones de la prueba de producción, se realizó una simulación en el software Novomet Sel Pro para obtener las gráficas del comportamiento actual de los equipos de fondo. En la tabla 3.49 se muestran los datos necesarios para realizar el análisis nodal en el software Pipesim.

**TABLA 3.49  
DATOS DEL POZO SACHA-239**

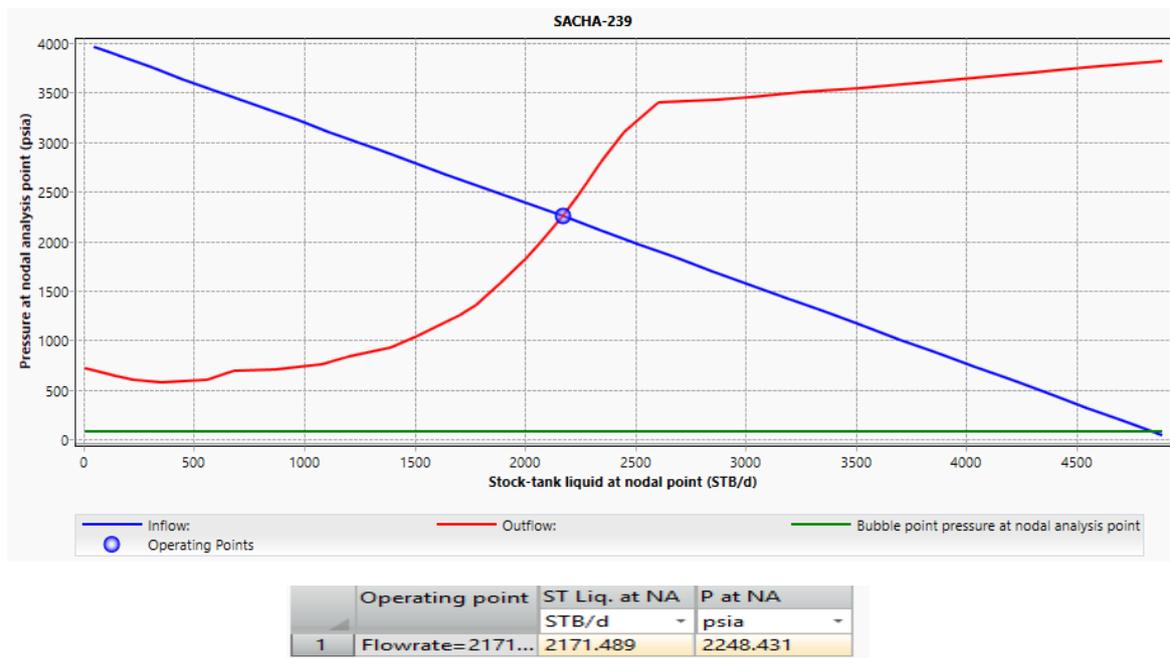
<b>CAMPO</b>				<b>SACHA</b>		
<b>RESERVORIO</b>				Hollín Superior		
<b>POZO</b>				SACHA-239 HS		
API	T fondo	PB	GOR	SGg	Sga	$\mu w$ (CP)
25	216 °F	76.7 psi	14.4	1.38	0.94	1 cp
Producción		2172 BFPD		P anular	20 psi	
Tipo de pozo		Direccional		IP	1.25 BFPD/psi	
P reservorio		4000 psi		Tubing	3 ½" hasta 10348.9 pies	
P cabeza		40 psi		Casing	9 5/8 "a 8373 pies	
% BSW		88		Liner	7" desde 8251.6 a 11 768 10 736.1	
Profundidad bomba		10 308.23 pies		Tope de perforados	11 516 pies	

Fuente: PETROAMAZONAS EP, octubre 2018

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

Con los datos de la tabla 3.49 y 3.46 se obtiene la curva de  $P_{wf}$  Vs  $Q$  y se determina el punto óptimo de producción de fluidos. En la figura 3.36 se observa la curva de desempeño de in flujo del yacimiento (inflow), que interseca a la curva de salida del sistema (outflow). El punto donde se intersecan las curvas es 2171. 48 BFPD y 2248. 43 psi.

**FIGURA 3.36 ANÁLISIS NODAL EN EL POZO SACHA 239-HS**



Fuente: PETROAMAZONAS E.P.

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

### Simulación de las condiciones actuales de operación

A continuación, se observa la tabla 3.50 con las variables calculadas por el programa.

**TABLA 3.50  
PARÁMETROS CALCULADOS POR EL SOFTWARE**

<b>POZO SACHA-239</b>		
<b>PARÁMETROS DE LEVANTAMIENTO</b>		
Profundidad de asentamiento de la bomba	10300	pies
Índice de productividad	1.2	BFPD/ psi
Producción	2173.89	BFPD
Corte de agua	88	%
Presión de descarga de la bomba	3850.8	psi
Presión de fondo fluyente	2246.46	psi
Nivel dinámico MD	4196.7	pies
<b>DATOS DE LA BOMBA</b>		
Consumo de potencia	144	hp
Frecuencia operativa	74	Hz
<b>DATOS DEL MOTOR</b>		
Carga del motor	32.18%	%
Eficiencia	91.83	%
Temperatura del devanado	236,3	°F
Corriente eléctrica	25.33	A

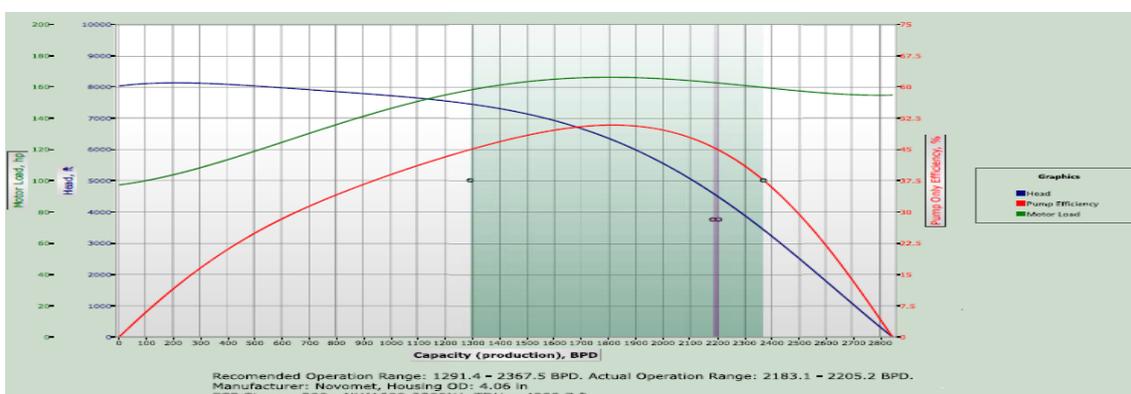
**TABLA 3.50 CONTINUACIÓN**

LINEA DEL CABLE		
Temperatura del MLE aceptada	450	°F
Temperatura máxima del MLE	242.317	°F
Pérdidas de voltaje en la línea del cable	148.33	V

Fuente: NOVOMET Sel Pro, 2015  
 Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

Con los datos obtenidos de la simulación se presentan las gráficas de rendimiento de las bombas en las figuras 3.37 y 3.38. En la figura 3.37 se observa que para el caudal que está produciendo de 2172 BFPD la bomba se encuentra en el rango operativo, pero cerca de la región del upthrust.

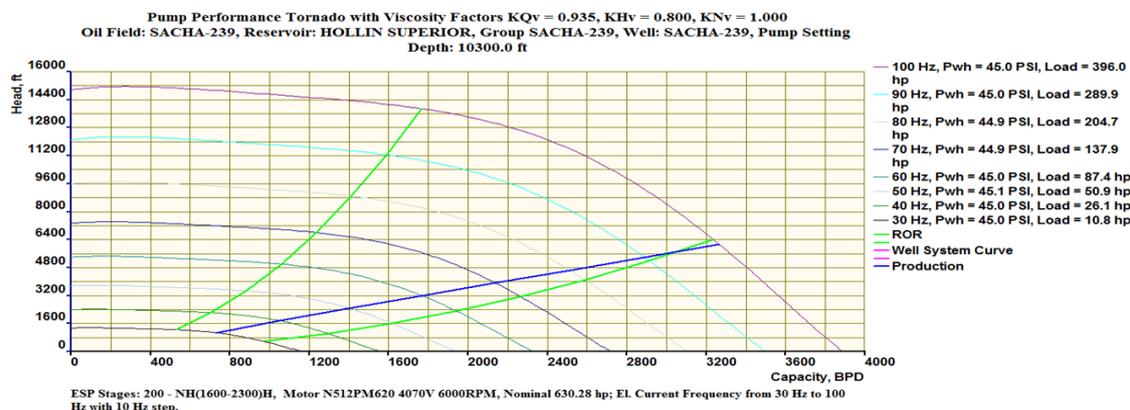
**FIGURA 3.37 CURVA DE RENDIMIENTO DE LA BOMBA NH (1600-2300)**



Fuente: PETROAMAZONAS E.P.  
 Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

A continuación, se observa la figura 3.38 correspondiente a la curva de tornado, en el que se observa el comportamiento de la bomba a diferentes frecuencias, en el Anexo No 6 observa la gráfica de tornado de la bomba NH (1600-2300)H, en la que se determina que la bomba actualmente está trabajando alejada del punto de mejor eficiencia y cerca de la región del upstruth.

**FIGURA 3.38 CURVA DE TORNADO DE LA BOMBA NH (1600-2300)**



Fuente: PETROAMAZONAS E.P.  
 Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

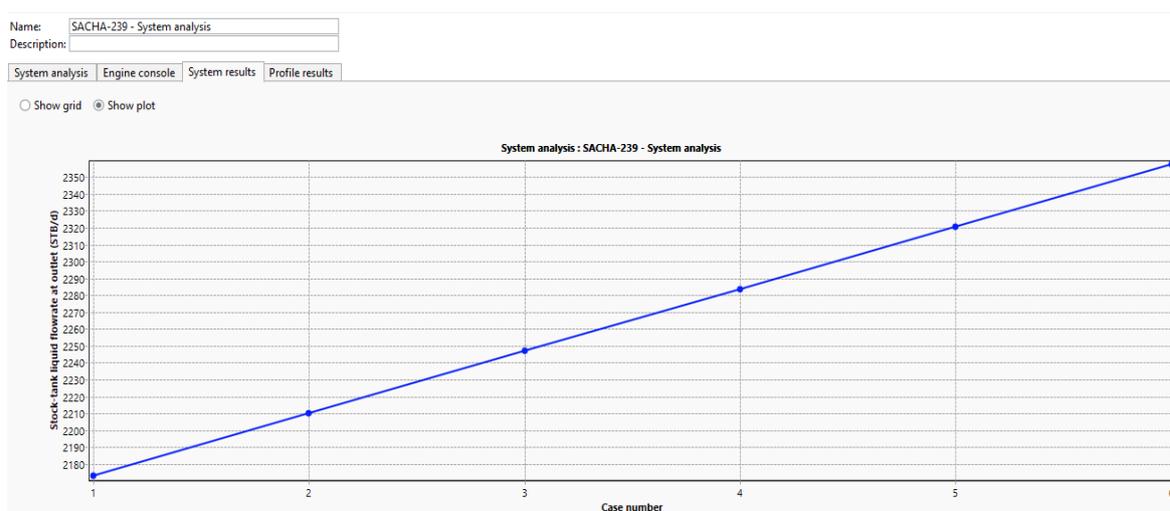
A continuación, se realiza el análisis de frecuencia tomando en cuenta el historial de producción del pozo para analizar cómo pueden variar los parámetros del sistema de levantamiento BES.

### ESTUDIO DE SENSIBILIDADES CON EL NUEVO EQUIPO BES

Para las condiciones de operación actual de los equipos se realiza un estudio de sensibilidades para observar el comportamiento del equipo si se incrementa la frecuencia. De acuerdo a la figura 3.39 se observan varios escenarios con diferentes valores de frecuencias entre 70 a 75 Hz, debido a las especificaciones de la bomba NH (1600-2300) H que permiten operar dentro del rango operativo hasta esa frecuencia.

De la figura 3.39 se determina que se puede incrementar la frecuencia hasta el escenario número 5 que corresponde a 75 Hz, ya que para valores mayores de frecuencia la bomba empieza a trabajar en la zona del upthrust, tomando en cuenta que la capacidad de la bomba en el rango operativo es desde 1132 BFPD hasta 2400 BFPD.

**FIGURA 3.39 ANÁLISIS DE FRECUENCIAS**

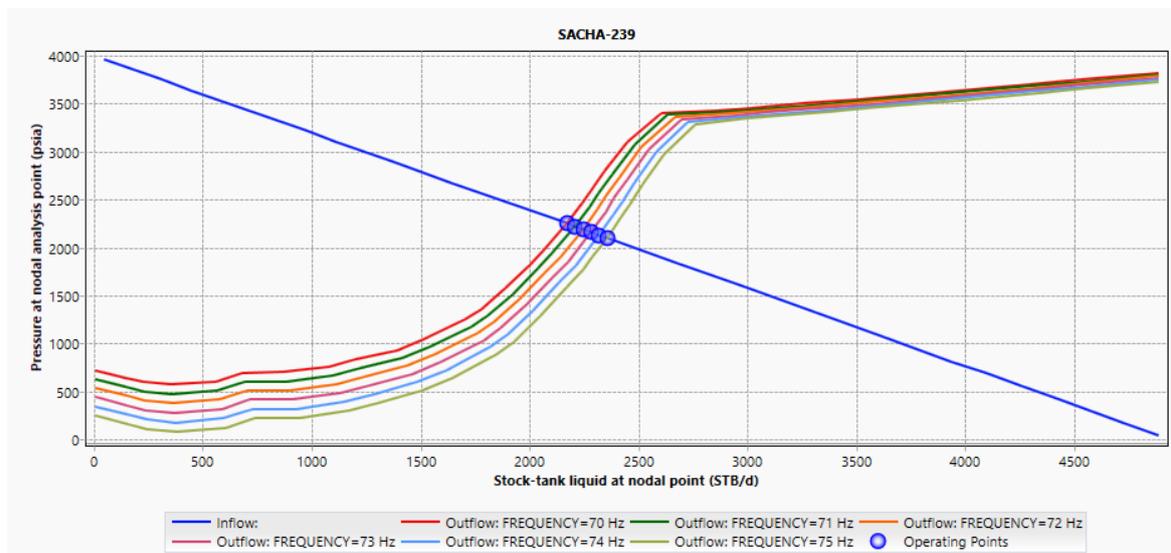


Fuente: PETROAMAZONAS EP, 2018

Modificado por: Diana Arellano y Gina Guajala

En base a este análisis de incremento de frecuencia se obtiene el análisis de sensibilidades para las frecuencias determinadas. En la figura 3.40 se observa el comportamiento del pozo a las diferentes frecuencias. Y se observa un incremento en el valor de la producción para cada frecuencia, la frecuencia máxima de operación va a ser 75 Hz aumentando la producción a 2762.86 BFPD

**FIGURA 3.40 ANÁLISIS DE SENSIBILIDADES DEL POZO 239 CON LA BOMBA NHV (1600-2300) H**



Operating point		ST Liq. at NA	P at NA
		STB/d	psia
1	FREQUENCY= 70 Hz Flowr...	2171.489	2248.431
2	FREQUENCY= 71 Hz Flowr...	2208.629	2218.359
3	FREQUENCY= 72 Hz Flowr...	2245.588	2188.428
4	FREQUENCY= 73 Hz Flowr...	2282.531	2158.508
5	FREQUENCY= 74 Hz Flowr...	2319.463	2128.592
6	FREQUENCY= 75 Hz Flowr...	2356.386	2098.68

Fuente: PETROAMAZONAS EP, 2018  
Modificado por: Diana Arellano y Gina Guajala

### 3.3.2 POZO SACHA-228

El pozo Sacha-228 es un pozo direccional, fue perforado en diciembre del 2008, alcanzó una profundidad de 10 593 pies en MD (10 038.63 pies en TVD). En el último trabajo de reacondicionamiento se cambió el equipo BES por comunicación tubing- casing, de una bomba P8x H6 por una bomba NF (310-630) (Petroamazonas, 2018).

#### Comportamiento de afluencia del reservorio

Con los datos de la tabla 3.51 se calculó el caudal máximo de producción, mediante el método de la IPR compuesta.

**TABLA 3.51  
DATOS DE UNA PRUEBA DEL POZO SACHA-228**

Pozo SACHA 228 HI	Pr psi	Pb psi	Fluido (BFPD)	Petróleo (BPPD)	Agua (BAPD)	BSW %
	4100	76.7	495	257	238	48.1
	PIP psi	Pwf psi	°API	Tipo bomba	Etapas	Frecuencia Hz
	664	854.77	27.8	NFV(310-630)H	315	140

Fuente: PETROAMAZONAS EP, octubre 2018  
Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

Aplicando las ecuaciones descritas del método de la IPR compuesta, se obtuvo los resultados expuestos en la tabla 3.52 y con estos valores se traza la figura 3.41 que representa la curva IPR del pozo.

**TABLA 3.52**  
**DATOS DE CAPACIDAD DE FLUJO DEL POZO SACHA 228**

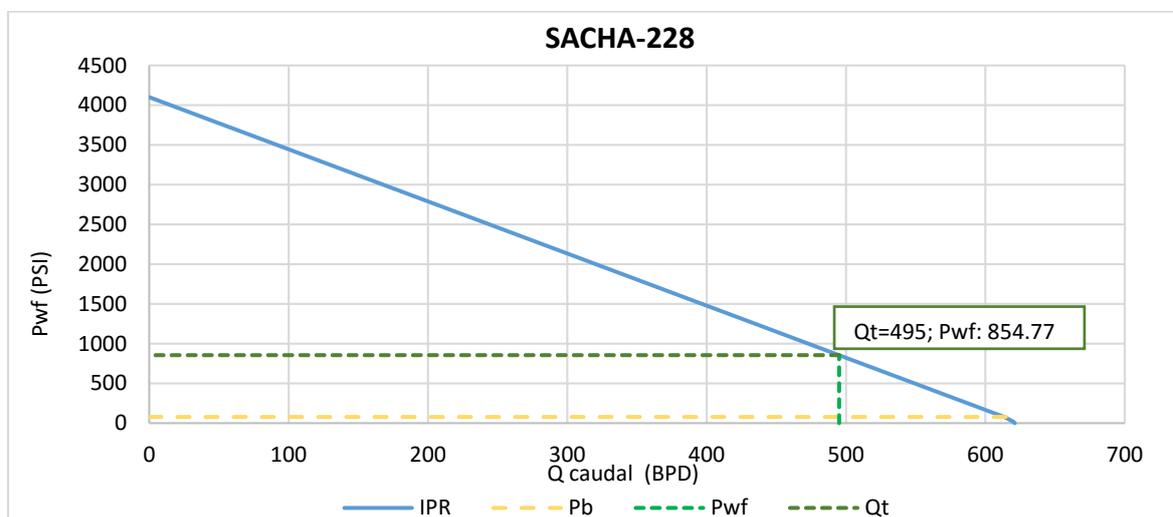
Pozo	Pr	Pb	IP	Qb	Q omáx	Tan $\beta$	Tan $\alpha$	Qt máx
Sacha	psi	psi	BFPD/ PSI	BPPD	BFPD	-	-	BFPD
228 HI	4100	76.7	0.15	613.68	620.18	18.7	0.05	621.05

Fuente: PETROAMAZONAS EP, octubre 2018

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

La curva IPR del pozo SACHA-228 muestra la capacidad de producción máxima del pozo.

**FIGURA 3.41 CURVA IPR DEL POZO SACHA 228 HI**



Fuente: PETROAMAZONAS E.P.

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

### Descripción del equipo instalado y análisis nodal

El pozo Sacha 228 se encuentra completado con el sistema BES con motor de imán permanente, en la tabla 3.53 se describen los equipos que se encuentran operando en el pozo.

**TABLA 3.53**  
**DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO BES SACHA-228**

DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO BES CON MOTOR DE IMÁN PERMANENTE			Longitud (pies)
EQUIPO DE FONDO	Bomba Superior	NF(310-630)H, SCMP, AR2, CR2C, 105STG, HSG #6	12.66
	Bomba Media 1	NF(310-630)H, SCMP, AR2, CR2C, 105STG, HSG #6	12.66
	Bomba media 2	NF(310-630)H, SCMP, AR2, CR2C, 105STG, HSG #6	12.66
	Separador de gas	GAS SEPARATOR, N406 3800, AR2, CR3, S14	2,93
	Protector	N406TMP LSBPB-SBPBSL CR2C S13 HT HL	14.96
	Motor	MOTOR, N460PM, 6000RPM, 135HP/3150V/21,3A, HT	10.10
	Sensor de fondo	NDS2 406 DES2 5800PSI CR2 MOD0 HT	2.02

**TABLA 3.53 CONTINUACIÓN**

	MLE	MLE TYPE3 450F AWG#5 5KV SS 115 FT	70
	Cable superior	CABLE, FLAT 450 F #4 5KV LEAD GALV CT 3/8 SW (STOCK PAM)	10011
<b>EQUIPO DE SUPERFICE</b>	SDT	XFMR, 200kVA 13800V PRI / MULTI TAP SEC PADMOUNTED (STOCK DE PAM)	N/A
	VDF	NVSD 300 kVA 480V 60HZ 6P NIF-B NSWF-B NSP-B	N/A
	SUT	XFMR,300kVA 480V PRI / MULTI TAP SEC	N/A

Fuente: PETROAMAZONAS EP, octubre 2018

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

Con la descripción de los equipos de la tabla 3.53 y las condiciones de la prueba de producción, se realizó la simulación en el software Novomet Sel Pro para obtener las gráficas del comportamiento de la bomba a condiciones actuales.

En la tabla 3.54 se muestran los datos necesarios para realizar el análisis nodal en el software Pipesim.

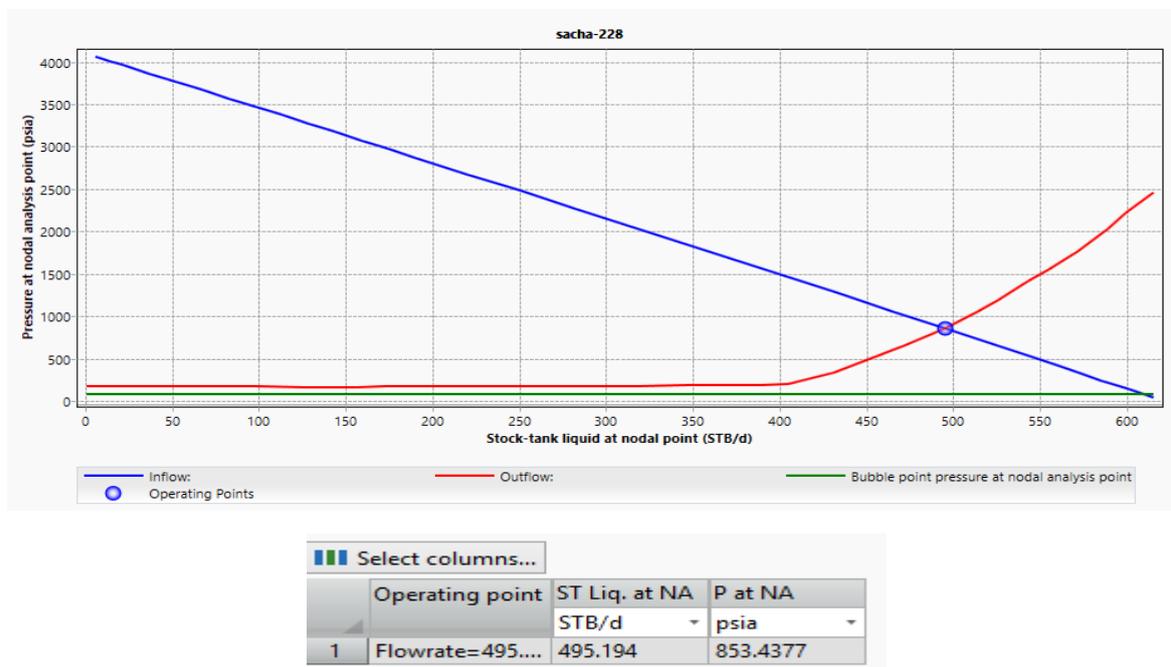
**TABLA 3.54  
DATOS DEL POZO SACHA-228**

<b>CAMPO</b>				SACHA		
<b>RESERVORIO</b>				Hollín Inferior		
<b>POZO</b>				SACHA-228 HI		
API	T fondo	PB	GOR	SGg	Sga	$\mu_w$ (CP)
27.8	225	76.7	15	0.78	1.02	1 cp
Producción		495 BFPD		P anular	20 psi	
Tipo de pozo		Direccional		IP	0.15 BFPD/psi	
P reservorio		4100 psi		Tubing	3 1/2pulgadas hasta pies 10041.3	
P cabeza		20 psi		Casing	9 5/8pulgadas a 9 117.5 pies	
% BSW		48.1		Liner	7pulgadas desde 8892 a 10 590 pies	
Profundidad bomba		10 003 pies		Tope de perforados	10 461 pies	

Fuente: PETROAMAZONAS EP, octubre 2018

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

Con los datos de la tabla 3.51 y 3.54 se obtiene la curva de  $P_{wf}$  Vs  $Q$  y se determina el punto óptimo de producción de fluidos. La curva resultante se expone en la figura 3.42 y se observa la curva de desempeño de influjo del yacimiento (inflow), que interseca a la curva de salida del sistema (outflow). El punto donde se intersecan las curvas es 495.19 BFPD y 853.43 psi, lo que significa que la modelación del pozo representa la realidad actual de las condiciones operativas del pozo.

**FIGURA 3.42 ANÁLISIS NODAL EN EL POZO SACHA 228**

Fuente: PETROAMAZONAS E.P.  
Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

Con la descripción de los equipos en la tabla 3.54 y las condiciones de la prueba de producción, se realizó una simulación en el software Novomet Sel Pro para obtener las gráficas del comportamiento de la bomba a condiciones actuales. A continuación, en la tabla 3.55 se presentan los datos calculados en el software.

**TABLA 3.55****PARÁMETROS CALCULADOS POR EL SOFTWARE**

POZO SACHA-228		
<b>PARÁMETROS DE LEVANTAMIENTO</b>		
Profundidad de asentamiento de la bomba	10005	pies
Índice de productividad	0.149	BFPD/ psi
Presión de reservorio	4100	psi
Producción	495.37	BFPD
Corte de agua	48	%
Presión de descarga de la bomba	3680	psi
Presión de cabeza	20	psi
Presión de casing	15	psi
Presión de fondo fluyente		psi
Nivel dinámico MD	8157	pies
<b>DATOS DE LA BOMBA</b>		
Consumo de potencia	54	hp
Frecuencia operativa	77	Hz

TABLA 3.55 CONTINUACIÓN

DATOS DEL MOTOR		
Carga del motor	51.76	%
Eficiencia	92.4	%
Temperatura del devanado	259	°F
Corriente eléctrica	11.232	A
LINEA DEL CABLE		
Temperatura del MLE aceptada	450	°F
Temperatura máxima del MLE	244.4	°F
Pérdidas de voltaje en la línea del cable	59.98	V

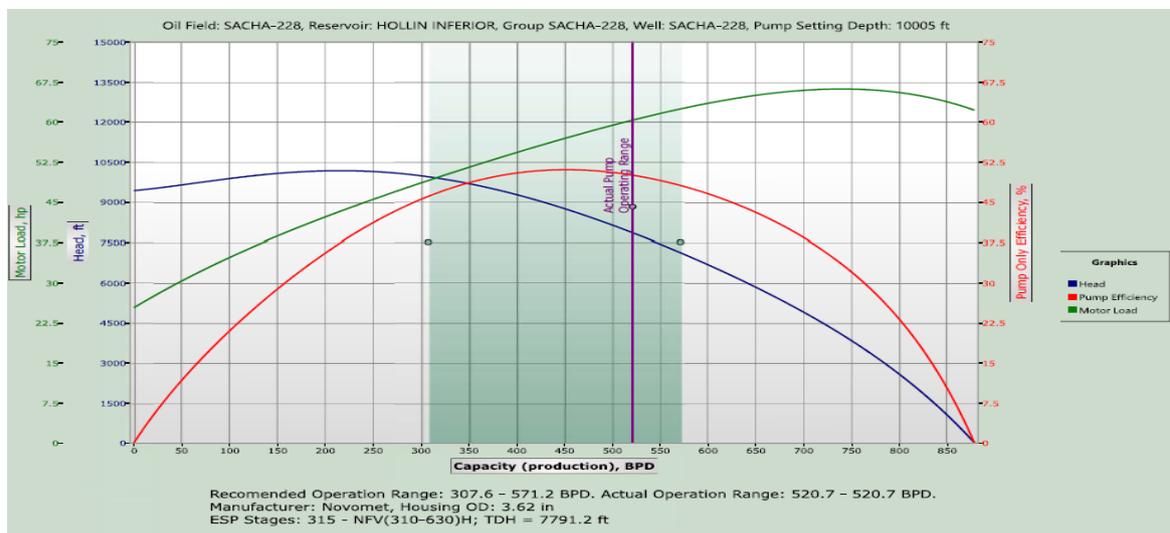
Fuente: NOVOMET Sel Pro, 2015

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

Con los datos obtenidos de la simulación se presentan las gráficas de rendimiento de las bombas en la figura 3.43 y 3.44

En la figura 3.43 se observa que para el caudal de producción actual de 495 BFPD la bomba NFV (310-630) H se encuentra dentro del rango de operación cerca del mejor punto de eficiencia.

FIGURA 3.43 CURVA DE RENDIMIENTO DE LA BOMBA NFV(310-630)H

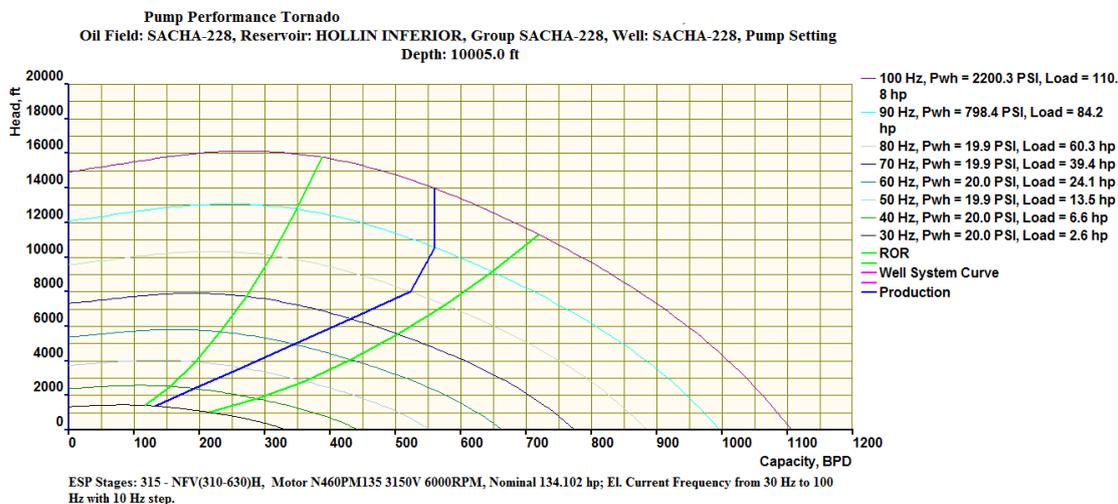


Fuente: PETROAMAZONAS E.P.

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

En la figura 3.44 se observa el comportamiento de la bomba a diferentes frecuencias, en este caso para el caudal de 495 BFPD la bomba se encuentra dentro del rango operativo a 77 Hz.

**FIGURA 3.44 CURVA DE TORNADO DE LA BOMBA NFV (310-630) H**

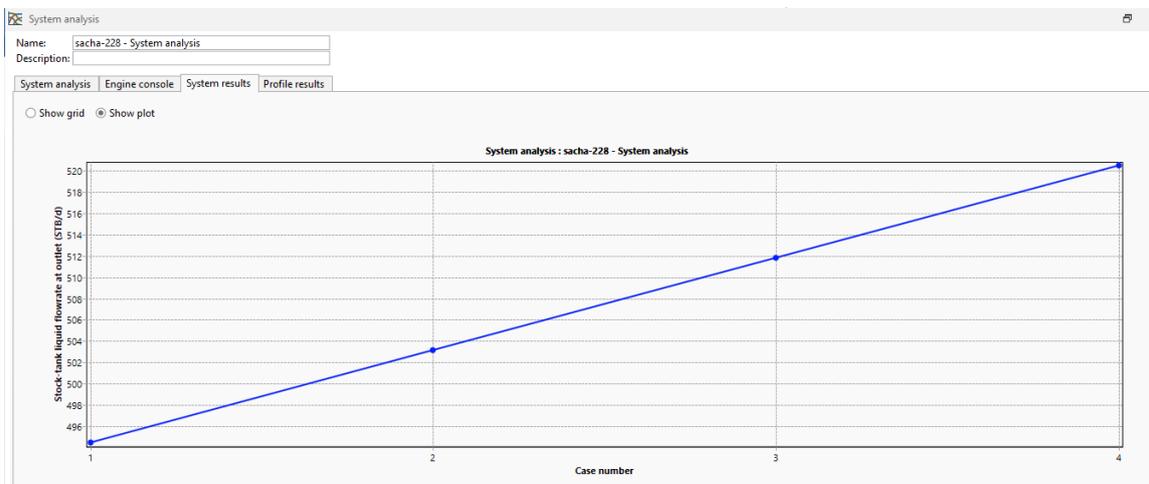


Fuente: PETROAMAZONAS E.P.  
Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

**ESTUDIO DE FRECUENCIAS CON EL NUEVO EQUIPO BES**

Se realiza un estudio de sensibilidades para observar el comportamiento del equipo si se incrementa la frecuencia. De acuerdo a la figura 3.45 se observa 4 escenarios con diferentes valores de frecuencias entre 77 a 80 Hz a condiciones actuales del pozo y yacimiento, y se determina que se podría incrementar la frecuencia hasta el escenario número 2 que corresponde a 78 Hz, ya que para valores mayores de frecuencia la bomba empieza a trabajar en la zona del upthrust, tomando en cuenta que la capacidad de la bomba en el rango operativo es de 264 BFPD hasta 490 BFPD.

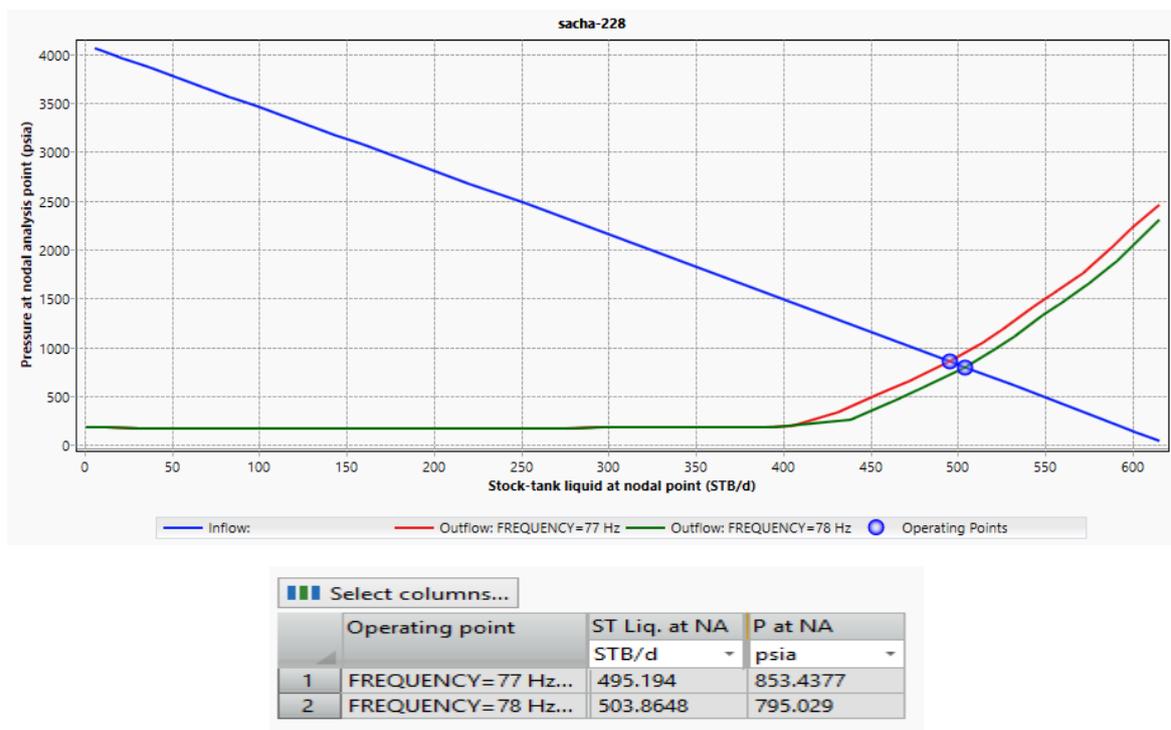
**FIGURA 3.45 ANÁLISIS DE FRECUENCIAS**



Fuente: PETROAMAZONAS EP, 2018  
Modificado por: Diana Arellano y Gina Guajala

En la figura 3.46 se observa el análisis de sensibilidades, para los dos escenarios determinados en la figura 3.45 se observa un incremento en el valor de la producción para cada frecuencia, considerando que la frecuencia máxima de operación va a ser 78 Hz obteniendo una producción a 503.86 BFPD.

**FIGURA 3.46 ANÁLISIS DE SENSIBILIDADES DEL POZO 228 CON LA BOMBA NFV (310-630) H**



Fuente: PETROAMAZONAS EP, 2018  
Modificado por: Diana Arellano y Gina Guajala

### 3.3.3 POZO SACHA-231

El pozo Sacha-231 es un pozo direccional tipo S, fue perforado el 10 de julio del 2011, alcanzó una profundidad de 10 406 pies en MD. En el último trabajo de reacondicionamiento se realizó un cambio de equipo BES TD-1250 por un equipo NHV (790-1000) H con 270 etapas (Petroamazonas, 2018).

#### Comportamiento de afluencia del reservorio

Con los datos de la tabla 3.56 se calcula el caudal máximo de producción del pozo Sacha-231 mediante el método de la IPR compuesta.

**TABLA 3.56  
DATOS DE UNA PRUEBA DEL POZO SACHA-231**

Pozo	Pr psi	Pb psi	Fluido (BFPD)	Petróleo (BPPD)	Agua (BAPD)	BSW %
SACHA 228 HI	3800	703	1013	243	770	76
	PIP psi	Pwf psi	°API	Tipo bomba	Etapas	Frecuencia Hz
	1357	1416.49	30.2	NHV(790-1000)H	279	142

Fuente: PETROAMAZONAS EP, octubre 2018  
Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

Aplicando las ecuaciones descritas del método de la IPR compuesta, se obtuvo los valores la tabla 3.57 y con estos valores se traza la figura 3.47 que representa la curva IPR del pozo.

**TABLA 3.57**

**DATOS DE CAPACIDAD DE FLUJO DEL POZO SACHA 231**

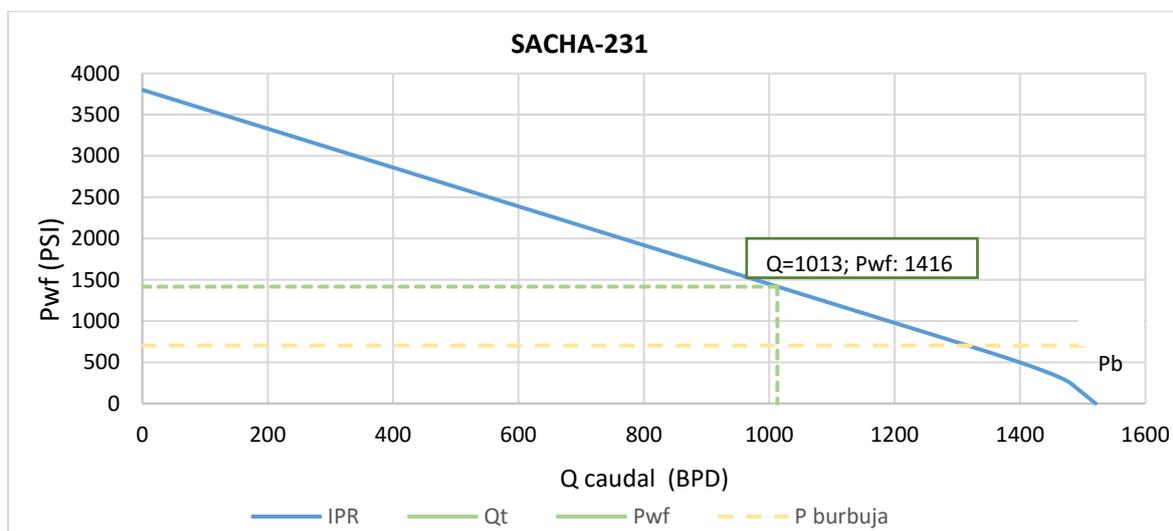
Pozo	Pr	Pb	IP	Qb	Q omáx	Tan $\beta$	Tan $\alpha$	Qt máx
Sacha	psi	psi	BFPD/ PSI	BPPD	BFPD			BFPD
239 HS	3800	703	0.425	1315.98	1481.93	6.19	0.16	1520.28

Fuente: PETROAMAZONAS EP, octubre 2018

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

La curva IPR del pozo SACHA-231 muestra la capacidad de producción máxima del pozo.

**FIGURA 3.47 CURVA IPR DEL POZO SACHA 231**



Fuente: PETROAMAZONAS E.P.

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

**Descripción del equipo instalado y análisis nodal**

En el pozo Sacha-231 actualmente se encuentra instalado un equipo BES con motor de imán permanente y bombas Power Save, en la tabla 3.58 se describen los principales equipos que se encuentran operando en el pozo.

**TABLA 3.58**

**DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DE FONDO- SACHA-231**

DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO BES CON MOTOR DE INDUCCIÓN			Longitud (pies)
EQUIPO DE FONDO	Subdescarga	SUBDESCARGA 3 1/2 "	0.72
	Válvula de descarga	BOLT-ON HEAD -3 1/2"- 8RD EUE-406 SERIES CR3	0.68
	Bomba Superior	NHV(790-1000)H, CMP, AR2, CR2C, S14, 93STG, HSG #7	12.80
	Bomba Media 1	NHV(790-1000)H, CMP, AR2, CR2C, S14, 93STG, HSG #7	12.80
	Bomba Inferior	NHV(790-1000)H, CMP, AR2, CR2C, S14, 93STG, HSG #7	12.80
	Separador de gas	GAS SEPARATOR, N406 3800, AR2, CR3, S14	2.96

**TABLA 3.58 CONTINUACIÓN**

	Protector	PROTECTOR N406TMP LSBPB-SBPBSL CR2C S13 HT HL	7.57
	Protector	PROTECTOR N406TMP LSBPB-SBPBSL CR2C S13 HT HL	
	Motor	MOTOR, N460PM, 6000RPM, 135HP/3150V/21,3A, CR2, HT	
	Sensor de fondo	NDS2 406 DES2 5800PSI CR2 MOD0 HT	
	MLE	MLE TYPE3 450F AWG#4 4KV MONEL 131FT	70
	Cable superior	CABLE, FLAT #2 5KV LEAD GALV 1CT 3/8 SINGLE ARMOR (GE)	5700
	Cable Medio	CABLE, FLAT #2 5KV LEAD GALV 1CT 3/8 (BH)	4335
<b>EQUIPO DE SUPERFICE</b>	SDT	XFMR, 200kVA 13800V PRI / MULTI TAP SEC PADMOUNTED (STOCK DE PAM)	N/A
	VDF	NVSD 300 kVA 480V 60HZ 6P NIF-B NSWF-B NSP-B	N/A
	SUT	XFMR,300kVA 480V PRI / MULTI TAP SEC	N/A

Fuente: PETROAMAZONAS EP, octubre 2018

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

Con la descripción de los equipos en la tabla 3.58 y las condiciones de la prueba de producción, se realizó una simulación en el software Novomet Sel Pro para obtener las gráficas del comportamiento de la bomba a condiciones actuales

En la tabla 3.59 se muestran los datos necesarios para realizar el análisis nodal en el software Pipesim.

**TABLA 3.59  
DATOS DEL POZO SACHA-231**

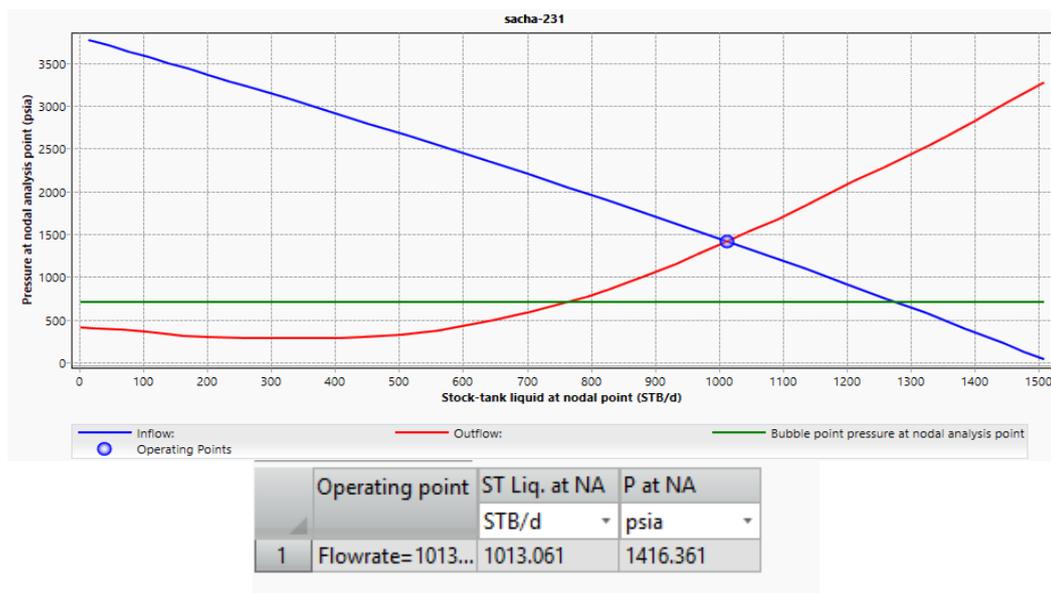
CAMPO				SACHA		
RESERVORIO				Hollín Superior		
POZO				SACHA-231 HS		
API	T fondo	Pb	GOR	SGg	Sga	$\mu_w$ (CP)
30.2	216 °F	703		0.78	0.98	1 cp
Producción		BFPD		P anular	20 psi	
Tipo de pozo		Direccional		IP	0.425 BFPD/psi	
P reservorio		3800 psi		Tubing	3 ½ "hasta 9100 pies	
P cabeza		psi		Casing	9 5/8" hasta 10 358 pies	
% BSW		76 %		Liner	7" desde 8808 hasta 10 358	
Profundidad bomba		10074 pies		Tope de perforados	10 216 pies	

Fuente: PETROAMAZONAS EP, octubre 2018

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

Con los datos de la tabla 3.56 y 3.59 se obtiene la curva de Pwf Vs Q y se determina el punto óptimo de producción de fluidos. El punto de intersección de la curva inflow con la curva de outflow es 1013.06 BFPD y 1416.36 psi, que significa que la simulación del pozo representa la realidad a las condiciones actuales del pozo. La gráfica resultante se observa en la figura 3.48.

**FIGURA 3.48 ANÁLISIS NODAL EN EL POZO SACHA 231**



Fuente: PETROAMAZONAS E.P.  
Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

### Simulación de las condiciones actuales de operación

A continuación, se presenta la tabla 3.60 con las variables calculados por el programa.

**TABLA 3.60  
PARÁMETROS CALCULADOS POR EL SOFTWARE**

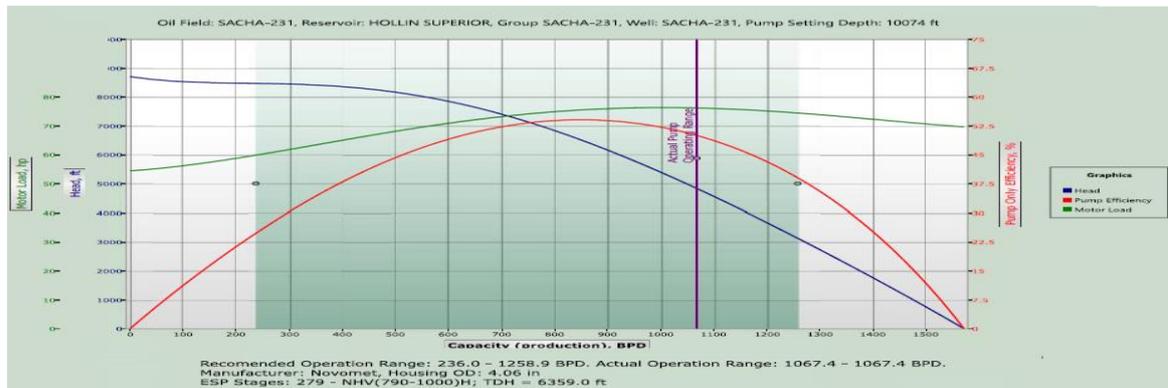
POZO SACHA-231		
PARÁMETROS DE LEVANTAMIENTO		
Profundidad de asentamiento de la bomba	10074	pies
Índice de productividad	0.421	BFPD/ psi
Producción	1013.719	BFPD
Corte de agua	76	%
Presión de descarga de la bomba	3207.10	psi
Presión de fondo fluente	1394.09	psi
Nivel dinámico MD	6372.7	pies
DATOS DE LA BOMBA		
Consumo de potencia	67	hp
Frecuencia operativa	71	Hz
DATOS DEL MOTOR		
Carga del motor	70	%
Eficiencia	92.56	%
Temperatura del devanado	252	°F
Corriente eléctrica	15.28	A
LINEA DEL CABLE		
Temperatura del MLE aceptada	450	°F
Longitud de MLE resistente al calor	82.021	pies
Pérdidas de voltaje en la línea del cable	83.557	V

Fuente: NOVOMET Sel Pro, 2015  
Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

Con los datos obtenidos de la simulación se presentan las gráficas de rendimiento de las bombas en la figura 3.49 y 3.50.

En la figura 3.49 se observa, para el caudal actual de producción de 1013 BFPD la bomba NHV (790-1000) H se encuentra dentro del rango de operación

### FIGURA 3.49 CURVA DE RENDIMIENTO DE LA BOMBA NHV (790-1000)H

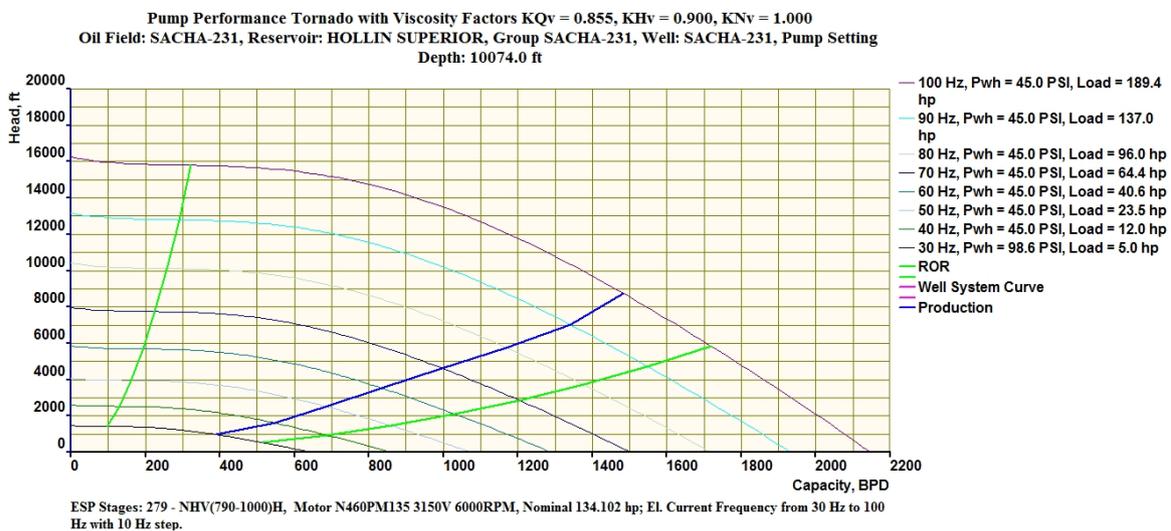


Fuente: PETROAMAZONAS E.P.

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

A continuación, en la figura 3.50 se presenta el comportamiento de la bomba a distintas frecuencias, a la frecuencia operativa de 71 Hz, la bomba se encuentra dentro del rango operativo con tendencia a trabajar en la región del upstrusth.

### FIGURA 3.50 CURVA DE TORNADO DE LA BOMBA NHV (790-1000)H



Fuente: PETROAMAZONAS E.P.

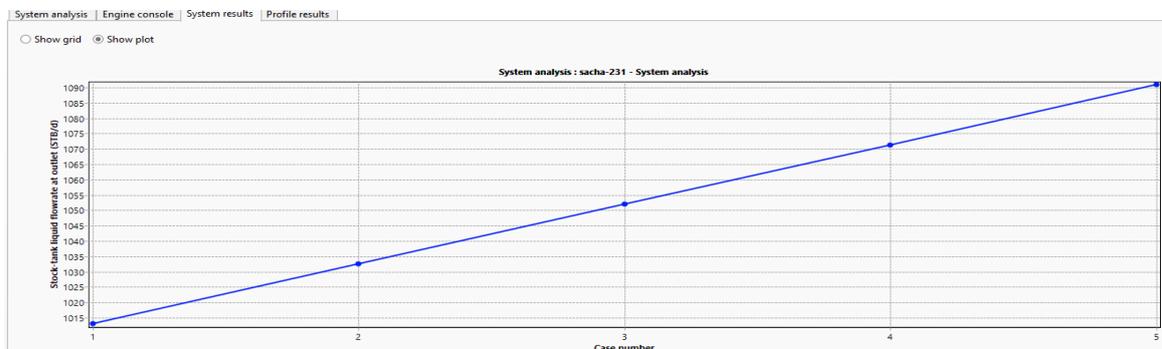
Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

### ESTUDIO DE FRECUENCIAS CON EL NUEVO EQUIPO BES

De acuerdo a la figura 3.51 se observan varios escenarios con diferentes valores de frecuencias entre 70 a 80 Hz, para la bomba NHV (790-1000) H a condiciones actuales del pozo y yacimiento. Cada frecuencia se ubica con su respectivo caudal

de producción y se determina que se podrá incrementar la frecuencia hasta 75 Hz, por especificaciones de la bomba.

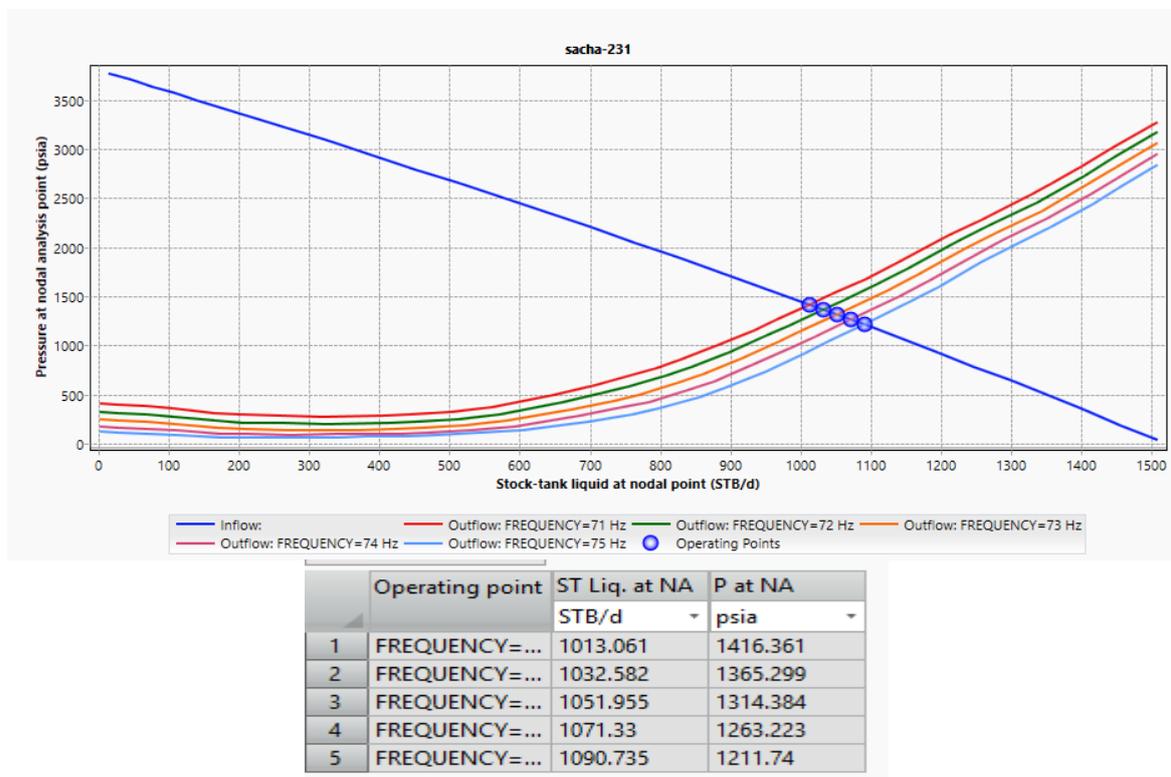
**FIGURA 3.51 ANÁLISIS DE FRECUENCIAS**



Fuente: PETROAMAZONAS EP, 2018  
Modificado por: Diana Arellano y Gina Guajala

En base a este análisis de incremento de frecuencia se obtiene el análisis de sensibilidades para las frecuencias determinadas. En la figura 3.47 se observa el comportamiento del pozo a las diferentes frecuencias. Y se observa un incremento en el valor de la producción para cada frecuencia, la frecuencia máxima de operación va a ser 75 Hz aumentando la producción a 1187.89 BFPD

**FIGURA 3.52 ANÁLISIS DE SENSIBILIDADES DEL POZO 231 CON LA BOMBA NHV (790-1000) H**



Fuente: PETROAMAZONAS EP, 2018  
Modificado por: Diana Arellano y Gina Guajala

### 3.3.4 POZO SACHA 425

El pozo Sacha-425 es un pozo direccional, fue perforado en el año 2014, alcanzó una profundidad de 10 670 pies en MD (10 086 pies en TVD). En el último trabajo de reacondicionamiento del 13 de marzo del 2018 se realizó un resdisparo a la arena Hollín Inferior en el intervalo 10097-10113 pies, un fracturamiento hidráulico a la arena U inferior y un cambio de equipo BES GE OIL & GAS P 18 por un equipo BES Novomet NF (310-630) H (Petroamazonas, 2018).

#### Comportamiento de afluencia del reservorio

Con los datos de la tabla 3.61 se calculó el caudal máximo de producción del pozo, mediante el método de la IPR compuesta.

**TABLA 3.61**

#### DATOS DE UNA PRUEBA DEL POZO SACHA-425

Pozo SACHA 425 UI	Pr psi	Pb psi	Fluido (BFPD)	Petróleo (BPPD)	Agua (BAPD)	BSW %
		1100	930.65	297	294	3
	PIP psi	Pwf psi	°API	Tipo bomba	Etapas	Frecuencia Hz
	537	680.49	18.9	NFV (310-630)H	570	57

Fuente: PETROAMAZONAS EP, octubre 2018

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

Aplicando las ecuaciones descritas del método de la IPR compuesta, se obtuvo los resultados expuestos en la tabla 3.62 y con estos valores se traza la figura 3.53 que representa la curva IPR del pozo.

**TABLA 3.62**

#### DATOS DE CAPACIDAD DE FLUJO DEL POZO SACHA 425

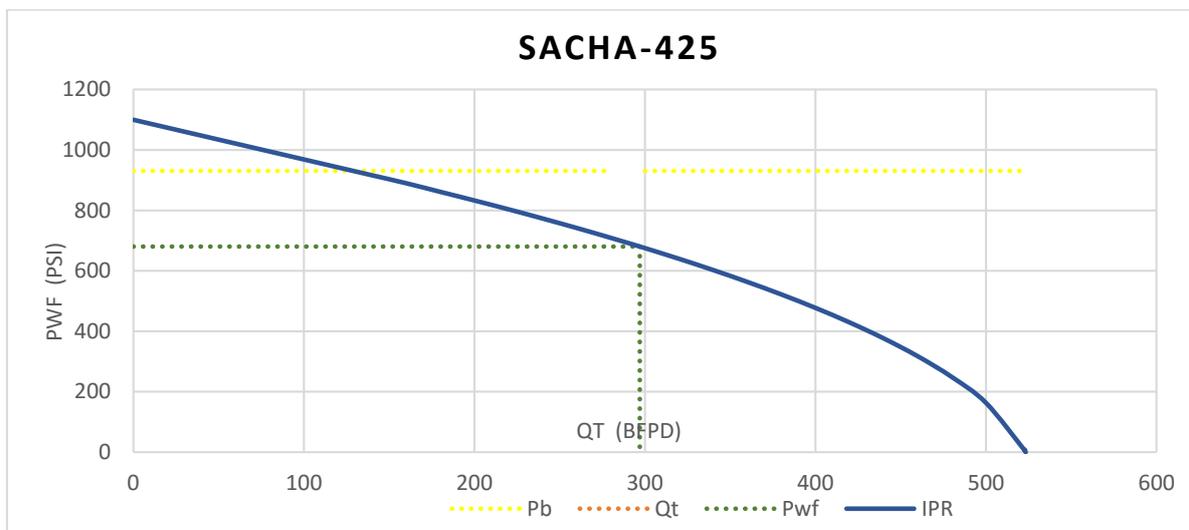
Pozo Sacha	Pr psi	Pb psi	IP BFPD/ PSI	Qb BPPD	Q omáx BFPD	Tan $\beta$	Tan $\alpha$	Qt máx BFPD
425 UI	1100	930.6 5	0.76	129.01	522.9	11.41	0.088	523.27

Fuente: PETROAMAZONAS EP, octubre 2018

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

La curva IPR del pozo SACHA-425 muestra la capacidad de producción máxima del pozo.

FIGURA 3.53 CURVA IPR DEL POZO SACHA 425 UI



Fuente: PETROAMAZONAS E.P.  
Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

### Descripción del equipo instalado y análisis nodal

En el pozo Sacha-425 actualmente se encuentra instalado un equipo BES con motor de imán permanente, en la tabla 3.63 se describe el equipo de fondo y superficie que se encuentran operando en el pozo Sacha-239

**TABLA 3.63**  
**DATOS DEL POZO SACHA-425 UI**

DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO BES CON MOTOR DE IMÁN PERMANENTE			Longitud (pies)
EQUIPO DE FONDO	Válvula de descarga	DISCHARGE PRESSURE SUB CR3	1.01
	Bomba Superior	NF(310-630)H SCMP, AR2, 105STG, HSG #6	12.66
	Bomba media 1	NF(310-630)H SCMP, AR2, 105STG, HSG #6	12.66
	Bomba media 2	NF(310-630)H SCMP, AR2, 105STG, HSG #6	12.66
	Bomba media 3	NF(310-630)H SCMP, AR2, 105STG, HSG #6	12.66
	Bomba inferior	NF(310-630) SCMP, S14, 150STG, HSG #9	12.66
	Bomba multifásica	N406MPP940 CMP, AR2, CR3, S14, 13STG	7.75
	Separador de gas	GAS SEPARATOR, N406 3800, AR2, CR3, S14	2.91
	Protector	PROTECTOR N406TMP LSBPB-SBPBSL CR2C S13 HT HL	14.95
	Motor	MOTOR, N460PM, 6000RPM, 135HP/3150V/21,3A, CR2, HT	10.08
	Sensor de fondo	NDS2, 406, DES2 5800PSI, CR2, MOD0 HT	2
	MLE	MLE TYPE3 450F AWG#5 4KV SS 115 FT	95

**TABLA 3.63 CONTINUACIÓN**

	Cable inferior	FLAT 450 F #2/7 5KV LEAD GALV CT 3/8 SINGLE CAPILAR	5740
<b>EQUIPO DE SUPERFICE</b>	SDT	GENERADOR	N/A
	VDF	NVSD 200kVA 480V 60HZ 6P	N/A
	SUT	XFMR, 200kVA 480V PRI / MULTI TAP SEC	N/A

Fuente: PETROAMAZONAS EP, octubre 2018

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

Con la descripción de los equipos en la tabla 3.63 y las condiciones de la prueba de producción, se realizó una simulación en el software Novomet Sel Pro para obtener las gráficas del comportamiento de la bomba a condiciones actuales.

En la tabla 3.64 se muestran los datos necesarios para realizar el análisis nodal en el software Pipesim.

**TABLA 3.64  
DATOS DEL POZO SACHA-425UI**

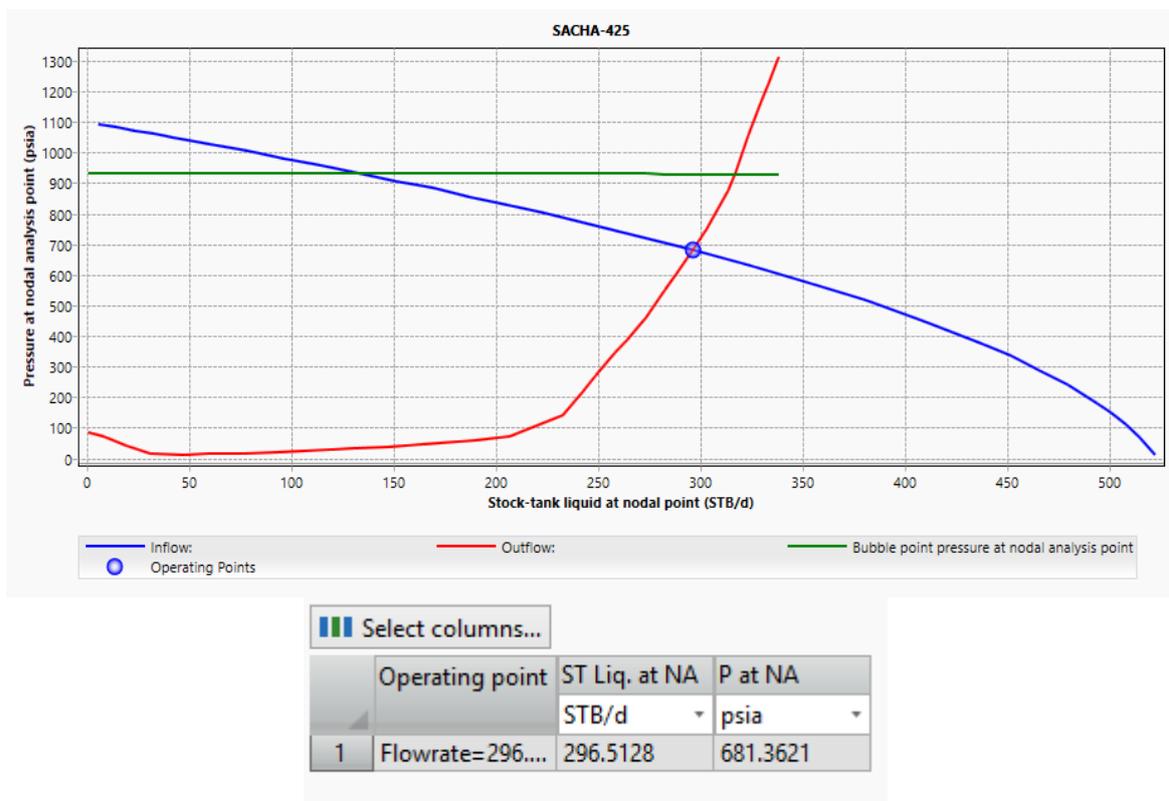
<b>CAMPO</b>				SACHA		
<b>RESERVORIO</b>				U INFERIOR		
<b>POZO</b>				SACHA-425 UI		
API	T fondo	Pb	GOR	SGg	Sga	$\mu_w$ (CP)
18.9	220	930.65	192	1.11	1.03	1
Producción		297 BFPD		P anular		20 psi
Tipo de pozo		Direccional		IP		0.76 BFPD/psi
P reservorio		1100 psi		Tubing		3 1/2pulgadas hasta 9 759.1pies
P cabeza		70 psi		Casing		9 5/8pulgadas a 8475.1 pies
% BSW		1		Liner		7pulgadas desde 8342 pies a pies 10 668
Profundidad bomba MD		9732 pies		Tope de perforados MD		10 078 pies

Fuente: PETROAMAZONAS EP, octubre 2018

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

Con los datos de la tabla 3.61 y 3.64 se obtiene la curva de Pwf Vs Q y se determina el punto óptimo de producción de fluidos. La curva resultante se expone en la figura 3.54 y se observa que la curva de desempeño de influjo del yacimiento (inflow) interseca a la curva de salida del sistema (outflow) en el punto de 296.51 BFPD y 681.3 psi, lo que significa que la modelación del pozo representa la realidad actual de las condiciones operativas del pozo.

**FIGURA 3.54 ANÁLISIS NODAL EN EL POZO SACHA 425 UI**



Fuente: PETROAMAZONAS E.P.  
Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

### Simulación de las condiciones actuales de operación

A continuación, en la tabla 3.65 se presentan los datos calculados en el software.

**TABLA 3.65  
PARÁMETROS CALCULADOS POR EL SOFTWARE**

POZO SACHA-425		
PARÁMETROS DE LEVANTAMIENTO		
Profundidad de asentamiento de la bomba	9724	pies
Índice de productividad	0.74	BFPD/ psi
Presión de reservorio	1100	psi
Producción	297.7	BFPD
Corte de agua	1	%
Presión de intake	538	psi
Presión de descarga de la bomba	3341.75	psi
Presión de cabeza	70	psi
Presión de casing	20	psi
Presión de fondo fluyente	667	psi
Nivel dinámico MD	7974.4	pies
DATOS DE LA BOMBA		
Consumo de potencia	40	hp

**TABLA 3.65 CONTINUACIÓN**

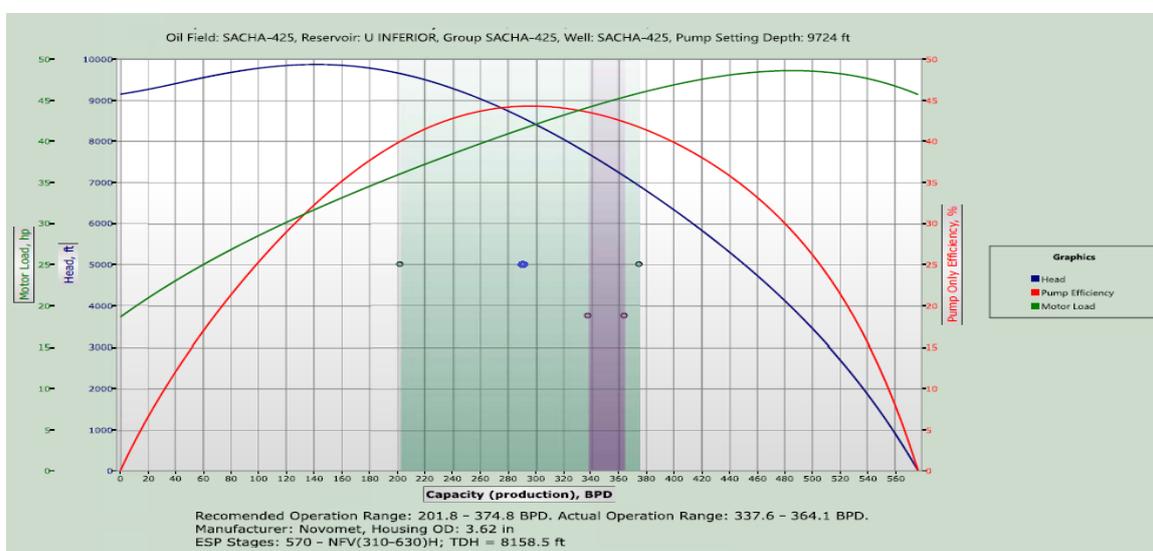
Frecuencia operativa	57	Hz
<b>DATOS DEL MOTOR</b>		
Carga del motor	49	%
Eficiencia	92.2	%
Temperatura del devanado	274.8	°F
Corriente eléctrica	10.75	A
<b>LÍNEA DEL CABLE</b>		
Temperatura del MLE aceptada	450	°F
Longitud de MLE resistente al calor	82.01	pies
Pérdidas de voltaje en la línea del cable	51.47	V

Fuente: NOVOMET Sel Pro, 2015

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

Con los datos obtenidos de la simulación se obtienen las gráficas de rendimiento de la bomba en la figura 3.55 y 3.56

En la figura 3.55 se observa que para el caudal de producción actual de 297 BFPD la bomba NFV (310-630) H se encuentra dentro del rango de operación cerca del mejor punto de eficiencia

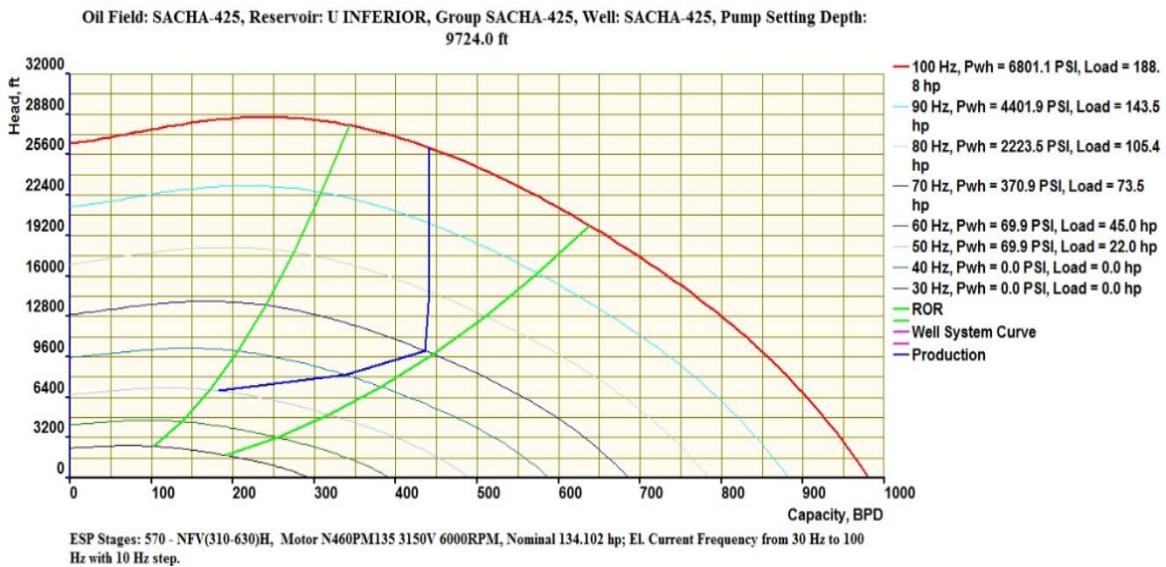
**FIGURA 3.55 CURVA DE RENDIMIENTO DE LA BOMBA NFV (310-630) H**

Fuente: PETROAMAZONAS E.P.

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

En la figura 3.56 se observa el comportamiento de la bomba a diferentes frecuencias, en este caso para el caudal de 297 BFPD la bomba se encuentra dentro del rango operativo a 57 Hz y cerca del mejor punto de eficiencia

**FIGURA 3.56 CURVA DE TORNADO DE LA BOMBA NFV (310-630) H**



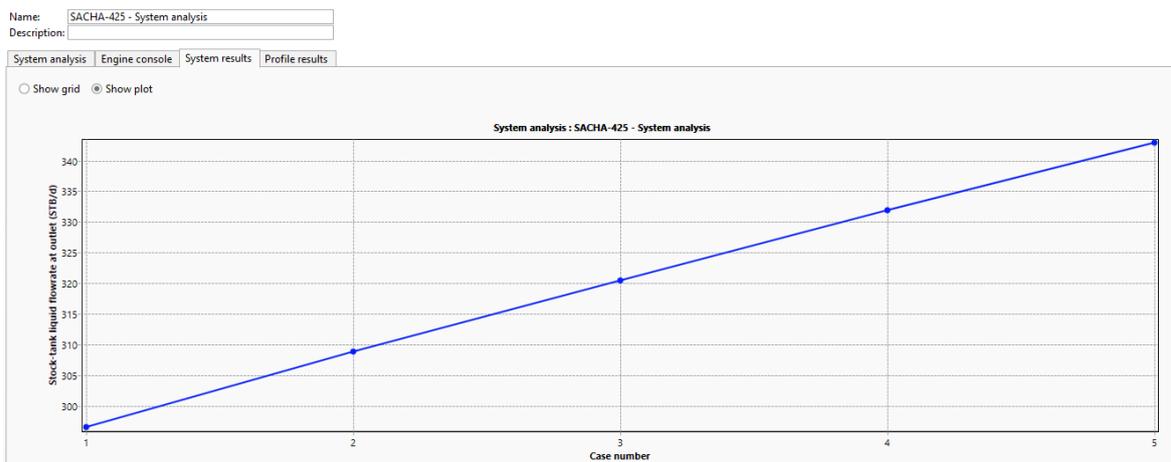
Fuente: PETROAMAZONAS E.P.  
Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

### ESTUDIO DE FRECUENCIAS PAR EL NUEVO EQUIPO BES

Para las condiciones de operación actual de los equipos se realiza un análisis de frecuencia para observar el comportamiento del equipo y la producción si se incrementa la frecuencia.

De acuerdo a la figura 3.57 se observan diferentes escenarios valores de frecuencias entre 57 a 61 Hz, para la bomba NFV(310-630)H a condiciones actuales del pozo y yacimiento, cada frecuencia con los respectivos caudales de producción.

**FIGURA 3.57 ANÁLISIS DE FRECUENCIAS**

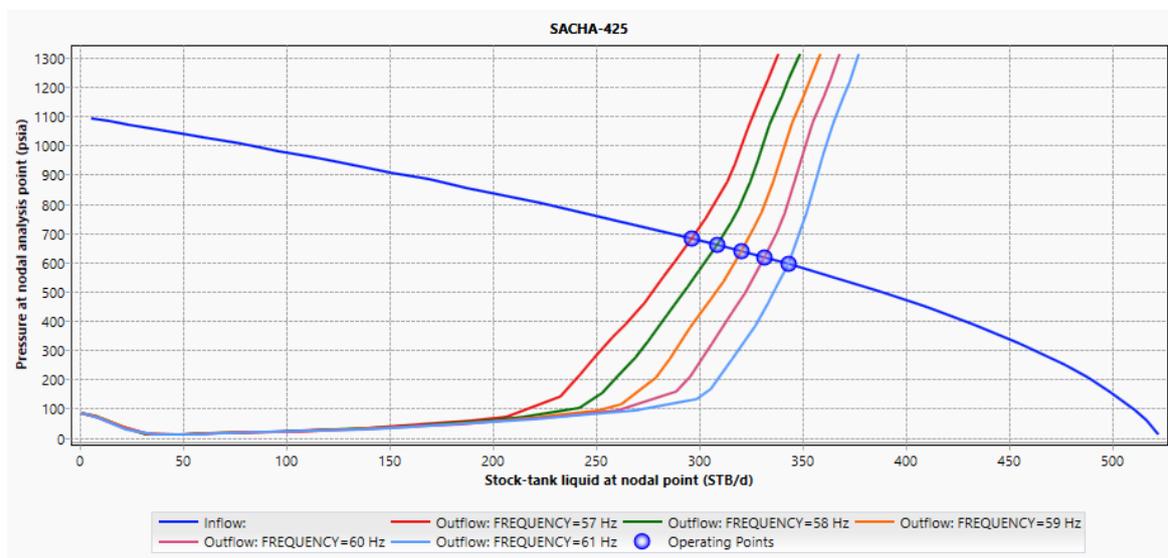


Fuente: PETROAMAZONAS EP, 2018  
Modificado por: Diana Arellano y Gina Guajala

En base a este análisis de incremento de frecuencia se obtiene el análisis de sensibilidades para las frecuencias determinadas. En la figura 3.58 se observa el

comportamiento del pozo con este incremento en los valores de frecuencias. Y se observa un incremento en el valor de la producción para cada frecuencia, considerando que la frecuencia máxima de operación va a ser 61 Hz incrementando la producción a 343.02 BFPD

**FIGURA 3.58 ANÁLISIS DE SENSIBILIDADES DEL POZO 425 CON LA BOMBA NFV (310-630) H**



Operating point		ST Liq. at NA	P at NA
		STB/d	psia
1	FREQUENCY=57 Hz Flowrate...	296.5128	681.3621
2	FREQUENCY=58 Hz Flowrate...	308.8512	659.2453
3	FREQUENCY=59 Hz Flowrate...	320.4325	637.9188
4	FREQUENCY=60 Hz Flowrate...	331.8434	616.3235
5	FREQUENCY=61 Hz Flowrate...	343.0233	594.5559

Fuente: PETROAMAZONAS EP, 2018  
Modificado por: Diana Arellano y Gina Guajala

### 3.4 ANÁLISIS ECONÓMICO

El sistema de bombeo electrosumergible consume altas cantidades de energía debido a los dispositivos eléctricos de fondo que utiliza para su funcionamiento. En la actualidad se presenta una nueva tecnología del sistema BES con el uso de un motor de imán permanente y bombas Power Save que disminuirían el consumo de energía eléctrica realizando la misma función (Colorado M, 2016).

Para analizar económicamente las ventajas y desventajas del uso del sistema BES con motor de inducción o el sistema BES con motor de imán permanente se realiza un análisis comparativo considerando el costo de consumo de energía eléctrica de cada una de las tecnologías y el costo de instalación de los equipos BES.

### 3.4.1 CONCEPTOS GENERALES

Para realizar el análisis económico es importante definir algunos conceptos de indicadores financieros que permiten determinar la viabilidad económica de un proyecto.

#### CAPEX

Son inversiones y Gastos de Capital que pasan a formar parte de los activos de la empresa y son conocidos comúnmente en la industria petrolera como CAPEX. Las inversiones o el CAPEX en la industria petrolera se clasifican en inversiones de subsuelo e inversiones de infraestructura.” (Pacific Rubiales Energy, 2014). Estas inversiones permitirán mejorar los bienes de capital de una compañía.

#### OPEX O COSTOS OPERATIVOS

Son los desembolsos relacionados a la operación que no pueden ser considerados como activos de la empresa o no pueden ser capitalizados. Los costos operativos pueden tener mayor impacto en comparación con el CAPEX”, debido a que aumentan el costo operativo por barril.” (Pacific Rubiales Energy, 2014).

#### VALOR ACTUAL NETO VAN

“El valor actual neto de una inversión, es igual a la suma algebraica de los valores actualizados de los flujos netos de caja asociados con esa inversión.” (VEGA, 2013)

$$VAN = \sum_{k=0}^n \frac{FNC_k}{(1+r)^k} \quad (3.1)$$

Donde:

$FNC_k$  = flujo neto de caja del año k

K = período de evaluación

r = tasa de actualización o descuento de la empresa

El VAN es el parámetro que determinará la viabilidad del proyecto de acuerdo a los siguientes valores:

- Si  $VAN > 0$  proyecto rentable → la inversión generaría ganancias
- Si  $VAN < 0$  proyecto no rentable → la inversión generaría pérdidas
- Si  $VAN = 0$  proyecto indiferente → no hay ni pérdidas ni ganancias

## TASA INTERNA DE RETORNO TIR

“La tasa interna de retorno de un proyecto, es la tasa de actualización que anula el valor actual neto del flujo de caja.” (VEGA, 2013). Muestra la rentabilidad que ofrece un proyecto, mientras se obtenga mayor TIR, mayor será la rentabilidad de un proyecto. Se lo expresa con la siguiente ecuación:

$$VAN = \sum_{k=0}^n \frac{FNC_k}{(1+TIR)^k} = 0 \quad (3.2)$$

Una vez obtenido el TIR se realiza la siguiente evaluación:

Si  $TIR > r$  proyecto rentable.

Si  $TIR = r$  proyecto indiferente

Si  $TIR < r$  proyecto no rentable.

Para la evaluación económica de este proyecto, primero se analizará los costos de energía consumida para cada sistema y luego la viabilidad económica de la instalación de un nuevo equipo BES, para cada una de las tecnologías

### 3.4.2 ANÁLISIS COMPARATIVO DE COSTOS DE CONSUMO DE ENERGÍA

Actualmente el Campo Sacha cuenta con una producción promedio de 66,488.80 BPPD, la energía requerida por los equipos BES instalados es generada mediante generadores propios del campo y rentados, otro suministro de energía es el Sistema Eléctrico Interconectado Petrolero con sus siglas SEIP. En la tabla 3.66 se observa los costos en kWh para cada sistema de generación eléctrica.

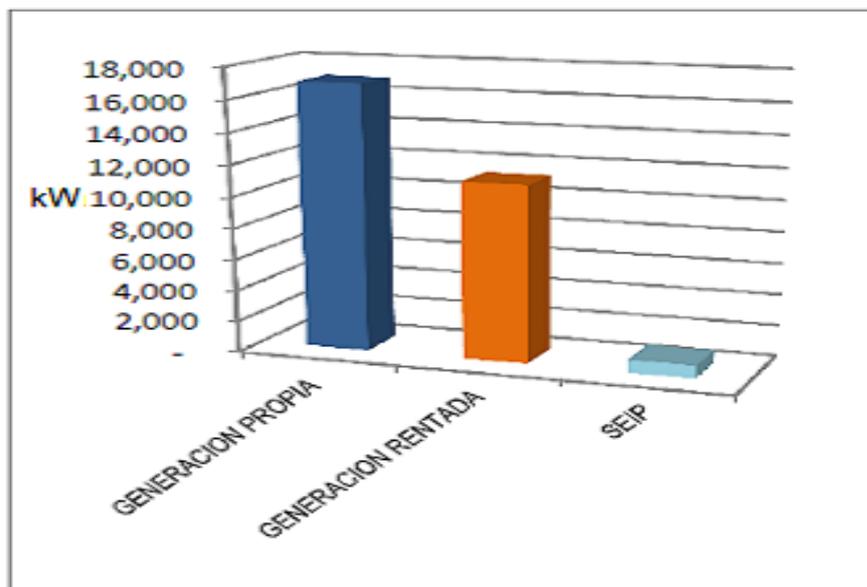
**TABLA 3.66**  
**SISTEMAS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DEL CAMPO SACHA**

<b>SISTEMA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA</b>	<b>COSTO PROMEDIO DE kWh</b>
Sistema Eléctrico Interconectado Petrolero SEIP	0.0789
Generación Rentada	0.1158
Generación por PAM	0.0962

Fuente: PETROAMAZONAS EP, octubre 2018

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

En la figura 3.59 se observa los kW promedio diarios generados por cada sistema de generación eléctrica.

**FIGURA 3.59 kW GENERADOS POR CADA SISTEMA DE GENERACIÓN**

Fuente: PETROAMAZONAS EP, octubre 2018  
 Elaborado por: Ingeniería del Campo Sacha

Para la estimación de costos se considera lo siguiente:

- **Curvas de declinación de producción de cada uno de los pozos**

Son gráficas de las tasas de producción de petróleo de un pozo versus el tiempo. El análisis de estas curvas de declinación permite predecir el comportamiento de un pozo o yacimiento.

Para la elaboración de las curvas de declinación es necesario conocer el historial de producción del pozo para analizar el comportamiento actual de producción y el comportamiento futuro del yacimiento.

Existen tres tipos de curvas de declinación de petróleo:

- Curvas de declinación exponencial
- Curva de declinación hiperbólica
- Curva de declinación armónica

Para este estudio se considera una curva de declinación exponencial descrita por la siguiente ecuación:

$$q = q_0 e^{-D_i t} \quad (3.3)$$

Donde:

$q$  =(tasa de producción a cualquier período BPPD, BPPM, BPPA)

$q_i$  =tasa inicial de producción (BPPD, BPPM, BPPA)

$D_i$  =tasa de declinación (días<sup>-1</sup>, meses<sup>-1</sup>, años<sup>-1</sup>)

$t$  =períodos de producción: días, meses, años

También se la puede expresar con la siguiente ecuación

$$q = q_o \exp^{-b(t-t_o)} \quad (3.4)$$

Esta ecuación permite obtener la producción en cualquier momento si se conoce la producción inicial  $q_o$ .

Este método es válido para semanas, meses, años. Considerando siempre el uso correcto de las unidades, si son tasas anuales, se multiplica por 365 a la producción, si se considera tasas mensuales la producción es mensual y se multiplica a la producción diaria por 30.42 (Melo V, 2019).

Se considera la siguiente ecuación para el cálculo de las tasas mensuales dependiendo el número de meses que se necesite calcular

$$q_t = q_o(1 - d_m)^t \quad (3.5)$$

Donde:

$q_t$ =Tasa de producción al mes  $t$

$d_m$ = declinación mensual

$t$  = período en meses

A continuación, se presenta un ejemplo de cálculo de la tasa de declinación mensual en el pozo Sacha 247 de acuerdo al historial de producción del pozo que se encuentra en el Anexo N<sup>o</sup> 7.

Del historial de producción se toman los siguientes datos:

- $q_o$ = 805 BPPD Tasa de producción en el mes de agosto del 2018
- $q_t$ = 758 BPPD Tasa de producción en el mes de marzo del 2019
- Meses= desde el mes de agosto al mes de marzo se tiene 7 meses y se aplica la siguiente ecuación:

$$q_{7 \text{ meses}} = q_o(1 - d_m)^{\text{meses}}$$

$$758 = 805(1 - d_m)^7$$

$$d_m = 0.0085573$$

Con el procedimiento descrito para el cálculo de la tasa mensual, se evalúan las tasas de declinación para los demás pozos seleccionados.

En la tabla 3.67 se observa la declinación anual y mensual para cada uno de los pozos seleccionados.

**TABLA 3.67**  
**TASA DE DECLINACIÓN EXPONENCIAL DE LOS 8 POZOS SELECCIONADOS**

POZO	BPPD AL MES DE ENERO DEL 2019	TASA DE DECLINACIÓN ANUAL	TASA DE DECLINACIÓN MENSUAL [%]
SACHA 481 TI	328	0.0955	0.007957
SACHA 137 UI	649	0.0282	0.002351
SACHA F247 TI	780	0.1027	0.008557
SACHA 395 UI	228	0.0058	0.000484
SACHA 228 HI	257	0.0860	0.007168
SACHA 231 HS	243	0.1809	0.015079
SACHA 239 HS	261	0.0739	0.006159
SACHA 425 UI	292	0.0169	0.001404

Fuente: PETROAMAZONAS EP, octubre 2018

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

Para determinar el consumo de energía se consideran los datos del reporte mensual Well Status ESP-octubre del 2018 sobre el consumo de kW mensual de cada pozo. En la tabla 3. 68 se presenta los kW requeridos por: mes, día y por hora de los 8 pozos seleccionados.

**TABLA 3.68**  
**CONSUMO DE POTENCIA kW PARA LOS 8 POZOS SELECCIONADOS**

POZO	Cantidad kW/mes	Cantidad kW/día	Cantidad kW/h
SACHA 481 TI	62461.89	2014.90	83.95
SACHA 137 UI	58593.02	1890.10	78.75
SACHA F247 TI	58529.85	1888.06	78.67
SACHA 395 UI	33860.66	1092.28	45.51
SACHA 228 HI	49666.56	1602.15	66.76
SACHA 231 HS	49666.56	1602.15	66.76
SACHA 239 HS	102279.70	3299.35	137.47
SACHA 425 UI	40178.07	1296.07	54.00

Fuente: PETROAMAZONAS EP, octubre 2018

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

Para los equipos BES propuestos con motor de imán permanente se calculó la potencia que consumirían en: kW/ mes, kW/ día y kW/ hora. Los resultados se presentan en la tabla 3.69. Se considera que los kVA calculados para el diseño del equipo BES no representan los kVA que consume el equipo BES cuando está en funcionamiento.

TABLA 3.69

## CONSUMO DE ENERGÍA DE LOS EQUIPOS BES PROPUESTOS

POZO	kW/h estimado para equipos propuestos	KW/día estimado para equipos propuestos	kW/ mes equipos propuestos	Energía consumida en kWh
SACHA F247 TI	52.48	1259.42	39042.09	52.48
SACHA 137 UI	51.56	1237.44	38360.49	51.56
SACHA 481 TI	42.92	1030.13	31934.14	42.92
SACHA 395 UI	35.00	840.14	26044.33	35.00

Fuente: PETROAMAZONAS EP, octubre 2018

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

Con el valor de la potencia consumida por hora, se calcula el consumo de energía y el costo de consumo por hora. En la tabla 3.70 se presentan los costos del consumo de energía por día para los pozos con el sistema BES con motor de inducción

TABLA 3.70

## COSTOS DEL CONSUMO DE kWh/ DÍA DEL SISTEMA BES CON MOTOR DE INDUCCIÓN

POZO	kW/h	Tiempo de operación	Energía consumida	Costo del kWh	Costo del kWh / día
		horas	kWh / día	USD	USD
SACHA 481 TI	83.95	24	2014.8	0.0789	158.97
SACHA 137 UI	78.75	24	1890	0.0789	149.12
SACHA F247 TI	78.67	24	1888.08	0.0789	148.97
SACHA 395 UI	45.51	24	1092.24	0.0789	86.18

Fuente: PETROAMAZONAS EP, octubre 2018

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

Se calcula la producción estimada por mes para un flujo de caja anual con la siguiente ecuación:

$$Q_0[\text{BPPD}]_{\text{mes } 2} = Q_0[\text{BPPD}]_{\text{mes}} - (Q_0[\text{BPPD}]_{\text{mes}} \times \% \text{ de decaimiento mensual})$$

En la tabla 3.71 se muestra un ejemplo de cálculo para determinar el consumo y costo energético para el pozo Sacha-247, que utiliza la energía del sistema eléctrico interconectado petrolero SEIP, considerando el sistema BES con motor de inducción.

Se considera los siguientes datos:

- Tasa de declinación mensual: 0.008573
- Producción Actual: 780 BPPD
- Potencia consumida en kW/ día: 1888.05959
- Y el costo de kWh/ día, que para el pozo Sacha-247 es igual a 148.97 USD calculado en la tabla 3.70.

Nota:

La declinación de la producción en el análisis del consumo energético es muy importante porque, cuando los pozos presentan variación en la producción se debe incrementar o disminuir la frecuencia del equipo BES. Para este análisis se considera un aumento o disminución de producción considerable a 300 BFPD. Todos los pozos de estudio no presentan una variación considerable de producción por lo que se asume el consumo energético constante para cada mes.

**TABLA 3.71**

**CONSUMO Y COSTO ENERGÉTICO DEL POZO SACHA-247 CON EL MOTOR DE INDUCCIÓN**

Tiempo de proyección	Días	Producción BPPD	Producción BPPM	kW/ día	kW/mes	Costo (USD) /día	COSTO (USD)
ene-19	31	780.00	23727.60	1888.06	58529.85	148.97	4618.00
feb-19	28	773.33	23524.56	1888.06	52865.67	148.97	4171.10
mar-19	31	766.71	23323.25	1888.06	58529.85	148.97	4618.00
abr-19	30	760.15	23123.66	1888.06	56641.79	148.97	4469.04
may-19	31	753.64	22925.79	1888.06	58529.85	148.97	4618.00
jun-19	30	747.19	22729.61	1888.06	56641.79	148.97	4469.04
jul-19	31	740.80	22535.10	1888.06	58529.85	148.97	4618.00
ago-19	31	734.46	22342.26	1888.06	58529.85	148.97	4618.00
sep-19	30	728.17	22151.07	1888.06	56641.79	148.97	4469.04
oct-19	31	721.94	21961.52	1888.06	58529.85	148.97	4618.00
nov-19	30	715.77	21773.59	1888.06	56641.79	148.97	4469.04
dic-19	31	709.64	21587.26	1888.06	58529.85	148.97	4618.00
ene-20	31	703.57	21402.54	1888.06	58529.85	148.97	4618.00
<b>Producción total Anual</b>			<b>293107.81</b>	<b>Costo total Anual</b>			<b>58991.28893</b>

Fuente: PETROAMAZONAS EP, octubre 2018

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

En la tabla 3.72 se muestra el consumo y costo energético del pozo Sacha-247, con proyección a 1 año de producción, considerando el uso del sistema BES con motor de imán permanente.

**TABLA 3.72**

**CONSUMO Y COSTO ENERGÉTICO DEL POZO SACHA-247 CON EL USO DEL MOTOR DE IMAN PERMANENTE**

Tiempo de proyección	Días	Producción BPPD	Producción BPPM	kW/ día	kW/mes	Costo (USD) /día	COSTO (USD)
ene-19	31	780.00	23727.60	1259.42	39042.09	99.37	3080.42
feb-19	28	773.33	23524.56	1259.42	35263.82	99.37	2782.32
mar-19	31	766.71	23323.25	1259.42	39042.09	99.37	3080.42

**TABLA 3.72 CONTINUACIÓN**

abr-19	30	760.15	23123.66	1259.42	37782.66	99.37	2981.05
may-19	31	753.64	22925.79	1259.42	39042.09	99.37	3080.42
jun-19	30	747.19	22729.61	1259.42	37782.66	99.37	2981.05
jul-19	31	740.80	22535.10	1259.42	39042.09	99.37	3080.42
ago-19	31	734.46	22342.26	1259.42	39042.09	99.37	3080.42
sep-19	30	728.17	22151.07	1259.42	37782.66	99.37	2981.05
oct-19	31	721.94	21961.52	1259.42	39042.09	99.37	3080.42
nov-19	30	715.77	21773.59	1259.42	37782.66	99.37	2981.05
dic-19	31	709.64	21587.26	1259.42	39042.09	99.37	3080.42
ene-20	31	703.57	21402.54	1259.42	39042.09	99.37	3080.42
<b>Producción total Anual</b>			<b>293107.81</b>	<b>Costo total Anual</b>			<b>39349.8892</b>

Fuente: PETROAMAZONAS EP, octubre 2018

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

Se calcula el consumo y costo de energía eléctrica para cada uno de los pozos en los que se realizó el diseño del sistema BES con motor de imán permanente.

En la tabla 3.73 se muestran los resultados de los costos estimados de energía total anual requerida por el sistema BES con motor de inducción y el sistema BES diseñado con motor de imán permanente, además se muestra la producción estimada para el año.

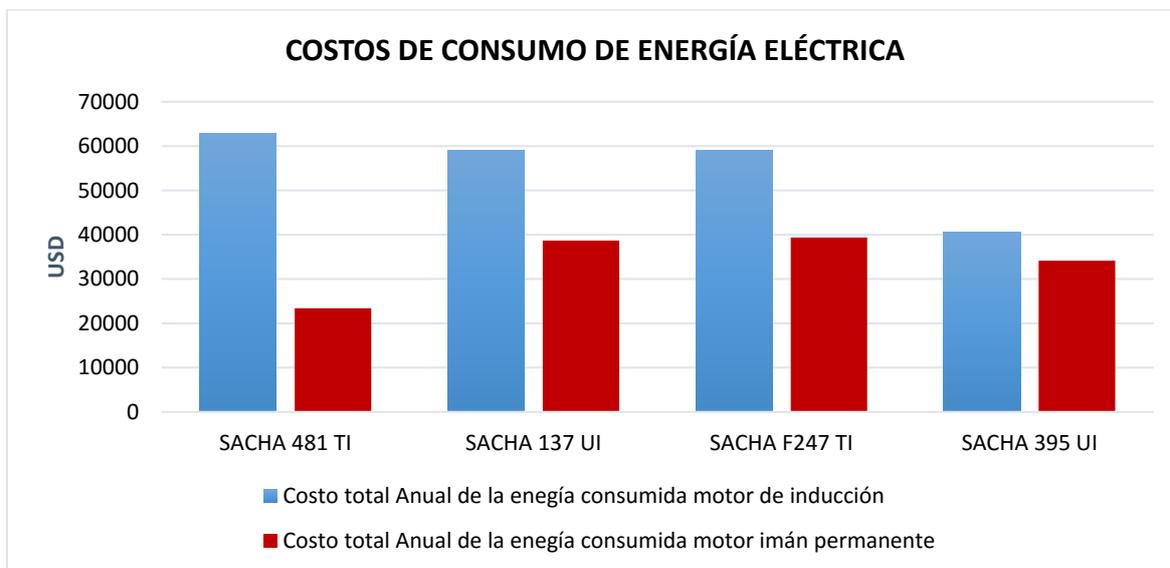
**TABLA 3.73  
COSTOS DE ENERGÍA ELÉCTRICA DEL SISTEMA BES CON MOTOR DE INDUCCIÓN Y EL SISTEMA BES CON MOTOR DE IMÁN PERMANENTE**

POZO	Costo anual del consumo de energía estimada en el equipo BES con motor de inducción (USD)	Costo anual del consumo de energía estimada en el equipo BES con motor de imán permanente (USD)	Producción anual estimada BP
SACHA 481 TI	62954.33	32185.91	123695.45
SACHA 137 UI	59054.96	38662.92	253063.48
SACHA F247 TI	58991.29	39349.88	293107.81
SACHA 395 UI	34127.61	26249.66	89903.49

Fuente: PETROAMAZONAS EP, octubre 2018

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

En la figura 3.61 se observa la comparación de costos energía para cada uno de los pozos seleccionados.

**FIGURA 3.60 COSTOS DE CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

Fuente: PETROAMAZONAS EP, octubre 2018

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

La variación total del costo de energía de los equipos con imán permanente es del 33% con respecto a los equipos con motor de inducción. Ya que esta tecnología consume menos energía para producir la misma cantidad de fluidos.

### 3.4.3 ANÁLISIS COMPARATIVO DE COSTOS DE INSTALACIÓN

Se realizó el análisis económico de acuerdo a los costos de instalación para determinar la viabilidad económica de un cambio de sistemas BES con motor de inducción y un sistema BES con motor de imán permanente, cuando el pozo lo requiera.

Los costos de reacondicionamientos pueden asociarse a los gastos de capital denominados CAPEX y los gastos operativos denominados OPEX, esto dependerá de los objetivos del trabajo de reacondicionamiento

En la tabla 3.74 y 3.75 se presentan los costos estimados de los trabajos de reacondicionamiento relacionados con la instalación de equipos BES

**TABLA 3.74**

#### TRABAJOS DE REACONDICIONAMIENTO DE POZOS ASOCIADOS A GASTOS DE CAPITAL

TRABAJOS DE REACONDICIONAMIENTO	COSTO UNITARIO EN USD
Cambio de zona	240000
Fracturamiento hidráulico	420000
Pulling Simple + Estimulación + Evaluación	290000

Fuente: PETROAMAZONAS EP

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

**TABLA 3.75**  
**TRABAJOS DE REACONDICIONAMIENTO DE POZOS ASOCIADOS A GASTOS OPERATIVOS.**

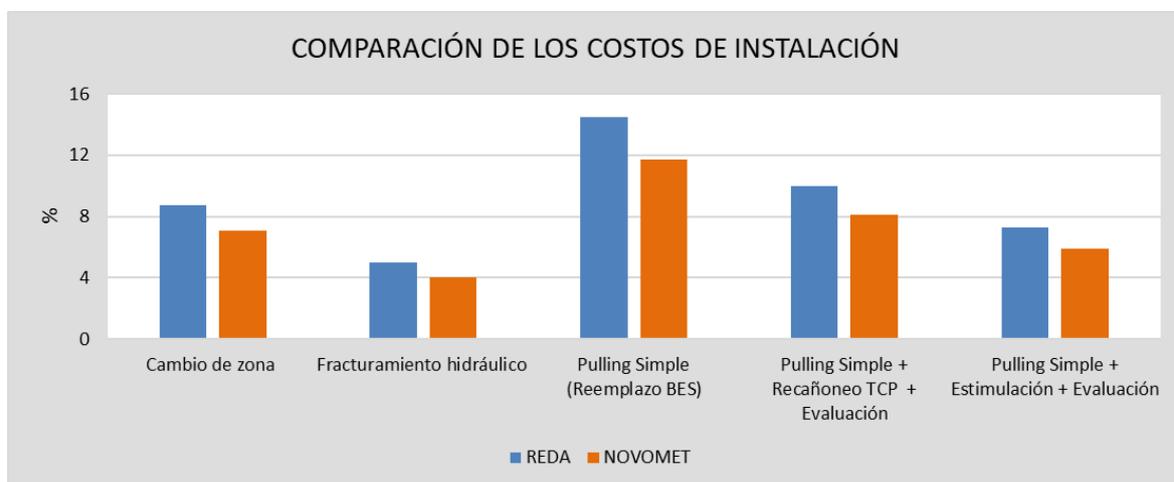
TRABAJOS DE REACONDICIONAMIENTO	COSTO UNITARIO EN USD
Pulling Simple (Reemplazo BES)	145000
Pulling Simple + Recañoneo TCP + Evaluación	210000

Fuente: PETROAMAZONAS EP

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

En la figura 3.61 se observan los costos de instalación de los equipos de motor de imán permanente frente a los costos de los equipos de motor de inducción.

**FIGURA 3.61 COMPARACIÓN DE LOS COSTOS DE INSTALACIÓN**



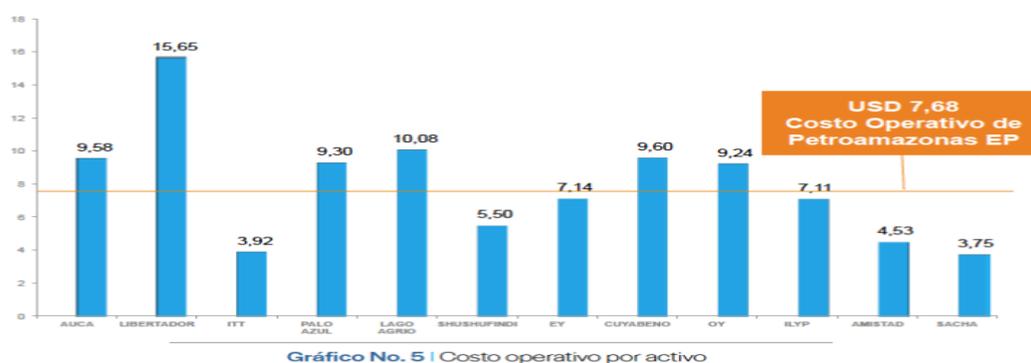
Fuente: PETROAMAZONAS EP

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

En la figura 3.62 se observa a el costo operativo para producir un barril de petróleo en el Campo Sacha.

**FIGURA 3.62 COSTOS OPERATIVOS PARA EL CAMPO SACHA**

Costo operativo por activo



Fuente: PETROAMAZONAS EP

Elaborado por: DIRECCIÓN DE PUBLICACIONES PETROAMAZONAS EP

En las tablas 3.76 Y 3.77 Y 3.78 se realiza el desarrollo de los indicadores financieros TIR y VAN para el estudio de la viabilidad económica de un cambio de sistema con motor de imán permanente para el pozo Sacha 481. Para el estudio se consideran varios parámetros.

- El costo operativo se toma del valor del Campo Sacha que es de 3.75 USD por barril de petróleo.
- La tasa de declinación se la determina con el historial de la producción, mediante la declinación exponencial y se obtiene una tasa de declinación mensual de 0.7957 %
- Se considera una tasa de actualización del 12 % para la determinación del flujo neto de caja.

Se establecen 3 escenarios para el análisis económico:

- Primer escenario precio del Barril de 40.00 USD
- Segundo escenario precio del Barril de 50.05 USD
- Tercer escenario precio del Barril de \$60.00 USD

**TABLA 3.76**

**ANÁLISIS ECONÓMICO EN EL POZO SACHA-481 CON UN PRECIO DE 40.00 USD POR BARRIL**

Periodo	MES	Producción diaria de petróleo [Bls]	Producción de petróleo mensual [Bls]	Ingreso [USD]	Costo de producción mensual [USD]	Costo trabajo de reacondicionamiento [USD]	Flujo Efectivo Neto	Flujo Neto de Caja
0	Ene-19		0	0.00	0.00	403071.2	-403071.20	-403071.20
1	Feb-19	328	9977	399066.67	37412.50	0	361654.17	322905.51
2	Mar-19	325.39	9897	395891.34	37114.81	0	358776.53	286014.45
3	Abr-19	322.80	9819	392741.29	36819.50	0	355921.79	253338.10
4	May-19	320.23	9740	389616.30	36526.53	0	353089.77	224394.93
5	Jun-19	317.68	9663	386516.17	36235.89	0	350280.28	198758.44
6	Jul-19	315.16	9586	383440.71	35947.57	0	347493.14	176050.84
7	Ago-19	312.65	9510	380389.72	35661.54	0	344728.19	155937.52
8	Sept-19	310.16	9434	377363.01	35377.78	0	341985.23	138122.10
9	Oct-19	307.69	9359	374360.38	35096.29	0	339264.10	122342.03
10	Nov-19	305.25	9285	371381.64	34817.03	0	336564.62	108364.80
11	Dic-19	302.82	9211	368426.61	34539.99	0	333886.61	95984.42
12	Ene-20	300.41	9137	365495.09	34265.16	0	331229.92	85018.47
							<b>VAN</b>	1764160.42
							<b>TIR</b>	89%

Fuente: PETROAMAZONAS EP

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

TABLA 3.77

**ANÁLISIS ECONÓMICO EN EL POZO SACHA-481 CON UN PRECIO DE 50.05 USD POR BARRIL.**

Periodo	MES	Producción diaria de petróleo [Bls]	Producción de petróleo mensual [Bls]	Ingreso [USD]	Costo de producción mensual [USD]	Costo trabajo de reacondicionamiento [USD]	Flujo Efectivo Neto	Flujo Neto de Caja
0	Ene-19		0	0.00	0.00	403071.2	403071.20	-403071.20
1	Feb-19	328	9977	499332.17	37412.50	0	461919.67	419926.97
2	Mar-19	325.39	9897	495359.05	37114.81	0	458244.23	378714.24
3	Abr-19	322.80	9819	491417.54	36819.50	0	454598.04	341546.24
4	May-19	320.23	9740	487507.39	36526.53	0	450980.86	308026.00
5	Jun-19	317.68	9663	483628.36	36235.89	0	447392.47	277795.52
6	Jul-19	315.16	9586	479780.19	35947.57	0	443832.62	250531.94
7	Ago-19	312.65	9510	475962.64	35661.54	0	440301.10	225944.09
8	Sep-19	310.16	9434	472175.47	35377.78	0	436797.68	203769.34
9	Oct-19	307.69	9359	468418.43	35096.29	0	433322.14	183770.89
10	Nov-19	305.25	9285	464691.28	34817.03	0	429874.25	165735.13
11	Dic-19	302.82	9211	460993.79	34539.99	0	426453.80	149469.46
12	Ene-20	300.41	9137	457325.73	34265.16	0	423060.56	134800.13
							<b>VAN</b>	2636958.75
							<b>TIR</b>	114%

Fuente: PETROAMAZONAS EP

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

TABLA 3.78

**ANÁLISIS ECONÓMICO EN EL POZO SACHA-481 CON UN PRECIO DE 60.00 USD POR BARRIL.**

Periodo	MES	Producción diaria de petróleo [Bls]	Producción de petróleo mensual [Bls]	Ingreso [USD]	Costo de producción mensual [USD]	Costo trabajo de reacondicionamiento [USD]	Flujo Efectivo Neto	Flujo Neto de Caja
0	Ene-19		0	0.00	0.00	403071.2	403071.20	-403071.20
1	Feb-19	328	9977	598600.00	37412.50	0	561187.50	510170.45
2	Mar-19	325.39	9897	593837.02	37114.81	0	556722.20	460100.99
3	Abr-19	322.80	9819	589111.93	36819.50	0	552292.44	414945.48

**CONTINUACION DE LA TABLA 3.78**

4	May-19	320.23	9740	584424.44	36526.53	0	547897.92	374221.65
5	Jun-19	317.68	9663	579774.25	36235.89	0	543538.36	337494.56
6	Jul-19	315.16	9586	575161.07	35947.57	0	539213.50	304371.96
7	Ago-19	312.65	9510	570584.58	35661.54	0	534923.05	274500.10
8	Sept-19	310.16	9434	566044.52	35377.78	0	530666.73	247559.95
9	Oct-19	307.69	9359	561540.57	35096.29	0	526444.29	223263.77
10	Nov-19	305.25	9285	557072.47	34817.03	0	522255.44	201352.08
11	Dic-19	302.82	9211	552639.91	34539.99	0	518099.92	181590.86
12	Ene-20	300.41	9137	548242.63	34265.16	0	513977.46	163769.06
							<b>VAN</b>	3290269.72
							<b>TIR</b>	138%

Fuente: PETROAMAZONAS EP

Elaborado por: Diana Arellano y Gina Guajala

Para los diferentes escenarios propuestos, los indicadores financieros son positivos, por lo que se puede concluir que en el caso de un cambio en el sistema BES con motor de inducción por el sistema BES con motor de imán permanente, cuando el pozo lo requiera. El proyecto es viable por su gran rentabilidad.

## CAPÍTULO 4

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 4.1 CONCLUSIONES

Una vez analizadas las dos tecnologías del sistema BES, podemos concluir lo siguiente:

- El motor de imán permanente no se acopla a cualquier variador de frecuencia, ya que necesita un variador que le proporcione altos rangos de velocidad y que le permita un arranque suave. Además, el variador debe controlar la posición del rotor. El motor de imán permanente, permite operar el equipo BES a mayores frecuencias, sin tener pérdidas de energía que ocasionen incrementos de temperatura en el motor.
- Para el diseño del equipo BES con el motor de inducción la selección de la bomba es más precisa, debido a que las bombas tienen rangos de operación más pequeños y la curva de comportamiento de la bomba corresponde a un motor de 3500 RMP, por otro lado, para el diseño del equipo BES con motor de imán permanente, las bombas tienen mayores rangos de velocidad debido al motor de imán permanente de 6000 RPM.
- En el pozo Sacha-247, se encuentra instalada una bomba electrosumergible RC1000 de 259 etapas con un motor de inducción 456, MAXIMUS, RA-S, RLOY de 180 HP, el motor se encuentra operando a: 61.5 Hz, 2562 voltios, 27.1 A, 3434 RPM y presenta un consumo de 1887.84 kW/día. La producción total es de 808 BFPD con un consumo de 2.34 kW/BFPD. En comparación la bomba de diseño NHV (790-1000) H de 216 etapas con un motor de imán permanente N406PM de 110 HP, que se encontraría operando dentro del rango de mayor eficiencia a: 79 Hz, 2054 voltios, 15.7 A, 4740 RPM y presentaría un consumo de 1259.28 kW/día. La producción esperada sería de 814 BFPD con un consumo de 1.547 KW/BFPD, presentando un menor consumo energético en comparación con la actualmente instalada.
- En el pozo Sacha-137, se encuentra instalada una bomba electrosumergible D460N de 164 etapas con un motor de inducción 456, MAXIMUS de 180 HP, que se encuentra operando a: 50 Hz, 2100 voltios, 28 A, 2814.7 RPM y presenta un consumo de 1890 kW/día. La producción total es de 435 BFPD con un consumo de 4.34 kW/BFPD. En comparación la bomba de diseño NFV (310-630) H de 260 etapas con un motor de imán permanente N406PM de 80 HP, que se encontraría operando dentro del rango de mayor eficiencia a: 77 Hz, 1555.4 voltios, 12.64 A, 4620 RPM y presentaría un consumo de 1237.2 KW/día. La producción esperada sería de 435.84 BFPD con un consumo de 2.84kW/BFPD, presentando un menor consumo energético en comparación con la actualmente instalada.

- En el pozo Sacha-395, se encuentra instalada una bomba electrosumergible D460N de 164 etapas con un motor de inducción 456, MAXIMUS de 120 HP, que se encuentra operando a: 52 Hz, 1307 voltios, 26 A, 3240.85 RPM y presenta un consumo de 1092.24 kW/día. La producción total es de 233 BFPD con un consumo de 4.68 kW/BFPD. En comparación la bomba de diseño NBV (160-250) H de 228 etapas con un motor de imán permanente N319PM, que se encontraría operando dentro del rango de mayor eficiencia a: 78 Hz, 998.4 voltios, 14.65 A, 4680 RPM y presentaría un consumo de 875.04 kW/día. La producción esperada sería de 238.34 BFPD con un consumo de 3.61 kW/BFPD, presentando un menor consumo energético en comparación con la actualmente instalada.
- En el pozo Sacha-481, se encuentra instalada una bomba electrosumergible RC1000 de 59 etapas con un motor de inducción 456, MAXIMUS de 120 HP, que se encuentra operando a: 58 Hz, 1458 voltios, 43 A, 3770 RPM y presenta un consumo de 2014.8 kW/día. La producción total es de 364 BFPD con un consumo de 5.535 kW/BFPD. En comparación la bomba de diseño NFV (310-630) H de 332 etapas con un motor de imán permanente N406PM de 67 HP, que se encontraría operando dentro del rango de mayor eficiencia a: 66 Hz, 1135.2 voltios, 13.28 A, 3960 RPM y presentaría un consumo de 988.8 kW/día. La producción esperada sería de 367.06 BFPD con un consumo de 2.69 kW/BFPD, presentando un menor consumo energético en comparación con la actualmente instalada.
- Debido a la fabricación y a el material de las etapas, las bombas alcanzan mayor rendimiento y menores pérdidas hidráulicas, esto provoca que las bombas sean más eficientes
- En el proceso de instalación del sistema BES con imán permanente se presenta mayor arrastre en las pruebas de giro y cuando la configuración del equipo tiene una bomba compresora presenta más arrastre, debido a la configuración del motor.
- Cuando se realiza una comparación de equipos BES se debe tomar en cuenta que la producción, no representa un parámetro de comparación, debido a que la producción depende de las condiciones del reservorio y el equipo producirá en el rango de diseño. En cada uno de los pozos con el nuevo diseño propuesto se presentan simulaciones con valores de producción diaria muy parecida a las que se encuentran produciendo actualmente los pozos con motor de inducción, aunque el incremento o declinación de la producción dependerá de varios factores y condiciones que tenga el reservorio y los equipos que conforman el sistema BES de producción, conforme transcurre el tiempo de estimado de producción del pozo.
- En los pozos seleccionados con el sistema BES con motor de imán permanente se determinó que: Para cada uno de los pozos que se encuentran operando con una bomba Power Save y un motor de imán permanente, como en el caso de los pozos: Sacha-228, Sacha-239, Sacha-

231 y Sacha 425 se encuentran en condiciones óptimas de operación, dentro del rango operativo y para la evaluación energética se obtuvo que consumen bajas cantidades de energía y que los costos de energía consumida anualmente son 50058.12 USD, 50058.12 UDS, 103086.06 USD y 49373.92 USD respectivamente.

- En los pozos SACHA-239, SACHA-228, SACHA-231 y SACHA-425 en los que se encuentra instalados equipos BES con motor de imán permanente, se puede observar que los equipos se encuentran dentro del rango operativo y que además el consumo de energía de los equipos es de: 137.47 kWh, 66.76 kWh, 66.76kWh y 54 kWh respectivamente.
- A pesar de que la mayoría de operadoras, asocian a los equipos BES con producciones a bajo caudal, los equipos de imán permanente también manejan altos caudales, actualmente se encuentran instalados una variedad de equipos con la nueva tecnología de motor de imán permanente y se ha observado una alta eficiencia en sistemas BES para producción de altos caudales.
- En el análisis energético de los equipos BES con motor de imán permanente, se determina que si se instalaran los equipos propuestos se ahorraría un 33% del consumo de energía actual que utiliza el sistema BES con motor de inducción, ya que los equipos trabajan con menor: amperaje y voltaje, pero con mayores revoluciones.
- En el pozo SACHA-247 para una producción anual estimada de 293107.81 BP el costo de la energía consumida al año con el equipo BES con motor de imán permanente es de 39349.88 USD mientras que en el equipo BES con motor de inducción es de 58991.29 USD, con el equipo BES con motor de imán permanente se ahorraría 19641.41 USD en los costos operativos del pozo.
- En el pozo SACHA-137 para una producción anual estimada de 253063.48 BP el costo estimado de energía consumida al año con el equipo BES con motor de imán permanente es de 38662.92 USD mientras que en el equipo BES con motor de inducción es de 59054.96 USD, con el equipo BES con motor de imán permanente se ahorraría 20392.04 USD en los costos operativos del pozo.
- En el pozo SACHA-395 para una producción anual estimada de 89903.49 BP el costo de la energía consumida al año con el equipo BES con motor de imán permanente es de 26249.66 USD mientras que en el equipo BES con motor de inducción es de 34127.61USD, con el equipo BES con motor de imán permanente se ahorraría de 7877.95 USD en los costos operativos del pozo.
- En el pozo SACHA-481 para una producción anual estimada de 123695.45 BP el costo estimado de energía consumida al año con el equipo BES con motor de imán permanente es de 32185.91 USD mientras que en el equipo

BES con motor de inducción es de 62954.33 USD, con el equipo BES con motor de imán permanente se ahorraría 30768.42 USD aproximadamente en los costos operativos del pozo.

- Económicamente el proyecto de un cambio de sistema BES con motor de inducción por un sistema BES con motor de imán permanente cuando el pozo lo requiera es viable, como muestran los indicadores financieros para el pozo Sacha-481 en el que se obtuvo un VAN mayor a cero para los tres escenarios de precio de petróleo planteados de 40.00 USD, 50.05 USD, y 60.00 USD, porque el gasto de consumo de energía eléctrica es inferior, y los costos de instalaciones y movimientos de equipos son similares.

## **4.2 RECOMENDACIONES**

- Para realizar el diseño del equipo BES con motor de imán permanente se debe considerar siempre las tablas de ingeniería del catálogo de Novomet para la selección de la bomba electrosumergible debido a las especificaciones presentes en estas tablas por el amplio rango de velocidad a las que operan las bombas Power Save.
- En el arranque se necesita hacer un seguimiento de la posición del rotor para controlar el flujo de campo magnético del estator y del rotor
- En el proceso de instalación del sistema BES con motor de imán permanente, se debe tener precaución, cuando se está realizando la prueba de giro del equipo, ya que el motor presentara giro duro y arrastre, además cuando el motor no se encuentra energizado se transforma en generador, debido a los imanes. Esto puede ser peligroso en el armado del equipo.
- Se debe verificar los datos de capacidad de flujo de yacimiento ya que estos parámetros condicionan al éxito o fracaso de la instalación del equipo BES.
- Antes de incrementar la frecuencia se debe considera la capacidad de flujo y la declinación del reservorio.
- Se recomienda la instalación del equipo BES con imán permanente de bajo caudal, en pozos que se encuentran operando en la zona de upthrust, con equipos BES de inducción sobre dimensionados.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ace International (2014). Metodología del Análisis Nodal. Quito-Ecuador

Activo Sacha (2018). Informe mensual de actividades, Bloque 60. Petroamazonas. Quito-Ecuador

Baby, P., Rivadeneira, M., Barragán, R., ed., Barragán, R., & ed. (2004). La Cuenca Oriente: GEOLOGÍA Y PETRÓLEO (1° Edición). QUITO-ECUADOR

BAKER HUGHES CENTRILIFT. (2009). BAKER HUGHES Sumergible Pump HANDBOOK (NINTH). U.S.A

Bearden, J. (2006). Electrical Submergible Pumps. En R. D. Wiggins M., Handbook of Facilities and Construction Engineering (pages. 625-711). Texas: Richardson, TX 75080-2040 USA.

Brown Kermit. (1984). Inflow performance: Vogels ecuation. The Technology of Artificial Lift Methods (Vol. 2). P. 14. Estados Unidos.

Camargo, E., Aguilar, J, Ríos, F., & (2009). An artificial lift production well model using nodal analysis. *Ciencia e Ingeniería*. 23-28.

Carranza C. (2010). Consideraciones para el diseño de una instalación de Bombeo Electrosumergible (BES) para el pozo Shushufindi SSFD 106D con alta relación gas-petróleo (GOR). Universidad Tecnológica Equinoccial, QUITO-ECUADOR.

Castellanos J. (2014). Análisis de los sistemas de levantamiento artificial por bombeo Electrosumergible convencional y bombeo electrosumergible con ahorro de energía en el campo Shushufindi. Universidad Tecnológica Equinoccial, Quito.

Cengel. Y. & Boles, M. (2006). *Termodinámica*. Quinta edición. Estados Unidos.

Centrilift, BAKER HUGHES. (1975). Submergible Pump HANBOOK (SIXTH). U.S.A.

Colorado M. (2016). Evaluación Técnico -Financiera del Rendimiento de los motores de Imanes Permanentes con Bombas Electrosumergibles de alta Eficiencia del Campo A Ubicado en La Cuenca Llanos Orientales. Fundación Universidad de América, Bogotá.

ESP OIL Engineering Consultants. (2004). Bombeo Electrosumergible: Análisis, Diseño, Optimización y Trouble Shooting (p. 180). Presentado en Work Shop International, Monagas-Venezuela.

Gad, M. A Fattah, G.Hassan, S.Zaied, A.Boccardi, A. Nady. & A. Sorour, (2017). Permanent Magnet Motor (Pmm) as The Right Solution For Electric Submersible Pump System Challenges In Beleyem Oilfields (Case Study). 14. Italia.

García, E., Sánchez, J., Baños, T., Molina, I., Valencia, F. & Tapia, R. (2015). Electric Submersible Pumping. First Application in a mature field in Mexico, Using Unconventional Technology with Synchronous Permanent Magnet (Motor PPM) + Power Save Pump. Society of Petroleum Engineers

Guerrón, J, & Robalino, D. (2013). Estudio de los resultados del cambio de sistema de Levantamiento Hidráulico a Electrosumergible en el Campo Sacha y Definición de Criterios para selección de pozos, enero. Universidad Central del Ecuador, Quito.

McCoy, J. N., Podio, A. L., & Drake, B. (2000). Electrical Submersible Pumps Components and Their Operational Features. Electrical Submersible Pumps. Manual Design, Operations, and Maintenance. Second edition. United States.

Melo, V (2019). Levantamiento Artificial, Quito – Ecuador.

NOVOMET (2018). NOVOMET PRODUCT CATALOG.

Núñez, M. (2017). Programa de Reacondicionamiento. Petroamazonas EP. Quito-Ecuador.

Pacific Rubiales Energy (2014). Evaluación Económica de Proyectos Petroleros. Bogotá-Colombia.

Petroamazonas EP. (2016). Departamento de Levantamiento Artificial. Quito-Ecuador.

Presentaciones Novomet (2017). Power Metallurgy Technology. Russia

Refai, A., Abdou, H. A. M., Seleim, A., Biasin, G., Reda, W., & Letunov, D. (2013). Permanent Magnet Motor application for ESP Artificial Lift. En North Africa Technical Conference and Exhibition. Cairo, Egypt: Society of Petroleum Engineers. <https://doi.org/10.2118/164666-MS>

Ruiz, Brito, & Marquez. (2014). Evaluation of Multiphase Flow Models To Predict Pressure Gradient in Vertical Pipes With Highly Viscous Liquids. Maracaibo: Society of Petroleum Engineers.

Takács, G. (2009). ESP Components and their Operational Features. En Electrical submersible pumps manual: design, operations, and maintenance (p. 68). Amsterdam: Gulf Professional Publ./Elsevier.

Valencia, P. (18 de noviembre de 2017). Bombeo Electrosumergible con Tecnología Power Save. (G. Guajala, Entrevistador)

Vega, G. (2018). Control Técnico de Exploración y Explotación. Resultados de Trabajos de Reacondicionamiento. Quito-Ecuador.

Vega, J. (2013). Los estudios de viabilidad para los negocios. (R. U. Mayañez, Ed.) Revista del UPRM, 1-3. Recuperado el 11 de Junio de 2016, de <http://www.uprm.edu/>

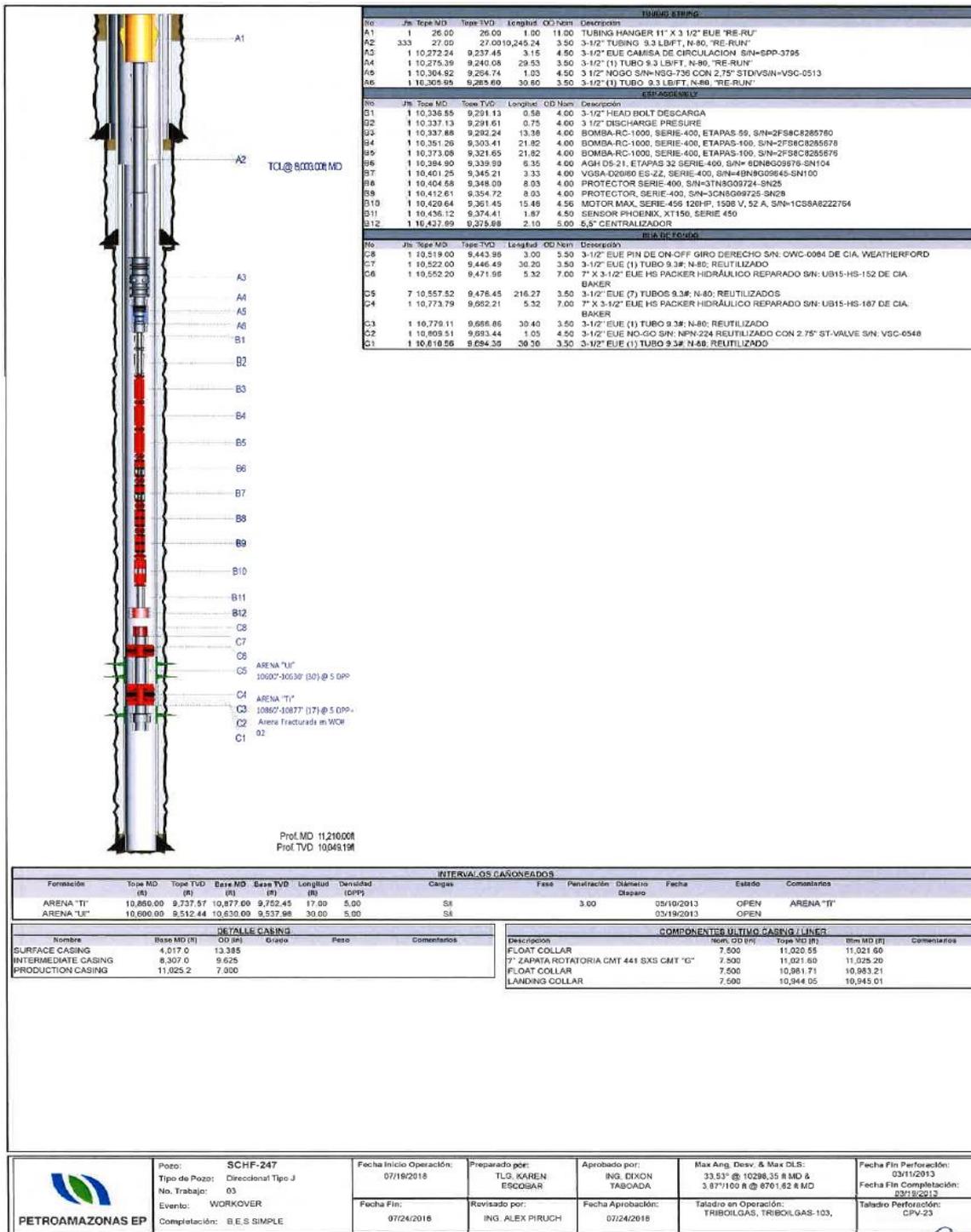
Xiao, J. J., & Lastra, R. (2018). Induction versus Permanent Magnet Motors for ESP Applications. SPE Kingdom of Saudi Arabia Annual Technical Symposium and Exhibition. Presentado en SPE Kingdom of Saudi Arabia Annual Technical

## **ANEXOS**

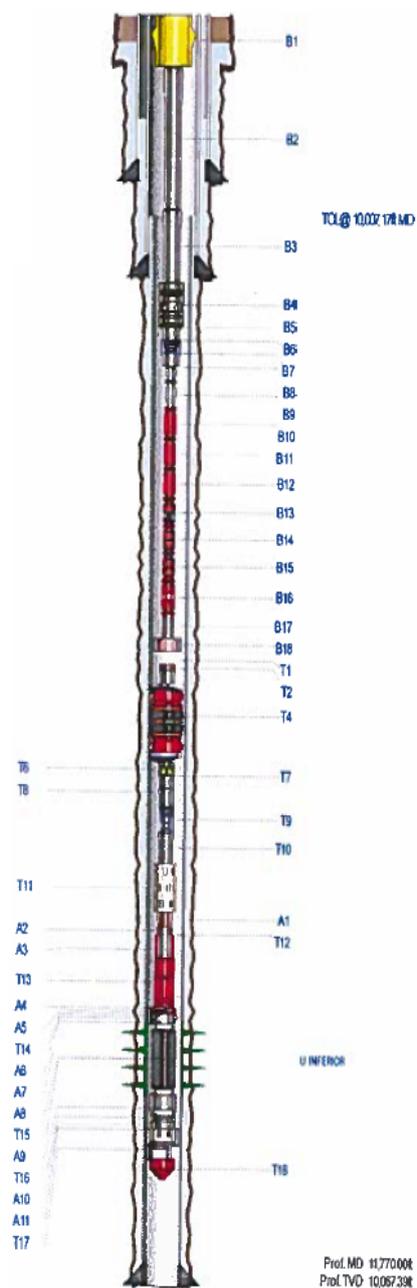
**ANEXO N.º 1**

**DIAGRAMAS MECÁNICOS DE LOS POZOS**

# SACHA-247



# SACHA-395



ESPASAMIENTO						
No	Jbs	Topo MD	Topo TVD	Longitud	OD Nom	Descripción
B1	1	36.80	36.80	1.00	11.00	1 1/2" X 3 1/2" EUE X 5000 PSI TUBING HANGER
B2	299	37.80	37.80	0,211.61	3.50	3 1/2" EUE (299) TUBOS, L-80, 9.3#, CLASE "B" (REPARADOS)
B3	46	9,249.41	7,927.99	1,445.08	3.50	3 1/2" EUE (46) TUBOS, L-80, 9.3#, TENARIS SL, CLASE "A"
B4	1	10,694.49	9,067.20	3.13	4.50	3 1/2" X 2.81" CAMISA TIPO "L" S/N: GG-0357
B5	1	10,697.92	9,089.90	31.47	3.50	3 1/2" EUE (1) TUBO, L-80, 9.3#, TENARIS SL, CLASE "A"
B6	1	10,729.09	9,117.03	1.00	4.50	3 1/2" X 2.75" NO-GO (NUEVO, SERTECPE) N/P: N-8075192 CON 2.75" STD-VALVE S/N: VSC-949R
B7	1	10,730.09	9,117.89	31.48	3.50	3 1/2" EUE (1) TUBO, L-80, 9.3#, TENARIS SL, CLASE "A"
B8	1	10,761.57	9,145.13	0.62	4.00	3 1/2" DESCARGA EUE, SERIE 400.
B9	1	10,762.19	9,145.68	0.78	4.00	DESCARGA DE PRESIÓN PHOENIX, SERIE 400.
B10	1	10,762.97	9,146.34	17.62	4.00	BOMBA D460N 164 STG CR-CT RLOY BTHD, INC. ARZ-TT, NFS, SERIE 400, S/N: 2F57D805082
B11	1	10,780.59	9,161.82	17.62	4.00	BOMBA D460N 164 STG CR CT RLOY BTHD, INC. ARZ-TT, NFS, SERIE 400, S/N: 2F57G4054575
B12	1	10,798.21	9,176.83	8.38	4.00	AGH 32 D5-21 CR-CT RLOY BTHD, INC. ES-TT, NFS, SERIE 400, S/N: 8096K7783226
B13	1	10,804.59	9,182.49	3.38	4.00	VGSA SEPARADOR DE GAS D90-60, RLOY INC, ES, EXTD HEAD-NFS; SERIE 400, S/N: 4BNA02654-SN54
B14	1	10,807.95	9,185.41	8.03	4.00	PROTECTOR BPBSL-UT, INC, RLOY, FACT SHM, MAX, SERIE 400, S/N: 3T57G8157984
B15	1	10,815.98	9,192.41	8.03	4.00	PROTECTOR BPBSL-S-LT, INC, RLOY, FACT SHM, MAX, SERIE 400, S/N: 3C57G8158097
B16	1	10,824.01	9,199.43	15.50	4.56	MOTOR 120 HP I1508V52ARA-S, RLOY, M-TRM, GRB, MAX, SERIE 456, S/N: 1C57F7996121
B17	1	10,859.51	9,212.98	1.87	4.50	SENSOR XT150 TIPO 1, SERIE 450, S/N: S113X17JN10885
B18	1	10,841.38	9,214.82	1.86	5.50	5 1/2" CENTRALIZADOR
CONJUNTO TOP						
No	Jbs	Topo MD	Topo TVD	Longitud	OD Nom	Descripción
T1	1	11,014.07	9,387.35	1.90	5.50	5-1/2" X 2-7/8" CAMPANA ON-OFF SOLA, GIRO ZIRO, S/N: OPB-0036 (PETROTECH)
T2	1	11,015.87	9,389.04	31.08	2.88	2-7/8" EUE (1) TUBO, N-80, 6.5# (RE-RUN)
T3	1	11,047.05	9,389.67	1.57	3.50	X-OVER 2-7/8" EUE BOX X 3-1/2" EUE PIN (PETROTECH)
T4	1	11,048.02	9,390.06	7.98	7.00	7" X 3-1/2" PACKER MECÁNICO ARROW SET S/N: KCP-ARW-0044 (PETROTECH)
T5	1	11,056.00	9,495.16	1.08	4.50	X-OVER 3-1/2" EUE BOX X 2-7/8" EUE PIN (PETROTECH)
T6	1	11,057.58	9,496.13	1.93	2.88	2-7/8" EUE MARCA RADIOACTIVA
T7	1	11,059.81	9,497.84	30.94	2.88	2-7/8" EUE (1) TUBO, N-80, 6.5# (RE-RUN)
T8	1	11,060.55	9,435.40	4.08	2.88	2-7/8" EUE (1) PUP JOINT, L-80, 6.5# (NUEVO)
T9	1	11,094.61	9,439.03	0.96	3.50	2-7/8" X 2.25" NO-GO TIPO "R" S/N: NAB-0178 (REPARADO) CON 2.25" STD-VALVE, S/N: VAB-0187
T10	2	11,095.57	9,439.88	61.90	2.88	2-7/8" EUE (2) TUBOS, N-80, 6.5# (RE-RUN)
T11	1	11,157.47	9,495.32	2.15	4.00	2-7/8" DROP BAR TUBING RATHOLE VALVE DTRY (VÁLVULA DE PRODUCCIÓN)
T12	1	11,159.62	9,497.25	30.70	2.88	2-7/8" EUE (1) TUBO, N-80, 6.5# (RE-RUN)
T13	1	11,190.32	9,524.89	5.05	3.88	3-3/8" FIRE HEAD BHP CABEZA DE DISPARO MECÁNICA
T14	1	11,195.37	9,529.45	14.83	4.50	4-1/2" SAFETY SPACER (CAÑÓN ESPACIADOR DE SEGURIDAD)
T15	1	11,210.00	9,542.87	27.90	4.50	4-1/2" CAÑÓN CON CARGAS POWER JET 4506 RDX @ 5 DPP
T16	1	11,237.00	9,567.13	2.15	4.50	4-1/2" DELAY FUSE (RETARDADOR DE DETONACIÓN)
T17	1	11,239.15	9,568.08	19.79	4.50	4-1/2" CAÑÓN VACÍO PARA DESBALANCE DINÁMICO (SISTEMA P3)
T18	1	11,258.94	9,567.07	0.65	4.50	4-1/2" BULL NOSE
CAÑONES OHP TOP						
No	Jbs	Topo MD	Topo TVD	Longitud	OD Nom	Descripción
A1	1	11,188.40	9,523.88	0.68	3.35	FIRING HEAD PULLING TOOL
A2	1	11,189.06	9,523.75	0.82	3.38	X-OVER API 3-3/8X 2-3/8
A3	1	11,189.88	9,524.49	7.90	3.38	3-3/8" HTD MK 3 CABEZA HIDRÁULICA CON 9.7 H TIME DELAY
A4	1	11,196.68	9,530.81	0.55	3.28	TOP SUB
A5	1	11,197.43	9,531.31	0.32	4.50	BALISTIC CONNECTOR
A6	1	11,197.75	9,531.80	0.47	5.56	X-OVER API CENTRALIZER
A7	1	11,198.22	9,532.02	11.72	4.50	SAFETY SPACER 4.5 KLB GUN CARRIER
A8	1	11,209.94	9,542.81	27.00	4.50	27 FT CAÑÓN 4-1/2" 5 DPP 89 FASE DEEP PENETRATION
A9	1	11,236.94	9,567.07	1.30	5.56	X-OVER API CENTRALIZER
A10	1	11,238.24	9,568.25	0.32	4.50	BALISTIC CONNECTOR
A11	1	11,239.56	9,568.54	5.48	5.78	SCLP DUAL GRIP PACKER

INTERVALOS CAÑONEADOS													
Fenómeno	Topo MD (ft)	Topo TVD (ft)	Base MD (ft)	Base TVD (ft)	Longitud (ft)	Densidad (gpp)	Cargas	Peso	Penetración	Diferencia Diámetros	Fecha	Estado	Comentarios
U INFERIOR	11,210.00	9,542.67	11,237.00	9,567.13	27.00	5.00	POWER JET 4506	60.00	52.20	0.39	12/25/2017	OPEN	"U": 11210' - 11237' (2) @ SOPP: W0W2
U INFERIOR	11,210.00	9,542.67	11,237.00	9,567.13	27.00	5.00	SA				06/13/2014	OPEN	C&PI

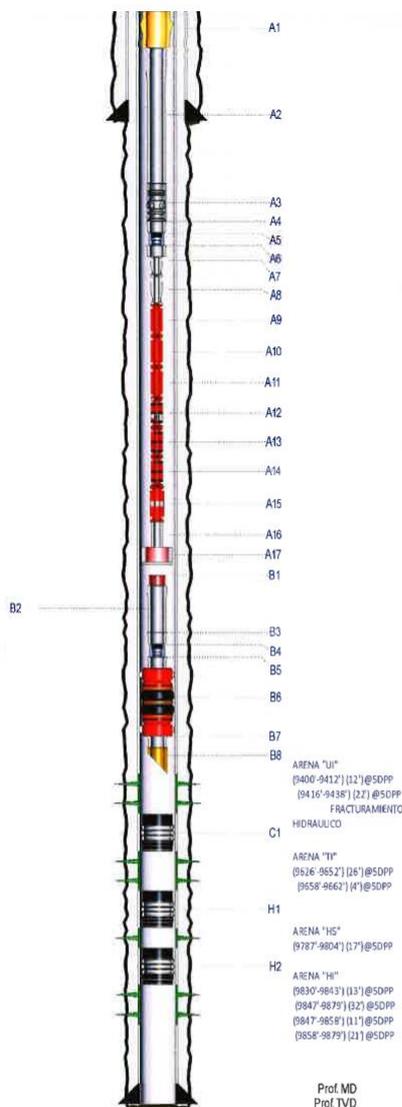
  

DETALLE CASING					COMPONENTES ÚLTIMO CASING / LINER					
Nombre	Base MD (ft)	OD (ft)	Grado	Peso	Comentarios	Descripción	Num. OHP (ft)	Topo MD (ft)	Btm MD (ft)	Comentarios
CONDUCTOR CASING	6,014.9	13.375	K-55	68		LANDING COLLAR,	7,000	11,691.08	11,692.08	
INTERMEDIATE CASING	10,145.0	9.625	N-80	47		CASING SHOE	7,000	11,765.05	11,768.00	
PRODUCTION LINER	11,768.0	7.000	P-110	26						

ELEVACIONES				CABEZAL		MATERIALES USADOS/ COMENTARIOS
Nombre	Elevación (ft)	Is Depth	Depth PDV-73	Tipo:	Modelo:	
ORIGINAL KB	867.80	Y	-None-	SIMPLE	13 5/8 x 3000 psi	90 PROTECTOR GRIPPY 35F16-19/80 (REPARADO) + 167 MID JOINT GRIPPY 35F16-19/80 (REPARADO) + 245 PROTECTOR GRIPPY 35F16-19/80 (USADOS) + 178 MID JOINT GRIPPY 35F16-19/80 (USADOS) + 1 PROTECTORES LIZER SERIE 456 + 8 PROTECTORES LOW PROFILE + 14 BANDAS 3/4" EN EQUIPO BE S + 11 BANDAS 3/4" EN BHA + 14 BANDAS 3/4" EN TUBERÍA + 78' DE MLE, PESO SUBIENDO 152 KLB PE 90 BAJANDO 120 KLB. 10709 21 FT DE CABLE # 4 CON CAPILAR 3/8" PROPIEDAD DE SCHLUMBERGER A MODO RENTA.
GROUND LEVEL	831.10	N	-None-	Marca:	CABE-VÁLVULAS DEL PACÍFICO	
Diferencia (EMR)	36.80			Presión (psi):	3,000.00	
				Tamaño (in):	13.63	

# SACHA-137



ESPASSEMBLY						
No	Jts	Topo MD	Topo TVD	Longitud	OD Nom	Descripción
A1	1	22.00	22.00	1.00	7.06	7-1/16" x 3-1/2" EUE x 5000 PSI HANGER
A2	298	23.00	23.00	0.007.35	3.50	(279) JUNTAS 3-1/2" EUE TUBING, 9.3 LBS/FT, N-80, CLASE "B", RE-RUN, (9) JUNTAS 3-1/2" EUE CLASE "B" DE STOCK ORN
A3	1	9,010.35	9,010.35	3.13	3.50	3-1/2" EUE CAMISA DE CIRCULACION S/N: S36-18109 (NUEVO SERTECPET)
A4	1	9,013.48	9,013.48	30.38	3.50	3-1/2" EUE (1) TUBO, N-80, 9.3 LBS/FT, RE-RUN
A5	1	9,043.86	9,043.86	1.00	3.50	3-1/2" NOGO S/N: 028-OP-6729 (NUEVO SERTECPET) CON 2.75" ST. VALVE S/N: VSC-0422 (REPARADO)
A6	1	9,044.86	9,044.86	30.36	3.50	3-1/2" EUE (1) TUBO, N-80, 9.3 LBS/FT, RE-RUN
A7	1	9,075.22	9,075.22	0.59	4.00	3-1/2" EUE HEAD BOLT ON DISCHARGE, SERIE 400
A8	1	9,075.81	9,075.81	0.75	4.00	3-1/2" EUE DESCARGA DE PRESION PHOENIX, SERIE 400
A9	1	9,076.56	9,076.56	17.60	4.00	BOMBA 1, D460N 154 STG, SERIE 400, S/N: 2FS8C8424184
A10	1	9,094.16	9,094.16	17.60	4.00	BOMBA 2, D460N 154 STG, SERIE 400, S/N: 2FS8C8424187
A11	1	9,111.76	9,111.76	6.35	4.00	AGH D5-21, SERIE 400, S/N: 6DS7R200853
A12	1	9,118.11	9,118.11	3.20	4.00	INTAKE/SEP DE GAS VGSA-S20-80, SERIE 400, S/N: 4BS9C068917
A13	1	9,121.31	9,121.31	8.90	4.00	PROTECTOR 1, SERIE 400, BPBSL-LT MAXIMUS, S/N: 3TNBF08191-SN41
A14	1	9,130.21	9,130.21	8.90	4.00	PROTECTOR 2, SERIE 400, BPBSL-LT MAXIMUS, S/N: 3CNBF08162-SN48
A15	1	9,139.11	9,139.11	19.70	4.56	MOTOR MAXIMUS, 180 HP, 2520V, 46 6 A, SERIE 456 S/N= 1CS8A8285598
A16	1	9,158.81	9,158.81	1.90	4.50	SENSOR PHOENIX SERIE 450, S/N: S113X17JN109
A17	1	9,160.71	9,160.71	2.50	6.00	7" CENTRALIZADOR

BHA DE FONDO						
No	Jts	Topo MD	Topo TVD	Longitud	OD Nom	Descripción
B1	1	9,202.47	9,202.47	2.15	5.50	5-1/2" x 3-1/2" CAMPANA ON-OFF GIRO IZQUIERDO (SLB NUEVO)
B2	1	9,204.62	9,204.62	1.80	3.50	3-1/2" EUE PUP JOINT (SLB NUEVO)
B3	1	9,206.42	9,206.42	30.87	3.50	3-1/2" EUE (1) TUBO, N-80, 9.3 LBS/FT, RE-RUN
B4	1	9,237.29	9,237.29	1.06	3.50	3-1/2" NO-GO S/N=NPC-0067 (NUEVO PETROTECH) CON STDV 2.75" S/N VSC-0444
B5	1	9,238.35	9,238.35	30.91	3.50	3-1/2" EUE (1) TUBO, N-80, 9.3 LBS/FT, RE-RUN
B6	1	9,269.26	9,269.26	7.90	7.00	7" X 3-1/2" EUE PKR ARROWSET MECANICO DERECHO, SERIE (ARW-0012), REPARADO
B7	1	9,277.16	9,277.16	30.85	3.50	3-1/2" EUE (1) TUBO, N-80, 9.3 LBS/FT, RE-RUN
B8	1	9,308.01	9,308.01	0.49	3.50	3-1/2" EUE COUPLING BISELADO, REUTILIZADO DE UN TUBO DEL POZO

CIBP						
No	Jts	Topo MD	Topo TVD	Longitud	OD Nom	Descripción
C1	1	9,560.00	9,560.00	2.00	7.00	EZ DRILL 7" (HALLIBURTON NUEVA)

CIBP						
No	Jts	Topo MD	Topo TVD	Longitud	OD Nom	Descripción
H1	1	9,720.00	9,720.00	2.00	7.00	CIBP

CIBP						
No	Jts	Topo MD	Topo TVD	Longitud	OD Nom	Descripción
H2	1	9,826.00	9,826.00	2.00	7.00	CIBP

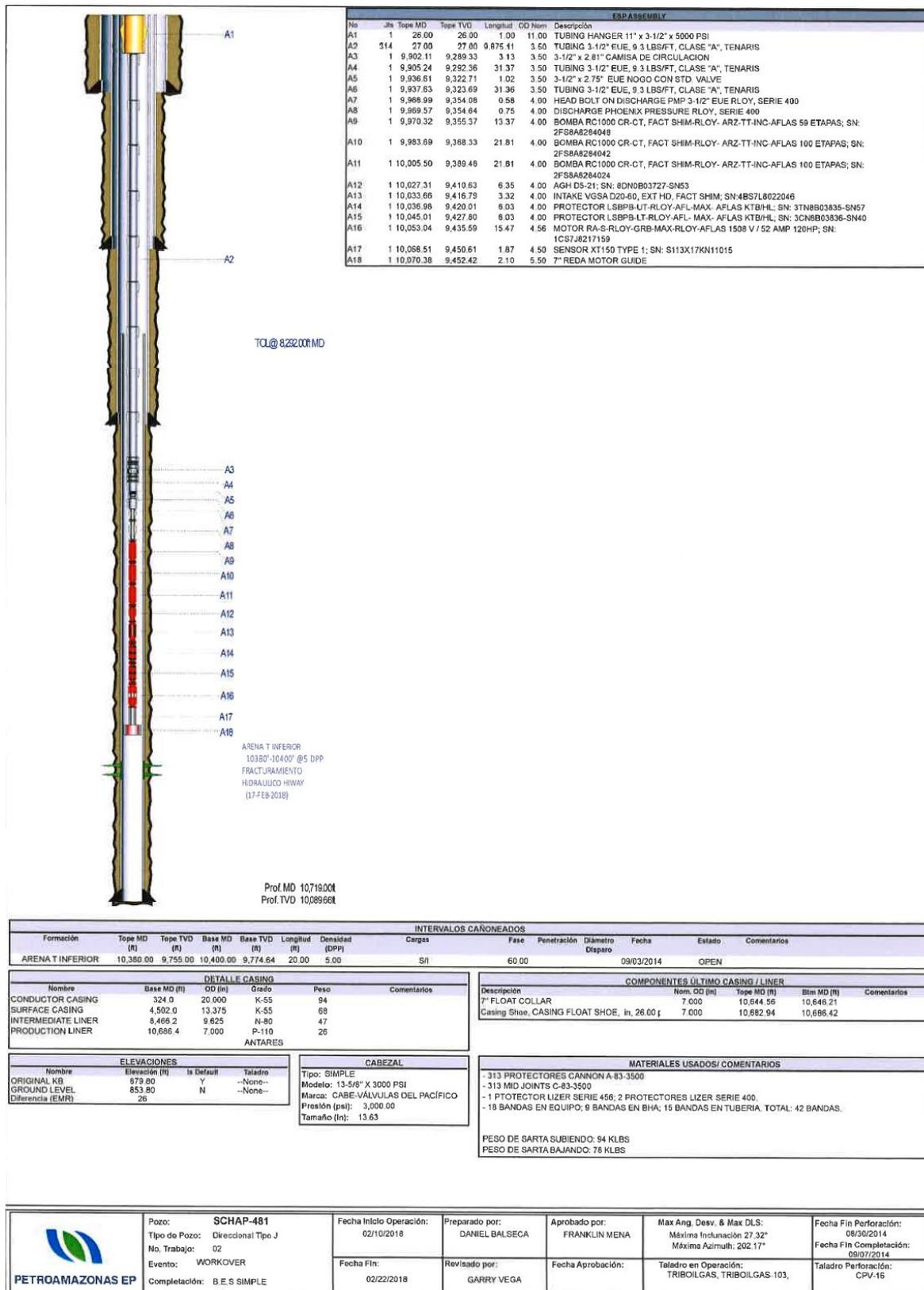
Prof MD  
Prof TVD

INTERVALOS CAÑONEADOS													
Formación	Topo MD (ft)	Topo TVD (ft)	Base MD (ft)	Base TVD (ft)	Longitud (ft)	Densidad (DPF)	Cargas	Fase	Penetración	Díametro Diapero	Fecha	Estado	Comentarios
ARENA "UI"	9,416.00	9,418.00	9,436.00	9,436.00	20.00	5.00	MAX FORCE	60.00	5.00	5.00	06/09/2018	OPEN	RECAÑONEO ARENA U INFERIOR
ARENA "UI"	9,400.00	9,400.00	9,412.00	9,412.00	12.00	5.00	SI	60.00	5.00	5.00	12/31/2010	OPEN	
ARENA "UI"	9,416.00	9,416.00	9,438.00	9,438.00	22.00	5.00	SI	60.00	5.00	5.00	12/31/2010	OPEN	
ARENA "TI"	9,626.00	9,626.00	9,652.00	9,652.00	26.00	5.00	SI	35.00	5.00	5.00	10/30/2005	OPEN	
ARENA "TI"	9,658.00	9,658.00	9,662.00	9,662.00	4.00	5.00	SI	35.00	5.00	5.00	10/30/2005	OPEN	
ARENA "HS"	9,787.00	9,787.00	9,804.00	9,804.00	17.00	5.00	SI	35.00	5.00	5.00	12/04/2004	OPEN	
ARENA "HI"	9,850.00	9,830.00	9,843.00	9,843.00	13.00	5.00	SI	35.00	5.00	5.00	02/11/2001	OPEN	
ARENA "HI"	9,847.00	9,847.00	9,858.00	9,858.00	11.00	5.00	SI	35.00	5.00	5.00	02/11/2001	OPEN	
ARENA "HI"	9,858.00	9,858.00	9,879.00	9,879.00	21.00	5.00	SI	35.00	5.00	5.00	02/11/2001	OPEN	
ARENA "HI"	9,847.00	9,847.00	9,879.00	9,879.00	32.00	5.00	SI	35.00	4.00	4.00	11/20/1994	OPEN	

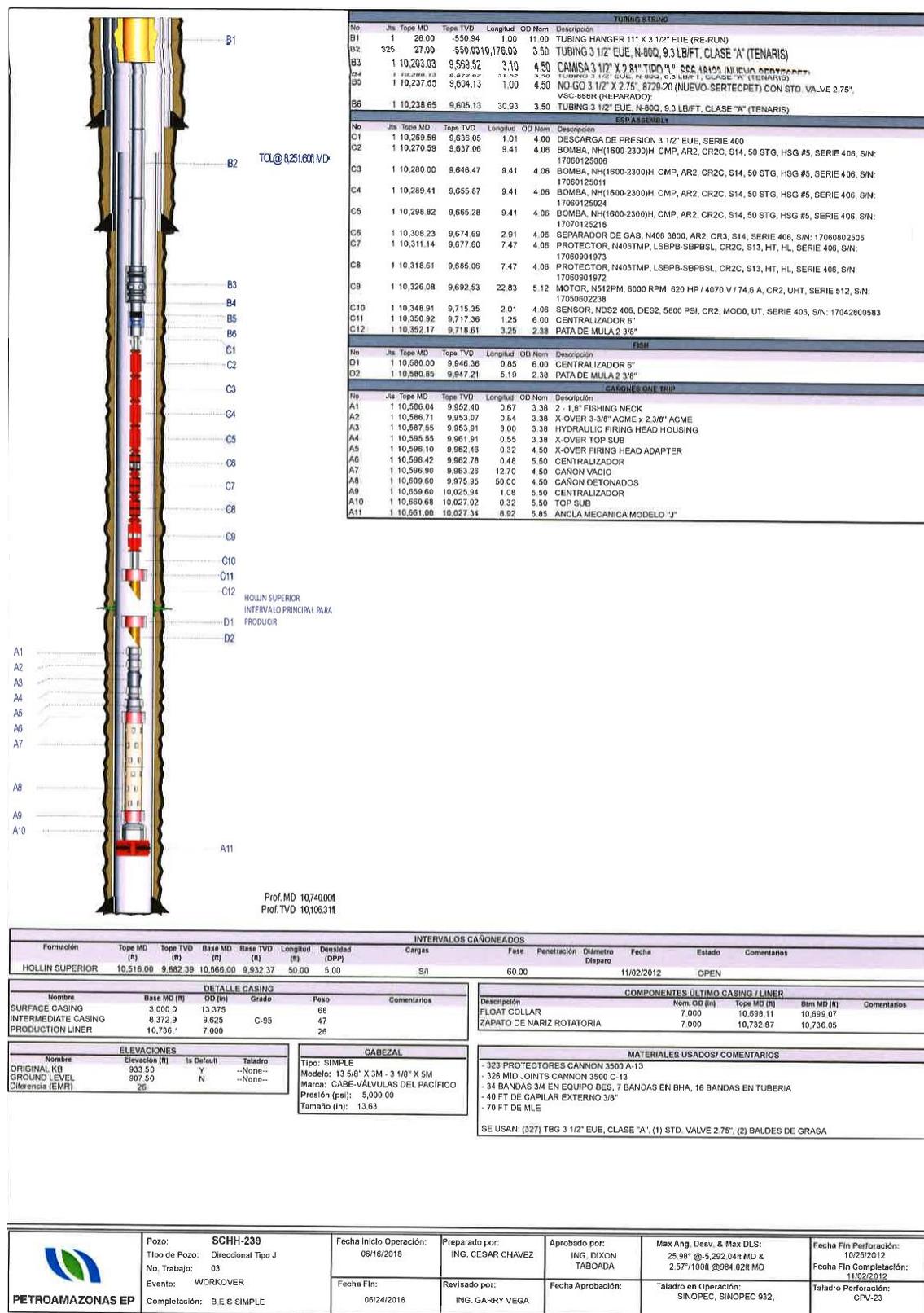
DETALLE CASING					COMPONENTES ÚLTIMO CASING L LINER				
Nombre	Base MD (ft)	OD (ft)	Grado	Peso	Descripción	Nom. OD (ft)	Topo MD (ft)	Base MD (ft)	Comentarios
SURFACE CASING	2,878.0	10.750	K-55	40.50	Float Collar	7.000	9,824.00	9,824.50	
PRODUCTION CASING	9,968.0	7.000	N-80	26	Casing Shoe	7.000	9,966.50	9,968.00	

	Pozo: <b>SCH-137</b> Tipo de Pozo: Vertical No. Trabajo: 07 Evento: WORKOVER Completación: B.E.S SIMPLE	Fecha Inicio Operación: 06/01/2018 Fecha Fin: 06/12/2018	Preparado por: DANIEL BALSECA Revisado por: LUIS PEÑAHERRERA	Aprobado por: FRANKLIN MENA Fecha Aprobación:	Max Ang. Dev. & Max DLS: Taladro en Operación: TRIBOILGAS, TRIBOILGAS-103,	Fecha Fin Perforación: 11/10/1994 Fecha Fin Completación: 11/28/1994 Taladro Perforación:
--	---	---	---	--	---	---

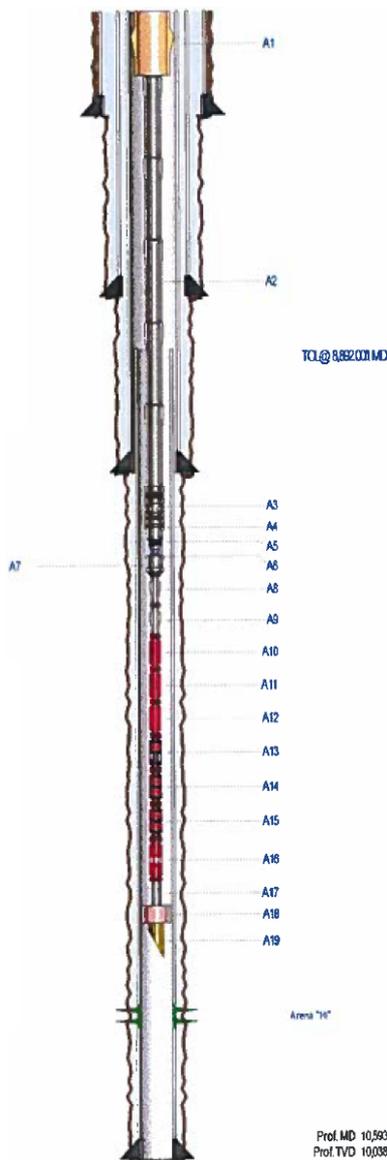
# SACHA-481



# SACHA-239



# SACHA-228



ESP ASSEMBLY						
No	Topo MD	Topo TVD	Longitud	OD Nom	Description	
A1	1	35.00	1.01	11.00	TBG HANGER 11" X 3-1/2" EUE	
A2	320	36.01	36.01	9.871 45	3-1/2" EUE TBG, 9.3LBS/FT, N-80 RIE RUN	
A3	1	9,907.48	9,960.38	2.93	3-1/2" x 2.81" EUE CAMISA DE CIRCULACION SAC-0039	
A4	1	9,910.39	9,963.24	30.80	3-1/2" EUE TBG, 9.3LBS/FT, N-80 (1 JUNTA)	
A5	1	9,941.19	9,993.57	1.01	3-1/2" EUE NOGO WSTD, VALVE 2.75"	
A6	1	9,942.20	9,994.56	30.75	3-1/2" EUE TBG, 9.3LBS/FT, N-80 (1 JUNTA)	
A7	1	9,972.95	9,424.85	0.90	3-1/2" EUE BOX x 2-7/8" EUE PIN X-OVER	
A8	1	9,973.85	9,425.74	0.82	DISCHARGE PRESSURE SUB 2-7/8"	
A9	1	9,974.67	9,426.54	0.74	BOH 2-7/8" BRD EUE SERIE CR3	
A10	1	9,975.41	9,427.27	12.66	BOMBA SUPERIOR: NFG10-630H, HSGAR2, CR2C, S14, 105 STG, S/N: 140603838	
A11	1	9,986.07	9,438.74	12.86	BOMBA INTERMEDIAL: NFG10-630H, HSGAR2, CR2C, S14, 105 STG, S/N: 140603879	
A12	1	10,000.73	9,452.22	12.86	BOMBA INFERIOR: NFG10-630H, HSGAR2, CR2C, S14, 105 STG, S/N: 140608959	
A13	1	10,013.39	9,464.69	2.93	4.06 SEPARADOR DE GAS N406GS, 3500 DES2 AR2 CR3 S/N: 17060802324	
A14	1	10,016.32	9,467.58	7.48	4.06 PROTECTOR N406, TMP LSPB-SBPBOL, S13, S/N: 17060901920	
A15	1	10,023.80	9,474.95	7.48	4.06 PROTECTOR N406, TMP LSPB-SBPBOL, S13, S/N: 17060901921	
A16	1	10,031.28	9,482.32	10.10	4.60 MOTOR N460, 8000 RPM, 135HP/3150V, 21.3A, CR2, HT, S/N: 17050602195	
A17	1	10,041.38	9,492.28	2.02	3.78 SENSOR ND82, 406, CR2, S/N: 18102801831	
A18	1	10,043.40	9,494.27	1.25	6.00 6" CENTRALIZADOR	
A19	1	10,044.65	9,495.50	3.25	2.88 2-7/8" PATA DE MUJA	

INTERVALOS CARONEADOS												
Formación	Topo MD (ft)	Topo TVD (ft)	Base MD (ft)	Base TVD (ft)	Longitud (ft)	Densidad (g/cm³)	Cargas	Fase	Penetración (ft)	Fecha	Estado	Comentarios
Arena 1H	10,481.00	9,907.36	10,482.00	9,928.20	21.80	5.00	S1	35.00		01/17/2009	OPEN	

DETALLE CASING						COMPONENTES ÚLTIMO CASING / LINER				
Nombre	Base MD (ft)	OD (in)	Grado	Peso	Comentarios	Descripción	Nom. OD (in)	Topo MD (ft)	Base MD (ft)	Comentarios
CONDUCTOR CASING	40.0	20.000		64		7" ZAPATO	7.000	10,588.50	10,590.00	
SURFACE CASING	5,856.5	13.375	C-95	72		7" COLLAR FLOTADOR	7.000	10,547.00	10,549.00	
INTERMEDIATE CASING	9,117.5	9.625	N-80	47						
PRODUCTION LINER	10,590.0	7.800	C-95	28						

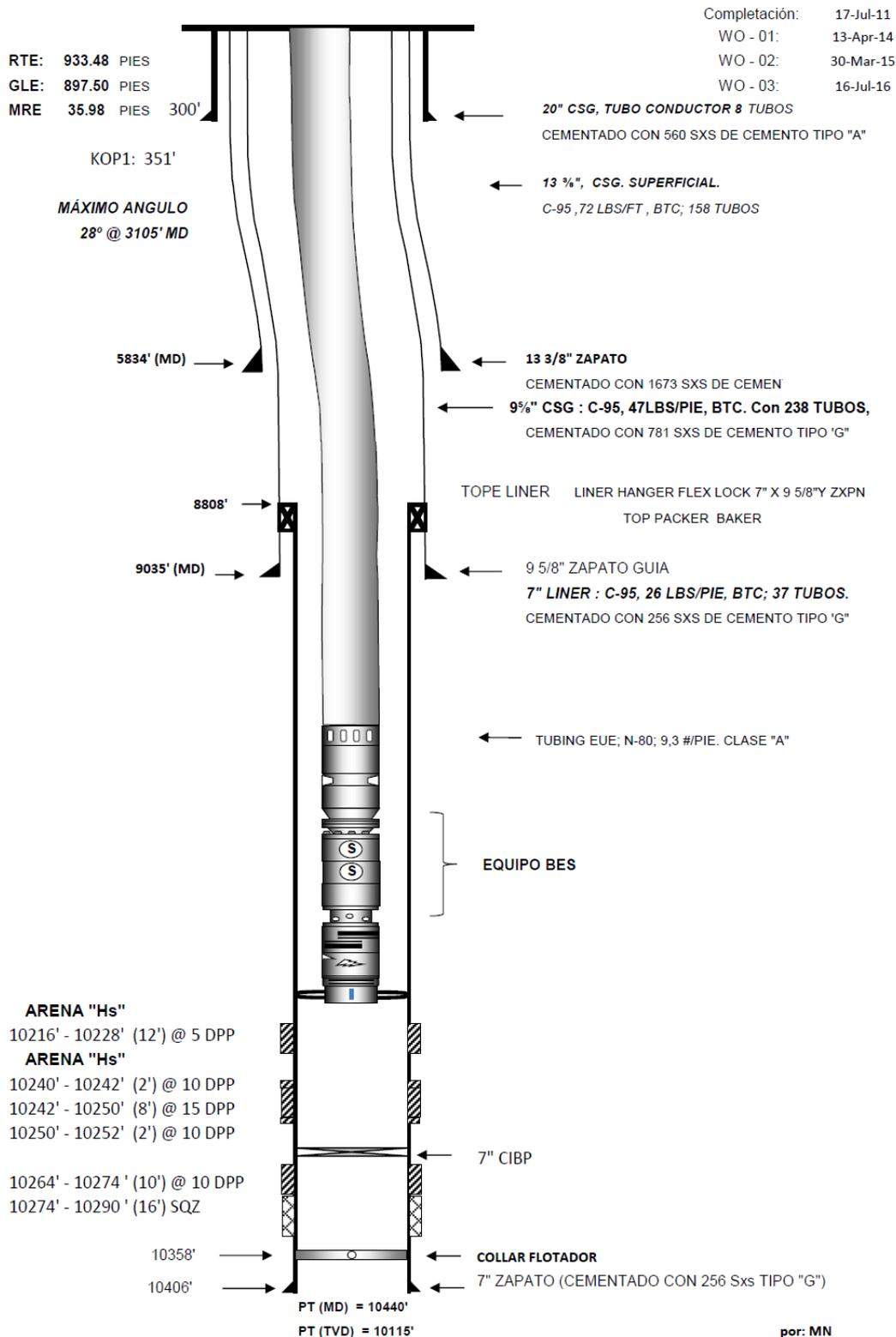
  

ELEVACIONES				CABEZAL		MATERIALES USADOS/COMENTARIOS
Nombre	Elevación (ft)	Is Default	Tolerancia	Tipo:	Modelo:	
ORIGINAL KB	933.00	Y	SINOPEC 191	SIMPLE	11 X 3-1/8" X 5M	(322) 3-1/2" EUE TBG, (31) 3/4" BANDAS EN EQUIPO, (10) 3/4" BANDAS EN BHA, (11) 3/4" BANDAS EN TUBERIA, (226) PROTECTORES GRIPPY, (93) PROTECTORES CANNON P/N: 3500
GROUND LEVEL (Altura) (EMR)	898.00	N	SINOPEC 191	Marca:	CABE-MISSIHPETROLEUM S A	A13, (226) MID JOINTS GRIPPY, (91) MID JOINTS CANNON P/N: 3500 C-13, 9928 94 PIES DE CABLE FLAT + 70.33 PIES DE CABLE MLE
	35.00			Presión (psi):	2,500.00	
				Tamaño (in):	11.00	

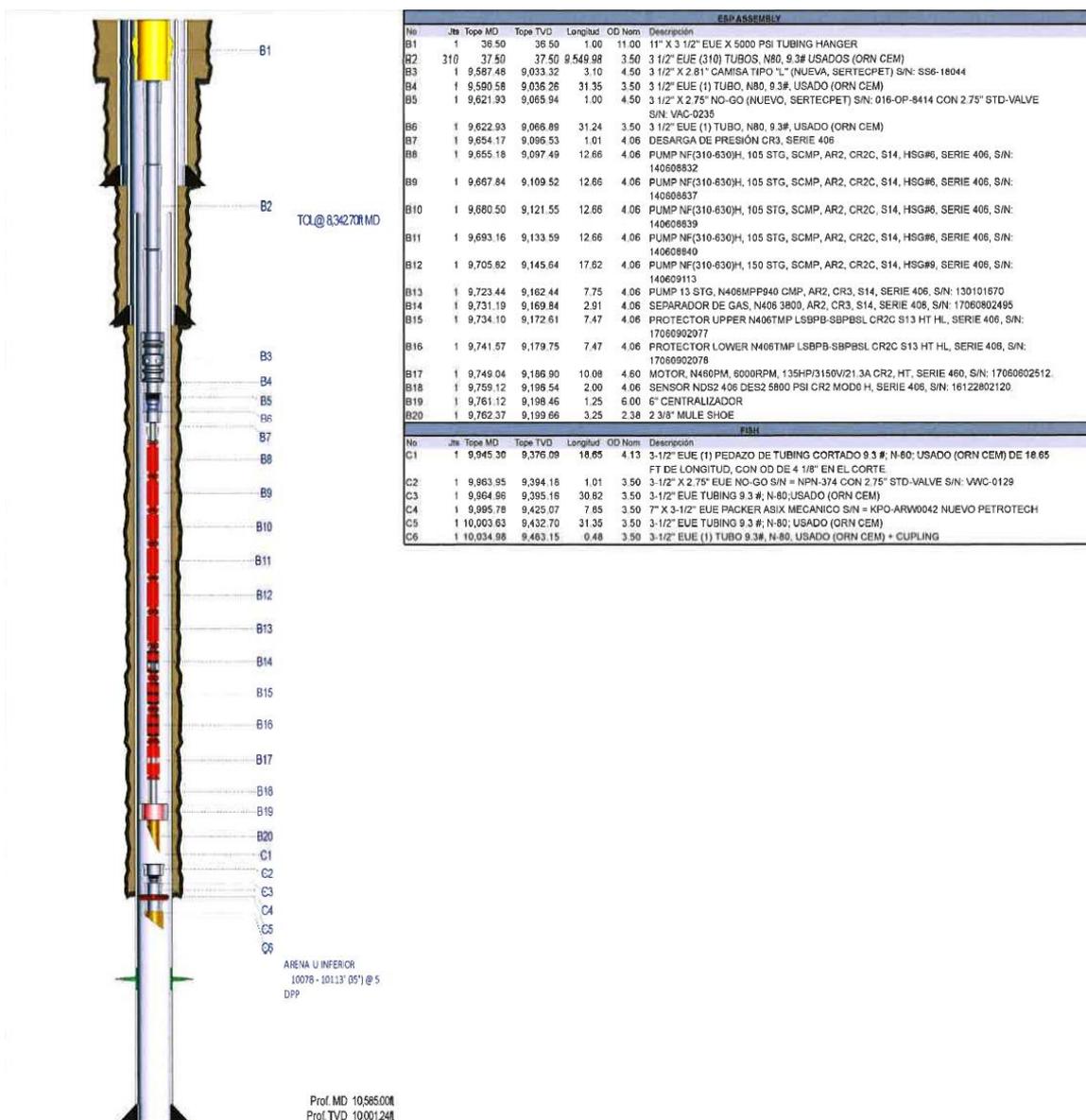
	Pozo: <b>SCHH-228</b> Tipo de Pozo: <b>Direccional Tipo J</b> No. Trabajo: <b>04</b> Evento: <b>WORKOVER</b> Completación: <b>B E S SIMPLE</b>	Fecha Inicio Operación: <b>09/30/2017</b>	Preparado por: <b>DIEGO VASQUEZ</b>	Aprobado por: <b>MAYRA NUÑEZ</b>	Max. Ang. Dev. & Max DLS: <b>23.42° @ 8,292.804 MD &amp; 3.45°/100ft @ 8,451.00ft MD</b>	Fecha Fin Perforación: <b>12/9/2008</b> Fecha Fin Completación: <b>01/25/2009</b>
		Fecha Fin: <b>10/05/2017</b>	Revisado por: <b>LENN GARCIA</b>	Fecha Aprobación: <b>10/10/2017</b>	Taladro en Operación: <b>PETROTECH, PETROTECH 04</b>	Taladro Perforación: <b>SINOPEC 191</b>

# SACHA-231

## DIAGRAMA PROPUESTO WO - 04



# SACHA-425



ESPASSEMBLY						
No	Jts	Tope MD	Tope TVD	Longitud	OD Nom	Descripción
B1	1	36.50	36.50	1.00	11.00	11" X 3 1/2" EUE X 5000 PSI TUBING HANGER
B2	310	37.50	37.50	9.549.98	3.50	3 1/2" EUE (310) TUBOS, N80, 9.3# USADOS (ORN CEM)
B3	1	9.587.48	9.033.32	3.10	4.50	3 1/2" X 2.81" CAMISA TIPO "L" (NUEVA, SERTECPET) S/N: SS6-18044
B4	1	9.590.58	9.036.26	31.35	3.50	3 1/2" EUE (1) TUBO, N80, 9.3#, USADO (ORN CEM)
B5	1	9.621.93	9.065.94	1.00	4.50	3 1/2" X 2.75" NO-GO (NUEVO, SERTECPET) S/N: 016-OP-8414 CON 2.75" STD-VALVE S/N: VAC-0235
B6	1	9.622.93	9.066.89	31.24	3.50	3 1/2" EUE (1) TUBO, N80, 9.3#, USADO (ORN CEM)
B7	1	9.654.17	9.096.53	1.01	4.06	DESARGA DE PRESION CR3, SERIE 406
B8	1	9.655.18	9.097.49	12.66	4.06	PUMP NF(310-630)H, 105 STG, SCMP, AR2, CR2C, S14, HSG#6, SERIE 406, S/N: 140608832
B9	1	9.667.84	9.109.52	12.66	4.06	PUMP NF(310-630)H, 105 STG, SCMP, AR2, CR2C, S14, HSG#6, SERIE 406, S/N: 140608837
B10	1	9.680.50	9.121.55	12.66	4.06	PUMP NF(310-630)H, 105 STG, SCMP, AR2, CR2C, S14, HSG#6, SERIE 406, S/N: 140608939
B11	1	9.693.16	9.133.59	12.66	4.06	PUMP NF(310-630)H, 105 STG, SCMP, AR2, CR2C, S14, HSG#6, SERIE 406, S/N: 140608940
B12	1	9.705.62	9.145.64	17.62	4.06	PUMP NF(310-630)H, 150 STG, SCMP, AR2, CR2C, S14, HSG#9, SERIE 406, S/N: 140609113
B13	1	9.723.44	9.162.44	7.75	4.06	PUMP 13 STG, N406MPP940 CMP, AR2, CR3, S14, SERIE 406, S/N: 130101670
B14	1	9.731.19	9.169.84	2.91	4.06	SEPARADOR DE GAS, N406 3800, AR2, CR3, S14, SERIE 406, S/N: 17060802495
B15	1	9.734.10	9.172.61	7.47	4.06	PROTECTOR UPPER N406TMP LSBPB-SBPBSL CR2C S13 HT HL, SERIE 406, S/N: 17060902077
B16	1	9.741.57	9.179.75	7.47	4.06	PROTECTOR LOWER N406TMP LSBPB-SBPBSL CR2C S13 HT HL, SERIE 406, S/N: 17060902078
B17	1	9.749.04	9.186.90	10.08	4.80	MOTOR, N460PM, 6000RPM, 135HP/3150V/21.3A CR2, HT, SERIE 460, S/N: 17060802512
B18	1	9.759.12	9.196.54	2.00	4.06	SENSOR NDS2 406 DES2 5900 PSI CR2 MOD0 H, SERIE 406, S/N: 16122802120
B19	1	9.761.12	9.198.46	1.25	6.00	6" CENTRALIZADOR
B20	1	9.762.37	9.199.66	3.25	2.38	2 3/8" MULE SHOE

PSH						
No	Jts	Tope MD	Tope TVD	Longitud	OD Nom	Descripción
C1	1	9.945.30	9.376.09	18.65	4.13	3-1/2" EUE (1) PEDAZO DE TUBING CORTADO 9.3 #, N-80; USADO (ORN CEM) DE 18.65 FT DE LONGITUD, CON OD DE 4 1/8" EN EL CORTE
C2	1	9.963.95	9.394.18	1.01	3.50	3-1/2" X 2.75" EUE NO-GO S/N = NPN-374 CON 2.75" STD-VALVE S/N: WVC-0129
C3	1	9.964.96	9.395.16	30.62	3.50	3-1/2" EUE TUBING 9.3 #, N-80; USADO (ORN CEM)
C4	1	9.965.78	9.425.07	7.65	3.50	7" X 3-1/2" EUE PACKER ASIX MECANICO S/N = KPO-ARW0042 NUEVO PETROTECH
C5	1	10.003.63	9.432.70	31.35	3.50	3-1/2" EUE TUBING 9.3 #, N-80; USADO (ORN CEM)
C6	1	10.034.98	9.463.15	0.48	3.50	3-1/2" EUE (1) TUBO 9.3#, N-80; USADO (ORN CEM) + COUPLING

INTERVALOS CAÑONEADOS												
Formación	Tope MD (ft)	Tope TVD (ft)	Base MD (ft)	Base TVD (ft)	Longitud (ft)	Densidad (DPP)	Cargas	Fase	Penetración Diámetro Disparo	Fecha	Estado	Comentarios
ARENA U INFERIOR	10,078.00	9,504.87	10,113.00	9,539.01	35.00	5.00	S/I	80.00		09/14/2014	OPEN	

DETALLE CASING				COMPONENTES ÚLTIMO CASING / LINER						
Nombre	Base MD (ft)	OD (in)	Grado	Peso	Comentarios	Descripción	Norm. OD (in)	Tope MD (ft)	Bin MD (ft)	Comentarios
SURFACE CASING	4,522.0	13.375	K-55	68		LANDING COLLAR 7"	7.000	10,592.14	10,593.14	
INTERMEDIATE CASING	8,475.1	9.625	N-80	47		ZAPATO FLOTADOR 7"	7.000	10,665.03	10,666.03	
PRODUCTION LINER	10,868.0	7.000	P-110	26						

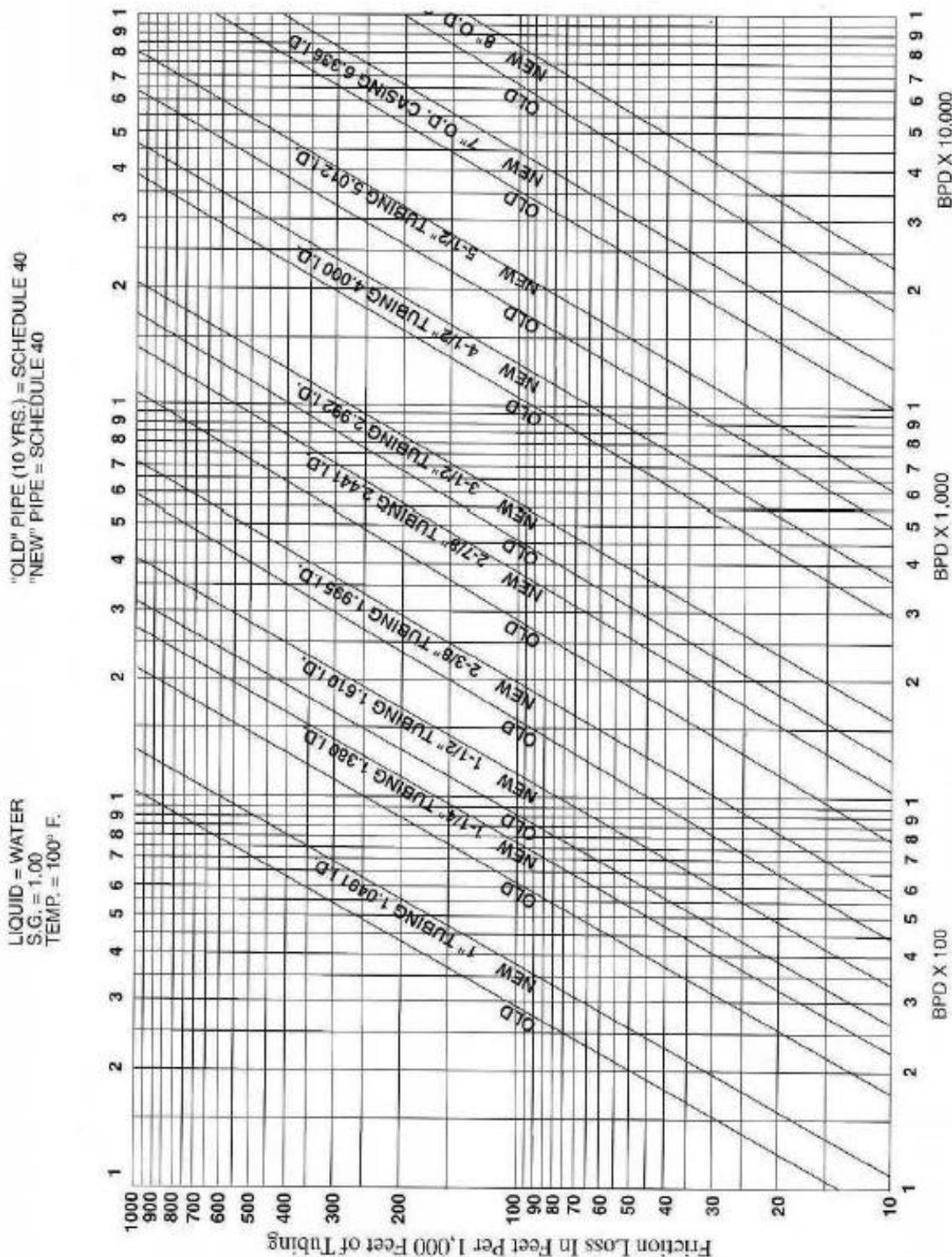
ELEVACIONES				CABEZAL		MATERIALES USADOS/ COMENTARIOS	
Nombre	Elevación (ft)	Is Default	Taladro	Tipo:	Presión (psi):	309 PROTECTORES CANNON 3500 A-13 (USADOS) + 54 MID JOINTS CANNON 3500 C-13 (USADOS) + 275 BANDAS 3/4" EN TUBERÍA + 40 BANDAS 3/4" EN EQUIPO BES + 9 BANDAS 3/4" EN BHA + 95' DE MILE. PESO DE LA SARTA SUBIENDO: 158 KLB. PESO DE LA SARTA BAJANDO: 118 KLB.	
ORIGINAL KB	883.00	Y	HILONG 16	Modelo:	3,000.00		
GROUND LEVEL	847.00	N	HILONG 16	Marca:			
Diferencia (EMR)	36.50			Tamaño (in):	13.63		

	Pozo: <b>SCHAJ-425</b> Tipo de Pozo: DIRECCIONAL No. Trabajo: 04 Evento: WORKOVER Completación: B.E.S SIMP+PKR FONDO	Fecha Inicio Operación: 01/08/2018 Preparado por: Ing. Diego Cunaista Aprobado por: Ing. Franklin Mena Max Ang. Dev. & Max DLS: 27.76° @ 1,316 R MD & 3.08°/100R @ 4,409 R MD Fecha Fin Perforación: 09/09/2014 Fecha Fin Completación: 09/18/2014	Fecha Fin: 03/03/2018 Revisado por: Ing. Lenin García Fecha Aprobación: 03/02/2018 Taladro en Operación: TRIBOILGAS, TRIBOILGAS-102,
--	--	---	---

**ANEXO N.º 2****DIAGRAMA PARA PÉRDIDAS DE FRICCIÓN**

## DIAGRAMA PARA PÉRDIDAS DE FRICCIÓN

BASED ON HAZEN-WILLIAMS FORMULA  
 FOR WATER: S.G. = 1.0, TEMP = 100°F, Q=GPM, C=120 (New Pipe) 84 (Old Pipe 10 years)  $F/1000' = 2.083 \left( \frac{100}{C} \right)^{1.85} \frac{D}{I.D.}^{1.85}$



Friction Loss Chart

**ANEXO N.º 3**  
**TABLAS DE INGENIERÍA**



> Engineering Tables > Power Save™ Pump Engineering Data

Model	Rotation speed, rpm	Recommended Operating Range, bpd	Recommended capacity at BEP, bpd	Power per stage, hp	Head per stage, ft, nominal	Pump Design			Stage Design*	Housing pressure limit, psi	Maximum ESP System OD, in
						FLT	SCMP	CMP			
NB(630-1000)H	2590	377-629	503	0.05	8.6	+					
	3490	472-786	629	0.10	13.3	+					
	3640	509-842	679	0.13	15.5	+			P, P		
	4040	629-943	786	0.20	20.8	+					
	4530	660-1128	880	0.29	26.2	+					
	5180	755-1100	1006	0.43	34.3	+					
	2910	503-1132	880	0.12	11.3						
NB(1100-1800)H	3490	604-1358	1069	0.20	16.2						
	3740	647-1453	1132	0.25	18.6				M, C		
	4160	716-1616	1258	0.34	23.0						
	5200	893-2018	1572	0.66	35.9						
	5820	1006-2264	1761	0.93	45.0						
	2910	943-1572	1258	0.12	8.5						
	3490	1132-1886	1509	0.20	12.2						
NB(1500-2500)H	4365	1415-2358	1887	0.40	19.1				M, C		
	4660	1509-2515	2012	0.49	21.8						
	5095	1635-2767	2201	0.63	26.1						
	3105	1509-2515	2012	0.02	10.2						
	3490	1698-2830	2264	0.02	10.2				M, C		
	4370	2126-3540	2830	0.06	20.2						
	4855	2358-3930	3145	0.08	24.9						
F / 362 series (OD 3.62 in)											
NFV(130-250)H	2910	94-157	126	0.03	12.0						
	3490	113-189	151	0.05	17.3						
	3640	119-201	157	0.05	18.8				PV, PC		4,70
	4370	144-238	189	0.09	27.1						
	5100	163-277	220	0.14	36.9						
	2910	220-409	314	0.04	12.1						
	3495	264-490	377	0.08	17.5				PV, P		4,70
NF(900-1300)H	4660	352-654	503	0.18	31.1						
	2910	503-1132	880	0.14	14.1						
	3330	572-1289	1006	0.21	18.4						
	3490	604-1358	1057	0.24	20.2				P, P		4,70
	3740	641-1446	1126	0.30	23.2						
	4160	716-1609	1252	0.41	28.8						
	4570	792-1786	1390	0.54	34.7						
NF(1300-2000)H	2910	943-1572	1321	0.24	14.7						
	3470	1126-1874	1572	0.40	20.9				M, C		4,70
	4430	1440-2396	2012	0.83	34.1						
	2910	1509-2515	2012	0.28	12.7						
	3490	1811-3019	2264	0.49	18.3						
	3640	1887-3144	2516	0.55	19.9				M, C		4,70
	4550	2358-3930	3145	1.08	31.1						
NF(2500-4400)H	2910	2012-3019	2516	0.37	13.4						
	3490	2421-3615	3622	0.64	19.3						
	3640	2516-3773	3145	0.73	20.9				M, C		4,70
	4365	3019-4528	3773	1.26	30.1						



> Engineering Tables > Power Save™ Pump Engineering Data

Model	Rotation speed, rpm	Recommended Operating Range, bpd	Recommended capacity at BEP, bpd	Power per stage, hp	Head per stage, ft, nominal	Pump Design			Stage Design*	Housing pressure limit, psi	Maximum ESP System OD, in
						FLT	SCMP	CMP			
NH(790-1000)H	2910	188-1006	629	0.09	13.5					5600	4.91
	3490	226-1207	755	0.16	19.3						
	3640	232-1258	786	0.18	21.0				PV, PC		
	4070	264-1409	880	0.25	26.3						
	4660	302-1610	1006	0.37	34.5						
	2910	817-1259	1038	0.22	18.8						
	3175	893-1371	1132	0.28	22.3						
	3530	987-1522	1258	0.39	27.6				P, P		
	3970	1113-1717	1415	0.55	34.9						
	4410	1230-1905	1572	0.76	43.1						
4940	1390-2132	1761	1.07	54.1							
2910	849-1540	1257	0.27	18.8							
3275	956-1735	1415	0.39	23.8							
3490	1031-1848	1508	0.47	27.0							
4660	1358-2465	2013	1.12	48.2							
5820	1698-3082	2515	2.17	75.2							
2910	1509-2516	2012	0.29	13.8							
3490	1823-3019	2421	0.51	19.9							
4500	2358-3931	3145	1.12	33.8							
2910	1962-3201	2578	0.39	14.9							
3490	2358-3842	3094	0.67	21.4							
4370	2950-4799	3868	1.30	33.4							
2910	2201-3773	3145	0.39	11.9							
3940	2641-4559	3773	0.98	21.8							
4080	3082-5283	4402	1.08	23.3							
4660	3522-6037	5031	1.61	30.5							
P / 535 series (OD 5.35 in)											
NP(1900-2500)H	2910	1006-2641	1887	0.88	33.1					5000	6.04
	3110	1069-2824	2012	0.84	37.8						
	3500	1207-3176	2264	1.19	47.9						
	3880	1339-3522	2516	1.62	58.9						
	2910	1761-4528	3145	1.08	32.6						
NP(3100-4400)H	3500	2113-5446	3773	1.88	47.2						
	4080	2465-5346	4402	2.98	64.1						
	2910	2830-5031	4088	1.63	37.8						
	3140	3050-5427	4402	2.04	44.0						
	3490	3396-6006	4937	2.81	54.3						
NP(4400-5700)H	3590	3490-3207	5031	3.06	57.5						
	4030	3918-6968	5660	4.32	72.4						
	2910	3459-5660	4717	1.20	27.1						
	3110	3692-6037	5031	1.47	30.9						
	3500	4151-6792	5660	2.09	39.2						
NP(4700-6300)H	3880	4616-7547	6289	2.85	48.1						
	2910	4402-8175	6289	1.85	29.2						
	3490	5220-9810	7547	3.20	42.0						
	3640	5503-10219	7861	3.63	45.7						
	4660	7044-13081	10062	7.62	74.9						
NP(7900-10100)H	2910	7547-12578	10062	2.96	31.5						
	3270	8490-14150	11320	4.21	39.7						
	3490	9056-15094	12075	5.11	45.3						
	3640	9434-15723	12578	5.80	49.2						
	4000	10376-17295	13836	7.70	59.5						
4370	11320-18867	15094	10.04	71.0							

**ANEXO N.º 4**

**ESPECIFICACIONES DE LAS BOMBAS NOVOMET**

## BOMBA NHV (790-1000)H



> Power Save™ Pumps > NH > NHV(790-1000)H

Power Save™  
Pumps  
Summary

### NHV(790-1000)H PUMP DESIGN DATA @ 60 HZ 406 SERIES | POWDER METALLURGY + CAST STAGE

COMPRESSION: AR2 CR1\*

HSG #	Length***		Weight		STG	Head		Eff., %	BHP, nominal		BHP, max		Part Number
	ft	m	lb	kg		ft	m		hp	kW	hp	kW	
3	6.6	2.0	212	96	47	910	277	69	7.3	5.5	7.8	5.8	3002142242
4	8.2	2.5	254	115	59	1143	348	69	9.2	6.9	9.8	7.3	3002142241
5	9.8	3.0	298	135	72	1395	425	69	11.2	8.4	11.9	8.9	3002142240
6	11.5	3.5	344	156	84	1627	496	69	13.1	9.8	13.9	10.4	3002142239

## BOMBA NFV(310-630)H

### NFV(310-630)H PUMP DESIGN DATA @ 60 HZ 362 SERIES | POWDER METALLURGY + CAST STAGE

SEMI-COMPRESSION: AR2 CR1\*

HSG #	Length***		Weight		STG	Head		Eff., %	BHP, nominal		BHP, max		Part Number S14 shaft**
	ft	m	lb	kg		ft	m		hp	kW	hp	kW	
5	9.8	3.0	262	119	96	1678	511	56	7.4	5.5	8.2	6.1	TBA
6	11.5	3.5	300	136	115	2010	613	56	8.9	6.6	9.8	7.3	TBA
7	13.1	4.0	335	152	130	2272	693	56	10.0	7.5	11.1	8.3	TBA
8	14.8	4.5	373	169	148	2587	789	56	11.4	8.5	12.6	9.4	TBA
9	16.4	5.0	408	185	166	2902	884	56	12.8	9.6	14.2	10.6	TBA
10	18.0	5.5	441	200	182	3181	970	56	14.0	10.5	15.6	11.6	TBA
11	19.7	6.0	481	218	200	3496	1066	56	15.4	11.5	17.1	12.8	TBA

## BOMBA NBV (160-250)H

### NBV(160-250)H PUMP DESIGN DATA @ 60 HZ 319 SERIES | POWDER METALLURGY STAGE

SEMI-COMPRESSION: AR2 CR1\*

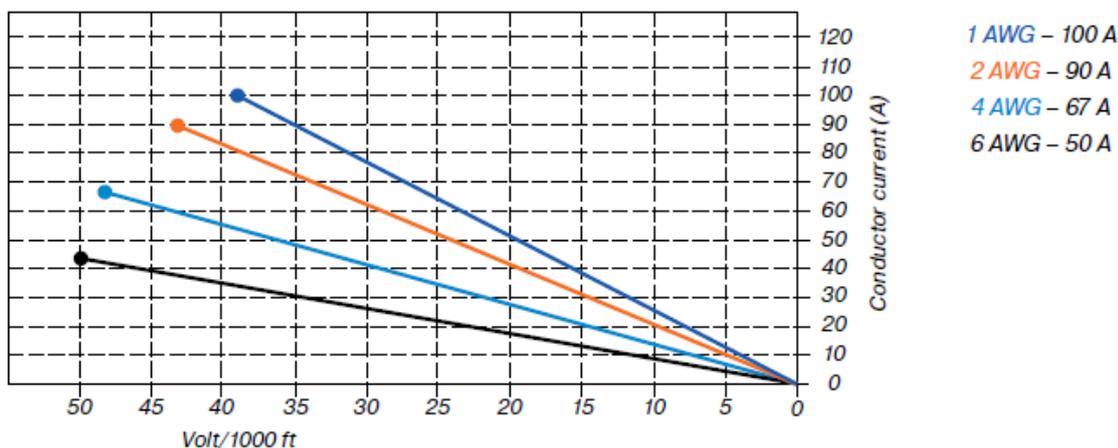
HSG #	Length***		Weight		STG	Head		Eff., %	BHP, nominal		BHP, max		Part Number S14 shaft**
	ft	m	lb	kg		ft	m		hp	kW	hp	kW	
3	6.6	2.0	183	83	60	934	285	40	3.5	2.6	3.7	2.8	TBA
4	8.2	2.5	221	100	77	1199	365	40	4.5	3.3	4.8	3.6	TBA
5	9.8	3.0	262	119	91	1417	432	40	5.3	3.9	5.7	4.2	TBA
6	11.5	3.5	271	123	108	1681	512	40	6.3	4.7	6.7	5.0	TBA
7	13.1	4.0	335	152	125	1946	593	40	7.2	5.4	7.8	5.8	TBA

**ANEXO N.º 5****ESPECIFICACIONES DE EL CABLE DE POTENCIA**

## PRYSMIAN FLAT CABLE SPECIFICATION E-LEAD (450 °F)

Description	Conductor size		Conductor	Overall dimensions		Weight		Part Number
	AWG#	mm <sup>2</sup>		in	mm	lb/ft	kg/m	
<b>POWER CABLE DW 4KV 450F FLAT GSTA BY PRYSMIAN, E-LEAD (temperature rating - 450 °F / 230 °C)</b>								
POWER CABLE DW 4KV 450F FLAT GSTA BY PRYSMIAN	1	42	Stranded	0.66 x 1.72	16.8 x 43.7	2.35	3.5	TBA
POWER CABLE DW 4KV 450F FLAT GSTA BY PRYSMIAN	2	35	Stranded	0.62 x 1.62	16.0 x 41.2	2.09	3.12	TBA
POWER CABLE DW 4KV 450F FLAT GSTA BY PRYSMIAN	4	21	Solid	0.54 x 1.37	13.9 x 34.9	1.61	2.4	TBA
POWER CABLE DW 4KV 450F FLAT GSTA BY PRYSMIAN	6	13	Solid	0.50 x 1.24	12.8 x 31.6	1.33	1.99	TBA
<b>POWER CABLE DW 5KV 450F FLAT GSTA BY PRYSMIAN, E-LEAD (temperature rating - 450 °F / 230 °C)</b>								
POWER CABLE DW 5KV 450F FLAT GSTA BY PRYSMIAN	1	42	Stranded	0.67 x 1.75	17.1 x 44.7	2.4	3.58	TBA
POWER CABLE DW 5KV 450F FLAT GSTA BY PRYSMIAN	2	35	Stranded	0.64 x 1.66	16.3 x 42.3	2.15	3.2	TBA
POWER CABLE DW 5KV 450F FLAT GSTA BY PRYSMIAN	4	21	Solid	0.57 x 1.47	14.7 x 37.5	1.73	2.58	TBA
POWER CABLE DW 5KV 450F FLAT GSTA BY PRYSMIAN	6	13	Solid	0.53 x 1.34	13.6 x 34.2	1.46	2.17	TBA

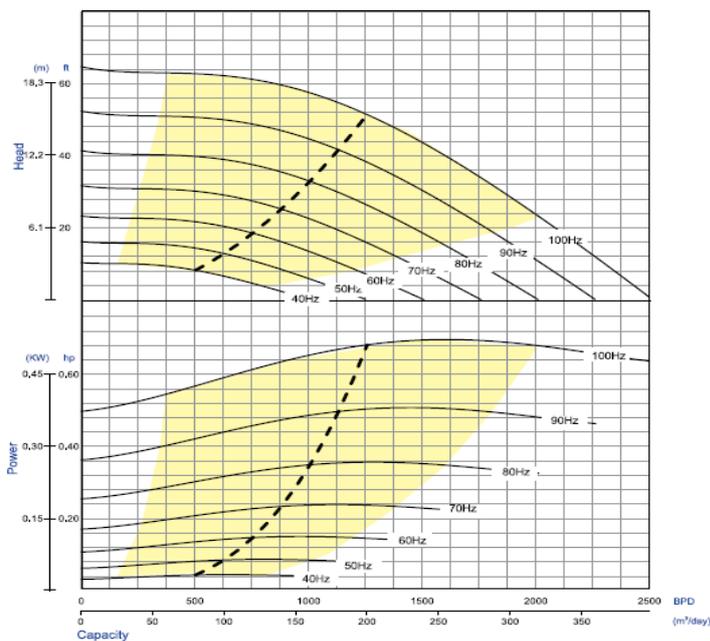
### VOLTAGE DROP AT 450 °F - 60 HZ - $\cos\Phi = 0.8$



Maximum current recommended to BHT (Bottom Hole Temperature) 400 °F (204 °C)

**ANEXO N.º 6**  
**CURVAS DE TORNADO**

### BOMBA NHV (790-1000)H



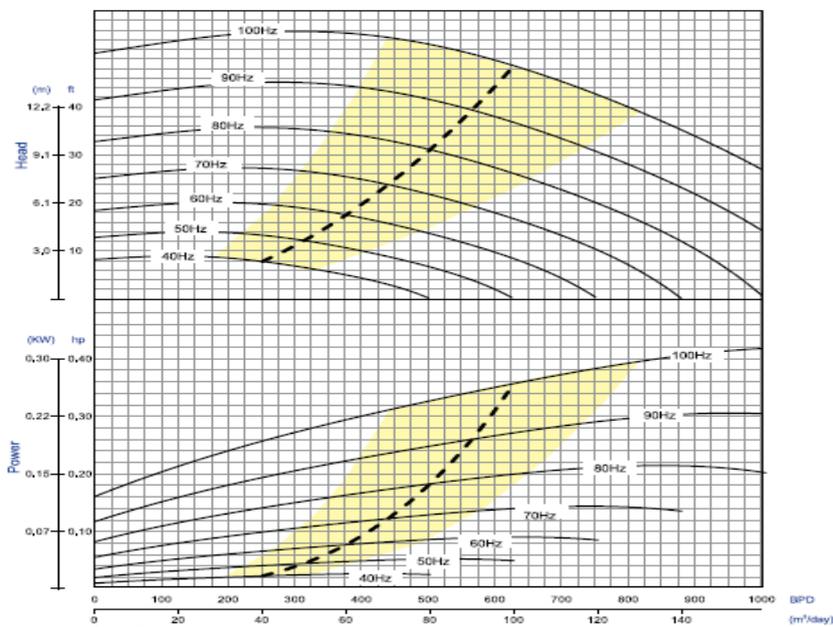
### BOMBA NFV(310-630)H

#### NFV(310-630)H MULTI HZ CURVE (TORNADO)

Multi Hz Curve

Curve is calculated for one stage on water of 1.00 sg

362 series / OD 92 mm



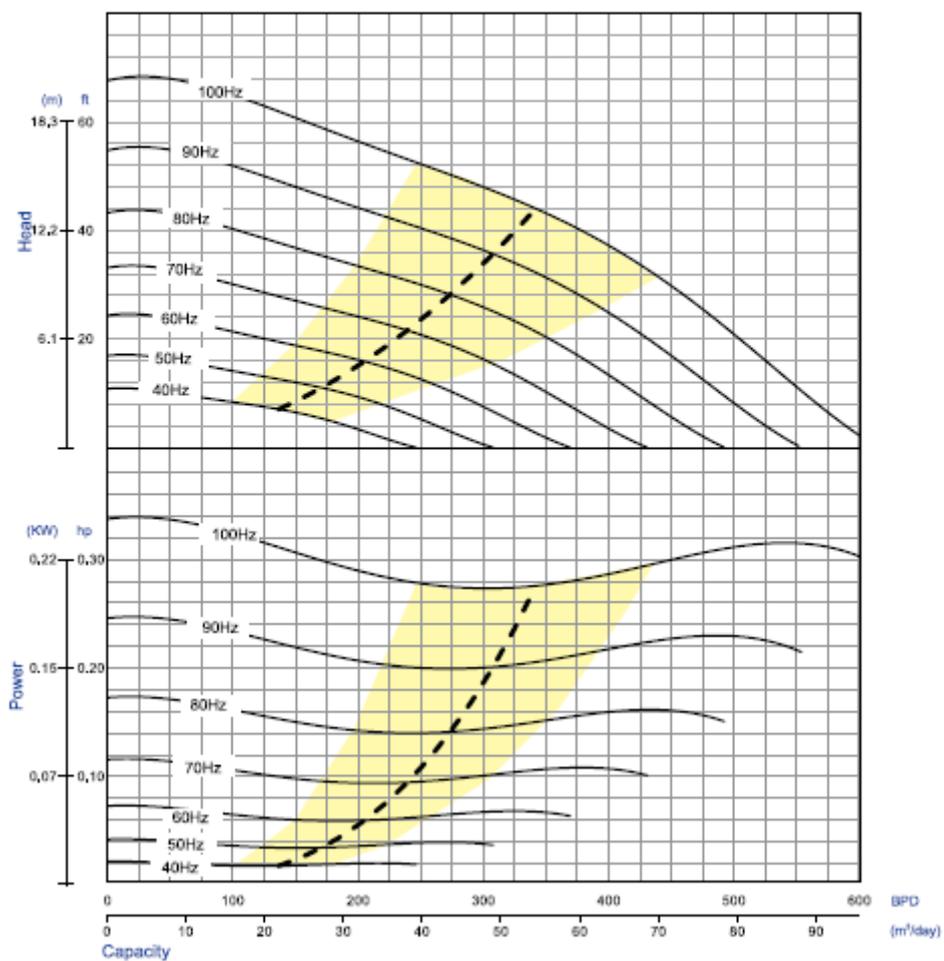
### BOMBA NBV (160-250)H

### NBV(160-250)H MULTI HZ CURVE (TORNADO)

Multi Hz Curve

Curve is calculated for one stage  
on water of 1.00 sg

319 series / OD 81 mm



**ANEXO N.º 7**  
**HISTORIAL DE PRODUCCIÓN**

**HISTORIAL DE PRODUCCIÓN SACHA-247**

FECHA	CRUDO BPPD	AGUA BAPD
1/2/2018	81	121
3/2/2018	141	61
14/2/2018	41	372
15/2/2018	43	388
15/2/2018	107	248
17/2/2018	306	107
18/2/2018	395	44
23/2/2018	430	37
24/2/2018	536	47
25/2/2018	485	42
26/2/2018	496	43
1/3/2018	524	46
1/3/2018	483	42
2/3/2018	463	40
4/3/2018	483	42
11/3/2018	482	42
10/4/2018	454	40
12/4/2018	458	40
24/4/2018	483	42
30/4/2018	479	42
18/5/2018	471	41
28/5/2018	479	42
8/6/2018	450	39
11/6/2018	475	41
20/6/2018	450	39
29/6/2018	454	40
5/7/2018	454	40
11/7/2018	433	38
11/7/2018	454	40
24/7/2018	186	742
25/7/2018	190	761
25/7/2018	200	801
25/7/2018	1104	96
25/7/2018	554	454
26/7/2018	543	444
26/7/2018	548	448
26/7/2018	677	319
27/7/2018	635	299
27/7/2018	638	300
27/7/2018	750	188
28/7/2018	754	188
28/7/2018	747	187
28/7/2018	794	140

**SACHA-247 CONTINUACIÓN HISTORIAL DE PRODUCCIÓN**

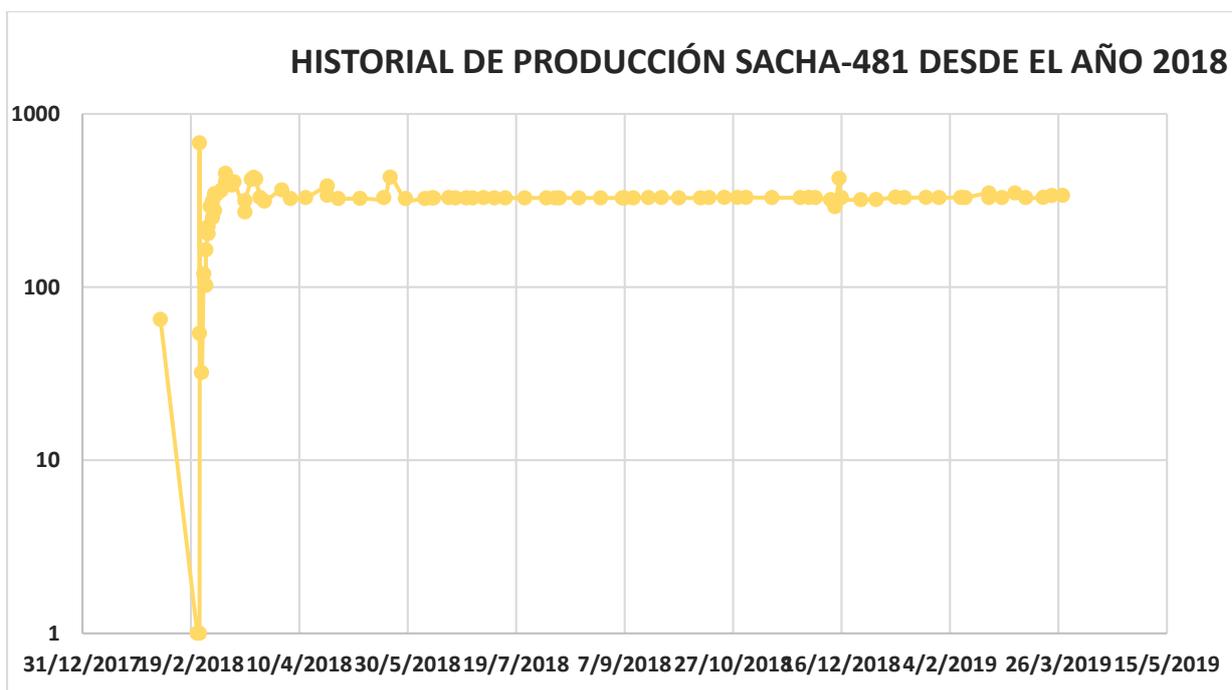
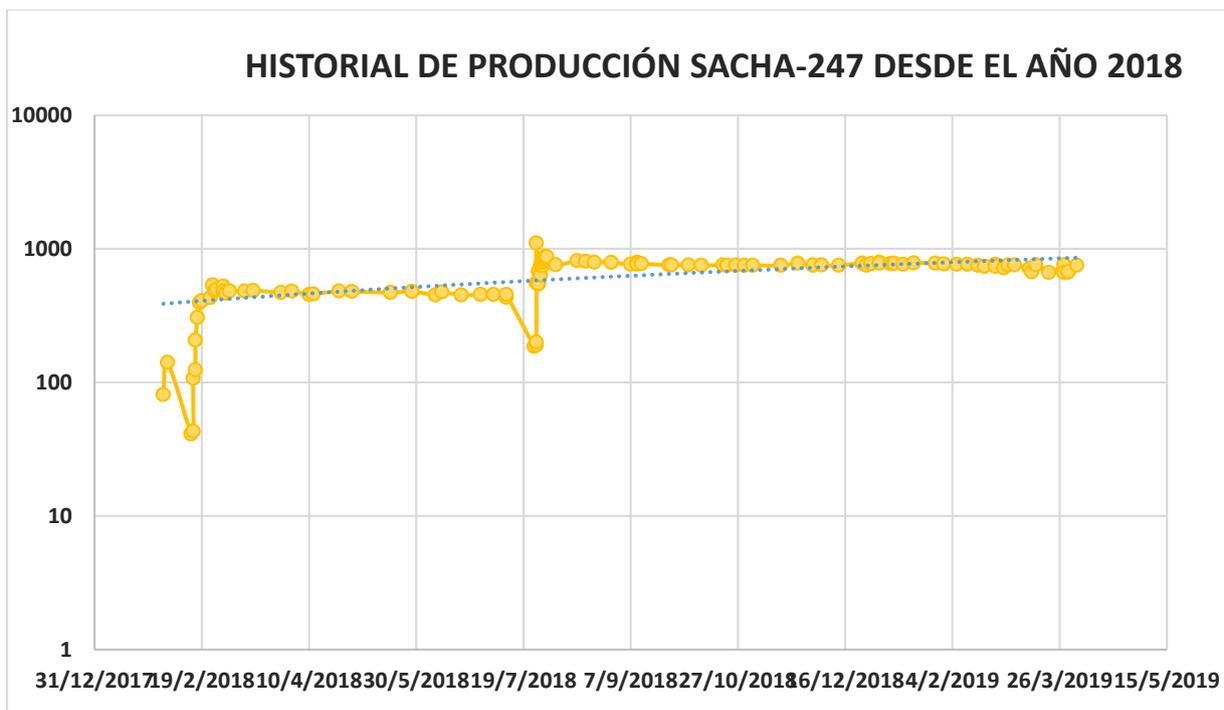
28/7/2018	794	140
29/7/2018	801	141
29/7/2018	844	63
29/7/2018	876	66
30/7/2018	869	65
3/8/2018	758	57
13/8/2018	814	61
21/8/2018	793	60
29/8/2018	789	59
7/9/2018	766	58
10/9/2018	793	60
10/9/2018	766	58
12/9/2018	772	58
25/9/2018	755	57
26/9/2018	755	57
4/10/2018	755	57
10/10/2018	751	57
20/10/2018	755	57
22/10/2018	751	57
26/10/2018	753	57
30/10/2018	751	57
3/11/2018	751	57
16/11/2018	751	57
28/12/2018	772	58
1/1/2019	793	60
1/1/2019	780	59
6/1/2019	772	58
7/1/2019	777	58
8/1/2019	777	58
12/1/2019	764	57
31/1/2019	768	58
6/2/2019	764	57
11/2/2019	764	57
16/2/2019	751	57
19/2/2019	737	55
24/2/2019	764	57
24/2/2019	737	55
28/2/2019	718	54
2/3/2019	755	57
5/3/2019	755	57
12/3/2019	710	53
13/3/2019	672	51
15/3/2019	758	57
21/3/2019	664	50
28/3/2019	758	57
28/3/2019	664	50
30/3/2019	668	50
30/3/2019	672	51
3/4/2019	751	57

**HISTORIAL SACHA-481**

FECHA	CRUDO BPPD	AGUA BAPD
23/2/2018	1	600
23/2/2018	679	21
23/2/2018	54	490
24/2/2018	32	294
25/2/2018	119	279
26/2/2018	102	239
26/2/2018	164	177
27/2/2018	203	125
27/2/2018	223	105
28/2/2018	292	138
1/3/2018	313	147
1/3/2018	251	118
2/3/2018	345	115
2/3/2018	277	92
3/3/2018	344	86
5/3/2018	361	69
7/3/2018	406	101
7/3/2018	453	113
10/3/2018	387	63
11/3/2018	405	45
16/3/2018	271	30
16/3/2018	315	35
19/3/2018	419	47
20/3/2018	430	48
21/3/2018	421	47
23/3/2018	329	36
25/3/2018	313	35
2/4/2018	363	40
6/4/2018	324	36
13/4/2018	328	36
23/4/2018	383	43
23/4/2018	338	38
28/4/2018	324	36
8/5/2018	325	36
19/5/2018	328	37
22/5/2018	431	48
29/5/2018	324	36
7/6/2018	324	36
10/6/2018	327	36
11/6/2018	327	36
18/6/2018	328	37
21/6/2018	327	36
26/6/2018	327	36
29/6/2018	327	36

**SACHA-481 CONTINUACIÓN HISTORIAL DE PRODUCCIÓN**

4/7/2018	328	36
9/7/2018	327	36
14/7/2018	327	36
23/7/2018	327	36
2/8/2018	327	36
6/8/2018	327	36
8/8/2018	327	36
17/8/2018	327	36
27/8/2018	327	36
6/9/2018	327	36
7/9/2018	327	36
11/9/2018	327	36
18/9/2018	328	36
24/9/2018	328	36
2/10/2018	327	36
12/10/2018	327	36
16/10/2018	328	36
23/10/2018	329	36
29/10/2018	329	36
2/11/2018	329	36
14/11/2018	328	36
27/11/2018	328	36
1/12/2018	329	36
4/12/2018	328	35
11/12/2018	319	35
13/12/2018	291	32
15/12/2018	424	47
16/12/2018	328	35
25/12/2018	319	35
10/1/2019	330	37
14/1/2019	328	37
24/1/2019	329	36
30/1/2019	328	36
9/2/2019	329	36
11/2/2019	328	37
22/2/2019	349	39
22/2/2019	328	37
28/2/2019	328	37
6/3/2019	349	39
11/3/2019	328	37
19/3/2019	329	37
23/3/2019	337	29
28/3/2019	338	29



**ANEXO No 8**

**ANÁLISIS ECONÓMICO TIR Y VAN PARA LOS POZOS DE  
DISEÑO**

**SACHA 137 UI**

Primer escenario precio de Barril de 40.00 USD.

Periodo	MES	Producción diaria de petróleo [Bls]	Producción de petróleo mensual [Bls]	Ingreso [USD]	Costo de producción mensual [USD]	Costo trabajo de reacondicionamiento [USD]	Flujo Efectivo Neto	Flujo Neto de Caja
0	Ene-19		0	0.00	0.00	403071.2	-403071.20	-403071.20
1	Feb-19	649	19740	789616.67	74026.56	0	715590.10	638919.7359
2	Mar-19	647.47	19694	787759.90	73852.49	0	713907.41	569122.6127
3	Abr-19	645.95	19648	785907.49	73678.83	0	712228.66	506950.2945
4	May-19	644.43	19601	784059.44	73505.57	0	710553.87	451569.8293
5	Jun-19	642.92	19555	782215.74	73332.73	0	708883.01	402239.2589
6	Jul-19	641.41	19509	780376.37	73160.28	0	707216.09	358297.6782
7	Ago-19	639.90	19464	778541.33	72988.25	0	705553.08	319156.3811
8	Sept-19	638.39	19418	776710.60	72816.62	0	703893.98	284290.9731
9	Oct-19	636.89	19372	774884.18	72645.39	0	702238.79	253234.3458
10	Nov-19	635.39	19327	773062.05	72474.57	0	700587.48	225570.419
11	Dic-19	633.90	19281	771244.21	72304.14	0	698940.06	200928.5658
12	Ene-20	632.41	19236	769430.64	72134.12	0	697296.51	178978.6477
							<b>VAN</b>	<b>3986187.54</b>
							<b>TIR</b>	<b>177%</b>

Segundo escenario Precio de Barril de 50.05 USD.

Periodo	MES	Producción diaria de petróleo [Bls]	Producción de petróleo mensual [Bls]	Ingreso [USD]	Costo de producción mensual [USD]	Costo trabajo de reacondicionamiento [USD]	Flujo Efectivo Neto	Flujo Neto de Caja
0	Ene-19		0	0.00	0.00	403071.2	-403071.20	-403071.20
1	Feb-19	649.00	19740	988007.85	74026.56	0	913981.29	830892.0834
2	Mar-19	647.47	19694	985684.57	73852.49	0	911832.08	753580.2307
3	Abr-19	645.95	19648	983366.75	73678.83	0	909687.92	683461.9987
4	May-19	644.43	19601	981054.38	73505.57	0	907548.80	619868.0441
5	Jun-19	642.92	19555	978747.44	73332.73	0	905414.72	562191.3038
6	Jul-19	641.41	19509	976445.93	73160.28	0	903285.65	509881.1998
7	Ago-19	639.90	19464	974149.84	72988.25	0	901161.59	462438.3838
8	Sept-19	638.39	19418	971859.14	72816.62	0	899042.52	419409.9701
9	Oct-19	636.89	19372	969573.83	72645.39	0	896928.43	380385.2129
10	Nov-19	635.39	19327	967293.89	72474.57	0	894819.32	344991.5846
11	Dic-19	633.90	19281	965019.31	72304.14	0	892715.17	312891.2203
12	Ene-20	632.41	19236	962750.08	72134.12	0	890615.96	283777.6922
							<b>VAN</b>	<b>5760697.72</b>
							<b>TIR</b>	<b>227%</b>

Tercer escenario precio de Barril de 60.00 USD.

Periodo	MES	Producción diaria de petróleo [Bls]	Producción de petróleo mensual [Bls]	Ingreso [USD]	Costo de producción mensual [USD]	Costo trabajo de reacondicionamiento [USD]	Flujo Efectivo Neto	Flujo Neto de Caja
0	Ene-19		0	0.00	0.00	403071.2	-403071.20	-403071.20
1	Feb-19	649.00	19740	1184425.00	74026.56	0	1110398.44	1009453.125
2	Mar-19	647.47	19694	1181639.84	73852.49	0	1107787.35	915526.7381
3	Abr-19	645.95	19648	1178861.24	73678.83	0	1105182.41	830339.9012
4	May-19	644.43	19601	1176089.16	73505.57	0	1102583.59	753079.4273
5	Jun-19	642.92	19555	1173323.61	73332.73	0	1099990.88	683007.7935
6	Jul-19	641.41	19509	1170564.55	73160.28	0	1097404.27	619456.1012
7	Ago-19	639.90	19464	1167811.99	72988.25	0	1094823.74	561817.6908
8	Sept-19	638.39	19418	1165065.90	72816.62	0	1092249.28	509542.3503
9	Oct-19	636.89	19372	1162326.26	72645.39	0	1089680.87	462131.0632
10	Nov-19	635.39	19327	1159593.07	72474.57	0	1087118.51	419131.2448
11	Dic-19	633.90	19281	1156866.31	72304.14	0	1084562.16	380132.422
12	Ene-20	632.41	19236	1154145.96	72134.12	0	1082011.83	344762.3151
							<b>VAN</b>	7085308.97
							<b>TIR</b>	275%

## SACHA F247 TI

Primer escenario precio de Barril de \$ 40.00

Periodo	MES	Producción diaria de petróleo [Bls]	Producción de petróleo mensual [Bls]	Ingreso [USD]	Costo de producción mensual [USD]	Costo trabajo de reacondicionamiento [USD]	Flujo Efectivo Neto	Flujo Neto de Caja
0	Ene-19		0	0.00	0.00	403071.2	-403071.20	-403071.20
1	Feb-19	780	23725	949000.00	88968.75	0	860031.25	767885.04
2	Mar-19	773.33	23522	940879.12	88207.42	0	852671.70	679744.66
3	Abr-19	766.71	23321	932827.73	87452.60	0	845375.13	601721.32
4	May-19	760.15	23121	924845.24	86704.24	0	838141.00	532653.76
5	Jun-19	753.64	22923	916931.06	85962.29	0	830968.77	471514.00
6	Jul-19	747.19	22727	909084.60	85226.68	0	823857.92	417392.06
7	Ago-19	740.80	22533	901305.29	84497.37	0	816807.92	369482.42
8	Sept-19	734.46	22340	893592.55	83774.30	0	809818.25	327072.01
9	Oct-19	728.17	22149	885945.80	83057.42	0	802888.38	289529.60
10	Nov-19	721.94	21959	878364.50	82346.67	0	796017.83	256296.44
11	Dic-19	715.77	21771	870848.07	81642.01	0	789206.06	226877.88
12	Ene-20	709.64	21585	863395.95	80943.37	0	782452.58	200836.09
							<b>VAN</b>	4737934.08
							<b>TIR</b>	213%

## Segundo escenario Precio de Barril de 50.05 USD.

Periodo	MES	Producción diaria de petróleo [Bis]	Producción de petróleo mensual [Bis]	Ingreso [USD]	Costo de producción mensual [USD]	Costo trabajo de reacondicionamiento [USD]	Flujo Efectivo Neto	Flujo Neto de Caja
0	Ene-19		0	0.00	0.00	403071.2	-403071.20	-403071.20
1	Feb-19	780.00	23725	1187436.25	88968.75	0	1098467.50	998606.82
2	Mar-19	773.33	23522	1177275.00	88207.42	0	1089067.58	900055.85
3	Abr-19	766.71	23321	1167200.70	87452.60	0	1079748.10	811230.73
4	May-19	760.15	23121	1157212.61	86704.24	0	1070508.37	731171.62
5	Jun-19	753.64	22923	1147309.99	85962.29	0	1061347.70	659013.42
6	Jul-19	747.19	22727	1137492.11	85226.68	0	1052265.43	593976.40
7	Ago-19	740.80	22533	1127758.24	84497.37	0	1043260.87	535357.79
8	Sept-19	734.46	22340	1118107.67	83774.30	0	1034333.37	482524.15
9	Oct-19	728.17	22149	1108539.69	83057.42	0	1025482.27	434904.59
10	Nov-19	721.94	21959	1099053.58	82346.67	0	1016706.91	391984.52
11	Dic-19	715.77	21771	1089648.64	81642.01	0	1008006.64	353300.18
12	Ene-20	709.64	21585	1080324.19	80943.37	0	999380.82	318433.53
							<b>VAN</b>	6807488.39
							<b>TIR</b>	272%

## Tercer escenario precio de Barril de 60.00 USD.

Periodo	MES	Producción diaria de petróleo [Bis]	Producción de petróleo mensual [Bis]	Ingreso [USD]	Costo de producción mensual [USD]	Costo trabajo de reacondicionamiento [USD]	Flujo Efectivo Neto	Flujo Neto de Caja
0	Ene-19		0	0.00	0.00	403071.2	-403071.20	-403071.20
1	Feb-19	780.00	23725	1423500.00	88968.75	0	1334531.25	1213210.23
2	Mar-19	773.33	23522	1411318.68	88207.42	0	1323111.26	1093480.38
3	Abr-19	766.71	23321	1399241.60	87452.60	0	1311789.00	985566.49
4	May-19	760.15	23121	1387267.86	86704.24	0	1300563.62	888302.45
5	Jun-19	753.64	22923	1375396.59	85962.29	0	1289434.30	800637.25
6	Jul-19	747.19	22727	1363626.90	85226.68	0	1278400.22	721623.60
7	Ago-19	740.80	22533	1351957.93	84497.37	0	1267460.56	650407.68
8	Sept-19	734.46	22340	1340388.82	83774.30	0	1256614.52	586219.95
9	Oct-19	728.17	22149	1328918.71	83057.42	0	1245861.29	528366.80
10	Nov-19	721.94	21959	1317546.75	82346.67	0	1235200.07	476223.10
11	Dic-19	715.77	21771	1306272.10	81642.01	0	1224630.09	429225.38
12	Ene-20	709.64	21585	1295093.93	80943.37	0	1214150.56	386865.79
							<b>VAN</b>	8357057.89
							<b>TIR</b>	330%

**SACHA 395 UI**

Primer escenario precio de Barril de 40.00 USD

Periodo	MES	Producción diaria de petróleo [Bls]	Producción de petróleo mensual [Bls]	Ingreso [USD]	Costo de producción mensual [USD]	Costo trabajo de reacondicionamiento [USD]	Flujo Efectivo Neto	Flujo Neto de Caja
0	Ene-19		0	0.00	0.00	403071.2	-403071.20	-403071.20
1	Feb-19	228	6935	277400.00	26006.25	0	251393.75	224458.71
2	Mar-19	227.89	6932	277265.73	25993.66	0	251272.07	200312.55
3	Abr-19	227.78	6928	277131.53	25981.08	0	251150.45	178763.93
4	May-19	227.67	6925	276997.39	25968.51	0	251028.88	159533.39
5	Jun-19	227.56	6922	276863.31	25955.94	0	250907.38	142371.58
6	Jul-19	227.45	6918	276729.30	25943.37	0	250785.93	127055.96
7	Ago-19	227.34	6915	276595.36	25930.81	0	250664.54	113387.91
8	Sept-19	227.23	6912	276461.48	25918.26	0	250543.21	101190.20
9	Oct-19	227.12	6908	276327.66	25905.72	0	250421.94	90304.66
10	Nov-19	227.01	6905	276193.91	25893.18	0	250300.73	80590.14
11	Dic-19	226.90	6902	276060.23	25880.65	0	250179.58	71920.65
12	Ene-20	226.79	6898	275926.61	25868.12	0	250058.49	64183.79
							<b>VAN</b>	1151002.27
							<b>TIR</b>	62%

Segundo escenario Precio de Barril de 50.05 USD

Periodo	MES	Producción diaria de petróleo [Bls]	Producción de petróleo mensual [Bls]	Ingreso [USD]	Costo de producción mensual [USD]	Costo trabajo de reacondicionamiento [USD]	Flujo Efectivo Neto	Flujo Neto de Caja
0	Ene-19		0	0.00	0.00	403071.2	-403071.20	-403071.20
1	Feb-19	228	6935	277400.00	26006.25	0	251393.75	224458.71
2	Mar-19	227.89	6932	277265.73	25993.66	0	251272.07	200312.55
3	Abr-19	227.78	6928	277131.53	25981.08	0	251150.45	178763.93
4	May-19	227.67	6925	276997.39	25968.51	0	251028.88	159533.39
5	Jun-19	227.56	6922	276863.31	25955.94	0	250907.38	142371.58
6	Jul-19	227.45	6918	276729.30	25943.37	0	250785.93	127055.96
7	Ago-19	227.34	6915	276595.36	25930.81	0	250664.54	113387.91
8	Sept-19	227.23	6912	276461.48	25918.26	0	250543.21	101190.20
9	Oct-19	227.12	6908	276327.66	25905.72	0	250421.94	90304.66
10	Nov-19	227.01	6905	276193.91	25893.18	0	250300.73	80590.14
11	Dic-19	226.90	6902	276060.23	25880.65	0	250179.58	71920.65
12	Ene-20	226.79	6898	275926.61	25868.12	0	250058.49	64183.79
							<b>VAN</b>	1151002.27
							<b>TIR</b>	62%

Tercer escenario precio de Barril de 60.00 USD.

Periodo	MES	Producción diaria de petróleo [Bls]	Producción de petróleo mensual [Bls]	Ingreso [USD]	Costo de producción mensual [USD]	Costo trabajo de reacondicionamiento [USD]	Flujo Efectivo Neto	Flujo Neto de Caja
0	Ene-19		0	0.00	0.00	403071.2	-403071.20	-403071.20
1	Feb-19	228	6935	416100.00	26006.25	0	390093.75	354630.68
2	Mar-19	227.89	6932	415898.60	25993.66	0	389904.93	322235.48
3	Abr-19	227.78	6928	415697.29	25981.08	0	389716.21	292799.56
4	May-19	227.67	6925	415496.08	25968.51	0	389527.58	266052.58
5	Jun-19	227.56	6922	415294.97	25955.94	0	389339.03	241748.91
6	Jul-19	227.45	6918	415093.95	25943.37	0	389150.58	219665.36
7	Ago-19	227.34	6915	414893.04	25930.81	0	388962.22	199599.12
8	Sept-19	227.23	6912	414692.22	25918.26	0	388773.95	181365.92
9	Oct-19	227.12	6908	414491.50	25905.72	0	388585.78	164798.30
10	Nov-19	227.01	6905	414290.87	25893.18	0	388397.69	149744.12
11	Dic-19	226.90	6902	414090.34	25880.65	0	388209.69	136065.13
12	Ene-20	226.79	6898	413889.91	25868.12	0	388021.79	123635.70
							<b>VAN</b>	2249269.66
							<b>TIR</b>	97%