

ÍNDICE	Página
Lista de figuras	v
Lista de tablas	viii
INTRODUCCIÓN	x
1. Fundamentos de los Sistemas Artificiales de Producción	1
1.1 Definición de un Sistema Artificial de Producción.	2
1.2 Limitaciones de los Sistemas Artificiales de Producción.....	4
1.3 Bombeo Neumático	9
1.3.1 Tipos de Bombeo Neumático.....	11
1.3.2 Tipos de válvulas para el Bombeo Neumático.....	13
1.3.3 Limitaciones en los tipos de Bombeo Neumático.....	14
1.3.4 Equipo Superficial	14
1.3.4.1 Árbol de válvulas.....	15
1.3.4.2 Conexiones superficiales	16
1.3.4.3 Válvulas de control.....	17
1.3.4.4 Válvulas de retención	17
1.3.4.5 Otros equipos superficiales.....	18
1.3.5 Equipo subsuperficial	19
1.3.5.1 Tubería de producción	19
1.3.5.2 Válvulas de inyección de gas.....	19
1.3.5.3 Empacadores.....	21
1.3.5.4 Accesorios para equipo Subsuperficial.....	21
1.4 Bombeo Mecánico	22
1.4.1 Unidad de bombeo mecánico.....	23
1.4.1.1 Unidades de bombeo mecánico tipo balancín.....	23
1.4.1.2 Bombeo Mecánico tipo hidroneumático.....	25
1.4.2 Mecanismos superficiales	25
1.4.3 Motor principal	26
1.4.4 Reductor de engranes.....	27
1.4.5 Varillas de succión.....	27
1.4.6 Bomba subsuperficial	27
1.4.7 Tubería de producción	29
1.5 Bombeo Electrocentrífugo Sumergido	30
1.5.1 Equipo Superficial	31
1.5.2 Equipo Subsuperficial.....	32
1.5.2.1 Motor eléctrico	32

1.5.2.2 Protector.....	33
1.5.2.3 Separadores de gas.....	33
1.5.2.4 Bomba centrífuga sumergible.....	34
1.5.2.5 Cable conductor eléctrico	35
1.6 Bombeo Hidráulico.....	36
1.6.1 Tipos de Bombeo Hidráulico.....	38
1.6.2 Sistema de inyección del fluido motriz.....	38
1.6.3 Equipo superficial	39
1.6.4 Equipo Subsuperficial.....	41
1.6.4.1 Bomba subsuperficial	42
1.6.4.2 Accesorios	43
1.7 Cavidades Progresivas.....	44
1.7.1 Equipo superficial.....	45
1.7.2 Equipo subsuperficial	47
1.7.2.1 Bomba.....	47
1.7.2.2 Sarta de Varillas.....	50
1.7.2.3 Accesorios	50
1.8 Sistemas híbridos.....	51
1.8.1 Definición de Sistemas Híbridos	51
1.8.2 Tipos de sistemas híbridos.....	52
Referencias	56
2. Generalidades de las Terminaciones Inteligentes.....	57
2.1 Historia de las terminaciones inteligentes.....	58
2.2 Historia y desarrollo tecnológico	61
2.3 Auto, natural o in-situ Bombeo Neumático	66
2.4 Historia de las terminaciones inteligentes en México.....	69
2.5 Evolución de las Terminaciones Inteligentes.....	73
2.6 Aplicaciones de las terminaciones inteligentes.....	76
2.6.1 Producción en diferentes zonas	76
2.6.2 Aislamiento de las zonas con invasión de agua o gas	78
2.6.3 Producción para campos marginales.....	79
2.6.3.1 Definición de mezclado para sistemas inteligentes	80
2.6.4 Control de flujo de inyección.	83
2.6.5 Otras aplicaciones sobre el manejo del pozo.....	83

2.6.5.1 Problema de incrustaciones en las tuberías.....	83
2.7 Beneficios en las instalaciones con terminaciones inteligentes	86
2.8 La planeación en la instalación de un terminación inteligente.....	92
Referencias.....	94
3. Bombeo Neumático Auto, Natural o In-situ	95
3.1 Definición de Auto Bombeo Neumático	96
3.2 Identificación del pozo candidato para una terminación inteligente	100
3.3 Elementos de un pozo inteligente.....	101
3.4 Módulos del equipo superficial de un sistema inteligente.....	104
3.5 Equipo superficial en el sitio del pozo.....	107
3.5.1 Fuentes de alimentación.....	107
3.5.1.1 Sistema Eléctrico	108
3.5.1.2 Sistema Hidráulico.....	109
3.6 Sistema de control del pozo inteligente	113
3.7 Sistema de supervisión del campo	116
3.8 Características y beneficios de los equipos superficiales	118
3.9 Cabezal de pozo.....	121
3.10 Equipo subsuperficial de un sistema inteligente.....	122
3.10.1 Flatpacks	124
3.10.2 Abrazaderas a las líneas de control y protectores	125
3.10.3 Sensores de Fondo	126
3.10.4 Dispositivos de aislamiento zonal.....	128
3.10.5 Sistemas de control de fondo	130
3.10.6 válvula controladora de intervalo (Válvula Auto BN).....	133
Referencias	135
4. Bombeo Electrocentrífugo Sumergido con Terminaciones Inteligentes ..	136
4.1 Definición de BEC con terminaciones inteligentes	137
4.1.1 Beneficios de integrar BEC con Terminaciones inteligentes.....	138
4.2 Desafíos de integrar terminaciones inteligentes con BEC.....	138
4.2.1 Métodos para combinar TI con sistemas BEC.....	139
4.2.1.1 Terminaciones inteligentes parcialmente recuperables.....	140
4.2.1.2 Actuadores	141
4.3 Consideraciones para instalar un BEC con terminaciones inteligentes.....	142

4.4 Equipo superficial del BEC con terminaciones inteligentes.....	143
4.4.1 Equipo superficial del	143
4.4.1.1 Variador de frecuencia.....	144
4.4.1.2 Equipo complementario	146
4.4.2 Equipo superficial de la terminación Inteligente	147
4.4.3 Sistema de monitoreo en tiempo real.....	150
4.4.4 Cabezal del pozo.....	151
4.5 Equipo Subsuperficial del BEC con Terminaciones Inteligentes.....	152
4.5.1 Equipo subsuperficial del Bombeo Electrocentrífugo Sumergido.....	153
4.5.1.1 Bomba Electrocentrífuga	153
4.5.1.2 Tipos de diseño de la bomba.....	155
4.5.1.3 Sensores instalados en la bomba.....	156
4.5.1.4 Cable del BEC	157
4.5.1.5 Equipo complementario.....	158
4.5.2 Equipo Subsuperficial de la Terminación inteligente.....	159
4.5.2.1 Flatpack y abrazaderas.....	160
4.5.2.2 Sensores de fondo	160
4.5.2.3 Medidor permanente de cuarzo.....	161
4.5.2.4 Medidor permanente de fibra óptica	164
4.5.2.5 Medidores de flujo y sistema de inyección químico.....	166
4.5.2.6 Empacadores.....	167
4.5.2.7 Válvula controladora de flujo	169
4.5.2.8 Válvula controladora de flujo binaria	169
4.5.2.9 Válvula controladora de posicionamiento discreto.....	171
4.5.2.10 Válvula controladora de variable infinita.....	173
4.5.2.11 Válvulas de seguridad Subsuperficiales.....	175
Referencias	177
5. Aplicaciones de la Terminaciones Inteligentes con Sistemas Artificiales .	178
5.1 Instalación de una terminación inteligente con un Auto BN.....	179
5.1.1 Antecedentes del campo Abqaiq.....	179
5.1.2 Problemas de producción del campo Abqaiq.....	180
5.1.3 Alternativas para mejorar la producción.....	180
5.1.4 Diseño de la T.I y del Auto BN	181
5.1.4.1 Diseño del estrangulador para ajuste de gas.	184

5.1.5 Resultados obtenidos	187
5.2 Instalación de una terminación inteligente con un BEC.....	190
5.2.1 Antecedentes del campo Eden-Yuturi	190
5.2.2 Problemas de producción del campo Eden-Yuturi	191
5.2.3 Alternativas para mejorar la producción.....	193
5.1.4 Diseño de la T.I y del BEC	194
5.2.5 Resultados obtenidos	200
5.3 Instalación de una terminación inteligente en aguas profundas	203
5.3.1 Antecedentes del campo NA Kika.....	203
5.3.2 Problemas de producción del campo Na Kika.....	203
5.3.3 Alternativas para mejorar la producción.....	205
5.3.4 Diseños de las terminaciones convencional e inteligente	206
5.3.5 Resultados obtenidos	209
Referencias	210
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	211
Nomenclatura.....	216
BIBLIOGRAFÍA	218

LISTA DE FIGURAS	Página
Figura 1.1 Partes fundamentales del Bombeo Neumático.....	10
Figura 1.2 Bombeo Neumático Continuo.....	12
Figura 1.3 Bombeo Neumático Intermitente	13
Figura 1.4 Medio árbol de válvulas	15
Figura 1.5 Válvulas de control de flujo tipo bola	17
Figura 1.6 Válvulas de retención.....	17
Figura 1.7 Equipos superficiales	18
Figura 1.8 Válvula recuperable	20
Figura 1.9 Empacadores recuperables.....	21
Figura 1.10 Geometrías del Bombeo Mecánico	24
Figura 1.11 Mecanismos Superficiales.....	26
Figura 1.12 Bomba insertada en la tubería de producción	28
Figura 1.13 Unidad de Bombeo Electrocentrífugo.....	30
Figura 1.14 Bomba Centrífuga para BEC.....	35
Figura 1.15 Cable Conductor Eléctrico	36

Figura 1.16 Bombeo Hidráulico tipo Pistón y tipo Jet	37
Figura 1.17 Componentes principales de un Bombeo Hidráulico	40
Figura 1.18 Proceso del fluido motriz	41
Figura 1.19 Unidad de Bombeo de Cavidades Progresivas.....	45
Figura 1.20 Dispositivos superficiales del BCP	47
Figura 1.21 Bomba Subsuperficial	48
Figura 1.22 Geometrias de la Bomba	49
Figura 1.23 Sistema combinado BEC y BN.....	53
Figura 1.24 Sistema BCPE	53
Figura 2.1 Ubicación del primer pozo inteligente	60
Figura 2.2 Plataforma TLP.....	60
Figura 2.3 Ubicación del primer sistema inteligente con instalaciones eléctricas.....	62
Figura 2.4 Diseño final del primer sistema inteligente eléctrico	65
Figura 2.5 Válvula Controladora de flujo.....	68
Figura 2.6 Ubicación del campo Cantarell	69
Figura 2.7 Utilización del casquete de gas como una fuente de energía	70
Figura 2.8 Flujo de gas controlado por una válvula auto BN.....	71
Figura 2.9 Válvula inteligente	72
Figura 2.10 Sistema Convencional.....	74
Figura 2.11 Sistema Inteligente.....	74
Figura 2.12 Principales avances en las áreas de la industria petrolera	75
Figura 2.13 Producción en diferentes zonas con una válvula reguladora de flujo	76
Figura 2.14 Sensor y empacadores de fondo	77
Figura 2.15 Una VCF aislando las zonas con invasión de agua.....	78
Figura 2.16 Producción en dos intervalos con un sistema inteligente.....	81
Figura 2.17 Problemas de incrustaciones en la T.P	84
Figura 2.18 Aseguramiento de flujo usando VCF.....	85
Figura 2.19 Equipo marino con sistemas inteligentes	87
Figura 2.20 Comparación económica de alternativas terminaciones	88
Figura 2.21 Sistema de supervisión y adquisición de datos	90
Figura 2.22 Definición de un sistema inteligente	92
Figura 2.23 Metodología para el desarrollo de un sistema inteligente	93
Figura 3.1 Bombeo Neumático y Auto Bombeo Neumatico.....	97
Figura 3.2 Válvula Auto-BN y equipo de fondo	98
Figura 3.3 Evaluación de un sistema de pozo inteligente.....	101

Figura 3.4 Elementos para la optimización de los Sistemas Inteligentes	102
Figura 3.5 Elementos básicos de una terminación inteligente.....	104
Figura 3.6 Equipo superficial y sistema de comunicación de una T.I	105
Figura 3.7 Módulos del sistema de control de un Pozo Inteligente.....	106
Figura 3.8 Unidad del Generador Termoeléctrico	108
Figura 3.9 Esquema del sistema de energía básico para un Sistema Inteligente	109
Figura 3.10 Típica instalación de un Sistema hidráulico superficial.....	110
Figura 3.11 Gabinete del sistema hidráulico de superficie y MSH	111
Figura 3.12 Modulo Controlador de Pozo	111
Figura 3.13 Sistema Hidráulico Superficial, Acumuladores y Sistema de Supervisión	112
Figura 3.14 Aplicación del sistema de supervisión de un Pozo Inteligente	113
Figura 3.15 Diseño del sistema de comunicación superficial.....	115
Figura 3.16 Interfaz entre SHS y el Sistema de Supervisión del servidor.....	117
Figura 3.17 Sistemas de arboles en aguas profundas	121
Figura 3.18 Equipo subsuperficial de una terminación inteligente	123
Figura 3.19 Flatpack.....	124
Figura 3.20 Abrazadera y protector.....	125
Figura 3.21 Clasificación general de los empacadores.....	128
Figura 4.1 BEC dentro de la T.P	139
Figura 4.2 Conector hidráulico	140
Figura 4.3 Sistema BEC POD	140
Figura 4.4 Funcionamiento de un actuador	142
Figura 4.5 Variadores de frecuencia de la compañía Schlumberger	144
Figura 4.6 Equipo complementario superficial del BEC.....	146
Figura 4.7 Equipo superficial de una T.I instalado con un BEC	149
Figura 4.8 Sistema de monitoreo en tiempo real	150
Figura 4.9 Distribución y comunicación de líneas de la T.I y del sistema BEC	151
Figura 4.10 Equipo subsuperficial de un BEC y una T.I.....	152
Figura 4.11 Bomba Electrocentrífuga y etapa de una bomba.....	153
Figura 4.12 Tipos de diseños de la Bomba Sumergible	155
Figura 4.13 Herramienta de monitoreo de la marca Phoenix* Schlumberger.....	157
Figura 4.14 Cable conductor del BEC.....	158
Figura 4.15 Líneas hidráulicas distribuidas en un flatpack	160
Figura 4.16 Partes de un medidor de presión/temperatura	161
Figura 4.17 Medidor de presión permanente y mandril	162
Figura 4.18 Medidor de fondo permanente en dos zonas productivas	163

Figura 4.19 Sensores de fibra óptica y dispersión Raman.....	165
Figura 4.20 Mandril de inyección y sistema sub inyección química.....	167
Figura 4.21 Aislamiento de zonas productoras.....	168
Figura 4.22 Válvula controladora de flujo.....	172
Figura 4.23 Componentes y Beneficios de las VCF.....	173
Figura 4.24 Montaje hidráulico directo de un VCF.....	174
Figura 4.25 Válvula de Seguridad Subsuperficial.....	175
Figura 5.1 Mapa del campo Abqaiq y el casquete de gas.....	180
Figura 5.2 Esquema completo del pozo A de Abqiaq.....	181
Figura 5.3 Válvula controladora de flujo.....	182
Figura 5.4 Equipo de terminación inteligente para el pozo A de Abqiaq.....	183
Figura 5.5 Curvas de rendimiento del gas.....	184
Figura 5.6 análisis de presiones de fondo fluyendo.....	185
Figura 5.7 IPR en la zona de gas.....	185
Figura 5.8 Perfil Cv para el estrangulador de la zona de gas.....	186
Figura 5.10 Rendimiento del pozo antes de empezar el Auto BN.....	188
Figura 5.11 Rendimiento del pozo después de empezar el Auto BN.....	189
Figura 5.12 Diseño original de la terminación del pozo EY-D11.....	192
Figura 5.13 Terminación inteligente del pozo EY-D11.....	195
Figura 5.14 Comparación de la producción del pozo EY-D11 con y sin T.I.....	201
Figura 5.15 Campo Na Kika.....	204
Figura 5.16 Diseño de la terminación del pozo Ariel A-3.....	207
Figura 5.17 Terminación inteligente (tres zonas) del pozo Ariel A-1.....	208

LISTA DE TABLAS

	Página
Tabla 1.1 Consideraciones de diseño de los sistemas artificiales de producción.....	5
Tabla 1.2 Consideraciones normales de operación de los sistemas artificiales de producción....	7
Tabla 1.3 Limitaciones de flujo para el bombeo neumático.....	14
Tabla 1.4 Tipos de motores para el BEC.....	32
Tabla 1.5 Componentes básicos para los diferentes tipos de instalaciones superficiales.....	43
Tabla 2.1 Aspectos en un programa de mantenimiento de pozo.....	59
Tabla 2.2 Etapas de los sistemas de producción.....	73
Tabla 2.3 Posibles causas de daño.....	83

Tabla 3.1 Principales tipos de Ethernet para los sistemas inteligentes.....	115
Tabla 3.2 Ventajas y desventajas de la fibra óptica.....	118
Tabla 3.3 Características y beneficios de los principales equipos superficiales.....	119
Tabla 3.4 Principales sensores de fondo utilizados en SI.....	127
Tabla 3.5 Empacadores utilizados en un SI.....	129
Tabla 3.6 Sistemas de control de flujo en un SI.....	131
Tabla 4.1 Clasificación de los VSD basándose en el voltaje.....	145
Tabla 4.2 Descripción de los tipos de diseño de la BEC.....	156
Tabla 4.3 Beneficios de la válvula binaria.....	170
Tabla 5.1 Desafíos de diseño del sistema de pozo inteligente del campo Eden-Yuturi.....	196