

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**“CÁLCULO Y DISEÑO DE CIMENTACIONES PARA
EQUIPOS Y MAQUINARIA PRESENTES EN UNA
FACILIDAD DE PRODUCCIÓN PETROLERA”**

PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

ELABORADO POR:

JENNIFFER CONSUELO SALAZAR CONTRERAS

SANGOLQUÍ, ENERO DE 2013

EXTRACTO

El presente trabajo describe temas no relacionados directamente con la ingeniería civil, pero los cuales son de suma importancia al momento de realizar un diseño y construcción dentro de una facilidad de producción petrolera, Se detalla el camino que sigue el crudo a partir de su extracción hasta la llegada al oleoducto, sus diferentes etapas de separación y limpieza; y los equipos y maquinaria necesarios para este fin. Con lo cual se da una idea global y clara al ingeniero estructural sobre las consideraciones a tomar en cuenta previo al diseño. Del gran campo que abarca la obra civil dentro de la industria petrolera este escrito se enfoca en las cimentaciones de equipo estático y dinámico de los diferentes equipos y estructuras presentes en una facilidad de producción petrolera; y hace hincapié en la necesidad de tener una idea del proceso al momento de elegir el tipo de cimentación y los parámetros para su diseño. Asimismo, se realiza el cálculo de las cimentaciones de un separador de producción trifásico, del sistema silenciador de un generador Wartsila y su estructura, de una bomba de inyección de agua y de un generador Wartsila de 7MW. Finalmente como aporte, este trabajo cita puntualmente los pasos a seguir previos al cálculo de cimentaciones de equipo estático y vibratorio y pequeñas consideraciones dado el caso de utilizar el software SAP2000 para este efecto.

ABSTRACT

This work describes themes not necessary related directly with the civil engineering but very important when designing and constructing in an oil production facility is about. The way that oil has to follow from its extraction until its arrival to the principal pipeline; is detailed; also the principal stages of separation and purging; and the machinery and equipment necessary to this purpose. This gives a global and clear idea to the structural engineer about the considerations that has to be made before the design. Of the large field covered de civil works in the petroleum industry, this text focus in foundations for static and dynamic equipment and structures of an oil facility; and emphasizes in the necessity of having an idea of the process at moment of choosing the type of foundation and the parameters for its design. Calculation is performed of the foundation for a horizontal triphasic vessel, for the Wartsila generator exhaust system and its structure, for a water injection pump; and for the 7MW Wartsila generator. Finally, and as a contribution this work points the steps to follow previous the calculation of foundations for static and dynamic equipment and some little considerations to make if the software SAP2000 is used.

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por la Srta. Jenniffer Consuelo Salazar Contreras como requerimiento parcial a la obtención del título de Ingeniero Civil.

Sangolquí, Enero de 2013

Ing. Marcelo Guerra Avedaño

DIRECTOR

Ing. Ernesto Pro Zambrano

CODIRECTOR

REVISADO POR

Ing. Jorge Zúñiga Gallegos

DIRECTOR DE LA CARRERA

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado enteramente a Dios, a la Virgen María por todas sus bendiciones; a mis padres y hermano; por el apoyo incondicional. A mis amigos que me acompañaron durante esta locura.

Y a mi director y co-director, pues es el resultado de su trabajo de enseñanza.

Jennifer C. Salazar C.

AGRADECIMIENTO

A Dios y a la Virgen, por la vida y la oportunidad de culminar mi carrera, porque sin la ayuda divina absolutamente nada es posible. Gracias a mis padres, que siempre me han acompañado y apoyado. A mi hermano, por ser uno de los mejores amigos que tengo y la alegría siempre. A todas mis amigas, por el tiempo que no pasé con ustedes y no me reprocharon. A los amigos, por hacer de la universidad una etapa inolvidable.

Agradezco a todos los que caminaron conmigo hasta la culminación de mi vida universitaria y colaboraron en cierta forma en mi desempeño. Al ingeniero Zúñiga por su gran ayuda en toda la carrera.

Gracias a mis directores, pues su conocimiento y guía fueron pilares fundamentales en la culminación de este trabajo.

Jennifer C. Salazar C.

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

JENNIFFER CONSUELO SALAZAR CONTRERAS

DECLARO QUE:

El proyecto de grado denominado “CÁLCULO Y DISEÑO DE CIMENTACIONES PARA EQUIPOS Y MAQUINARIA PRESENTES EN UNA FACILIDAD DE PRODUCCIÓN PETROLERA”, ha sido desarrollado enteramente respetando los derechos intelectuales de terceros, con las respectivas citas de autores y en base a la bibliografía que consta en este trabajo.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico de este proyecto de grado.

Sangolquí, Enero de 2013

AUTORIZACIÓN

Yo, Jenniffer Consuelo Salazar Contreras, autorizo a la Escuela Politécnica del Ejército la publicación en la biblioteca virtual de la institución, del proyecto titulado: “CÁLCULO Y DISEÑO DE CIMENTACIONES PARA EQUIPOS Y MAQUINARIA PRESENTES EN UNA FACILIDAD DE PRODUCCIÓN PETROLERA”; cuyo contenido es exclusivamente de mi autoría.

Sangolquí, Enero de 2013

Índice

Índice.....	IX
1 CAPÍTULO I	1
GENERALIDADES	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.1.1 ANTECEDENTES.....	2
1.1.2 DIVISIÓN BLOQUES PETROLEROS EN ECUADOR	3
1.1.3 OBJETIVOS DEL ESTUDIO.....	4
1.1.4 JUSTIFICACIÓN.....	4
2 CAPÍTULO II	6
FACILIDADES DE PRODUCCIÓN PETROLERA.....	6
2.1 ESQUEMA TÍPICO DE UNA FACILIDAD DE PRODUCCIÓN PETROLERA	6
2.1.1 PARTES CONSTITUTIVAS.....	7
2.1.1.1 PLATAFORMAS	9
2.1.1.2 FACILIDAD DE PROCESAMIENTO CENTRAL (CPF).....	10
2.2 PROCESO DE EXTRACCIÓN Y PRODUCCIÓN	11
2.2.1 SISTEMAS DE EXTRACCIÓN	12
2.2.1.1 BOMBEO MECÁNICO	13
2.2.1.1.1 PARTES CONSTITUTIVAS Y FUNCIONAMIENTO.....	15
2.2.1.1.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS	16
2.2.1.2 BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE (BES).....	17

2.2.1.2.1 PARTES CONSTITUTIVAS Y FUNCIONAMIENTO	18
2.2.1.2.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS	20
2.2.1.3 BOMBEO HIDRÁULICO (CON BOMBA JET).....	21
2.2.1.3.1 PARTES CONSTITUTIVAS Y FUNCIONAMIENTO	22
2.2.1.3.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS	23
2.2.2 INYECCIÓN DE AGUA Y VAPOR.....	24
2.2.3 DEFINICIONES	25
2.2.4 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCESO	27
2.2.4.1 CRUDO	29
2.2.4.2 AGUA.....	29
2.2.4.3 GAS	30
2.2.5 CARACTERÍSTICAS DE LOS FLUIDOS DE LOS POZOS.....	32
2.2.6 TRATAMIENTO DEL CRUDO	36
2.3 GENERACIÓN DE ENERGÍA	39
2.3.1 GENERALIDADES	39
2.3.2 EQUIPOS QUE NECESITAN ENERGÍA	40
2.4 DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS Y ESTRUCTURAS	41
2.4.1 SEPARADORES O VESSELS	42
2.4.1.1 TIPOS DE SEPARADORES	44
2.4.1.1.1 SEPARADORES TRIFÁSICOS HORIZONTALES	45
2.4.1.2 TEORÍA DE SEPARACIÓN	46
2.4.1.3 FUNCIONAMIENTO	47

2.4.2	BOMBAS	49
2.4.2.1	Bombas Centrífugas	50
2.4.2.2	Bombas de desplazamiento positivo (Reciprocantes).....	51
2.4.3	GENERADORES DE ENERGÍA.....	53
2.4.3.1	TORRE DE SILENCIADOR (EXHAUST SYSTEM)	55
3	CAPÍTULO III	57
	CIMENTACIONES PARA EQUIPO INDUSTRIAL.....	57
3.1	CIMENTACIONES	57
3.1.1	TIPOS DE CIMENTACIONES	57
3.1.2	CIMENTACIONES PARA VESSELS (RECIPIENTES) VERTICALES	62
3.1.3	CIMENTACIONES PARA VESSELS (RECIPIENTES) HORIZONTALES E INTERCAMBIADORES DE CALOR	63
3.1.4	CIMENTACIONES PARA VESSELS (RECIPIENTES) ESFÉRICOS 64	
3.1.5	CIMENTACIONES PARA MAQUINARIA-HERRAMIENTA	64
3.1.6	CIMENTACIONES PARA EQUIPO ELÉCTRICO Y SU ESTRUCTURA DE APOYO.....	65
3.1.6.1	TIPO BLOQUE.....	65
3.1.6.2	TIPO BLOQUE COMBINADO.....	65
3.1.6.3	TIPO MESA.....	66
3.1.6.4	TIPO MESA CON AISLADORES.....	67

3.1.6.5	EQUIPO MONTADO SOBRE RESORTES (AMORTIGUADORES).....	67
3.1.6.6	TIPO BLOQUE DE INERCIA EN ESTRUCTURA	68
3.1.7	CONSIDERACIONES GENERALES.....	70
3.1.8	DIMENSIONAMIENTO	72
3.1.9	DISEÑO.....	76
3.2	CRITERIOS DE SELECCIÓN DEL TIPO DE CIMENTACIÓN.....	77
3.2.1	LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO	80
3.2.2	ESTUDIOS DE SUELOS.....	81
3.2.2.1	OBJETIVO DEL ESTUDIO.....	82
3.2.2.2	PROPIEDADES RELEVANTES DE LOS SUELOS	82
3.2.3	MATERIALES Y MANO DE OBRA DISPONIBLES	92
3.2.4	MÉTODOS CONSTRUCTIVOS.....	94
3.2.5	FACTORES ECONÓMICOS	97
3.2.6	FACTORES DE SEGURIDAD	98
3.2.6.1	FACTOR DE SEGURIDAD AL VOLTEO.-	99
3.2.6.2	FACTOR DE SEGURIDAD AL DESLIZAMIENTO.-	100
3.3	CARGAS DE DISEÑO	101
3.3.1	CARGAS ESTÁTICAS.....	101
3.3.1.1	CARGAS MUERTAS	101
3.3.1.2	CARGAS VIVAS	102
3.3.1.3	CARGAS DE OPERACIÓN.....	102

3.3.1.4	OTRAS CARGAS.....	103
3.3.2	CARGAS DINÁMICAS.....	105
3.3.2.1	SISMO.....	105
3.3.2.2	VIENTO.....	110
3.3.2.3	TIPOS DE EQUIPO DINÁMICO.....	114
3.3.2.4	VIBRACIONES.....	116
3.3.3	COMBINACIONES DE CARGA.....	119
4	CAPÍTULO IV	122
	EJEMPLO PRÁCTICO	122
4.1	EQUIPOS ESTÁTICOS.....	122
4.1.1	DISEÑO DE LA CIMENTACIÓN PARA UN SEPARADOR TRIFÁSICO HORIZONTAL.....	122
4.1.1.1	DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO	122
4.1.1.2	DATOS DE SUELO Y MATERIALES.....	124
4.1.1.3	SELECCIÓN DEL TIPO DE CIMENTACIÓN	125
4.1.1.4	CARGAS Y COMBINACIONES	126
4.1.1.5	DIMENSIONAMIENTO Y MODELO ESTRUCTURAL	127
4.1.1.6	DISEÑO	128
4.1.2	DISEÑO DE LA CIMENTACIÓN PARA UNA TORRE DE SILENCIADOR, EXHAUST SYSTEM.....	128
4.1.2.1	DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA.....	129
4.1.2.2	DATOS DE SUELO Y MATERIALES.....	129

4.1.2.3	SELECCIÓN DEL TIPO DE CIMENTACIÓN	130
4.1.2.4	CARGAS Y COMBINACIONES	130
4.1.2.5	DIMENSIONAMIENTO Y MODELO ESTRUCTURAL	131
4.1.2.6	DISEÑO	133
4.2	EQUIPOS DINÁMICOS.....	134
4.2.1	DISEÑO DE LA CIMENTACIÓN PARA UNA BOMBA DE INYECCIÓN DE AGUA.....	134
4.2.1.1	DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO	134
4.2.1.2	DATOS DE SUELO.....	135
4.2.1.3	SELECCIÓN DEL TIPO DE CIMENTACIÓN	135
4.2.1.4	CARGAS Y COMBINACIONES	135
4.2.1.5	DIMENSIONAMIENTO Y MODELO ESTRUCTURAL	136
4.2.1.6	DISEÑO	138
4.2.2	DISEÑO DE LA CIMENTACIÓN PARA UN GENERADOR DE ENERGÍA DE 7MW	138
4.2.2.1	DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO	138
4.2.2.2	DATOS DE SUELO.....	140
4.2.2.3	SELECCIÓN DEL TIPO DE CIMENTACIÓN	140
4.2.2.4	CARGAS	141
4.2.2.5	DIMENSIONAMIENTO Y MODELO ESTRUCTURAL	141
4.2.2.6	DISEÑO	142
5	CAPÍTULO V	143

RESUMEN DE PROCEDIMIENTO PARA EL DISEÑO DE CIMENTACIONES	143
6 CAPÍTULO VI	149
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	149
6.1 CONCLUSIONES	149
6.2 RECOMENDACIONES	157
BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS	159
ANEXOS	163
ANEXO A: DIVISIÓN DE BLOQUES PETROLEROS	163
ANEXO B: HOJA DE DATOS SEPARADOR HORIZONTAL	164
ANEXO C: ESTRUCTURAS ASOCIADAS A GENERADOR WARTSILA	165
ANEXO D: ESQUEMA 3D TORRE DE SILENCIADOR	166
ANEXO E: HOJAS DE DATOS BOMBA DE INYECCIÓN DE AGUA	167
ANEXO F: HOJAS DE DATOS DE GENERADOR WARTSILA 7MW	170
ANEXO G: RESULTADOS DE ESTUDIOS DE SUELOS	174
ANEXO H: MEMORIA DE CÁLCULO CIMENTACIÓN DE SEPARADOR	176
ANEXO I: MEMORIA DE CÁLCULO CIMENTACIÓN TORRE DE SILENCIADOR	177
ANEXO J: MEMORIA DE CÁLCULO CIMENTACIÓN DE BOMBA DE INYECCIÓN DE AGUA	178

ANEXO K: MEMORIA DE CÁLCULO CIMENTACIÓN DE GENERADOR WARTSILA.....	179
ANEXO L: FUERZAS HORIZONTALES: GENERACIÓN DEL ESPECTRO SÍSMICO SEGÚN NEC-11 Y PRESIÓN DE VIENTO SEGÚN ASCE-7-2010	180
ANEXO M: PLANOS ESTRUCTURALES	181
HOJA DE LEGALIZACIÓN DE FIRMAS	182

LISTADO DE TABLAS

CAPÍTULO II

Tabla 2-1 Composición química del petróleo en porcentajes	33
Tabla 2-2 Clasificación del crudo según gravedad API	34
Tabla 2-3 Indicador para el procesamiento de crudos	35
Tabla 2-4 Tiempos de retención para diferentes tipos de fluido	46
Tabla 3-1 Clasificación SUCS suelos gruesos.....	83

CAPÍTULO III

Tabla 3-2 Clasificación SUCS suelos finos.....	84
Tabla 3-3 Aberturas de tamices normalizados para granulometría	85
Tabla 3-4 Ángulos de fricción aproximados para suelos sin cohesión. Fuente: Manual del Ingeniero Civil, tomo I	88
Tabla 3-5 Longitud mínima referencial de pernos de anclaje	94
Tabla 3-6 Resumen de Cargas Muertas	101
Tabla 3-7 Resumen de Cargas Vivas.....	102
Tabla 3-8 Cargas de Operación	102
Tabla 3-9 Resumen de Cargas Varias	103
Tabla 3-10 Factor de Importancia según el Tipo de Estructura. Fuente: NEC-11, Peligro Sísmico.....	107
Tabla 3-11 Coeficientes de reducción de respuesta estructural en estructuras diferentes a la edificación, NEC-11, Peligro Sísmico	108

Tabla 3-12 Cargas dinámicas en equipo rotatorio..... 117

Tabla 3-13 Cargas dinámicas en equipo recíprocante 118

Tabla 3-14 Cargas dinámicas en equipo de impulsión..... 119

CAPÍTULO IV

Tabla 4-1 Características de Operación de Separador Horizontal 122

Tabla 4-2 Resumen de Pesos de Separador Horizontal 123

Tabla 4-3 Resumen de Cargas actuantes en cimentación de Separador 126

Tabla 4-4 Resumen de Cargas de la Torre del silenciador 131

Tabla 4-5 Pesos de la bomba y elementos 134

Tabla 4-6 Cargas estáticas en cimentación de bomba..... 135

Tabla 4-7 Pesos de instalación de Generador-Motor de 7MW..... 139

Tabla 4-8 Resumen de Cargas transmitidas a losa de Generador..... 141

CAPÍTULO V

Tabla 5-1 Datos de severidad de las vibraciones en maquinaria en general . 146

LISTADO DE FIGURAS

CAPÍTULO II

Figura 2.1 Esquema típico de una facilidad petrolera. Fuente: Curso de Facilidades de Producción (NEXT)	8
Figura 2.2 Sistemas de comunes levantamiento artificial. Fuente: “Instalaciones de superficie para la producción de petróleo y gas” (NEXT)	9
Figura 2.3 Composición típica de un yacimiento de petróleo	12
Figura 2.4 Energías que intervienen en bombeo mecánico. Fuente: Sistema de bombeo mecánico, http://gerardofretes.blogspot.com	14
Figura 2.5 Esquema del mecanismo y partes del bombeo mecánico. Fuente “EL Pozo Ilustrado”	15
Figura 2.6 Esquema de BES.....	19
Figura 2.7 Detalles básicos de una instalación de bombeo hidráulico para pozos petrolíferos.....	21
Figura 2.8 Componentes de una bomba jet	23
Figura 2.9 Diagrama esquemático del manejo de la producción en campo. Fuente: “Instalaciones de superficie para la producción de petróleo y Gas” (NEXT)	32
Figura 2.10 . Área de Químicos en plataforma.....	37
Figura 2.11 Esquema de separadores. Fuente: “Instalaciones de superficie para la producción de petróleo y Gas” (NEXT).....	42
Figura 2.12 Separador Trifásico Horizontal soportado en un skid.....	45
Figura 2.13 Componentes de un separador.....	48

Figura 2.14 Partes de una bomba centrífuga. Fuente: “Bombas Centrífugas”, Ing. Juan Ruíz	50
Figura 2.15 Bomba centrífuga sobre bloque de cimentación	51
Figura 2.16 Clasificación de bombas reciprocantes	52
Figura 2.17 Esquema de funcionamiento de una bomba recíprocante	53
Figura 2.18 Generador Wartsila	54
Figura 2.19 Torre del silenciador (exhaust system).....	55
Figura 2.20 Esquema de gases de escape en Generador a diesel.....	56

CAPÍTULO III

Figura 3.1 Resumen de los tipos de cimentaciones	59
Figura 3.2 Pilote a la punta	60
Figura 3.3 Pilote a fricción.....	61
Figura 3.4 Zapata y pedestal octogonal para vessel vertical.....	62
Figura 3.5 Zapatas arriostradas para vessel horizontal Fuente: ACI.....	63
Figura 3.6 Zapata octogonal y pedestal para esfera vertical. Fuente: ACI.....	64
Figura 3.7 Cimentación tipo bloque. Fuente: ACI.....	65
Figura 3.8 Cimentación tipo bloque combinado. Fuente: ACI	66
Figura 3.9 Cimentación tipo pórtico (mesa). Fuente: ACI.....	66
Figura 3.10 Cimentación tipo pórtico (mesa) con aisladores. Fuente: ACI.....	67
Figura 3.11 Cimentación bloque con equipo asentado en resortes. Fuente: ACI	67

Figura 3.12 Bloque de inercia en estructura. Fuente: ACI.....	68
Figura 3.13 Cimentación tipo cajón	69
Figura 3.14 Diagrama de flujo conceptual para diseño de cimentaciones (modificado de NBCC, 2005).....	70
Figura 3.15 Modelo de fricción, (b) Solicitación de corte en una sección de suelo. Fuente Principios de Ingeniería en Cimentaciones, Braja M. Das	87
Figura 3.16 Representación geométrica de la fricción interna. Fuente: Ingeniería de los Suelos II, Ing. Milton Torres Espinoza	88
Figura 3.17 Fuerzas que influyen en el volteo y estabilización de la cimentación	99
Figura 3.18 Cuarto de generación Wartsila.....	113
Figura 3.19 Límite de Amplitudes según frecuencia de operación. Fuente: “Fundaciones de Equipos Vibratorios”, Fernando Yévenes U.....	116

CAPÍTULO IV

Figura 4.1 Esquema de cimentación para separador horizontal	124
Figura 4.2 Detalle de Anclaje de perfil a cimentación.....	131
Figura 4.3 Sección crítica a cortante en perfiles metálicos	133
Figura 4.4 Dimensión preliminar de la altura de la cimentación. Fuente: “Plant Engineering Hand Book” de Mobley R. Keith	137

LISTADO DE ANEXOS

1.	ANEXO A: DIVISIÓN DE BLOQUES PETROLEROS.....	163
2.	ANEXO B: HOJA DE DATOS SEPARADOR HORIZONTAL.....	164
4.	ANEXO C: ESTRUCTURAS ASOCIADAS A GENERADOR WARTSILA	165
5.	ANEXO D: ESQUEMA 3D TORRE DE SILENCIADOR.....	166
6.	ANEXO E: HOJAS DE DATOS BOMBA DE INYECCIÓN DE AGUA	166
7.	ANEXO F: HOJAS DE DATOS DE GENERADOR WARTSILA 7MW.....	170
9.	ANEXO G: RESULTADOS DE ESTUDIOS DE SUELOS.....	173
10.	ANEXO H: MEMORIA DE CÁLCULO CIMENTACIÓN DE SEPARADOR	176
11.	ANEXO I: MEMORIA DE CÁLCULO CIMENTACIÓN TORRE DE SILENCIADOR	177
12.	ANEXO J: MEMORIA DE CÁLCULO CIMENTACIÓN DE BOMBA DE INYECCIÓN DE AGUA.....	178
13.	ANEXO K: MEMORIA DE CÁLCULO CIMENTACIÓN DE GENERADOR WARTSILA	179
14.	ANEXO L: GENERACIÓN DEL ESPECTRO SÍSMICO SEGÚN NEC-11	180
15.	ANEXO M: PLANOS ESTRUCTURALES.....	181

NOMENCLATURA UTILIZADA

CPF: Central Processing Facility.

BES: Bombeo Electrosumergible

BPD: Barriles por día.

PSI: Pounds Square Inch

ARCH: Agencia de Regulación y Control Hidrocarburífero.

OCP: Oleoducto de Crudos Pesados.

KOD: Knock out Drum.

API: American Petroleum Institute.

MW: Mega Watts.

PDVSA: Petróleos de Venezuela, Sociedad Anónima

NEC: Norma Ecuatoriana de la Construcción.

SUCS: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

FS: Factor de Seguridad.

UBC: Uniform Building Code.

ACI: American Concrete Institute.

ASCE: American Society of Civil Engineering.

ASME: American Society of Mechanical Engineering.

ANSI: American National Standards Institute.

MMSCFD: Million Standard Cubic Feet Per Day.

PEMEX: Petróleos mexicanos

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

Los hidrocarburos son sin duda alguna la fuente más importante en la actualidad. El petróleo desde hace varias décadas es un elemento irremplazable al momento de elegir un recurso confiable para el desarrollo de la industria, transporte y suministro de energía; eso sin contar la cantidad de derivados que produce y su aporte a diferentes áreas. El Ecuador es un país productor de petróleo por excelencia, siendo su exportación la mayor fuente de ingresos de nuestro país. El auge de la explotación estará vigente al menos dos décadas más, por lo que es importante el desarrollo de facilidades de extracción confiables y a la vez amigables con el medio ambiente.

Los yacimientos existentes en el Ecuador, casi siempre están concentrados en el oriente, sin embargo, lugares como Santa Elena y Esmeraldas, son también zonas en las que se trabaja en la recolección del crudo; por lo que son necesarias también facilidades.

El desarrollo de la ingeniería de dichas facilidades y/o plataformas involucra el trabajo en conjunto de varias ramas, mecánica, eléctrica, procesos y obviamente el área civil. El tipo de obra civil correspondiente al ámbito petrolero que debe realizarse es variado y extenso; la rama civil abarca desde los caminos de acceso, estabilización de suelos, cimentaciones, estructuras, soportería; en fin, una gran cantidad de elementos que deben ser lo suficientemente bien diseñados como para

cumplir eficientemente con la función destinada.

El presente trabajo se encargará de realizar un estudio sobre el proceso de extracción del crudo a su vez situando al ingeniero civil dentro del mismo, con el fin de tener una idea más clara sobre el tema, para así poder desarrollar una ingeniería adecuada. Además y como parte fundamental, se tratará el tema de cimentaciones para equipo y maquinaria petrolera, conjuntamente con un estudio de los mismos y un diseño, así se tratará de abarcar todos los requisitos que debe tener un calculista al momento de realizar un diseño óptimo de una cimentación.

1.1.1 ANTECEDENTES

La actividad petrolera en el Ecuador se ha venido desarrollando desde inicios del siglo XX, varias empresas extranjeras han tenido a cargo la exploración, explotación, refinación, almacenamiento y transporte de crudo y derivados y la comercialización del crudo en el país; por lo que generalmente la ingeniería para los propósitos mencionados se ha desarrollado bajo requerimientos y especificaciones extranjeras.

La mayoría de facilidades de producción, plataformas y plantas de generación de energía existentes son diseños netamente foráneos y construcciones con mano de obra local; los ingenieros ecuatorianos recibían los diseños y planos provenientes del exterior y se dedicaron a adoptar y adaptar estándares internacionales dentro de la situación local.

Con el transcurso del tiempo y con la intervención del Estado ecuatoriano en los procesos de explotación petrolera, se hizo necesario que exista un desarrollo mayor en la ingeniería local, con el propósito de

que se establezcan estándares y normas propias, aplicables a la situación geográfica, topográfica y geológica local.

Es entonces, cuando nacen varias empresas ecuatorianas que son ahora las que desarrollan los diseños completos de las facilidades petroleras. Por tanto es necesario tomar en cuenta que en la rama de ingeniería civil, los diseños destinados a satisfacer estándares petroleros se tratan de una manera especial. Factores de seguridad, consideraciones sísmicas y de viento; y buenas prácticas aplicadas deberán entonces ser tomados en cuenta, con el fin de asegurar un diseño estructural óptimo, confiable y seguro.

1.1.2 DIVISIÓN BLOQUES PETROLEROS EN ECUADOR

La importancia de reconocer las zonas de actividad petrolera en el país radica en localizar geográficamente las áreas en las cuales se desarrollarán posibles proyectos de ingeniería de detalle. El reconocimiento de dichas áreas, permite conocer datos generales importantes para el diseño, tales como: tipo de suelo según la región, zona sísmica, vías de acceso, yacimientos de agua y agregado cercanos; y además se pueden reconocer los proyectos similares con el fin de tener una referencia para evaluar el comportamiento de las cimentaciones elegidas. En el Anexo A se encuentra un mapa del Ecuador con la división de los bloques petroleros y su correspondiente asignación a la empresa que los explota.

La explotación petrolera en el Ecuador está concentrada en el oriente, sin embargo la península de Santa Elena también presenta actividad.

Las ganancias se contabilizan en barriles por día cuyo costo referencial lo da el WTI.¹ De ahí el Estado ecuatoriano es el encargado de fijar un acuerdo con las empresas extranjeras, las cuales invierten en la construcción de las facilidades, es decir en la explotación del campo propiamente; aportan con los diseños, la tecnología y los estándares. A partir de esto se debe considerar que gran parte de la obra a realizarse en el desarrollo de una facilidad de extracción partiendo de cero, será obra civil; cuyos diseños deberán regirse a los estándares considerados por cada empresa y complementarlos con la normativa nacional vigente. En el Ecuador prestan servicios empresas como: Andes Petroleum Ecuador (China), Repsol YPF, Petrobras Energía Ecuador (Brasil), Agip Oil, entre otras; empresas como Petroecuador y Petroamazonas son netamente estatales.

1.1.3 OBJETIVOS DEL ESTUDIO

Elaborar un estudio detallado de los parámetros necesarios para el diseño de la cimentación de los equipos y maquinaria comúnmente utilizados en una facilidad petrolera de producción; además realizar paso a paso el diseño de las cimentaciones de dichos equipos, maquinaria y estructuras.

1.1.4 JUSTIFICACIÓN

El Ecuador es un país petrolero por excelencia, el desarrollo de este sector es innegable y por ende la demanda de trabajos en el área civil es

¹ El WTI es un promedio, en cuanto a calidad, del petróleo producido en los campos occidentales del estado de Texas (Estados Unidos). Se emplea como precio de referencia para fijar el precio de otros petróleos crudos producidos.

constante. Las cimentaciones, estructuras, vías y demás obras pertenecientes al área civil se tratan de una manera especial en este ámbito debido a que los equipos aquí utilizados son especiales. Para el caso de cimentaciones de tanques de almacenamiento o de dichos equipos, que pueden ser estáticos o dinámicos, las obras civiles deben ser capaces de responder de la mejor manera ante las solicitaciones.

Las facilidades petroleras están en constante crecimiento, plataformas, estaciones de generación, tanques de almacenamiento son comunes en el oriente y costa ecuatorianos. Constantemente se requiere realizar ampliaciones o nuevas instalaciones por lo que es extremadamente necesario tener un trabajo civil de calidad, que de seguridad al cliente.

El diseño de cimentaciones para equipos estáticos (tipo transformadores, chimeneas) o dinámicos (motores, bombas, generadores) requiere siempre el perfecto dominio de los códigos aplicables y del comportamiento de la cimentación. El resto son procedimientos comprobados científicamente y valederos. Es por eso que este trabajo pretende dictar parámetros necesarios para escoger correctamente el tipo de cimentación a utilizar, establecer el modelo matemático acorde a las solicitaciones y factores externos y establecer un método de cálculo eficiente.

CAPÍTULO II

FACILIDADES DE PRODUCCIÓN PETROLERA

2.1 ESQUEMA TÍPICO DE UNA FACILIDAD DE PRODUCCIÓN PETROLERA

Si bien una facilidad de producción es aquella en la que se hace el seguimiento del crudo desde la extracción hasta la entrega a tanques de almacenamiento para comercialización o al oleoducto; es necesario hacer una breve diferenciación entre una Plataforma y una Facilidad de Procesamiento Central (CPF²).

Plataformas son aquellas que se construyen o se levantan alrededor de un grupo de pozos aledaños y constan de: losa patín para recibir al taladro de perforación, pozos, cabezales, área de variadores, manifold (arreglo de tuberías principal y de prueba), área de químicos.

A partir de la salida del manifold, lo extraído del pozo se traslada a un CPF. Esta central de procesamiento (CPF) posee áreas separadas según el diseño del proceso de cada caso, pero en general consta de: recipientes a presión para separación de fases, tanques de almacenamiento, tanques de lavado, bombas aumentadoras de presión, bombas de inyección de agua o transferencia de crudo, recipientes contenedores de gas, flares (quemadores), depuradores; conjuntamente con un complejo sistema de tuberías y válvulas correspondiente al gas, agua y crudo extraídos, además del drenaje correspondiente para sólidos y desechos.

² Siglas en inglés para Central Processing Facility

En la figura 2.1 se aprecia conjuntamente una plataforma y una Central de procesamiento, lo que no sucede usualmente pues se puede tener un solo CPF al que llegue el flujo de varias plataformas y de aún más pozos, que debido al costo es lo más conveniente. Si una plataforma se encuentra a una distancia considerable de la Central de procesamiento cercana se requerirá de bombeo adicional para incrementar la presión del flujo, dado que ya no es suficiente la dada inicialmente por el bombeo desde el pozo.

La facilidad de producción deberá entonces, proveer de equipos de almacenamiento temporal (limitado) para recibir el flujo del pozo, además de equipos para acumular y separar los sólidos en suspensión, el gas y para el asentamiento libre del agua. De donde, las impurezas se purgan, el gas se quema o se reutiliza en pequeñas cantidades, el agua se reinyecta y el aceite se transporta por un sistema de recolección de tuberías hacia una planta central o CPF.

2.1.1 PARTES CONSTITUTIVAS

Se puede definir a una facilidad petrolera de producción como el conjunto de equipos cuya función principal es la de separar lo extraído del pozo en tres sustancias o fases: aceite, gas y agua; para luego bien re utilizarlos como fuente de energía o comercializarlos.

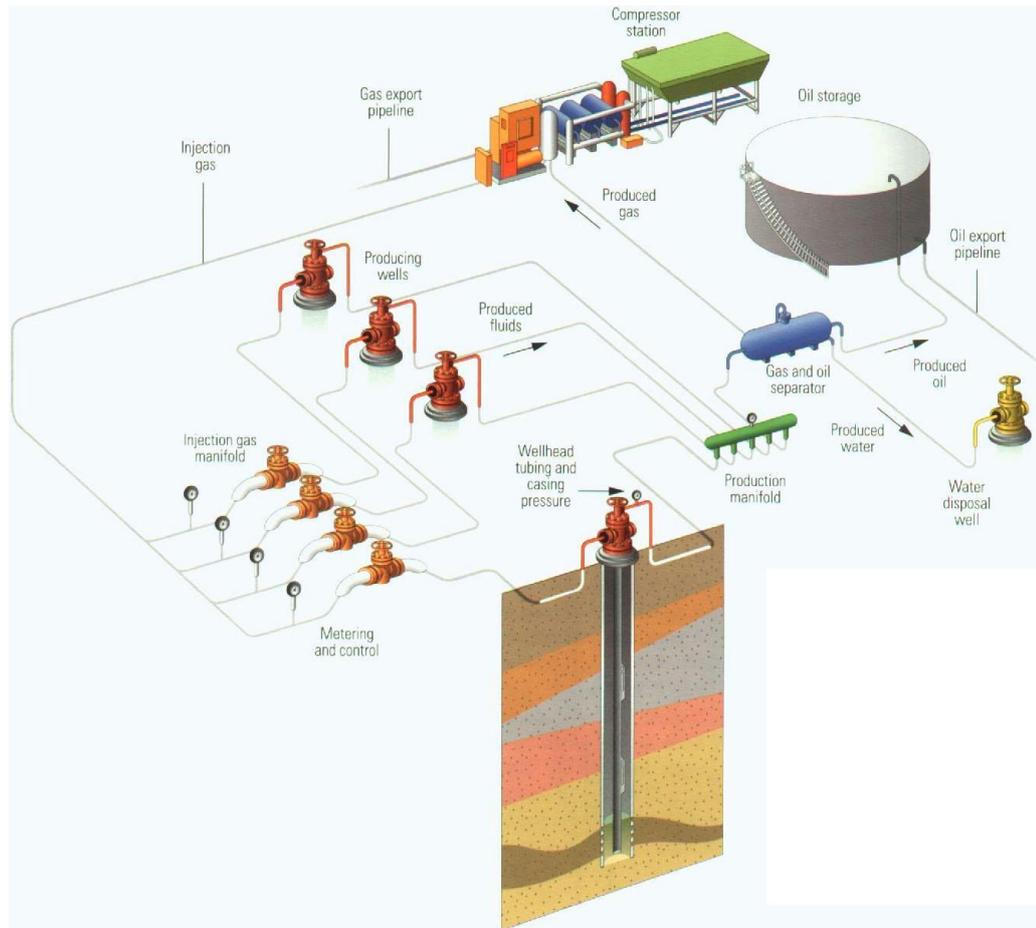


Figura 2.1 Esquema típico de una facilidad petrolera. Fuente: Curso de Facilidades de Producción (NEXT)

Una facilidad de producción petrolera generalmente se constituye por los elementos similares en todos los casos debido a que todas están diseñadas para cumplir un mismo propósito, lo que varía normalmente es el sistema de extracción del crudo desde el pozo. Se describe los elementos presentes en una facilidad más adelante en la sección definiciones.

2.1.1.1 PLATAFORMAS

Dentro de una plataforma se realizan trabajos de levantamiento de crudo y envío a la Central más cercana. Se compone principalmente de:

- Sistema de levantamiento artificial³
 - Bombeo mecánico
 - Bombeo por cavidades progresivas
 - Bombeo electro-sumergible
 - Bombeo Hidráulico

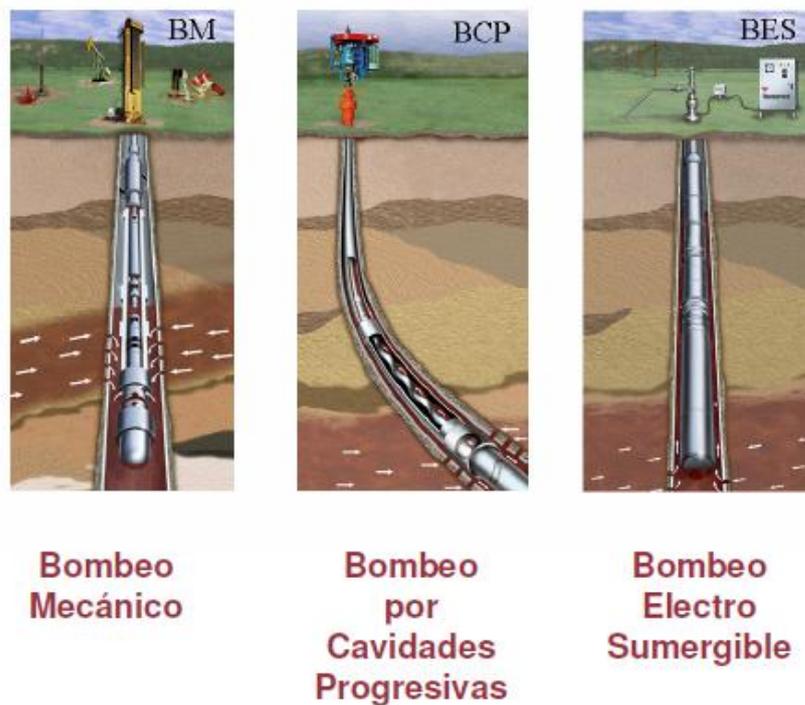


Figura 2.2 Sistemas de comunes levantamiento artificial.
Fuente: “Instalaciones de superficie para la producción de petróleo y gas” (NEXT)

³ Se mencionan los sistemas de levantamiento artificial comúnmente utilizados en la producción petrolera.

- Cabezales de producción (árbol)
- Manifold
- Área de químicos para tratamiento de crudo
- Bombeo multifásico (si la central se encuentra a grandes distancias de la plataforma)
- Sistema de generación de energía local (de ser requerido)

2.1.1.2 FACILIDAD DE PROCESAMIENTO CENTRAL (CPF)

- En el caso del crudo:
 - o Separadores bifásicos o trifásicos
 - o Tratadores asociados a los separadores (calentadores)
 - o Bota de gas
 - o Tanque de lavado y almacenamiento
 - o Bombas (booster y de transferencia)
 - o Lack unit
- En el caso del agua:
 - o Tanque de almacenamiento
 - o Bombas (booster y de reinyección)
 - o Planta de tratamiento (en algunos casos)
- En el caso del gas
 - o KoD (Knock out drum) de alta y baja presión: depósitos de

almacenamiento a presión

- Depuradores (scrubber)
- Flares (quemadores de gas)

A lo largo de las instalaciones se encuentra además en cada etapa otros elementos: válvulas reguladoras de presión, instrumentos de control y medición, equipos eléctricos de suministro de energía (transformadores, generadores, variadores), en algunos casos compresores de aire, área de inyección de químicos demulsificantes, trampas de grasas, piscinas de lodos, drenajes. Además se encuentran estructuras tipo marco utilizadas para el soporte de tuberías denominadas: pipe racks.

En la descripción del proceso se detallará mejor los elementos antes mencionados y su participación dentro del mismo.

2.2 PROCESO DE EXTRACCIÓN Y PRODUCCIÓN

El proceso de extracción del crudo comprende un estudio detallado y exhaustivo, que inicia con la exploración de yacimientos de crudo. Dicha exploración se lleva a cabo perforando pozos pequeños (pozos exploratorios) cada cierta distancia con el fin de encontrar depósitos de crudo. El petróleo bajo la tierra se aloja en una especie de piscinas, las cuales dependiendo del tamaño entre otros factores será o no un yacimiento que valga la pena ser explotado. La exploración inicial también provee una idea de la calidad y cantidad del crudo que se podrá obtener de determinado yacimiento.

Una vez determinadas las características del yacimiento, se procede a la explotación propiamente dicha. Se ha mencionado lo exhaustivo que debe ser el estudio del proceso de extracción y producción; sin embargo para el presente trabajo se hará énfasis únicamente en dejar sentado la idea general de dicho proceso.

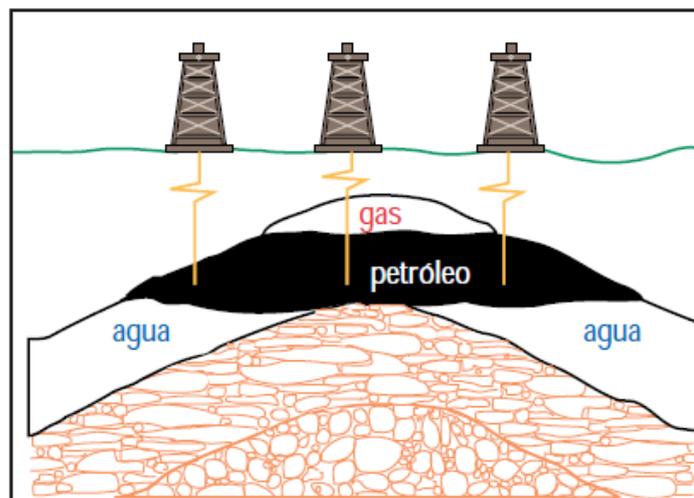


Figura 2.3 Composición típica de un yacimiento de petróleo

En definitiva, por medio de *“actividades de exploración y perforación la industria petrolera estudia la corteza terrestre y el subsuelo para buscar, ubicar, cuantificar y producir yacimientos de gas y/o petróleo con fines comerciales.”*⁴

2.2.1 SISTEMAS DE EXTRACCIÓN

La parte inicial del proceso, una vez que se ha determinado un yacimiento en buenas condiciones y se tenga las facilidades construidas y completas, es sin duda la extracción del crudo desde el yacimiento. En ciertos casos la presión del yacimiento es suficiente para que el crudo

⁴ “El Pozo Ilustrado”, Efrain E. Barberii

emerja naturalmente hacia la superficie (flujo natural), sin embargo y debido a que la industria petrolera debe mantener una producción constante, lo más común es utilizar sistemas artificiales de levantamiento.

Se hará una descripción de los sistemas de bombeo más utilizados en el Ecuador que son:

- Bombeo mecánico
- Bombeo electro sumergible
- Bombeo hidráulico (con bomba Jet también llamado bombeo secundario)

2.2.1.1 BOMBEO MECÁNICO

El sistema de bombeo mecánico es el proceso de levantamiento artificial más antiguo, a pesar de ser muy efectivo; en nuestro país es aún utilizado pero en pozos relativamente antiguos o marginales (de baja producción o baja calidad de crudo).

Es óptimo cuando se utiliza bajo condiciones de presiones moderadas y volúmenes pequeños.

El pozo a ser bombeado mecánicamente, presenta ya un grado de presión natural, por lo que este mecanismo es un procedimiento de succión y transferencia continua.

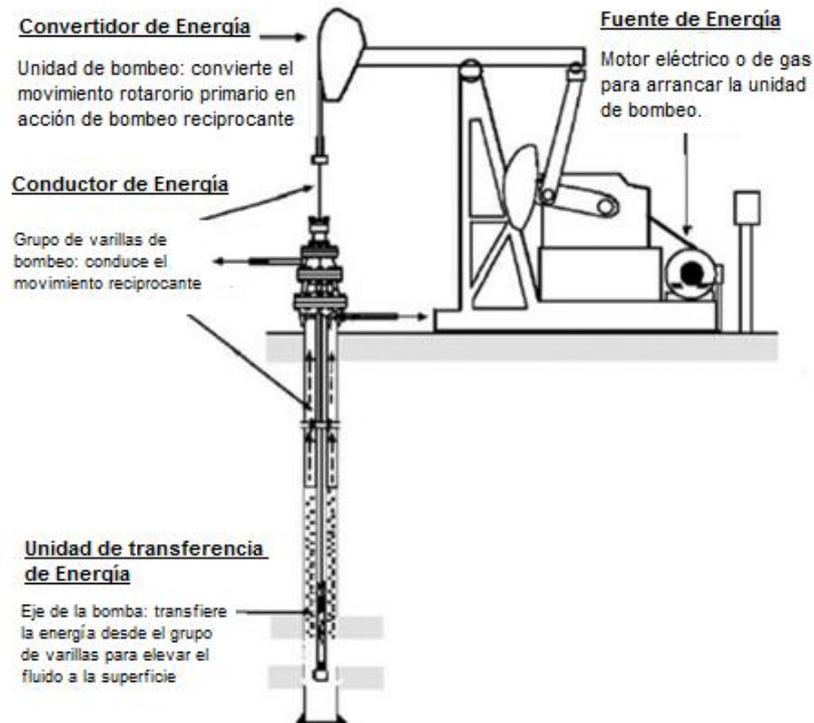


Figura 2.4 Energías que intervienen en bombeo mecánico. Fuente: Sistema de bombeo mecánico, <http://gerardofretes.blogspot.com>

2.2.1.1.1 PARTES CONSTITUTIVAS Y FUNCIONAMIENTO

La fig. 2.6 muestra las partes constitutivas de un bombeo mecánico. Las cuales básicamente se encuentran en todos los casos. El motor es el que suministra la energía necesaria para su funcionamiento. Básicamente, el balancín hace que una serie de varillas de succión (sarta de varillas que pueden medir varios cientos de metros dependiendo la profundidad del pozo) introducidas en el pozo, se deslicen de arriba hacia abajo y de ahí el movimiento del pistón de la bomba (dicha bomba sumergible, funciona de manera parecida a una que bombea aire a un neumático), la válvula fija se abre para que el crudo ingrese al cilindro de la bomba y se cierra al movimiento ascendente de las varillas, solo al tiempo que se abre la válvula

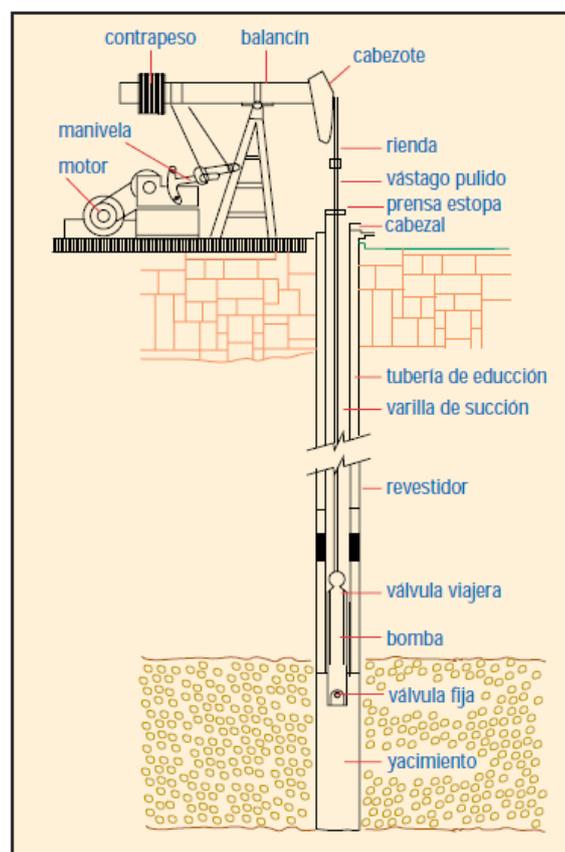


Figura 2.5 Esquema del mecanismo y partes del bombeo mecánico. Fuente “EL Pozo Ilustrado”

viajera, que permite que el producto ingrese a la tubería de educación o producción; la misma que en el ascenso se vuelve a cerrar para permitir que llegue el crudo al cabezal del pozo; al tiempo que se repite el proceso de apertura de la válvula fija e ingreso a la bomba.

El contrapeso ubicado mayormente detrás del balancín permite que se realice continuamente el movimiento ascendente y descendente llamado movimiento de émbolo, lo que mantiene el flujo en la superficie.

2.2.1.1.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS

Como se ha mencionado anteriormente el bombeo mecánico es conveniente cuando se tienen presiones moderadas en el pozo y para volúmenes no tan grandes, bajo estas premisas tenemos:

VENTAJAS

- Mecanismo de fácil operación y mantenimiento.
- Disponibilidad de materiales y bombas de diferentes tamaños.
- Puede usarse junto a un sistema de inyección de gas y durante toda la vida de producción del pozo.
- El nivel de producción puede variarse fácilmente cambiando la velocidad de bombeo.
- El motor puede ser a gas si no existiese la electricidad necesaria para la puesta en marcha de un motor eléctrico.
- Se puede obtener la máxima producción bombeando el pozo a una baja presión de entrada.
- En caso de daño, los elementos de la superficie (motor,

contrapeso, etc.) pueden ser reemplazados fácilmente.

- Monitoreo remoto y además permite el control del proceso con computadora.

DESVENTAJAS

- Limitada capacidad de producción en comparación con otros métodos de levantamiento artificial.
- Por el tamaño y forma del equipo su uso es restringido fuera de la costa y en áreas urbanas.
- Tiene problemas cuando el pozo presenta grandes cantidades de arena o gas libre.
- En pozos desviados la fricción entre las varillas y la tubería puede producir fallas en el material.

2.2.1.2 BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE (BES)

Este sistema de levantamiento artificial es uno de los más usados en la actualidad, pues sirve para el manejo eficiente y económico de altos volúmenes de agua y crudo. Trabaja generalmente bajo presiones moderadas, cuando el índice de productividad es alto, la relación agua-petróleo es alta y la relación gas-líquido es baja⁵. Además, debido al tipo de bomba, se manejan altos voltajes, por lo que siempre o casi siempre es necesario equipos eléctricos adicionales como transformadores, variadores de frecuencia, cajas de venteo, cuartos de control, etc.

⁵ En caso de tener relación gas-líquido alta, se puede usar el bombeo electro sumergible junto con un separador de gas.

Este sistema funciona principalmente convirtiendo la energía eléctrica en energía mecánica y se constituye principalmente de una bomba centrífuga ubicada en el subsuelo, cuya función es elevar el producto del yacimiento hacia la superficie.

2.2.1.2.1 PARTES CONSTITUTIVAS Y FUNCIONAMIENTO

Típicamente un sistema de bombeo electro sumergible se constituye por:

- *Equipos de subsuelo:* en donde se tiene: la bomba centrífuga, la sección de entrada estándar o separador de gas (si fuere necesario), la sección sellante o de protección y el motor eléctrico.
- *Equipos de superficie:* son principalmente: el cabezal, variador de frecuencia, la caja unión o venteo y el o los transformadores.
- *Cables:* el principal es el cable de conducción eléctrico, además del cable de conexión al motor y un sensor de presión en el fondo.

La bomba centrífuga trabaja incrementando la presión del fluido elevando el caudal necesario de crudo de tal manera que llegue al cabezal de descarga con la presión necesaria. La sección estándar de entrada permite que el fluido pase a la bomba, en el caso de que exista separador de gas éste garantiza retirar la mayor cantidad de gas posible para, de la misma manera permitir el ingreso de fluidos a la bomba.

El cable de potencia o de conducción se encarga de llevar la energía desde la superficie hasta el motor eléctrico de la bomba centrífuga para su operación. El tablero de control sirve para el manejo de la producción, los variadores de frecuencia permiten arrancar los motores a velocidades bajas para reducir esfuerzos en el eje de la

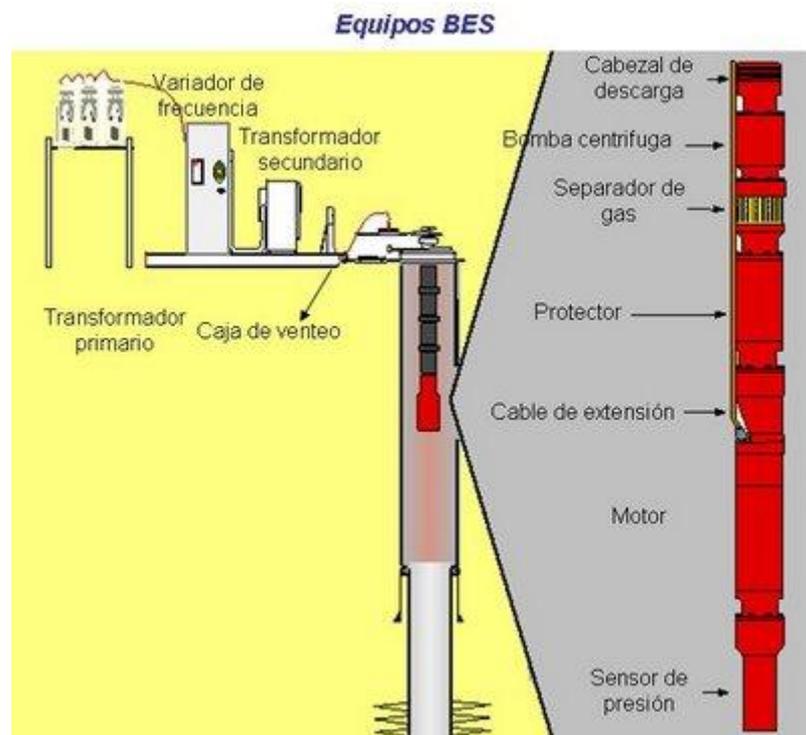


Figura 2.6 Esquema de BES

bomba y a proteger de variaciones de corriente; la caja de venteo por su parte ubicada entre el cabezal y el tablero de control, permite airear el gas que fluye a través del cable y evita que llegue al tablero.

Este mecanismo de levantamiento artificial se compone de equipos de alto costo por lo que es necesario el buen manejo de los mismos para su óptimo funcionamiento.

2.2.1.2.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS**VENTAJAS**

- Sirve para levantar grandes volúmenes de fluidos a un costo relativamente bajo.
- Tiene buen desempeño tanto en pozos verticales rectos como en desviados.
- El rango de la tasa de producción que maneja varía entre 200 y 90000 BPD (barriles por día).
- La presencia de sensores en el fondo facilita el control y monitoreo de presiones y temperaturas.
- Funciona a grandes profundidades y con bajas presiones de fondo, además que soporta altas temperaturas.
- Se controla fácilmente desde la superficie y no implica grandes instalaciones en la misma, por lo que no causa gran impacto en áreas urbanas.
- Presenta una vida útil larga con bajo costo de mantenimiento.

DESVENTAJAS

- Se necesita una gran inversión inicial.
- Es importante contar con un suministro de energía estable ya que se manejan altos voltajes, por lo que generalmente se instala generadores de energía cuyos costos son elevados.
- Se debe controlar la presencia de gas libre para que los fluidos puedan ingresar a la bomba.
- No funciona adecuadamente en presencia de sólidos o de cantidades significativas de arena.

- Las altas temperaturas pueden llegar a deteriorar los cables.

2.2.1.3 BOMBEO HIDRÁULICO (CON BOMBA JET)

Es un método muy comúnmente usado en el Ecuador, su principio se basa en que las bombas para el levantamiento del crudo son accionadas por el llamado fluido motriz, que puede ser el mismo petróleo o agua.

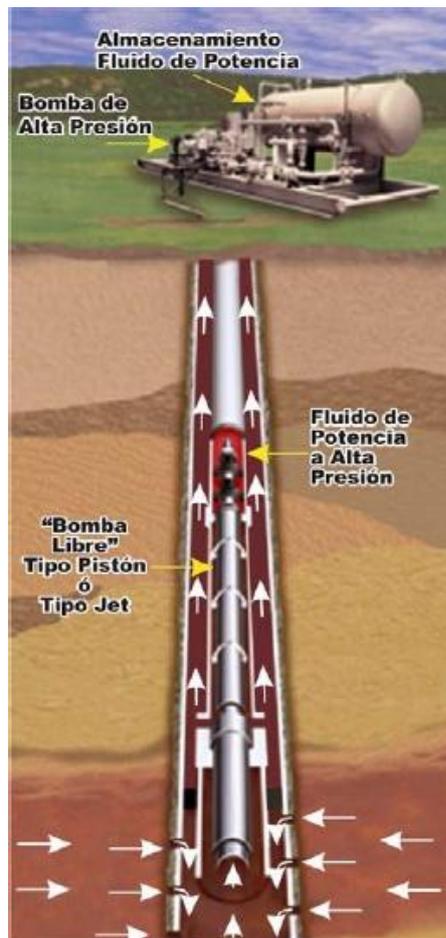


Figura 2.7 Detalles básicos de una instalación de bombeo hidráulico para pozos petrolíferos

Si bien lo anterior es el principio de funcionamiento de un bombeo hidráulico en general, la bomba usada puede ser "tipo pistón (o

bombeo recíprocante)” o “tipo jet”. Este estudio se enfoca únicamente en la segunda, debido a que es la más utilizada en el Ecuador.

La diferencia es que el bombeo tipo jet, utiliza un fluido a presión para dar potencia a la bomba de subsuelo. Soporta altas presiones de fluido y altos volúmenes de líquido.

2.2.1.3.1 PARTES CONSTITUTIVAS Y FUNCIONAMIENTO

El fluido de potencia o motriz (generalmente petróleo o agua) es almacenado en tanques, el mismo se envía con altas presiones a la bomba, de donde la energía potencial de dicho fluido se convierte en energía cinética.

En la fig. 2.9 se observa los componentes de una bomba tipo jet, a la boquilla llega entonces el fluido motriz, en donde se convierte en un chorro de alta velocidad. Este chorro se encuentra con el fluido de producción en la sección de la garganta donde se produce una transferencia de impulso que es lo que hace que el fluido de producción se eleve a la superficie; mientras que en la sección del difusor se reduce la velocidad aumentando la presión.

La presión de operación varía entre 2000-4000 PSI.

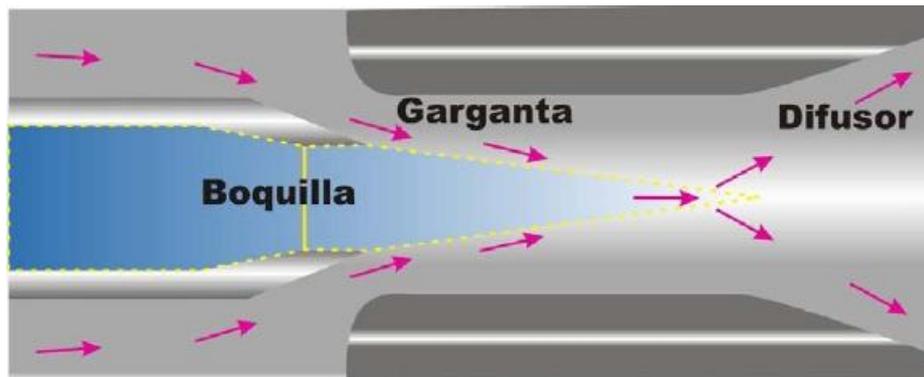


Figura 2.8 Componentes de una bomba jet

2.2.1.3.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS

VENTAJAS

- Permite manejar emulsiones fuertes.
- No tiene problemas utilizándolo en pozos desviados.
- Debido a que se utiliza un fluido pueden inyectarse directamente químicos demulsificantes al pozo.
- Permite varias formas de recuperación de la bomba y el costo de su reemplazo es relativamente bajo.
- Tiene una buena tolerancia de sólidos en la producción.
- Los equipos de superficie no ocupan tanto espacio, por lo que no hay inconveniente en su uso en áreas urbanas.

DESVENTAJAS

- Se necesita un diseño complejo de las líneas de inyección y recolección.
- Si el pozo ejerce contrapresión, este sistema es sensible a ello.

- La bomba puede presentar desgaste cuando hay bajas presiones a la entrada de la bomba.
- Si el fluido motriz utilizado es aceite, puede ser peligroso debido a que es inflamable.
- Se necesita de planes de contingencia en la superficie debido a los fluidos inflamables a altas presiones, que pueden producir explosiones.

2.2.2 INYECCIÓN DE AGUA Y VAPOR

Independientemente de los métodos artificiales de levantamiento mencionados anteriormente, y de acuerdo a la naturaleza de cada pozo, se emplea estos dos métodos con el fin de aumentar la eficiencia en la recuperación para facilitar la producción.

- *Inyección de Agua:* se basa en la inundación de un conjunto de pozos que generalmente se perforan a distancias de entre 50 y 500m, debido a la diferencia de densidades, el agua desplaza al crudo y puede mantenerse o incrementarse la presión del yacimiento entero. En algunos casos la eficiencia puede incrementarse en un 60%.
- *Inyección de Vapor:* funciona bajo el mismo principio de la inyección de agua, desplazar al crudo. Sin embargo, este método es usado en pozos que producen crudos muy viscosos, al aumentar la temperatura del yacimiento se reduce dicha viscosidad y el petróleo fluye mejor en su camino ascendente.

Los dos anteriores junto con cualquier método de levantamiento artificial, son las formas comúnmente usadas de extracción de crudo. Dependiendo de su diseño y combinación, y tomando en cuenta las características de cada yacimiento; la producción será más o menos eficiente.

2.2.3 DEFINICIONES

Facilidades de producción: Son aquellas compuestas por todos los equipos, maquinaria y materiales encargados de todos los procesos de la recolección, separación y tratamiento de los fluidos extraídos, así como la caracterización y medición de las corrientes provenientes de los pozos productores. Además la constituye la infraestructura asociada como los equipos encargados de la generación de la energía, necesaria para el desarrollo de las actividades antes mencionadas.

Plataformas: Se conoce como plataforma principalmente a la estructura montada alrededor de un pozo cuya finalidad es extraer el crudo hacia la superficie. Comprende desde el sistema de levantamiento artificial, hasta el manifold, de donde se desprende la línea que conduce al CPF.

CPF: Abreviatura en inglés para Central Processing Facility, es aquella a donde llega el producto de la extracción. Aquí se realizan las actividades de separación, depuración, almacenamiento y despacho de las fases.

Crudo: Más conocido como petróleo, se trata principalmente de una mezcla de hidrocarburos⁶ presentes en distintas fases, aunque también se encuentran compuestos como azufre, nitrógeno, sales, metales, entre

⁶ Compuestos formados por átomos de Carbono en Hidrógeno en distintas proporciones.

otros. Su formación es de origen natural y se aloja en la corteza terrestre en yacimientos.

Gas natural: Compuesto combustible que se aloja en yacimientos independientes en la corteza terrestre o más comúnmente mezclado en yacimientos de petróleo en condiciones de alta presión. Puede contener compuestos “indeseables” para su comercialización por ejemplo sulfuro de hidrógeno (H_2S), por lo cual es tratado luego de su extracción antes de su uso.

Cabezal de producción: También conocidos como “árboles de navidad”, son dispositivos colocados en la cabeza del pozo cuya función es controlar de forma segura los fluidos provenientes del pozo y realizar las operaciones de distribución desde la cabeza del pozo.

Manifold: Se trata de arreglos de tuberías y válvulas provenientes desde cada pozo y que tienen como función llevar el petróleo hacia un colector principal. Además, permiten aislar un pozo para realizar pruebas individuales o reparaciones; y la inyección de químicos demulsificantes.

Separador o vessel: Equipo mecánico que se encarga de la separación de las fases del petróleo (agua, gas, crudo) a determinadas condiciones de presión y temperatura.

Fase: Estado de la materia homogéneo y uniforme. En el caso del crudo, éste se compone de varias fases: líquido (con diferentes densidades), gas, sólidos (impurezas), etc., las cuales deberán ser separadas.

Tanque: Recipiente que recibe el producto de la separación (agua, crudo) y se mantiene en condiciones de presión atmosférica.

Bota de gas: Equipo encargado de realizar una separación final del gas restante del crudo proveniente de los separadores. Actúa como separador vertical.

KoD: (Knock out Drum) Separadores horizontales que aíslan el crudo condensado y sólidos del gas natural.

Scrubber de gas: Separadores usados cuando la relación gas-líquido es alta, consiguen precipitar los condensados de hidrocarburos, vapor de agua, etc.

2.2.4 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCESO

Se ha recalcado anteriormente la importancia de describir el proceso de producción para un ingeniero civil, pues es conveniente que éste conozca el comportamiento que se espera tener de las estructuras y cimentaciones diseñadas de acuerdo a los esfuerzos a los que se van a someter. A continuación se desarrolla una breve descripción del camino que deberán seguir el crudo, agua y gas a partir de su salida de los cabezales de pozo con finalidad de complementar los conceptos dados en este trabajo.

El producto extraído de un yacimiento consta principalmente de agua, crudo propiamente dicho y gas. Además de las impurezas que puedan llegar a la superficie, derivadas del bombeo: sólidos, arena, sal, etc. A partir de la salida del cabezal del pozo su trayectoria es la siguiente:

Dentro de una plataforma:

- Una vez extraído el crudo del yacimiento pasa por el cabezal de cada pozo y se dirige al sistema de recolección, en este caso el manifold.

Un manifold es un arreglo de tuberías a donde llega lo recolectado de cada pozo con una presión de más o menos 400 PSI, del mismo se desprenderá una línea principal y una de prueba, con el fin de poder aislar cada pozo y tomar muestras del crudo. En Ecuador la ARCH (Agencia de Regulación y Control Hidrocarburífero) es la encargada de monitorear la toma de muestras y los resultados.

- De la línea principal se dirige el flujo a la Estación Central (CPF) donde es recibido en una o varias unidades separadoras o vessels, la presión con la que el flujo llega a la unidad separadora es la dada desde el bombeo del pozo. Si una plataforma se encuentra a distancias considerables de CPF en donde la presión no sea suficiente, se instalan sistemas de bombeo multifásico del flujo con el fin de que llegue a los separadores con la presión adecuada.

Dentro de la Facilidad de Procesamiento Central

- Dependiendo del diseño del proceso, se tendrá una o varias unidades separadoras, de igual manera éstas serán bifásicas o trifásicas; conceptos que se detallarán en el apartado de Separadores. Asimismo dependiendo de las propiedades del fluido se deberá contar con tratadores o calentadores al interior de las unidades separadoras, con el fin de facilitar el recorrido del flujo (minorar la viscosidad) y la separación de las fases.
- Una vez realizada la separación de las fases cada producto: crudo, gas, agua cada uno toma el siguiente camino:

2.2.4.1 CRUDO

- Saliendo de la unidad separadora éste pasa por una bota de gas, la cual servirá para retirar lo que no pudo ser separado en el vessel.
- A continuación, ingresa a un tanque de lavado (wash tank), el mismo que tiene un tiempo de residencia en el cual el agua aún presente se asienta por diferencia de densidades.
- Por rebose, el crudo pasa a otro tanque de almacenamiento del cual el flujo se dirigirá generalmente a un OCP (oleoducto de crudos pesados) para su comercialización, para lo cual necesita adquirir cierta presión.
- Saliendo del tanque de almacenamiento, el flujo pasa por una bomba aumentadora de presión o bomba booster que se encarga de que el mismo alcance la presión adecuada para encender la bomba de transferencia (bomba horizontal) que es aquella que le imprime la presión final al flujo para la salida al oleoducto.
- Antes de que el crudo se incorpore al OCP, pasa por una unidad de medición de contenido de agua, llamada lack unit. Si el flujo que llega contiene una cantidad $\leq 1\%$ de agua, se despacha al oleoducto; de lo contrario éste regresa al wash tank para repetir el proceso.

2.2.4.2 AGUA

- Por ser el agua más densa que el crudo (1 t/m^3) se asentará en la unidad separadora. A continuación se dirige a un tanque de almacenamiento.

- Lo contrario de lo que pasa con el crudo, en el tanque de almacenamiento el crudo que pueda estar aún presente flotará, éste toma el nombre de desnatados. Los cuales se direccionan a un drenaje.
- El objeto del agua obtenida en la extracción de petróleo es ser reinyectada al yacimiento para realizar nuevamente la recuperación y levantamiento de crudo.
- Para la llegada del agua a los pozos se requiere de una sofisticada bomba de inyección cuya configuración dependerá de la presión a la que se debe llevar el agua al pozo y la cantidad de barriles que se desea inyectar al día.
- Previo al paso por la bomba de inyección, la presión necesaria para que ésta funcione es proporcionada por una bomba booster.

2.2.4.3 GAS

- Es usual reutilizar el gas como combustible para el funcionamiento de motores o equipos, para levantamiento artificial o inyección en yacimientos; sin embargo en nuestro país la mayoría de este gas es quemado en los flares (quemadores).
- El gas proveniente de la unidad separadora, es gas de alta presión, debido a que el mismo vessel es un recipiente que funciona a determinada presión; el gas de la bota desgasificadora y del wash tank (en pocas cantidades), se denomina gas de baja presión.
- El gas de alta presión pasa por una unidad llamada KoD (knock out drum) de alta presión, el cual se encarga de realizar otra

separación de las partículas de líquido sobrantes en el gas, provenientes del vessel. Lo propio sucede con el gas de baja, el cual pasa por un KoD de baja presión.

- Un flare es una especie de mechero el cual se encuentra encendido con una llama piloto, existe un flares de alta y baja a los cuales llegará el gas correspondiente desde los KoD's correspondientes. La llama será más o menos intensa de acuerdo a la cantidad de gas que ingresa.

- Los residuos del paso del flujo por los KoD's, scrubber y de los flare se denominan condensados, los cuales toman dos caminos: volver a las unidades separadoras o vessels o dirigirse al wash tank; e ingresar de nuevo al proceso de tratamiento.

- Es común que del yacimiento se obtenga sólidos en suspensión como arena o sal, estas impurezas son recogidas de cada recipiente y conducidas a un drenaje en donde se eliminan.

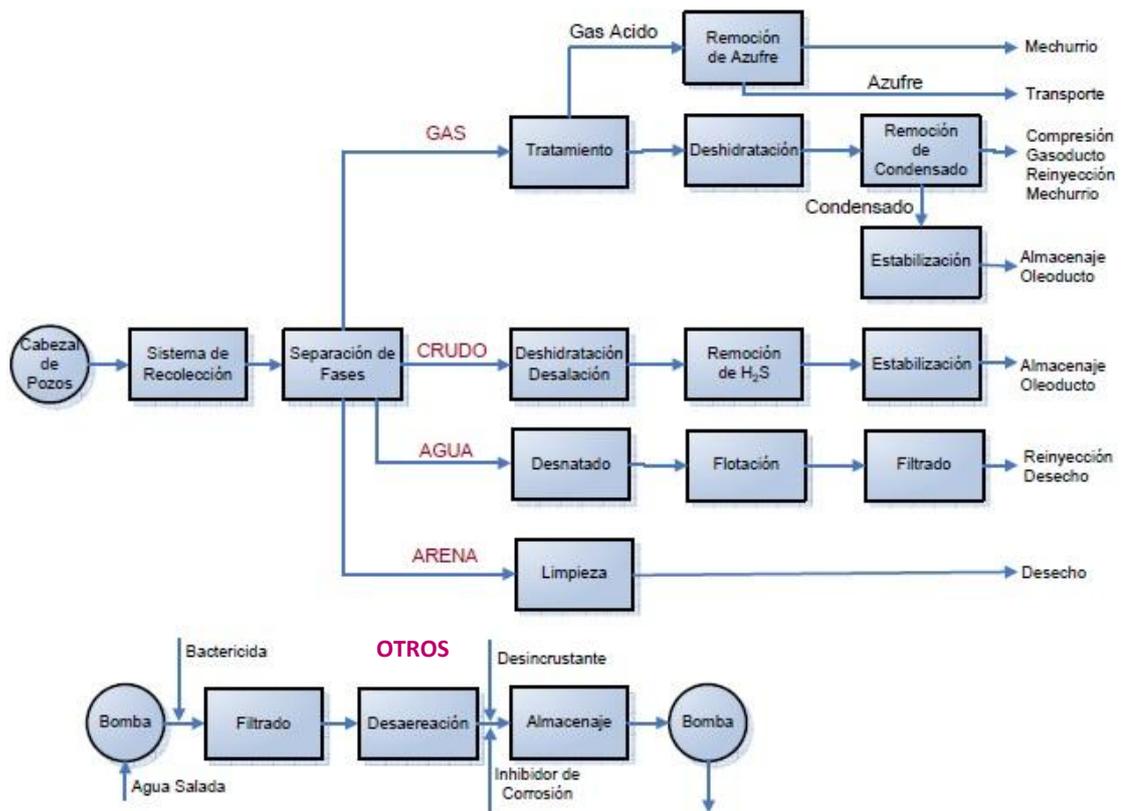


Figura 2.9 Diagrama esquemático del manejo de la producción en campo. Fuente: “Instalaciones de superficie para la producción de petróleo y Gas” (NEXT)

2.2.5 CARACTERÍSTICAS DE LOS FLUIDOS DE LOS POZOS

La rentabilidad de la explotación de un determinado pozo depende de varios factores como la facilidad de exploración y extracción de crudo, la disponibilidad de energía eléctrica, entre otros. Pero lo que definitivamente determina las ganancias que pueda o no tener la extracción de crudo de un pozo es sin duda, las propiedades de dicho fluido y cuánto tratamiento se le deba dar a éste para la eliminación de agua e impurezas.

El petróleo es una mezcla compleja de un amplio número de

compuestos hidrocarburos, cuyas propiedades varían dependiendo de las condiciones de su origen. Esta mezcla puede ser estudiada desde dos puntos de vista: químico y físico.

Punto de vista químico.- Se encarga de estudiar elemento por elemento los componentes del petróleo.

Es común en todos los yacimientos la presencia en cantidades variables de Carbono e Hidrógeno (de ahí el nombre Hidrocarburo), además de otros elementos como Nitrógeno, Azufre, Oxígeno, sales y algunos metales pesados. En el siguiente cuadro se representa aproximadamente la composición estándar de un yacimiento en porcentajes.

Tabla 2-1 Composición química del petróleo en porcentajes

Elemento	% en peso
Carbono	83-87
Hidrógeno	11-14
Azufre	0-05-2.5
Nitrógeno	0.1-2
Oxígeno	0-2

Punto de vista Físico.- A diferencia del enfoque químico, aquí se considera al petróleo como producto. Mediante ensayos determina la calidad del crudo para su comercialización. Desde la parte de producción, éste enfoque es el válido para determinar el precio del crudo. Por esta razón, se describirá las principales propiedades físicas del crudo:

- **Gravedad API:** Es la propiedad preferencial y se define como:

$$SG = \frac{141.5}{131.5 + API}$$

De donde:

SG: Gravedad específica, relación entre la densidad del fluido y la densidad del agua a 60°F.

A partir de esta propiedad los crudos se clasifican en:

Tabla 2-2 Clasificación del crudo según gravedad API

Crudo	°API
Livianos	> 30
Medianos	22-20.9
Pesados	10-21.9
Extra Pesados	< 10

- **Viscosidad (cinemática):** Es la propiedad que mide la resistencia de un fluido a deformarse. En el petróleo es primordial para determinar el tipo de bombeo más conveniente. Se define como:

$$\vartheta = \frac{\mu}{\rho}$$

De donde:

ϑ : Viscosidad cinemática (Centistokes [cm^2/seg])

μ : Viscosidad absoluta o dinámica (Centipoise [$\text{gr}/\text{seg. cm}$])

ρ : Densidad [gr/cm^3]

Existen además otras propiedades físicas importantes, determinadas por ensayos como: punto de fluencia, metales, contenido de sal, azufre,

punto de inflamación, etc. Las cuales influyen en el tratamiento que se le deba dar a determinado flujo de determinado yacimiento.

La calidad de un fluido se cuantifica en general por la cantidad de hidrocarburos que pueda contener así se tendrá:

- Nafténicos
- Parafínicos
- Mixto

De los cuales se diferencia el contenido de productos derivados que se pueda obtener.

Tabla 2-3 Indicador para el procesamiento de crudos

	PRODUCTOS			
	Lubricantes	Asfalto	Gasolinas	Tratamiento de productos
Parafínico	1	3	3	1
Mixto	2	2	2	2
Nafténico	3	1	1	3
1: Excelente 2: Bueno 3: Pobre				

Se debe tomar en cuenta que la viscosidad y la gravedad API son propiedades que dependen de: la temperatura, la composición (el porcentaje de cada fase presente) y, en menor grado, de la presión.

A mayor temperatura, la densidad de un líquido es menor; la viscosidad de un líquido disminuye y la de un gas aumenta; es decir, el crudo fluye más. De ahí la necesidad de inyectar vapor a un yacimiento o de tener calentadores cercanos a los separadores, con el fin de facilitar el movimiento del flujo.

La presión, por el contrario, hace que la viscosidad de un líquido aumente, la fuerza por unidad de área ejercida sobre un fluido debido al bombeo, facilitará el movimiento del crudo por las tuberías.

2.2.6 TRATAMIENTO DEL CRUDO

Una parte importante del proceso de producción es el tratamiento que se da al crudo, no desde el punto de vista de obtención de derivados, sino del despacho al oleoducto de un crudo de calidad. Dicha calidad se mide de acuerdo a la gravedad API, a mayor grado API mayor el precio que se paga por barril. Obviamente la cantidad de agua, sales y sedimentos influyen en la calidad del crudo, por lo que su tratamiento es primordial.

Las formas más comunes de tratamiento son:

- Tratamiento con químicos (demulsificantes)
- Separación por gravedad
- Calentamiento
- Campo electrostático

En secciones anteriores se mencionó la existencia de un área de químicos, generalmente presente en plataformas. Cada una de estas áreas posee tanques dosificadores y bombas, los cuales a través de tubos delgados (tubbing) se bombean al flujo al momento de llegar al manifold, con el fin de que las partículas de agua y crudo se separen.



Figura 2.10 . Área de Químicos en plataforma

Los demulsificantes actúan sobre los siguientes principios químicos.

- Neutralizan emulsificantes naturales.
- Tenso-activos: sobre la tensión superficial de las gotas.
- Floculación: neutralizando las cargas eléctricas que se repelen haciendo que las gotas dispersas se unan.
- Coalescencia: debilitan y rompen la tensión superficial, con el

fin de que las gotas se combinen en gotas más grandes y se asienten.

- Mojabilidad de los sólidos: al humedecer los sólidos como las arcillas y lodos, éstos se van con el agua; y las parafinas y asfaltenos, con el crudo. Lo anterior permite que los químicos actúen directamente sin intervenciones sobre la coalescencia.

Es importante la introducción de químicos pues a partir de esto, se procede con los otros métodos de tratamiento. De la separación por gravedad se encargan los vessels, los tanques y otros recipientes con KoD's o botas de gas, cuyo parámetro de diseño es el *tiempo de residencia*. Los tratadores o calentadores, actúan sobre la temperatura del fluido y por ende sobre su viscosidad y gravedad API. Existen crudos muy viscosos, el calentarlos su fluidez mejora, por lo que conjugado con el tiempo de residencia en cada equipo se logra una separación eficaz.

Es conveniente utilizar termo tratadores debido a que solo por gravedad, se requeriría un tiempo de residencia muy largo y aun así las partículas muy unidas permanecerían así. Según la Ley de Stokes: “una gota de agua de diámetro= 20 μ m, se asienta a una velocidad de 0.021336m/s (0.07ft/s) en un crudo de 33°API, viscosidad absoluta de 6.5cP, a 110°F”

La separación electrostática comúnmente trata de una deshidratación, con lo que se actúa sobre las moléculas de agua (cargas positivas y negativas de los iones) para que se asienten por peso. Ésta es la última etapa de separación. La energía electrostática es enviada a través de transformadores.

Con todo lo anterior se asegura que el crudo enviado al oleoducto tendrá menos del 1% de agua en su composición.

2.3 GENERACIÓN DE ENERGÍA

La actividad de producción petrolera debe siempre ser constante, ya que de esto depende también la rentabilidad de la misma. Dicha continuidad se garantiza con un suministro constante de energía eléctrica en la potencia necesaria para el funcionamiento de cada equipo.

De acuerdo a la región, si no es posible comprar la energía eléctrica necesaria de la compañía pública que opere (ya sea por costo elevado o porque la continuidad sea poco confiable), será imprescindible la instalación de plantas centrales de generación de energía eléctrica para la respectiva distribución al CPF y a las plataformas.

En el Ecuador, la energía eléctrica pública no presenta un nivel elevado de confiabilidad y menos garantiza continuidad por lo que en la mayoría de los casos se cuenta con plantas instaladas por las compañías que funcionan en los yacimientos.

Una planta central de generación de energía deberá tener una ubicación estratégica con el fin de suministrar convenientemente electricidad a las facilidades que la necesiten.

2.3.1 GENERALIDADES

La capacidad de suministro de una planta de energía eléctrica debe ser al menos el equivalente al 150% de la capacidad teórica que los equipos instalados necesitan, con esto se garantiza que se cubran consumos

extras por sobrecarga de equipos o por instalación de nuevos.

“Los sistemas de generación eléctrica son un conjunto de equipos que se utilizan para transformar energía mecánica en electricidad y transportarla hasta los lugares donde se encuentran los equipos para producción petrolera”⁷

El combustible más usado en los sistemas es el diesel, sin embargo el gas o una combinación gas/crudo es muy usual hoy en día. Sin embargo, esto dependerá de que tan económico resulte el transporte de cualquiera de los combustibles antes mencionados. El gas solo (que generalmente es quemado) o en combinación con el crudo asociado, puede servir de alimentación para los motores de los generadores con lo que se aprovecha en su totalidad.

Una vez más dependerá de las condiciones y requerimientos de producción, el tipo de generación a ser usado, además de su mantenimiento, costo (inversión inicial y costo de mantenimiento). La cantidad de MW requeridos se puede estimar basándose en el potencial de producción de fluido.

2.3.2 EQUIPOS QUE NECESITAN ENERGÍA

Una vez que se cuenta con la energía necesaria, se define cuales son aquellos equipos a los que se debe suministrar electricidad. Para empezar, el tipo de bombeo (dependiendo del motor al que funcione), en el caso de bombeo electro sumergible (BES) es importante la calidad y

⁷ “Análisis y Optimización de la Calidad de la energía eléctrica para pozos de producción petrolera Oriente-Ecuador, realizado por la empresa EQUIPOIL S.A.”, Jhahaira Ludeña/César Bastidas, ESPE, 2009

continuidad de energía; bombeo de superficie; postes de alumbrado, oficinas, entre otros son aquellos que requieren de energía para funcionar.

Los separadores de producción, intercambiadores de calor, tratadores térmicos, bombas aumentadoras de presión, bombas de exportación de crudo y bombas de inyección (o re inyección) de agua son equipos que necesariamente deben ser provistos de energía eléctrica para su funcionamiento.

Equipos como variadores de frecuencia o transformadores son asociados a la generación, son aquellos que regularán el suministro a los demás equipos presentes en una facilidad o central de procesamiento. Además de todos los equipos y paneles de instrumentación y control del proceso.

2.4 DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS Y ESTRUCTURAS

En el presente trabajo se hará hincapié en las características más importantes de los equipos y estructuras cuya cimentación se va a diseñar. Es importante conocer el funcionamiento básico y el papel que cumplen las máquinas dentro de una facilidad de producción, pues así se podrá determinar o deducir con mayor facilidad los esfuerzos a los que va a estar sometida la cimentación y el factor de seguridad que deberá ser considerado en el diseño de la misma.

Se ha de describir a detalle 4 elementos presentes en una facilidad: Separadores agua-crudo-gas (trifásicos) horizontales, bombas de inyección de agua, generadores de energía (diesel-crudo), torre de silenciador (exhaust system).

2.4.1 SEPARADORES O VESSELS

Son equipos que se utilizan para la separación, medida y muestreo de una mezcla que se encuentra formada por dos o más fases, con diferentes densidades. Dichas fases pueden tener diferentes características:

- Una fase vapor y una líquida
- Una fase vapor y una sólida
- Dos fases líquidas inmiscibles⁸
- Una fase vapor y dos líquidas (gas, crudo, agua)
- Combinación de las anteriores

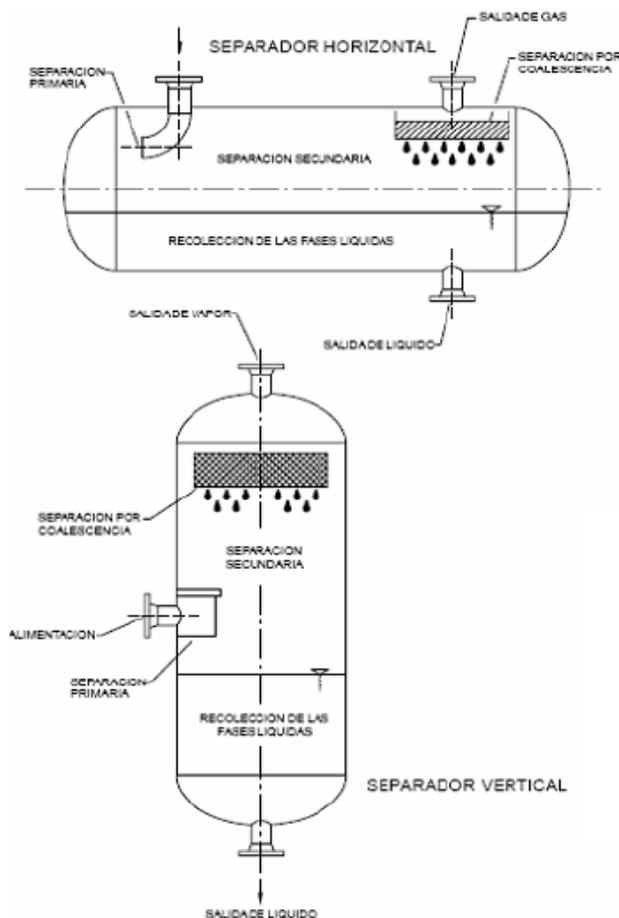


Figura 2.11 Esquema de separadores. Fuente: “Instalaciones de superficie para la producción de petróleo y Gas” (NEXT)

⁸ Sustancias que en ninguna proporción forman una mezcla homogénea, por ejemplo aceite y agua.

Los separadores constituyen parte fundamental de una facilidad de producción, siendo los que controlan la presión de salida de cada fluido o gas con la que llegarán a los recipientes de almacenamiento.

El término separador es usado para una gama de elementos cuyo nombre se le atribuye a su aplicación específica entre los que se encuentran:

- BOTAS DE GAS: Colocados cerca del tanque de lavado para separar el gas de los restantes de crudo.
- KNOCKOUT DRUM, TRAMPAS: Utilizados para separar el agua.
- FLUSH VESSEL, EXPANSION VESSEL: Separadores de gas que trabajan a bajas presiones y a temperaturas ambiente.
- SCRUBBER (Despojadores): Se refiere a separadores cuya función es retirar una fracción muy pequeña de líquido en una corriente gaseosa.
- PURIFICADOR: Se refiere a separadores cuya función es retirar impurezas de una corriente gaseosa, tales como: óxidos, lodos, agua que fue condensada, aceites residuales, etc.
- FILTROS: Separadores que tienen como función remover sólidos del gas o retirar gotas de líquido muy pequeñas.
- ATRAPA TAPONES (SLUG CATCHERS): Separador diseñado para absorber grandes volúmenes de líquidos a intervalos regulares.
Usado en sistemas de recolección de gas.

La separación de las fases es una de las operaciones físicas primordiales en la producción, procesamiento y tratamiento del crudo y gas.

2.4.1.1 TIPOS DE SEPARADORES

Los separadores se clasifican de acuerdo a diversos criterios.

En función de su aplicación o forma de operación:

- *Bifásicos.*- Encargado de la separación de dos fases, la corriente líquida del gas.
- *Trifásicos.*- Separa tres fases, el gas del líquido; pero adicionalmente el líquido en sus estratos diferenciados: agua y crudo.

En función del flujo:

- *Horizontales.*- Para el manejo de grandes relaciones gas-petróleo. Realiza separación trifásica y funciona bien en crudos espumosos. El flujo es unidireccional y el gas no se opone al drenaje o extracción de la niebla.
- *Verticales.*- Para relaciones de gas-petróleo altas o bajas. Manejo de caudales bajos con un estricto control de niveles. Aparte de ocupar un área más pequeña facilitan el drenaje de fondo y la remoción de sólidos.
- *Esféricos.*- Para altas relaciones gas-petróleo y con tasas de flujo constante. Es ideal para facilidades con límite de espacio en horizontal y vertical.

Es común además clasificar a los separadores de acuerdo a su temperatura y presión en los que serán de baja, si operan en rangos de 10-20 PSI hasta 180-225 PSI; de media presión, si su rango es 230-250 PSI hasta 600-700 PSI; y de alta presión si operan en un rango de 750 a 1500 PSI.

2.4.1.1.1 SEPARADORES TRIFÁSICOS HORIZONTALES

Un separador trifásico como ya se ha mencionado, se encarga de aislar las 3 fases principales que componen el flujo proveniente del manifold.

Un separador horizontal trifásico presenta ciertas ventajas sobre los anteriormente descritos:

- Se maneja la misma capacidad de gas que en un horizontal bifásico, sino que con menor diámetro.
- Versatilidad en variaciones de volumen.



Figura 2.12 Separador Trifásico Horizontal soportado en un skid

A pesar de que muy comúnmente un separador horizontal se monta sobre un “skid” que es una especie de patines hechos de perfiles de acero y que viene incorporado al equipo, es de especial importancia el anclaje del mismo a una cimentación segura, este tipo de equipo funciona de manera continua y es imprescindible asegurar dicho funcionamiento.

El flujo entra al equipo y permanece por cierto tiempo pasando internamente por varios elementos encargados de realizar la separación. El tiempo que una gota de fluido permanece en el interior se conoce como *Tiempo de Retención*, el mismo que depende de la tasa de flujo y del área ocupada.

Tabla 2-4 Tiempos de retención para diferentes tipos de fluido

Tipo de Líquido	Tiempo de Retención (min)
>35°API	2
25-35°API	3-5
15-25°API	4-6
Espuma pequeña	4-6
Espuma moderada	6-8
Espuma severa	10

2.4.1.2 TEORÍA DE SEPARACIÓN

Dentro de un vessel, se inducen varios principios para lograr la separación, cada una de estas etapas producirá un esfuerzo característico el cual servirá para el diseño del espesor del separador, de las sillas y de los elementos internos. El diseño de un separador está a cargo del área mecánica, en el mismo se toma en cuenta fuerzas sísmicas y de viento, las cuales deberán estar en coordinación con aquellas tomadas en el área civil para el diseño de

la cimentación.

Para decidir que esfuerzos tomar en cuenta en el momento del diseño se debe conocer los tres principios básicos utilizados en el diseño del funcionamiento de un separador:

- *Momentum (Cantidad de Movimiento)*: Se define como el producto de la masa por la velocidad. Los componentes del fluido tienen obviamente diferentes densidades, por ende diferente momentum. El cambio brusco de dirección del fluido, provocará una variación en la velocidad de movimiento de las partículas más pesadas, siendo éstas las que se “retrasan” en comparación a las de la fase liviana; esto produce la separación.
- *Fuerza de gravedad*: Cuando la fuerza horizontal de arrastre de partículas de la fase líquida es menor a la acción de la gravedad éstas se separan.
- *Coalescencia*: Las partículas muy pequeñas que no se separan por gravedad se unen por coalescencia y forman gotas más grandes y pesadas que son capaces de separarse por gravedad.

2.4.1.3 FUNCIONAMIENTO

De acuerdo a los principios antes mencionados, un separador horizontal funciona de la siguiente manera:

- El fluido que ingresa choca contra un accesorio ubicado en la entrada, que provoca que cambie el momentum de la mezcla, provocando así una separación inicial de las fases.

- A continuación en la sección libre, la fuerza de gravedad permite que el líquido abandone la fase gaseosa y caiga a la sección de acumulación de líquidos, con el tiempo de retención adecuado.
- Debido a que es una separación de tres fases, se necesita un tiempo de retención adicional para que las dos fases líquidas se disocien.

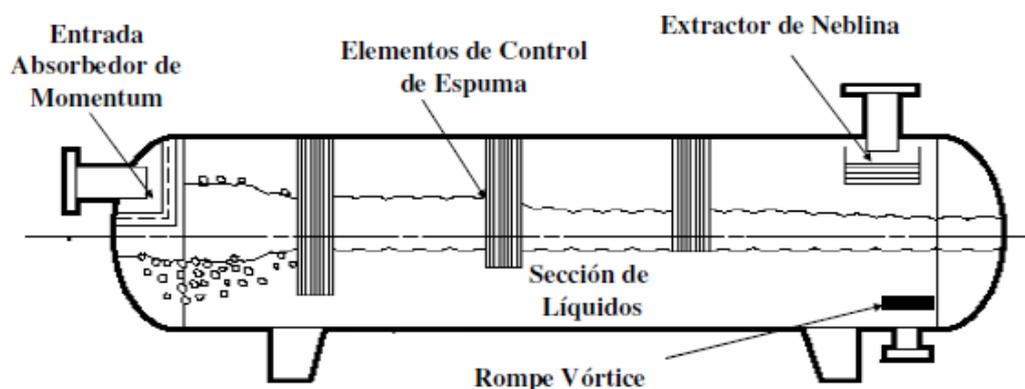


Figura 2.13 Componentes de un separador

- En el Manual de Diseño de Proceso de PDVSA, se reconoce cuatro partes principales en el funcionamiento de un separador:
 - **Separación primaria:** El cambio en la cantidad de movimiento. Esta zona incluye las boquillas de entrada y los aditamentos de entrada, tales como deflectores o distribuidores.
 - **Separación secundaria:** Se observan zonas de fase continua con gotas dispersas (fase discontinua), sobre la cual actúa la fuerza de gravedad. En esta parte del recipiente la fase liviana se mueve a una velocidad relativamente baja y con muy poca turbulencia.

- **Separación por coalescencia:** Para lograrlo se hace necesario tener elementos como los eliminadores de niebla o Mallas para el caso de separadores líquido–vapor, o las esponjas o platos coalescedores, en el caso de la separación líquido–líquido.
- **Recolección de las fases líquidas:** Las fases líquidas ya separadas requieren de un volumen de control y emergencia para una operación confiable y segura de los equipos aguas abajo.

2.4.2 BOMBAS

En esta sección, se describe las bombas que facilitan el flujo de un elemento a otro dentro de una Central de Procesamiento, no a aquellas utilizadas para el bombeo de crudo desde el pozo hasta la superficie.

El principio de una bomba es transformar la energía mecánica en hidráulica. La energía mecánica proveniente de un motor (eléctrico, térmico) se convierte en energía para un fluido, que puede traducirse en cambios de presión o velocidad.

Las funciones de las bombas en una facilidad de superficie son principalmente:

- Conducción de líquidos (crudo o agua)
- La transferencia de un valor de presión a otro

Para el efecto de conducción de crudo o agua, las bombas se clasifican:

2.4.2.1 Bombas Centrífugas

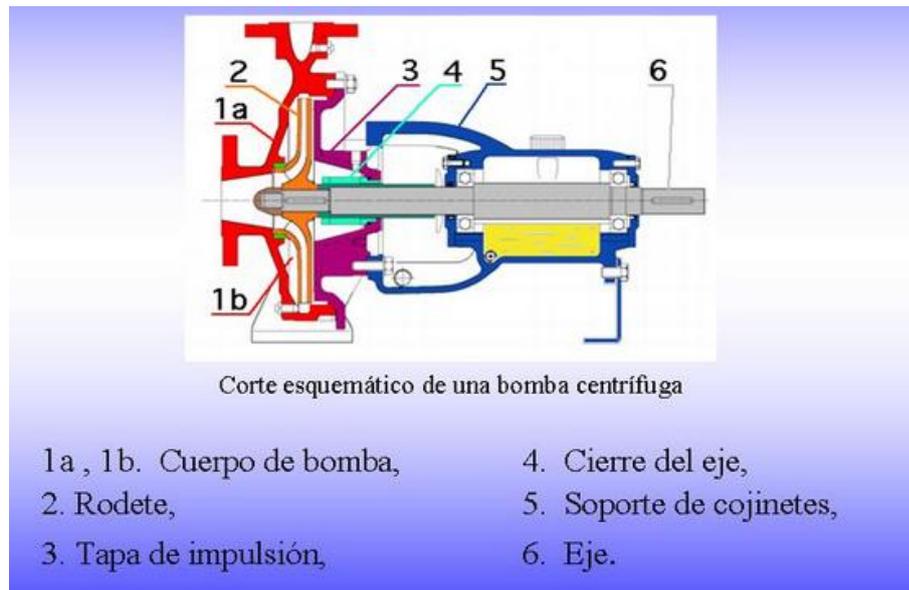


Figura 2.14 Partes de una bomba centrífuga. Fuente: “Bombas Centrífugas”, Ing. Juan Ruíz

Transforma la energía mecánica de un impulsor rotatorio (o motor) en la energía cinética y potencial requeridas por el fenómeno de continuidad. El fluido entra por el centro del rodete, que dispone de unos álabes para conducir el fluido, y por efecto de la fuerza centrífuga es impulsado hacia el exterior, donde es recogido por la carcasa o cuerpo de la bomba, que por el contorno su forma lo conduce hacia la salida o hacia el siguiente rodete.

Una bomba centrífuga dentro de una facilidad de superficie se utiliza para bombear a presiones de hasta 3500 PSI.

Entre ellas se tiene, las bombas de inyección de agua, las cuales funcionan con un motor eléctrico. El diseño de la cimentación de una bomba en el presente trabajo, será destinado precisamente a una bomba de inyección de agua. Dicho diseño presenta un grado de

complejidad importante debido a que se debe tomar en cuenta las vibraciones a distinta velocidad, tanto del motor como de la bomba.

Además dentro de la categoría de bombas centrífugas, se encuentran las llamadas “bombas booster”, el término booster significa aumentadora de presión. Su función principal es la de proveer al flujo (sea en la línea de agua o crudo) la presión necesaria para accionar las bombas de transferencia que finalmente conducirán el agua de regreso al pozo para su recuperación, o al crudo al oleoducto como ya se ha explicado anteriormente.

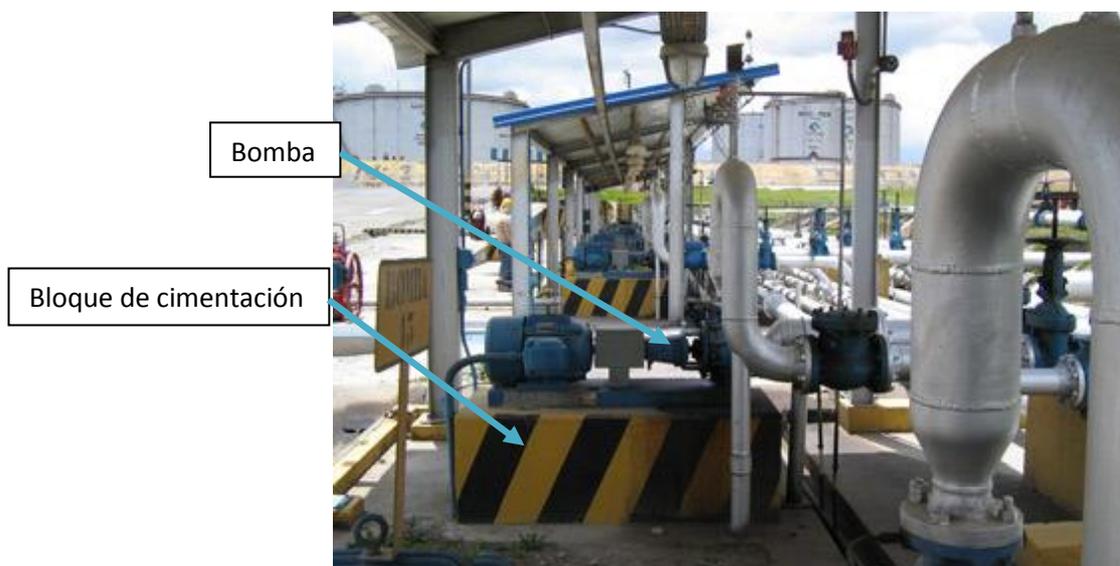


Figura 2.15 Bomba centrífuga sobre bloque de cimentación

En este tipo de bombas es importante que el flujo sea continuo y a una determinada velocidad para lograr la presión esperada.

2.4.2.2 Bombas de desplazamiento positivo (Reciprocantes)

En esta sección las más importantes son las reciprocantes, las cuales se usan en funciones que exceden la capacidad de una bomba centrífuga (presiones desde 3500 PSI hasta 5000 PSI).

Se llaman de desplazamiento positivo debido a que reciben un volumen fijo de fluido en condiciones casi de succión, lo comprimen a la presión de descarga y lo expulsa por la boquilla de descarga. El funcionamiento de estas bombas se logra por el movimiento alternativo de un pistón, émbolo o diafragma.

La principal diferencia con la bomba centrífuga es que no requiere de una velocidad del flujo para transformarla en presión (presiones altas a velocidades bajas).

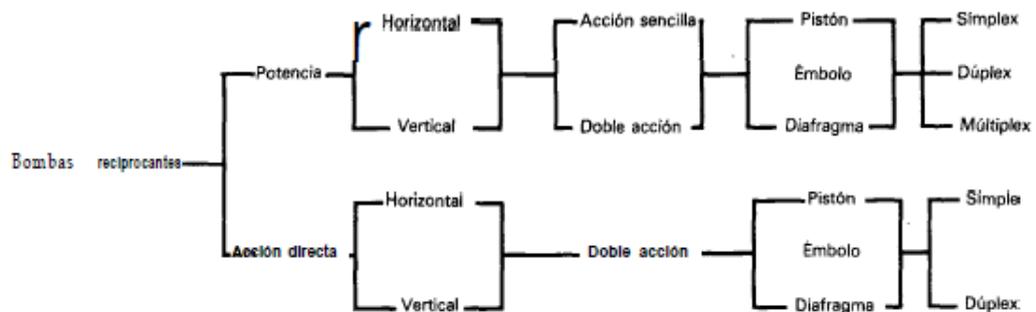


Figura 2.16 Clasificación de bombas reciprocantes

En la *bomba de potencia* se alterna el elemento de bombeo con una manivela o un cigüeñal. Esta bomba se mueve con un propulsor con eje rotatorio, como motor eléctrico, de combustión interna o turbina. Su ventaja principal es su alta eficiencia (85-94%).

La *bomba de acción directa* se impulsa con un fluidomotor por medio de presión diferencial. Su ventaja es, el poder ser usada en condiciones de bajo flujo y alta presión.

Las más comunes son las bombas de transferencia, utilizadas para enviar el flujo desde el tanque hacia la succión de las bombas centrífugas de la línea de flujo.

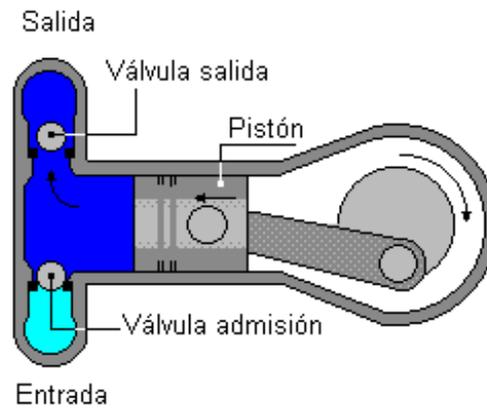


Figura 2.17 Esquema de funcionamiento de una bomba recíprocante

2.4.3 GENERADORES DE ENERGÍA

Se ha mencionado la importancia de tener energía continua para el óptimo desarrollo de una facilidad petrolera, además de que esto se consigue con la instalación de plantas generadoras de energía. El corazón de dichas plantas son obviamente: los generadores. El diseño y construcción de una cimentación segura para recibir al generador (cualquiera que éste sea) es por tanto, primordial.

El principio del funcionamiento de un generador, es convertir la energía mecánica (sea cual sea la fuente, térmica, hídrica, eólica, etc.) en energía eléctrica, siendo capaz de mantener la diferencia de potencial eléctrico (voltaje) entre dos polos o terminales.

Los generadores principalmente utilizan como combustible el gas natural, en cuyo caso se denominan turbogeneradores; o una combinación de diesel-crudo. El tipo y capacidad (cantidad de MW a generar) se especifican de acuerdo al proyecto y dependen entre otras de: condiciones ambientales, factor de potencia nominal, frecuencia, disponibilidad del combustible para el motor, etc.



Figura 2.18 Generador Wartsila

Los turbogeneradores generan electricidad y calor; son turbinas conectadas a un generador eléctrico, son más ligeros y ocupan menos espacio, funcionan impulsados a vapor (gas natural); sin embargo los generadores los diesel-crudo presentan mayor eficiencia en el uso de combustible y energía continua más confiable. Este trabajo se enfocará en el diseño de la cimentación de un generador a diesel, debido a su gran tamaño y a la complejidad que presenta debido a su comportamiento.

Específicamente, se diseñará la cimentación de un generador marca Wartsila de 7MW (Figura 2.19), cuyas características serán descritas más adelante.

2.4.3.1 TORRE DE SILENCIADOR (EXHAUST SYSTEM)

La torre del silenciador (exhaust system) de un generador a diesel es únicamente un complemento de la planta de generación, se hace una mención especial debido a que alcanza alturas de hasta 25m, siendo una estructura netamente estática, se ve afectada por cargas de viento y sismo importantes, por lo cual la cimentación se somete también a esfuerzos significativos.



Figura 2.19 Torre del silenciador (exhaust system)

Como complemento a un generador se tiene el sistema de gases de escape cuya función, como su nombre lo indica es llevar los gases de escape al exterior de la sala de máquinas, con el fin de mantener aceptables niveles de emisión y ruido.

El sistema exhaust o silenciador es el paso inmediatamente posterior a la salida de los gases de escape del turbocargador.

En la Fig. 2.21 Se aprecia un esquema del sistema de gases de escape, en donde para lograr el aumento de la potencia del motor, se aprovecha la energía de los gases de escape producida por la combustión para introducir aire a alta presión al múltiple de admisión, una vez aprovechado esta energía, los gases de escape pasan por el turbocargador estos se dirigen al silenciador o sistema exhaust (mitigar el ruido), luego a la chimenea y finalmente son echados en la atmósfera.

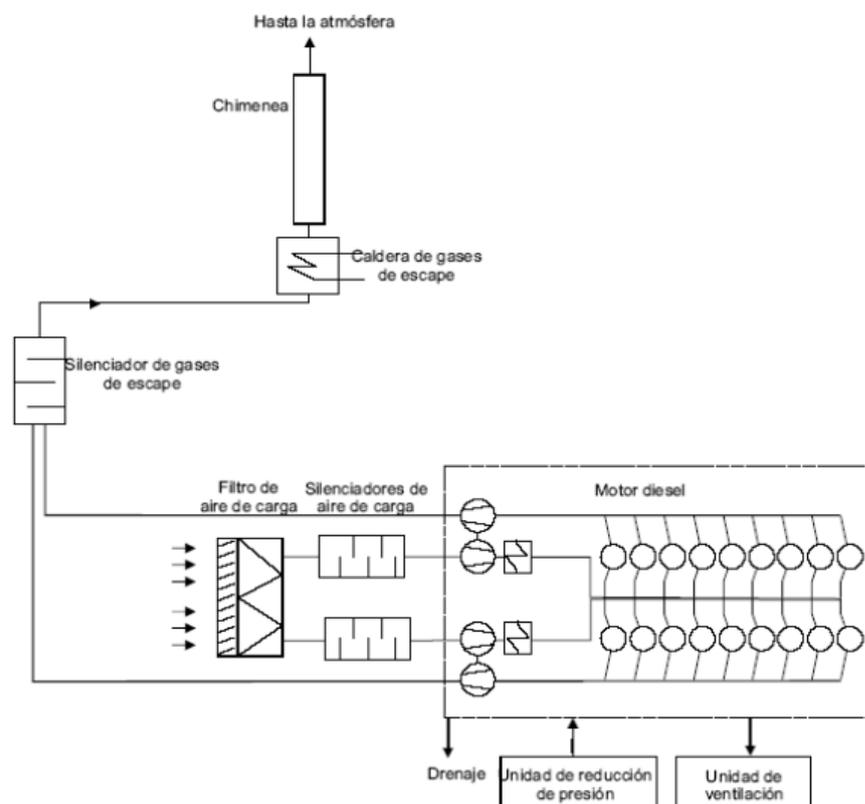


Figura 2.20 Esquema de gases de escape en Generador a diesel

CAPÍTULO III

CIMENTACIONES PARA EQUIPO INDUSTRIAL

3.1 CIMENTACIONES

Una cimentación es la encargada de la transmisión de cargas de la estructura, maquinaria o equipo que esté soportando, al suelo.

Teniendo en cuenta que el principio de diseño de una cimentación no varía, se debe sin embargo, hacer ciertas consideraciones especiales en los parámetros usados para cimentar equipo industrial, específicamente elementos presentes en las facilidades petroleras. La diferencia principal radica en que los equipos transmiten no solo carga estática como cualquier edificación, sino que además se suman las cargas dinámicas provenientes del funcionamiento mismo de la máquina. Ahora bien, no todos los equipos o estructuras industriales transmiten cargas dinámicas, pero también tienen un tratamiento especial debido a las grandes cargas estáticas que traspasan a la cimentación.

Es por tanto que el análisis de una cimentación para equipo industrial, presenta un grado mayor de dificultad, ya que se debe combinar correctamente los criterios de la ingeniería estructural, geotecnia y el análisis de vibraciones; además del dominio de la normativa y su aplicación oportuna.

3.1.1 TIPOS DE CIMENTACIONES

En general las cimentaciones se las categoriza como superficiales y profundas. La elección de la adecuada cimentación, dependerá siempre del estudio de suelos, que proporcionará la profundidad de desplante de

la cimentación. La Norma Ecuatoriana de la Construcción, NEC-11, indica un criterio para la clasificación de las cimentaciones:

$$\text{Si } \frac{D_f}{B} \leq 4 \rightarrow \text{Cimentación Superficial}$$

$$\text{Si } \frac{D_f}{B} > 4 \rightarrow \text{Cimentación Profunda}$$

En donde:

D_f es la profundidad de desplante de la cimentación dada por el estudio de suelos correspondiente.

B es el ancho de la cimentación.

Lo anterior sin embargo, en el caso de cimentación para equipo industrial está condicionado a otros parámetros adicionales. Por ejemplo, es usual que para realizar ampliaciones o nuevas cimentaciones se tome en cuenta las estructuras aledañas y a pesar de realizarse un estudio de suelos, muchas empresas optan por adoptar un diseño parecido al existente, más aún si éste ha funcionado adecuadamente.

En la Fig. 3.1, se muestra un cuadro con los tipos de cimentaciones existentes.

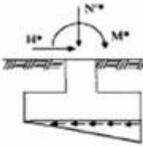
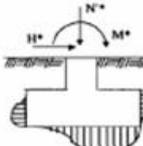
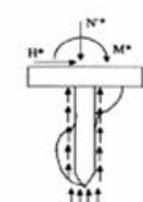
TIPOS DE CIMENTACIONES	CARAS QUE APORTAN ANTE LA ACCIÓN DE CARGAS HORIZONTALES	TIPOLOGÍA
Cimentaciones superficiales	Solo la base de la cimentación. 	<ul style="list-style-type: none"> - Aisladas que por su forma pueden ser: <ul style="list-style-type: none"> • Circulares • Rectangulares - Corridas - Combinadas - En balsas
Cimentaciones Semi-profundas	Tanto la base de la cimentación como las caras laterales. 	<ul style="list-style-type: none"> - Fosos compactados - Cimentaciones en pozo
Cimentaciones Profundas	Solo las caras laterales. 	<ul style="list-style-type: none"> - Pilotes - Pilotes cortos

Figura 3.1 Resumen de los tipos de cimentaciones

Pilotes: pueden soportar sus cargas a través de una reacción en la punta, fricción a lo largo de sus costados, adherencia al suelo o una combinación de estos medios. Así el comportamiento de una cimentación de pilote depende de la resistencia de los pilotes y de las capacidades de carga y de resistencia al esfuerzo cortante del suelo. El uso de pilotes se vuelve necesario cuando la cimentación superficial o semiprofunda no es posible x razones técnicas, de dimensiones o económicas.

Existen muchos criterios para la clasificación de los pilotes, pero el principal es aquel que determina su forma de trabajo e interacción con el suelo:

Pilotes trabajando a la punta: El principio de este tipo de pilotes es el apoyo normal en estratos de suelo que sean más resistentes que las capas superficiales; sea debido a su confinamiento o a su diferente naturaleza.

$$P = \int \sigma_n dA_{\text{punta}}$$

En donde:

σ_n : esfuerzo normal

A_{punta} : área del pilote en contacto normal con un estrato resistente

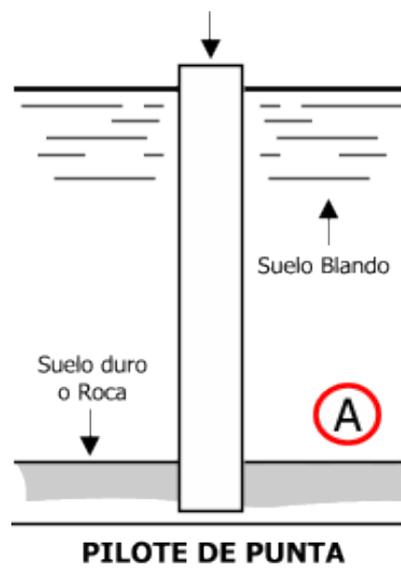


Figura 3.2 Pilote a la punta

Pilotes trabajando a fricción: Su interacción se basa justamente en la fricción entre el suelo y el elemento, es decir tensión tangencial versus desplazamiento relativo.

$$P = \int \tau dA_{\text{fricción}}$$

En donde:

τ : esfuerzo tangencial

Africción: área del pilote en fricción con el terreno

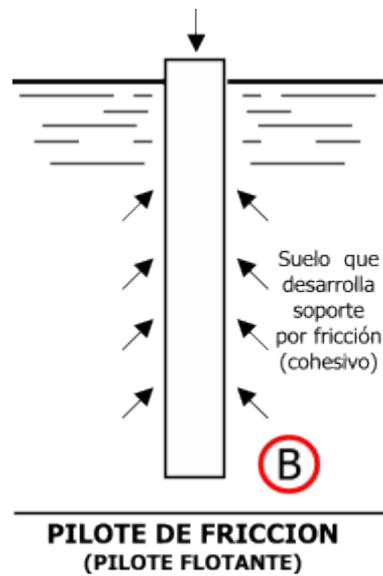


Figura 3.3 Pilote a fricción

Se utiliza pilotes en general, cuando se tienen las siguientes condiciones:

- La resistencia de los estratos superficiales no es suficiente para soportar una cimentación superficial de tamaño aceptable.
- El relleno es de un suelo blando consolidado, que nunca se ha sometido a cargas exteriores.
- Cuando se requiere estricto control de asentamientos diferenciales o existen cimentaciones aledañas.
- Sobre terreno heterogéneo.
- Cuando las cargas son muy grandes.

Al tratarse de cimentaciones para equipo estático, el reporte ACI 351.2R-94 (Re aprobado en 1999), "Foundations for Static Equipment"; hace referencia a los siguientes tipos de cimentaciones:

3.1.2 CIMENTACIONES PARA VESSELS (RECIPIENTES) VERTICALES

Debe ser capaz de resistir cargas por gravedad y debido a la altura del equipo que soporta, estar lista para resistir grandes fuerza laterales (por sismo o viento).

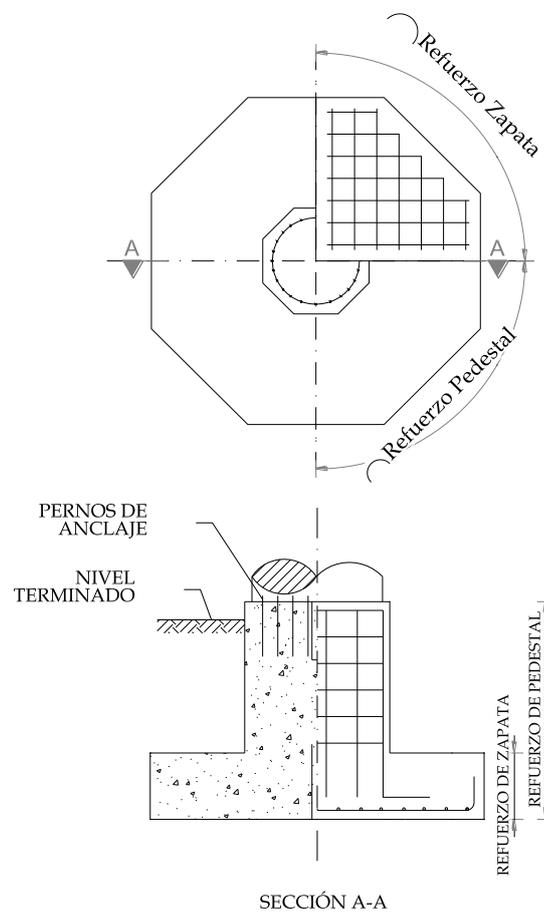


Figura 3.4 Zapata y pedestal octogonal para vessel vertical

Se compone de un pedestal que puede estar apoyado en una zapata, losa o en pilotes directamente; si el vessel fuere no tan alto, la cimentación puede tratarse de un pedestal apoyado (enterrado)

directamente en el suelo. Dichos pedestales individuales pueden ser de varias formas: circular, cuadrado, octogonal. Su elección dependerá de varios factores, la facilidad de construcción versus la necesidad de colocar no más del materia necesario.

3.1.3 CIMENTACIONES PARA VESSELS (RECIPIENTES) HORIZONTALES E INTERCAMBIADORES DE CALOR

Son generalmente pedestales que descansan sobre zapatas, ya sea individuales (unidas con una viga a manera de trabe o arriostamiento); zapatas corridas o sobre pilotes directamente. Dichos pedestales suelen estar elevados varios centímetros del nivel de suelo terminado, debido a requerimientos de paso de tuberías y conexiones. Su configuración dependerá de las sillas del vessel y sus anclajes y de la magnitud y dirección de las fuerzas a las que los pedestales serán sometidos.

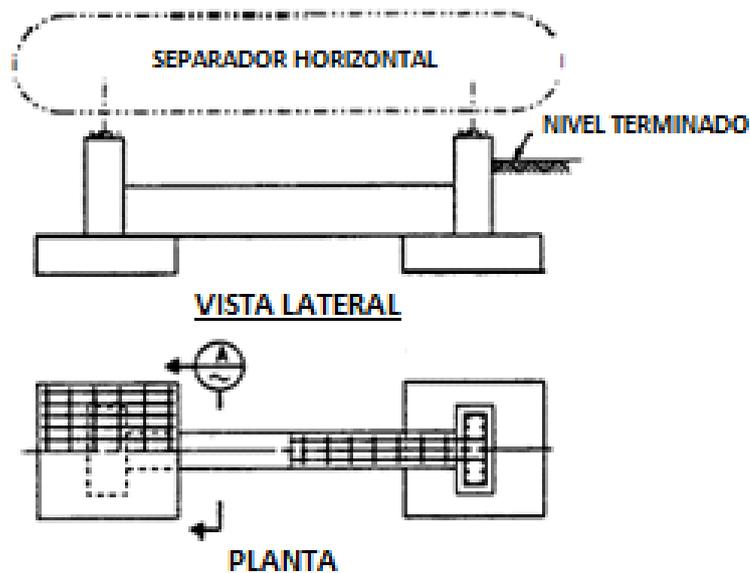


Figura 3.5 Zapatas arriostradas para vessel horizontal

Fuente: ACI

La forma prismática del pedestal es la más común, sin embargo pueden ser necesarios otros tipos de elementos como refuerzos si las fuerzas horizontales son muy grandes.

3.1.4 CIMENTACIONES PARA VESSELS (RECIPIENTES) ESFÉRICOS

Se trata de bases para cada “pata” del equipo, en disposición anular. Estos pedestales descansan en zapatas corridas individuales, en una losa continua o en un anillo circular, hexagonal u octogonal. Debe cuidarse los asentamientos diferenciales que puedan existir.

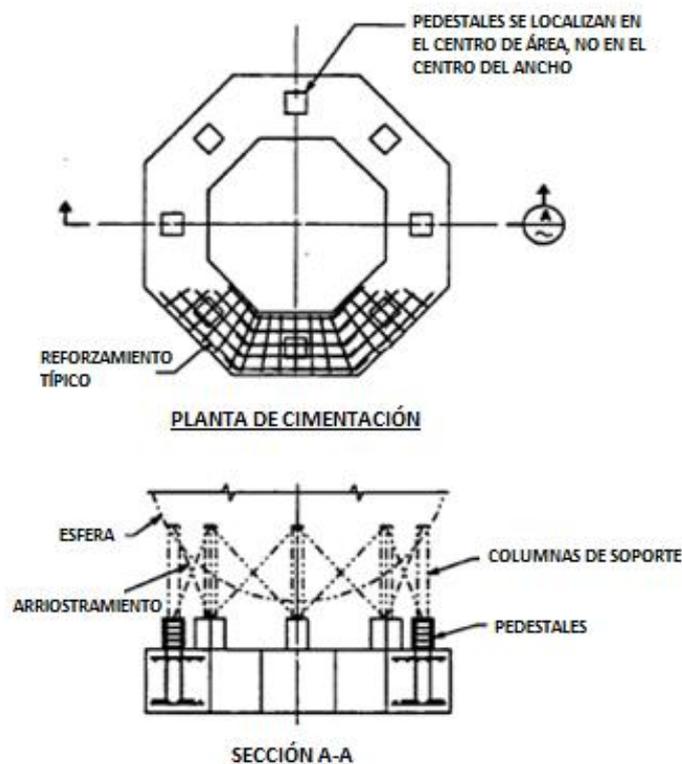


Figura 3.6 Zapata octogonal y pedestal para esfera vertical. Fuente: ACI

3.1.5 CIMENTACIONES PARA MAQUINARIA-HERRAMIENTA

Son en general, losas construidas a nivel de piso, las mismas que pueden o no ser soportadas en pilotes; todo de acuerdo a las características del suelo.

3.1.6 CIMENTACIONES PARA EQUIPO ELÉCTRICO Y SU ESTRUCTURA DE APOYO

El equipo eléctrico se compone normalmente de transformadores, interruptores, variadores; cuyas cimentaciones son diseñadas para cargas muertas, vivas, sísmicas, de montaje y operación. Dichas cimentaciones son losas de cimentación, a veces soportadas en pilotes.

En el caso de cimentaciones para equipo dinámico, el reporte ACI 351.3R-04, "Foundations for Dynamic Equipment"; hace referencia a los siguientes tipos de cimentaciones:

3.1.6.1 TIPO BLOQUE

Se diseñan como estructuras rígidas, su respuesta ante cargas dinámicas depende de: la carga dinámica, la masa de la cimentación y las características del suelo.

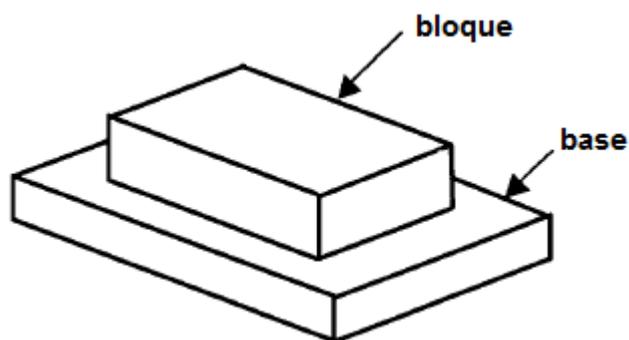


Figura 3.7 Cimentación tipo bloque. Fuente: ACI

3.1.6.2 TIPO BLOQUE COMBINADO

Para soporte de maquinaria cercana. Presentan dificultad en el diseño pues la combinación de las fuerzas de cada equipo puede ocasionar falta de rigidez o la necesidad de tener una losa base de mayor

espesor. En nuestro medio, se la conoce también como “tortugas” a los bloques donde se asienta cada equipo.

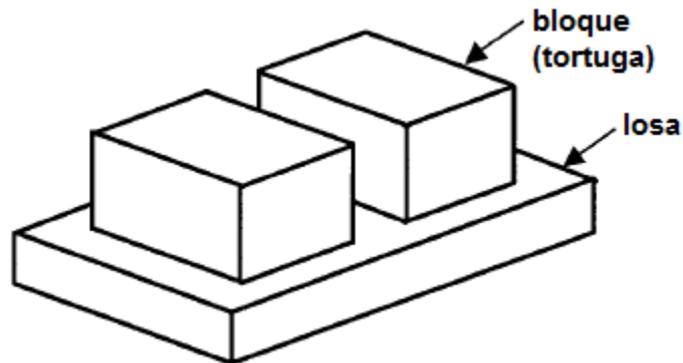


Figura 3.8 Cimentación tipo bloque combinado.

Fuente: ACI

3.1.6.3 TIPO MESA

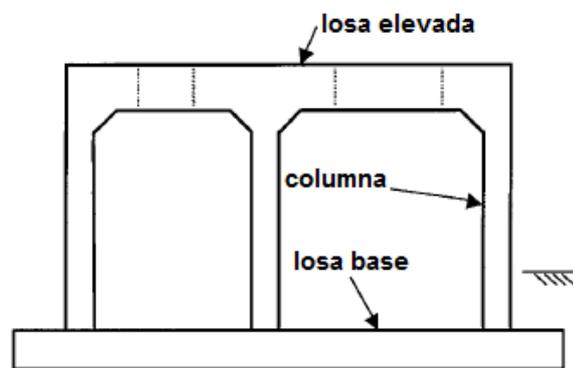


Figura 3.9 Cimentación tipo pórtico (mesa).

Fuente: ACI

También conocidas como cimentaciones tipo pórtico.⁹ Se consideran como cimentaciones flexibles, una losa apoyada en vigas y columnas; la determinación de su respuesta dinámica es compleja, depende tanto de los elementos que la componen.

⁹ En el “Manual de diseño de cimentación tipo pórtico para equipo dinámico”, Eduardo Sebastián López Moreno, ESPE 2010, se amplía a detalle el análisis de este tipo de cimentaciones.

3.1.6.4 TIPO MESA CON AISLADORES

Se usan aisladores (resortes, amortiguadores) entre la mesa y las columnas, para minimizar los efectos de las cargas dinámicas.

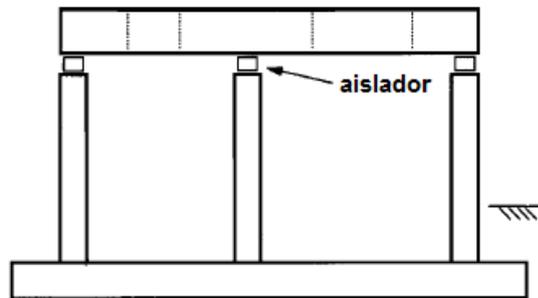


Figura 3.10 Cimentación tipo pórtico (mesa) con aisladores. Fuente: ACI

3.1.6.5 EQUIPO MONTADO SOBRE RESORTES (AMORTIGUADORES)

Se monta el equipo sobre resortes, los mismos que descansan sobre una cimentación tipo bloque. Tienen un comportamiento similar a las cimentaciones tipo mesa con aisladores.

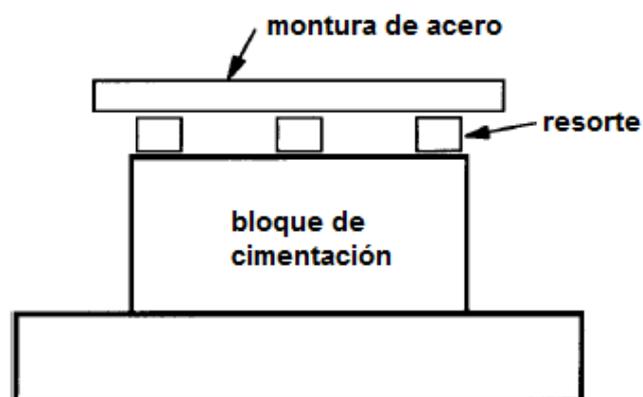


Figura 3.11 Cimentación bloque con equipo asentado en resortes. Fuente: ACI

3.1.6.6 TIPO BLOQUE DE INERCIA EN ESTRUCTURA

Se diseña con el fin de alejar el valor de la frecuencia natural del bloque, de la frecuencia de operación de la máquina; además para resistir amplitudes incrementado la fuerza de inercia resistente.

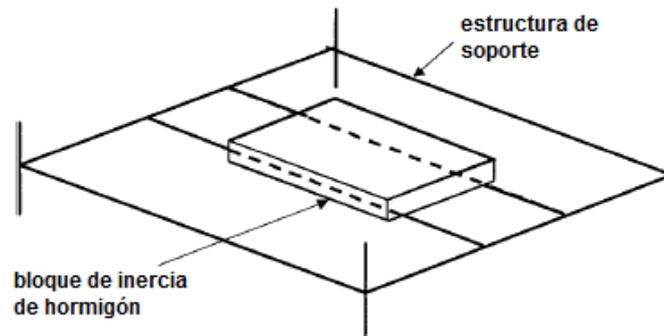


Figura 3.12 Bloque de inercia en estructura.

Fuente: ACI

Las cimentaciones antes mencionadas, pueden o no estar apoyadas sobre pilotes, cuidando siempre revisar el cálculo de los elementos, adicionando la capacidad portante de los pilotes; que seguramente definirá nuevas dimensiones para el bloque o marco; y también otra armadura.

Existen también variaciones de los bloques de cimentación, en las que se tiene una especie de cajón, como un bloque hueco, que soporta a la maquinaria en el interior, ver fig. 3.13. La dificultad de una cimentación de este tipo, no radica únicamente en su diseño, sino más bien en su construcción, el encofrado y fundida de un cajón de hormigón sin duda representará un costo adicional.

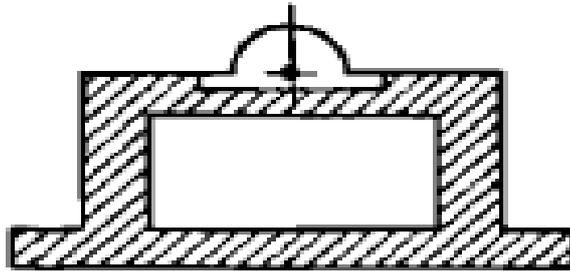


Figura 3.13 Cimentación tipo cajón

3.1.7 CONSIDERACIONES GENERALES

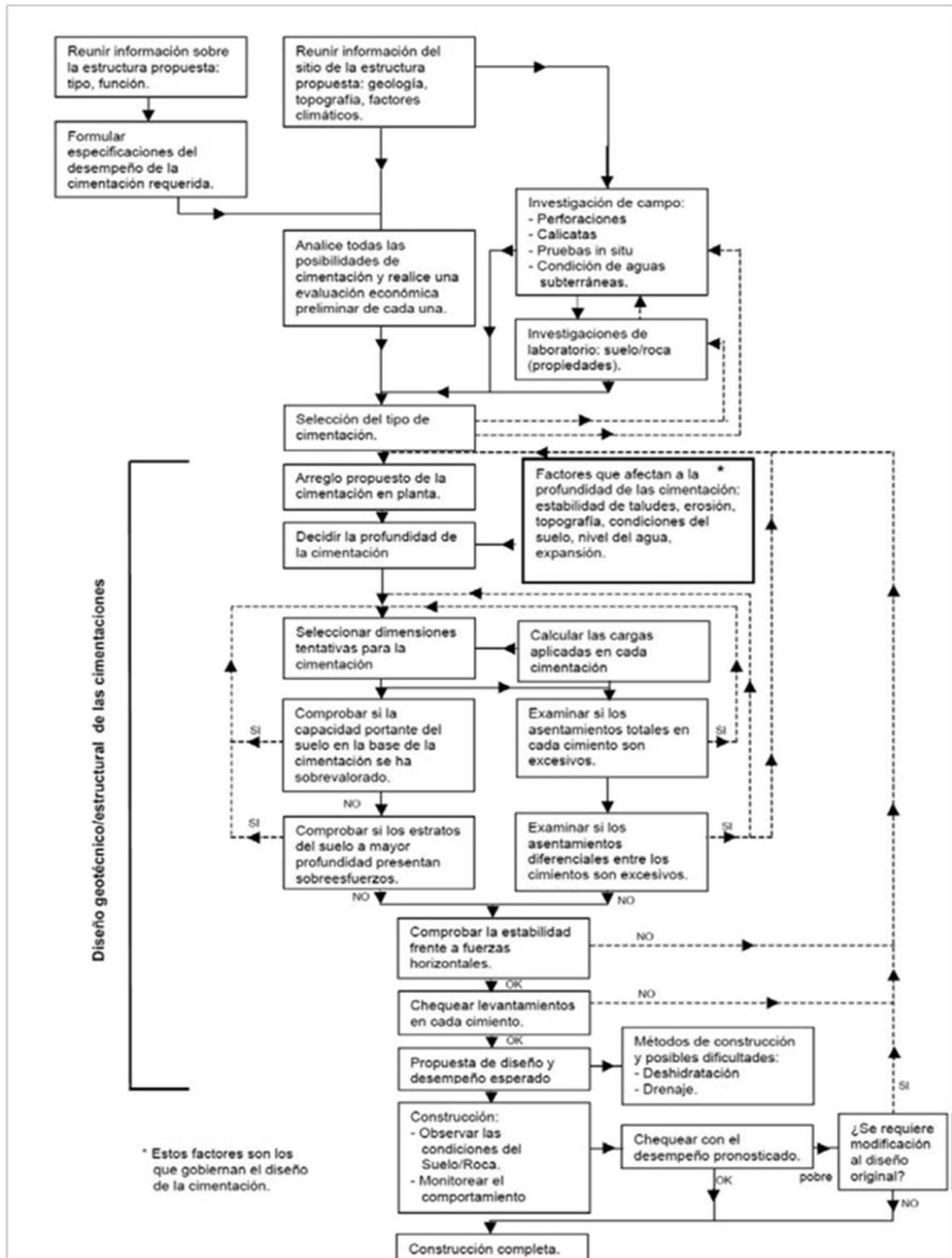


Figura 3.14 Diagrama de flujo conceptual para diseño de cimentaciones (modificado de NBCC, 2005)

La NEC-11, en el capítulo destinado a Geotecnia y Cimentaciones, presenta un diagrama de flujo (Fig. 3.14) en el que se aprecia un procedimiento general para el diseño de una cimentación. La norma además menciona que el diagrama es una base que bien puede ser simplificado o completado de acuerdo al proyecto.

Para el caso de equipo industrial, el diagrama de flujo debería tomar en consideración como condicionantes los parámetros de prediseño y las buenas prácticas usadas en el caso de cargas estáticas y vibratorias que generan los equipos presentes en una facilidad de producción petrolera.

De manera general y previa al diseño se consideran los siguientes factores en el diseño de una cimentación (sea estática o dinámica) en una facilidad de producción petrolera:

- Localización del proyecto: vías de acceso, poblaciones aledañas, clima, zonificación sísmica, etc.
- Requerimientos del cliente o la empresa contratante, ampliaciones, nuevas instalaciones, tipo de proceso.
- Disponibilidad de recursos económicos.
- Tipos de equipos o estructuras que se van a cimentar. Es necesario contar con los planos de fabricante de los equipos, los cuales deben proporcionar, los pesos y dimensiones de los equipos, cargas de operación así como sus principales características; y se indiquen los centroides de balance vertical y horizontal, la localización de los anclajes y los diámetros necesarios de éstos.

- Restricciones de material, montaje e instalación; además de las impuestas por el área mecánica o eléctrica.
- Exigencias futuras para el mantenimiento, como área mínima o instalación de estructuras auxiliares.
- Códigos y normativa vigente, sea nacional o extranjera.
- Ubicación de cunetas para colocación óptima de drenajes.
- Constatar la necesidad de usar protecciones para el concreto debido al ataque de químicos o si deben diseñarse cubetos para contener fluidos en caso de derrame.

Una vez tomados en cuenta, los parámetros anteriores, se tiene un punto de partida para iniciar el diseño estructural óptimo.

3.1.8 DIMENSIONAMIENTO

En cuanto al dimensionamiento en planta de la cimentación dependerá siempre de la ubicación de los apoyos o anclajes del equipo, adicionalmente de la distancia necesaria para realizar mantenimiento.

Adicionalmente se debe constatar las restricciones de espacio que se pueden presentar, por paso de tuberías o cercanías con otros equipos.

Por lo demás, una vez decidido el tipo de cimentación que se va a utilizar, (tomando en cuenta los criterios que se van a presentar más adelante); el procedimiento general de dimensionamiento es:

- Establecer dimensiones preliminares de acuerdo al equipo, distancia entre anclajes, limitaciones de espacio y datos del estudio de suelos.
- Hacer un cálculo de los esfuerzos con las cargas de servicio

- Comparar el esfuerzo actuante calculado con el esfuerzo admisible del suelo, conjuntamente, verificar la estabilidad a volteo y deslizamiento. Además chequear que los asentamientos estén dentro de los admisibles.
- Verificar con esto, las dimensiones de la cimentación y corregirlas si fuera necesario.

El breve procedimiento anterior es aplicable como un pre diseño en cualquier tipo de cimentación, siempre y cuando se esté consciente de las cargas que se utiliza para el cálculo preliminar de esfuerzos.

Al tratarse de una cimentación para equipo dinámico, existen ciertos parámetros que pueden ser considerados al iniciar el diseño, los mismos que se basan generalmente en la experiencia; a continuación se citan algunos de estos parámetros:

En el caso de cimentaciones tipo bloque asentadas sobre suelo o pilotes (con las debidas consideraciones que esto conlleva):

- Se debe procurar que la altura de desplante se encuentre sobre el nivel freático, o sobre estratos de suelo no sensibles a vibraciones (siempre y cuando se pueda, y el estudio de suelos no recomiende el uso de pilotes).
- Se debe dimensionar el bloque tal que la relación masa de la cimentación versus masa del equipo sea más o menos 3:1, en el caso de maquinaria centrífuga; para maquinaria recíprocante la relación de masas deberá ser 5:1.

- El espesor de la fundación debe ser mayor a:
 - o 60 cm
 - o La longitud embebida los pernos de anclaje,
 - o Mayor a 1/5 de la dimensión menor en planta de la fundación, 1/10 de la dimensión mayor en planta, o
 - o No menor a:

$$t = 0.01 \left(\frac{GL^4}{b} \right)^{\frac{1}{3}} \geq 60cm$$

En donde:

G: Módulo de corte del suelo [kg/cm²]

L: dimensión larga de la cimentación [cm]

b: dimensión corta [cm]

- Se determina las dimensiones en planta y se deberá procurar un área libre desde el borde de la máquina hasta el borde del bloque (aproximadamente 30 cm) para mantenimiento.
- Se deberá tratar de que el centro de gravedad de la máquina coincida con el centro de gravedad¹⁰ de la cimentación. El centro de gravedad combinado, debe tratar coincidir con el centro de resistencia del suelo. De esto no ser posible, se deberá procurar que la excentricidad, en cada dirección principal, entre el centro de masa del sistema fundación/máquina y el centro del área de contacto de la fundación, no debe exceder el 5% de la dimensión correspondiente de la cimentación.

¹⁰ Punto de aplicación de la resultante de todas las fuerzas de gravedad que actúan sobre un cuerpo.

- En grandes máquinas reciprocantes, la parte “enterrada” de la cimentación podrá incrementarse de un 50%-80% de la altura total del bloque, con el fin de incrementar el confinamiento lateral y las fuerzas de amortiguamiento para todos los modos de vibración.
- Se debe tener cuidado con evitar la resonancia, es decir verificar que la frecuencia natural del bloque de cimentación esté alejada de la frecuencia de operación de la máquina.

En el caso de cimentaciones tipo bloque asentadas en pilotes:

- La masa de hormigón asentada sobre los pilotes deberá ser de 1.5-2.5 veces la masa de una máquina centrífuga; y de 2.5-4 veces la masa de una maquinaria reciprocante.
- La selección del espesor, largo y ancho se hace similar a un bloque sin pilotes.
- La selección del número de pilotes se hace de tal manera que ninguno de ellos deba soportar más de la carga admisible que resiste cada pilote.
- Se deberá hacer coincidir el centroide del arreglo de pilotes con el centro de gravedad de la estructura combinada y las cargas de la maquinaria.
- Los pilotes deben ser anclados correctamente a la losa para tener una rigidez adecuada.

Para cimentaciones elevadas tipo pórtico o mesa se tienen las siguientes premisas:

- Se debe considerar el tamaño de la máquina y verificar que se dé el espacio suficiente para pernos de anclaje, tuberías, instalación y mantenimiento y operación.
- La profundidad de desplante de la losa de cimentación no deberá ser menor que la recomendada por el estudio de suelos (también pueden ser usados pilotes), además su espesor será:

$$t = 0.07L^{4/3}$$

De donde:

L: es la longitud promedio de dos vanos adyacentes (espacios entre columnas) en metros

- Se debe procurar que todas las columnas soporten más o menos la misma carga.
- La altura de las vigas será al menos 1/5 de la luz libre entre columnas, y la deflexión máxima admisible de las vigas ante cargas estáticas será 0.02" o 0.5 mm.
- La masa total de la estructura no debe ser menor que 3 veces la masa de una máquina centrífuga y 5 veces la masa de una máquina recíproca; además la masa de la losa superior (mesa) no debe ser menor a la masa de la máquina.

3.1.9 DISEÑO

Una vez establecida el tipo de cimentación a ser usada, definidas también las dimensiones apropiadas, se debe realizar el análisis de

esfuerzos completo. Se consideran aquí las cargas a las que será sometida la fundación y sus correspondientes combinaciones y factores de mayoración. Más adelante se detalla dichas cargas y las distintas combinaciones aplicables en el caso de equipo y maquinaria para facilidades petroleras.

3.2 CRITERIOS DE SELECCIÓN DEL TIPO DE CIMENTACIÓN

La clave de un diseño estructural exitoso es determinar correctamente que tipo de cimentación va a usarse, a que profundidad se va a desplantar y que armadura llevará. Es responsabilidad del diseñador dicha elección, basándose en las normas vigentes y en la experiencia ingenieril.

Es común que se presenten problemas en las estructuras en general cuando ha existido una investigación inadecuada del sitio, interpretación defectuosa de los informes de reconocimiento, mano de obra defectuosa durante la construcción, baja calidad en los materiales, etc. Un diseño fallido no solo puede representar un colapso o daño en la estructura o equipo, sino que la carencia de espacio para el paso de las tuberías, diseño innecesario que dificulte la construcción o exceso de material; también constituye falencias en el criterio del ingeniero. Se debe insistir en que exista una estrecha colaboración entre los contratistas, diseñadores, ingenieros mecánicos, eléctricos y electrónicos. Asimismo, una gran ayuda es referirse a las cimentaciones en las estructuras vecinas, si es posible se puede comparar los asentamientos reales con los calculados.

Un diseño satisfactorio de cimentación para equipo o maquinaria presente en una facilidad petrolera deberá cumplir al menos los siguientes requerimientos:

- a. La cimentación deberá soportar las cargas impuestas, verticales, horizontales, permanentes, no permanentes, normales y accidentales; sin que existan fallas de corte, volteos ($FS > 1.5^{11}$) o deslizamientos; además que los asentamientos producidos estén dentro de los límites permisibles.
- b. El centro de gravedad de la maquinaria habrá de alinearse en la medida de lo posible, verticalmente con el centro de gravedad de la cimentación.
- c. No tiene que existir posibilidad de resonancia, por ende, siempre será chequeada que exista disimilitud entre la frecuencia de operación de la maquinaria y la frecuencia natural de la cimentación, al menos que se cumpla un 30% de diferencia entre ellas.
- d. Al tratarse de equipo dinámico, se cuidará que las amplitudes de vibración estén dentro de las tolerancias provistas por el fabricante.
- e. Se deberá chequear el nivel freático, de estar muy alto se tomará las acciones pertinentes para mantenerlo al menos un cuarto más abajo que la base de la cimentación; el agua subterránea disipa bien las ondas de vibración.
- f. Dentro de una facilidad tendrán que ser separadas las cimentaciones de maquinaria (que tenga efectos de vibración) de las construcciones adyacentes por medio de juntas de expansión.

¹¹ "Cimentaciones de estructuras y equipo" NRF-159-PEMEX-2006

- g. El hormigón de la cimentación deberá estar protegido del ataque químico de los aceites combustibles de los equipos, o de su contenido según sea el caso.

Algunas otras recomendaciones generales son:

- Considerar cambios probables en el futuro en la naturaleza o en la distribución en las cargas.
- No utilizar diferentes tipos de cimentación para una estructura donde los efectos de un asentamiento diferencial pueden ser serios.
- Evitar asentamientos diferenciales.
- Evitar el hincado de pilotes donde la vibración propia del hincado puede causar que el suelo se consolide o licúe y pierda capacidad de apoyo o soporte de carga.
- Proporcionar un espacio razonable para los pilotes.
- Interpretar con prudencia los resultados no solo del estudio de suelos sino aquellos arrojados por el programa utilizado para el análisis estructural.
- Supervisión durante la construcción.
- Construir de acuerdo a lo que estipulen los planos estructurales.
- No modificar el diseño por criterio del constructor.

A continuación se describen a detalle los parámetros más importantes a considerarse en la elección de la cimentación.

3.2.1 LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO

Una de las partes primordiales para arrancar el diseño estructural, es sin duda la ubicación del proyecto. Todos los parámetros siguientes se derivan de ésta. Cuando se trata de la ampliación de una facilidad, como muchas veces ocurre que se debe perforar pozos adyacentes, o ubicar redes de tuberías nuevas, es común que la empresa que realizó la ingeniería previa suministre los planos de ubicación exacta de la plataforma o CPF; con lo que se tiene el precedente para empezar el diseño.

Sin embargo, cuando es un proyecto totalmente nuevo el que se va a iniciar, se debe recurrir a los métodos de exploración del sitio completos. Desde el uso de la cartografía del Instituto Geográfico Militar, hasta la inspección en sitio.

Las investigaciones en el campo, muchas veces revelan condiciones de cimentación indeseables para el tipo de estructura. La inspección visual es un paso preliminar esencial.

Se debe entonces, proporcionar datos sobre: los suelos superficiales, el agua superficial, las pendientes, la facilidad de entrada de equipo para exploración subterránea, la disponibilidad de agua para equipos de perforación, las estructuras que existen sobre el lugar, las estructuras anteriores y construcción adyacente. También debe determinar si pasan tuberías subterráneas a través del terreno.

3.2.2 ESTUDIOS DE SUELOS

Las cimentaciones son siempre ligadas a la mecánica de suelos, obviamente por la importancia de la interacción existente entre el terreno que recibirá las cargas y su agente transmisor. La Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-11, señala la obligatoriedad de realizar el estudio geotécnico para absolutamente todas las edificaciones y estructuras que se construyan en el territorio ecuatoriano.

El estudio de suelos para cimentaciones para equipo y maquinaria de facilidades petroleras no es la excepción, se seguirán todas las normas vigentes para la toma de muestras y ensayos necesarios para la identificación de amenazas geotécnicas, análisis de estabilidad, caracterización del subsuelo; incluso para recomendar un tipo de cimentación de acuerdo a los resultados obtenidos.

Los parámetros que se necesitarán del estudio, dependen generalmente del proyecto; este tipo de facilidades requiere ser específicos en la estructura que se requiera para el equipo que vaya a ser instalado; no es lo mismo cimentar un generador de peso 150 toneladas, que un tanque. Sin embargo también es común cuando se trata de la construcción de una facilidad de producción completa, dirigir los sondeos a los elementos más significativos (tanques, área de transformadores, generadores); en las demás cimentaciones se tomará las características del suelo más cercano.

3.2.2.1 OBJETIVO DEL ESTUDIO

El laboratorio que proporcione el estudio de suelos, en general proveerá los siguientes resultados:

- a. Clasificación de los suelos, conformación del subsuelo mediante la elaboración de columnas estratigráficas.
- b. Presencia de flujos de agua de infiltración superficial y nivel freático.
- c. Propiedades físicas y geomecánicas de los suelos encontrados.
- d. Valores geomecánicos para el diseño de las cimentaciones.
- e. Parámetros de expansión y permeabilidad.
- f. Recomendaciones de tipo de cimentación, mejoramiento (si se requiere) y procesos constructivos.

3.2.2.2 PROPIEDADES RELEVANTES DE LOS SUELOS

Las propiedades que se determinaran a través de los ensayos de laboratorio son:

- a. Estratigrafía: Se determina la composición del suelo donde se va a asentar la estructura por medio de métodos geofísicos.
- b. Clasificación (Granulometría): Por medio del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, SUCS¹². La cual clasifica a los suelos de la manera general:
 - **Suelos Gruesos:** La mayor parte de los granos tienen un diámetro mayor a 0.074 mm, más del 50% en peso de sus granos están retenidos en el tamiz 200. Constan en este grupo las gravas, las arenas, los suelos gravosos y arenosos con pequeñas cantidades de material fino (limo o arcilla).

¹² Según Norma Ecuatoriana de la Construcción, Capítulo 9 “Geotecnia y Cimentaciones” Sección 9.3.3.3

Tabla 3-1 Clasificación SUCS suelos gruesos

Pedregullos o suelos gravosos		Arenas	
GW	Grava bien graduada	SW	Arena bien graduada
GP	Grava mal graduada	SP	Arena mal graduada
GM	Grava limosa	SM	Arena limosa
GC	Grava arcillosa	SC	Arena arcillosa

En donde la notación viene de las siglas:

- G: Gravel (Grava)
 - S: Sand (Arena)
 - W: Well (Buena gradación del suelo)
 - P: Poorly (Mala gradación de suelo)
 - M: Mo (Fracción de finos con poca o nula plasticidad)
 - C: Clay (Fracción de finos con propiedades plásticas)
- **Suelos Finos.-** La mayoría de los granos tienen un diámetro menor a 0.074 mm, más del 50% en peso de sus granos pasan el tamiz 200. Constan en este grupo los suelos finos, limosos o arcillosos de baja compresibilidad, con un límite líquido menor a 50 o de alta compresibilidad, límite líquido mayor a 50.

Tabla 3-2 Clasificación SUCS suelos finos

LL<50		LL>50	
ML	Limo de baja compresibilidad	MH	Limo de alta compresibilidad
CL	Arcilla de baja compresibilidad	CH	Arcilla de alta compresibilidad
OL	Suelo orgánico de baja compresibilidad	OH	Suelo orgánico de alta compresibilidad

En donde la notación viene de las siglas:

- M: Mo (Fracción de finos con poca o nula plasticidad, Limos)
 - C: Clay (Fracción de finos con propiedades plásticas, Arcillas)
 - O: Organic (Suelo orgánico)
 - L: Low (Baja plasticidad y compresibilidad)
 - H: High (Alta plasticidad y compresibilidad)
- **Turbas.**- Suelos altamente orgánicos generalmente fibrilares o extremadamente compresibles. Se los representa con el símbolo Pt.

La granulometría se determina haciendo pasar a las muestra por los tamices normalizados y registrando el porcentaje de suelo retenido en cada uno de ellos. Con ello se determina la curva granulométrica y la correspondiente gradación del suelo. Existen también métodos de

laboratorio como el ensayo con el hidrómetro para la clasificación de los finos pasantes del tamiz 200.

Tabla 3-3 Aberturas de tamices normalizados para granulometría

Fuente: Espinace R., 1979

No. Tamiz (ASTM)	Abertura (mm)	Suelo
3"	76.12	Grava
2"	50.80	
1 1/2"	38.10	
1"	25.40	
3/4"	19.05	
3/8"	9.52	
4	4.76	Arena Gruesa
10	2.00	Arena Media
20	0.84	
40	0.42	
60	0.250	Arena Fina
140	0.105	
200	0.074	

- Peso Específico o Gravedad Específica (γ_g): Se define como relación entre el peso de sus partículas minerales y el peso de igual volumen de agua destilada a 4°C. De esta manera se tiene que, si el peso específico de un suelo es de 2.7, significa que un centímetro cúbico de partícula de ese suelo, pesa 2.7 veces más

que un centímetro cúbico de agua destilada a 4°C.¹³ Varía entre 2 y 3, y la referencia es la arena de cuarzo cuyo peso específico es 2.65.

Interviene en el cálculo de la relación de vacíos de un suelo, del peso unitario del suelo y sirve para graficar la recta de saturación máxima en el ensayo de compactación Proctor.

- Contenido de Humedad: Es un porcentaje determinado a través de la relación entre el peso del agua presente en un suelo y el peso del suelo seco.

Es un dato útil para estimar la compactación del suelo y su compresibilidad. El contenido de agua también influye en la resistencia al esfuerzo cortante de las arcillas.

- Densidad: Se mide los volúmenes relativos de vacíos y sólidos en un suelo. La densidad relativa indica la compresibilidad del suelo.
- Resistencia al corte: Es una de las propiedades más importantes del suelo y se define como el valor máximo de esfuerzo que se puede inducir sobre un suelo antes de que falle. La resistencia al corte de un suelo está basada en el “Modelo de Fricción” en donde la resistencia la crea la fricción que se existe entre las partículas conforman la masa al momento de ser sometidas a un esfuerzo.

¹³ “Teoría de Mecánica de Suelos I”, Ing. Milton Torres

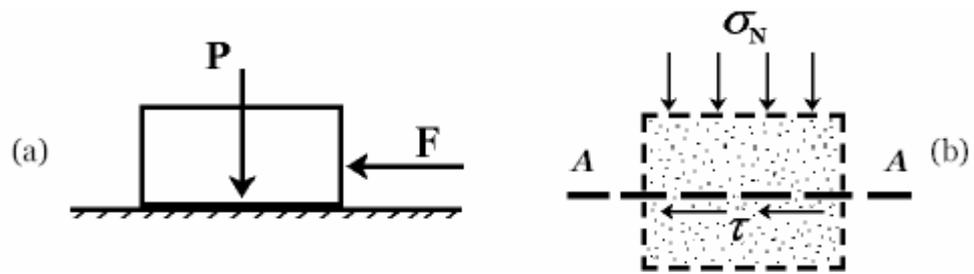


Figura 3.15 Modelo de fricción, (b) Solicitación de corte en una sección de suelo. Fuente Principios de Ingeniería en Cimentaciones, Braja M. Das

Se puede determinar la resistencia al corte con la ecuación de Coulomb:

$$\tau = c + \sigma \tan(\varphi)$$

En donde:

τ : resistencia al corte

c : cohesión

σ : tensión normal en el plano de rotura

φ : ángulo de fricción interna

El ángulo de fricción interna es la expresión geométrica de la fricción interna de un suelo, el término $\tan(\varphi)$ se denomina coeficiente de fricción. Entonces la componente de fricción en una masa de suelo es equivalente a multiplicar la presión normal que actúa por el coeficiente de fricción

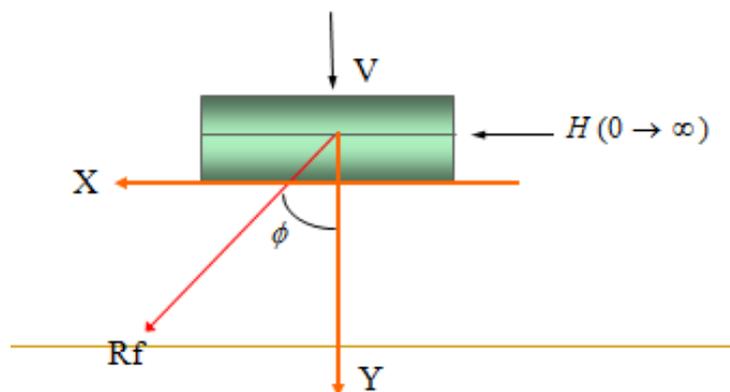


Figura 3.16 Representación geométrica de la fricción interna.
Fuente: Ingeniería de los Suelos II, Ing. Milton Torres Espinoza

Un mayor ángulo de fricción interna, representa un coeficiente también mayor; este puede aumentar con la densidad y la buena gradación del suelo.

Tabla 3-4 Ángulos de fricción aproximados para suelos sin cohesión. Fuente: Manual del Ingeniero Civil, tomo I, Frederick S.

Merritt, McGraw-Hill

TIPO DE SUELO	ϕ EN GRADOS	$\tan(\phi)$
Limo o arenas uniformes finas a medianas	26-30	0.5-0.6
Arena bien graduada	30-34	0.6-0.7
Arena y grava	32-36	0.6-0.7

La resistencia al esfuerzo cortante de materiales granulares varía con la presión normal. La resistencia al esfuerzo cortante de las

arcillas saturadas depende de la velocidad de deformación.

El análisis de las teorías de Coulomb y Mohr para la determinación de esfuerzos normales y su interacción con la resistencia al corte de los suelos es exhaustivo y no es el objeto de este estudio.

- Compresibilidad: Propiedad que influye en la determinación de los asentamientos finales del suelo ante la carga transmitida por la cimentación; es decir, define las características de esfuerzo-deformación.

En suelos granulares se expresa como el Módulo de Young (E) y en las arcillas con el Índice de Compresión.

- Permeabilidad: Propiedad que define la capacidad del suelo de permitir el escurrimiento del agua a través de él. Se expresa numéricamente como el coeficiente de permeabilidad (K) y depende de la temperatura y del índice de vacíos del suelo.

Es importante para determinación de drenajes, rebajamiento de nivel de las aguas y control de hundimientos.

3.1.1.1 PROCEDIMIENTOS Y ENSAYOS

Los métodos de exploración y ensayos necesarios para determinar las características del suelo para el diseño de una cimentación se describen brevemente a continuación:

- a. *Métodos geofísicos*: Se fundamentan en la medición de parámetros físicos, como la velocidad de una onda mecánica, o variación de un campo gravitacional, producida por diferencia de

densidad, o la intensidad de una corriente asociada a la propagación de ondas eléctricas. Un ejemplo es la sísmica de refracción, cuyo principio es que la velocidad de las ondas de choque varían con el material a través del cual viajan; por lo que se puede determinar con correlaciones el espesor de los estratos de cada material.

- b. *Pozos a cielo abierto*: permiten el examen visual del suelo en sitio y proporcionan información sobre la dificultad de la excavación. Con ellos también es posible obtener en forma manual una muestra no alterada del suelo¹⁴.

El número, la localización y la profundidad de los pozos a cielo abierto y las perforaciones que se deben hacer dependen del tipo y tamaño de la estructura, de las cargas y del suelo.

Los códigos locales de construcción pueden especificar el número mínimo de perforaciones o pozos a cielo abierto en términos del área de construcción y también puede indicar la profundidad de dichas perforaciones, además la profundidad de los sondeos varía de acuerdo al equipo que se esté cimentando, por ejemplo en este caso el generador Wartsila de 7MW requiere un sondeo a 13 metros mínimo.

¹⁴ Muestra que teóricamente guarda exactamente las mismas condiciones del terreno donde fue tomada.

Frecuentemente, es más económico hacer una investigación completa con perforaciones que diseñar o proyectar para las peores condiciones.

- c. *Las pruebas de suelo en sitio:* Las pruebas de penetración, compresibilidad y de esfuerzo cortante ocasionalmente se llevan a cabo en el campo. Estos valores pueden correlacionarse con la resistencia al esfuerzo cortante y a la fricción y se utilizan para determinar la capacidad de carga del suelo y la resistencia a la fricción de los pilotes, para poder estimar la longitud de éstos. (Criterio de rechazo).
- d. *Las pruebas de carga:* Se aplican incrementos de carga a una placa de soporte mediante gastos o pesos. Se determina el asentamiento después de cada incremento.
- e. *Densidad in situ:* Este ensayo se utiliza con el fin de conocer y controlar la compactación de terraplenes y capas de base, también para determinar densidad *in situ* y porcentajes de contracción o expansión de materiales.
- f. *Contenido de humedad:* Se debe obtener el peso de la muestra al natural, luego el peso de la muestra seca (secar completamente en horno a 110°); se determina así:

$$\%h = \frac{Pa}{Ps} * 100 \quad Pa = Ph - Ps$$

En donde:

%h: porcentaje de contenido de humedad

Pa: peso del agua

Ph: peso de suelo húmedo

Ps: peso de suelo seco

g. Compresión triaxial: Es el ensayo más utilizado para determinar la resistencia al corte de los suelos. Se realiza en muestras inalteradas que tienen forma cilíndrica y relación 1:2, las cuales son sometidas a fuerzas de compresión, actuando a 90° entre sí, una en dirección longitudinal y dos laterales (presión de confinamiento)

La falla ocurre debido al corte, por ello es necesario considerar la relación entre la resistencia al corte y la tensión normal que actúa sobre cualquier plano dentro del cuerpo a compresión.

El esfuerzo axial y la presión de confinamiento son los esfuerzos principal mayor y principal menor respectivamente.

Con este ensayo se obtiene la cohesión “c” y ángulo de fricción interna ϕ .

3.2.3 MATERIALES Y MANO DE OBRA DISPONIBLES

Como se ha mencionado muchas de las facilidades petroleras se encuentran o deben ser construidas en lugares donde no existe a veces ni siquiera comunicación vial. Se debe tomar en cuenta dentro del costo de los diseños, el transporte de materiales pétreos, acero y equipos

necesarios. Generalmente grandes piezas de acero son transportadas por helicóptero.

Los diseños estructurales en el entorno petrolero, requieren materiales a veces especiales, lo que debe verificarse también. Un ejemplo se tiene en que muchos perfiles de acero presentes en catálogos no se encuentran en stock dentro del país, por lo que se debe prever el armado de ciertas secciones, lo que conlleva a la necesidad de mano de obra especializada.

Son los códigos locales los que gobiernan los requisitos que deben cumplir los materiales, sin embargo el Comité de Normalización de Petróleos Mexicanos y Organismos Subsidiarios (PEMEX), suministra un capítulo especial para cimentación de estructuras y equipo en lo que se especifica lo siguiente:

- a. El hormigón debe tener un peso específico mínimo de 2.2 t/m^3 .
- b. La resistencia a la compresión de las cimentaciones tipo bloque, marco y las columnas para cimentaciones de turbogeneradores debe ser $f'c \geq 240 \text{ kg/cm}^2$.
- c. La resistencia del hormigón en replantillos será mínimo de $f'c = 100 \text{ kg/cm}^2$.
- d. Las varillas de acero serán corrugadas con resistencia a la fluencia $F_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$.
- e. Las placas de apoyo serán de acero estructural tipo A-36.
- f. En cuanto a los pernos, las roscas y cabezas de tuercas (hexagonales) deberán cumplir los requisitos de ASTM-307 grado A.

Las arandelas tendrán calidad equivalente a ASTM-325. Además se puede usar preliminarmente para determinar la longitud lo siguiente:

Tabla 3-5 Longitud mínima referencial de pernos de anclaje¹⁵

LONGITUD MÍNIMA Lo DE ANCLAJE DE LOS PERNOS		
Pernos Φ (mm)	Lo (cm) Pernos Fijos	Lo (cm) Pernos Desmontables
≤20	40	40
22-30	50	40
32-36	60	50
40-50	70	50
55-60	80	60
65-70	80	70
75-80	80	80
85-90	80	90

- g. Los perfiles cumplirán con las normas nacionales y serán de acero estructural A-36.

En cuanto al grout¹⁶ usado en la fijación de anclajes, existen dos tipos: el cementicio y el polímero (basado en epóxicos). El primero es más comúnmente usado debido a su disponibilidad en el mercado, facilidad de uso, buenas propiedades físicas y sobre todo el bajo costo. Este material se lo encuentra premezclado en el mercado y contiene instrucciones de preparación de superficie, colocación y curado.

3.2.4 MÉTODOS CONSTRUCTIVOS

El diseñador estructural debe considerar la parte práctica en su ingeniería. Es bastante frecuente que un diseño óptimo desde el punto de vista netamente teórico no siempre es el más fácil de construir; muchas de las veces se realiza un gasto aún mayor al tratar de construir

¹⁵ Fuente: "Suelos, Fundaciones y Muros", María Graciela Fratelli.

¹⁶ Mortero autonivelante, usado para rellenar espacios entre superficies (hormigón/ placa).

las “secciones ideales” y no se consigue el propósito de calidad, seguridad, economía y eficiencia constructiva.

Las cimentaciones para equipo se rigen bajo los parámetros usuales de construcción pero adicionalmente, bajo requerimientos específicos provistos por el fabricante del equipo con el fin de mantener un grado de alineación preciso.

Los andamios y encofrados constituyen una parte importante, el constructor preverá su diseño para resistir: las cargas del hormigón, cargas de impacto y cargas temporales de construcción. Se considera cargas de viento pero no de sismo al momento de diseñar los andamios y encofrados. Puede requerirse arriostramiento transversal y longitudinal para resistir las fuerzas horizontales.

El tipo de fundaciones para equipo y maquinaria son en su mayoría, masivas, es decir son volúmenes muy grandes de hormigón.

En la práctica, existen formas de disminuir la temperatura de fraguado para evitar los agrietamientos y daños en la cimentación:

- a. Usar la menor cantidad de cemento posible para cumplir las necesidades de resistencia y durabilidad del diseño.
- b. Se puede usar cemento puzolánico¹⁷.
- c. Se puede enfriar el agregado o usar hielo triturado en la mezcla como parte del volumen de agua.
- d. De ser posible utilizar el mayor tamaño de agregado (de acuerdo a

¹⁷ Menor cantidad de material aglomerante que reaccione con el agua.

las normas) para minimizar la cantidad de cemento.

- e. Utilizar un aditivo reductor de agua para disminuir la reacción de los componentes agua/cemento.
- f. Vibrar correctamente.
- g. Se tratará de evitar en lo posible diseños de mezclas con agregado pequeño y grandes cantidades de cemento que requieran ser bombeadas.

Si es permitido según la cimentación se debe, por tanto, realizar juntas de construcción ¹⁸ que subdividirán la fundición y evitarán el calentamiento interno del hormigón y las grietas por retracción de fraguado. De la correcta construcción de las juntas dependerá la integridad estructural de la cimentación. Las juntas en las columnas (cimentaciones tipo marco) se ubican cerca de la línea de piso y en la parte inferior de las vigas apoyadas. En losas y vigas de piso se ubicarán en los lugares de menor concentración de esfuerzos. Las juntas deben transmitir los esfuerzos de una manera correcta, por ejemplo, cargas de tracción se transfieren dejando proyectadas las varillas del hormigón ya fundido atravesando la junta. La transferencia de compresión se logra asegurando que el hormigón de ambos lados de la junta posea la misma consistencia y resistencia. El corte puede disiparse en la cara de la junta o bien puede transferirse añadiendo rugosidad a la cara de la junta para crear fricción.

¹⁸ Las juntas en cimentaciones para equipo vibratorio, principalmente en bloques debido a la necesidad de una cimentación homogénea y continua.

La instalación de los equipos o estructuras en la cimentación tiene como interface a las placas, anclajes y pernos; los mismos que dependen del fabricante del equipo, de los procedimientos de construcción (si se usan pernos embebidos o de expansión), de la colocación y ajuste del equipo y de las tolerancias permitidas.

Es común la necesidad de inyectar grout para nivelar las placas y bases del equipo a los pedestales construidos. El diseñador deberá revisar para esto la forma de las bases de la máquina, el espacio disponible para la inyección del mortero y el diseño de los pernos de anclaje.

3.2.5 FACTORES ECONÓMICOS

El factor económico es siempre importante al momento de elegir el tipo de obra civil a realizar. Si bien es cierto, que para ciertos casos existen opciones óptimas de diseño, no siempre son las únicas, de hecho se debe analizar más de una alternativa tomando en cuenta la diferencia de costos que cada una conlleva.

En el caso de las cimentaciones, el tener una losa de cimentación implicará siempre un costo mayor que elegir un sistema de vigas; sin embargo hay equipos que necesariamente deben apoyarse sobre una losa fuerte, por lo que se puede optar por elegir un sistema combinado de vigas y losa de cimentación. Así al distribuir las cargas a las vigas, el espesor de la losa disminuiría respecto a la decisión inicial, por ende el costo también baja.

Así también hay ocasiones en que no solo las cargas son las que determinan el mayor costo de una cimentación respecto a otra (por tamaño, volumen y cantidad de materiales) sino que además, la localización y el tipo de terreno del lugar a cimentar pueden encarecer una obra, a pesar de haber elegido el diseño correcto y además “más barato”; el transporte de material al sitio, el acceso de la maquinaria, la necesidad de mano de obra especializada (soldadores experimentados), el pilotaje; son algunos rubros que pueden resultar siendo representativos de acuerdo a la ubicación del proyecto. Con lo que luego de considerar estos parámetros, se deberá hacer una evaluación económica preliminar de cada diseño y compararla con el presupuesto que se tiene para la obra, con el objeto de no encarecerla demasiado.

Es conocido que la industria petrolera maneja presupuestos bastante altos, existen equipos cuyo costo sobrepasa los 5 millones de dólares; por ende la seguridad es primordial; esto da un poco más de holgura al diseñador a la hora de elegir una cimentación frente a otra.

3.2.6 FACTORES DE SEGURIDAD

Los factores de seguridad en este tipo de trabajos, parten en 1.5, en todo diseño, tanto mecánico, eléctrico, instrumentación y control y por supuesto el civil. Este valor es variable de acuerdo al tipo de equipo o sistema que se vaya a diseñar. El establecer sabiamente un factor de seguridad apropiado para cada caso garantizará el evitar no solo daños en los sistemas sino también evitar posibles daños ambientales que

puedan ser causados por la ruptura de tuberías, paralización de suministro de energía, etc.

En el caso específico de las cimentaciones, se analiza dos casos principales:

3.2.6.1 FACTOR DE SEGURIDAD AL VOLTEO.-

Se presenta cuando se transmiten momentos a la cimentación, lo que sucede en la mayoría de los casos, ya que las cargas axiales van acompañadas de una excentricidad, además de las fuerzas horizontales que tratarán de voltear la estructura y por ende, esforzarán a la cimentación.

Se calcula dividiendo el momento estabilizador para el momento de volteo actuante, el peso propio de la cimentación y el peso del relleno, de existir, son las variables más importantes que deben contrarrestar el efecto, por lo que es necesario el chequeo de este factor al momento de dimensionar la fundación. Se considera el valor de 1.5 un factor aceptable para que la cimentación se mantenga estable ante el volteo.

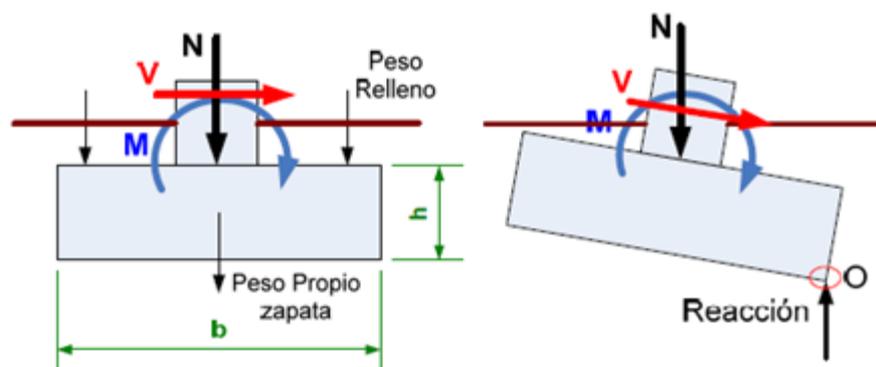


Figura 3.17 Fuerzas que influyen en el volteo y estabilización de la cimentación

En la figura 3.17 se esquematiza las fuerzas actuantes para el cálculo del factor de seguridad al volteo, el cual se resume en:

$$FS_v = \frac{M_e}{M_v} \geq 1.5$$

3.2.6.2 FACTOR DE SEGURIDAD AL DESLIZAMIENTO.-

Es aplicable generalmente en zapatas no arriostradas horizontalmente o en la dirección crítica donde las fuerzas horizontales puedan no solo producir momentos importantes de volteo sino también sean capaces de arrastrar a la cimentación en el sentido de aplicación de dichas fuerzas. Su valor depende del terreno y del área de la fundación y deberá ser mayor o igual a 1.5, con lo que se tiene:

Para suelos arenosos.-

$$FS_d = \frac{(N + \text{Peso Propio}) \tan(\varphi_d)}{V} \geq 1.5$$

Para suelos cohesivos.-

$$FS_d = \frac{A * C_d}{V} \geq 1.5$$

En donde:

N: fuerza axial que se transmite (ver figura 3.17)

Φ_d : $2/3\Phi$, donde Φ es el ángulo de fricción interna del suelo¹⁹

C_d : $0.5C$, donde C es la cohesión del terreno²⁰

A: área de la cimentación

V: fuerza horizontal actuante (ver figura 3.17)

¹⁹ Dato proporcionado por el estudio de suelos correspondiente.

²⁰ Dato proporcionado por el estudio de suelos correspondiente.

3.3 CARGAS DE DISEÑO

El establecer correctamente las cargas previo al diseño de las cimentaciones es lo que dará la pauta para saber si se va o no a considerar todas las condiciones críticas a las que van a estar sometidas las mismas. La diferenciación de las cargas a aplicarse dependerá del tipo de equipo.

3.3.1 CARGAS ESTÁTICAS

Por definición una carga estática es aquella que no tiene variación en el tiempo al ser aplicada en una estructura. Estas cargas en su mayoría son aplicables para ambas maquinaria estática y dinámica.

3.3.1.1 CARGAS MUERTAS

Tabla 3-6 Resumen de Cargas Muertas

EQUIPO ESTÁTICO	EQUIPO DINÁMICO
<p>Peso del equipo, plataformas, tubería, ductos, revestimientos y demás accesorios permanentes.</p> <p>En el caso de vessels, se considera a veces el peso del líquido que contienen, esto puede llevar a confusiones al momento de hacer combinaciones de carga y aplicar los factores de mayoración</p>	<p>El peso del equipo y accesorios permanentes. La distribución de esta carga sobre la cimentación depende de la ubicación de los puntos de apoyo. Generalmente el fabricante provee un diagrama con la aplicación de las cargas verticales, de no suceder esto se hace asume un comportamiento rígido y se distribuye adecuadamente esta carga.</p>

3.3.1.2 CARGAS VIVAS

Tabla 3-7 Resumen de Cargas Vivas

EQUIPO ESTÁTICO	EQUIPO DINÁMICO
Corresponde a personal de mantenimiento, operadores, equipo móvil, herramientas y demás elementos que no son parte permanente del equipo. Puede incluir pequeñas grúas, válvulas, brazos mecánicos, unidos a una parte del equipo o a la cimentación. Se considera que no actúan en periodos de operación.	Son las mismas que las consideradas en equipo estático. Generalmente se distribuye uniformemente sobre el área de la cimentación. Varía desde más o menos 290kg/m ² (para personal) hasta 730kg/m ² (para equipo de mantenimiento y materiales adicionales).

3.3.1.3 CARGAS DE OPERACIÓN

Tabla 3-8 Cargas de Operación

EQUIPO ESTÁTICO	EQUIPO DINÁMICO (ESTÁTICAS)
<p>Comprende el contenido de los equipos (líquido, granular, sólidos en suspensión) en condiciones normales de operación. Puede incluir efectos de transferencia o movimiento de dicho contenido (llenado, vaciado), sin embargo estos efectos pueden ser tratados aparte y aplicarse diferentes factores de mayoración.</p> <p>Incluyen cargas por cambios de temperatura, sea en el equipo o en el sistema de tuberías conectado. Por ejemplo en separadores horizontales o intercambiadores de calor que posean dos sillas asentadas cada una en un pedestal separado, el cambio de temperatura puede provocar fuerzas horizontales críticas al tope de los mismos.</p>	<p>Incluyen el peso del gas o líquido dentro de la máquina, durante la operación normal. Algunas máquinas desarrollan un torque en la conexión entre el cuerpo de la máquina propiamente dicho y su mecanismo de arranque, el cual puede estar separado (motor eléctrico, turbina de vapor) o integrado. Dicho torque es igual en magnitud y opuesto en dirección en el mecanismo de arranque y en el equipo; y se aplica en la cimentación como un par de fuerzas en dirección vertical que actúa en el "center line" de la máquina:</p> $NT = \frac{5250 * (P_s)}{f_o} [lb - ft]$ <p>NT: torque normal</p>

	<p>Ps: potencia transmitida por el eje de la conexión (HP, kilowatts)</p> <p>fo: velocidad o frecuencia de operación (rpm)</p>
--	--

3.3.1.4 OTRAS CARGAS

Tabla 3-9 Resumen de Cargas Varias

CARGA	EQUIPO ESTÁTICO	EQUIPO DINÁMICO (CARGAS ESTÁTICAS)
DE PRUEBA	En equipos que participan en procesos, como los separadores a presión, es común realizar la llamada: prueba hídrica (se prueba su resistencia lleno de agua, ya que su densidad, 1t/m ³ es mayor que la del crudo).	
DE MONTAJE, MANTENIMIENTO Y REPARACIÓN	Cargas temporales. Son considerables en equipos como intercambiadores de calor. Se las aplica como una fracción del peso (0.5-1.5) del grupo de tuberías que se reemplaza o se retira para limpieza. Se aplica en el "center line" del equipo y solo se combina con la carga muerta. Se recomienda chequear las cargas de montaje por seguridad.	Cargas temporales. Las de montaje suelen ser provistas por el fabricante en el esquema de cargas que actuarán sobre la cimentación. Se combinan con otras cargas: vivas, muertas, sismo, viento. Aunque no se asume que las dos últimas actúen en su totalidad en estas combinaciones.
DE MOVIMIENTO DEL CONTENIDO	El movimiento de un fluido o gas dentro de	Si un equipo dinámico tuviere un contenido de

	<p>un equipo produce fuerzas dinámicas, sin embargo la dificultad de su estimación obliga a tratarlas como estáticas, en el diseño de la cimentación. Se representan como una fuerza horizontal aplicada en el centroide del líquido contenido y su valor es de 0.1-0.5 veces el peso del líquido contenido (según el equipo que se esté diseñando); en algunos casos esta fuerza es pequeña y puede ser despreciada.</p>	<p>líquido significativo, se considera similar al equipo estático.</p>
<p>TEMPERATURA</p>	<p>Se considera dentro de las cargas de operación.</p>	<p>El cambio de temperatura puede ser tan fuerte que puede ocasionar que la máquina trate de deslizar, por lo que provoca fuerzas de fricción, cuya magnitud depende de: temperatura, localización de los apoyos y de la condición de la superficie de apoyo. Dichas fuerzas no son significativas para el suelo y la cimentación pero pueden gobernar el diseño del anclaje y grout en los pedestales. Es difícil estimar las fuerzas de fricción por cargas de temperatura, pero se recomienda el siguiente cálculo:</p> $F_f = (\mu) * (carga\ actuante)$ <p>El coeficiente de fricción μ, varía entre 0.2-0.5 y la carga</p>

		actuante incluye: la carga muerta del equipo, el torque normal, la carga sobre los pernos y pesos de tuberías.
DE “FLOTABILIDAD”	Un nivel freático alto puede producir un efecto de “flotación” de la cimentación si no ha sido controlado. Se chequea el F.S a deslizamiento.	Similar al equipo estático.

3.3.2 CARGAS DINÁMICAS

Las siguientes cargas, son independientes del tipo de equipo que se esté analizando (estático o dinámico). En el caso de sismo, se usa la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-11) con las consideraciones adecuadas.

Para el caso de las cargas que afectan exclusivamente a la cimentación de equipos dinámicos se realiza primero una clasificación de la maquinaria y de ahí se define las cargas actuantes.

3.3.2.1 SISMO

El caso se la fuerza sísmica es similar en ambos equipo estático y dinámico. Se ha mencionado antes que en el Ecuador no se tiene una normativa específica para aplicar en estructuras y cimentaciones para equipo y maquinaria; pero se puede realizar una similitud y calcular un factor de sismo para multiplicarse con el peso y así obtener el cortante basal.

En la NEC-11 se especifica la forma de calcular el cortante basal de diseño, con lo que se puede determinar una fuerza a ser aplicada en el centro de masas del equipo y cimentación para así realizar correctamente el diseño y el chequeo de los factores de seguridad:

$$V = \frac{\eta * Z * F_a * I}{R} W$$

$$k = \frac{\eta * Z * F_a * I}{R}$$

$$V = kW$$

En donde:

I: factor de importancia de la estructura, ver tabla 3.9

Fa: coeficiente que amplifica las ordenadas del espectro de respuesta elástico de aceleraciones para el diseño en roca.

R: factor de reducción de respuesta estructural, ver tabla 3.10.

Tabla 3-10 Factor de Importancia según el Tipo de Estructura. Fuente:

NEC-11, Peligro Sísmico

Categoría	Tipo de uso, destino e importancia	Factor
Edificaciones esenciales y/o peligrosas	Hospitales, clínicas, Centros de salud o de emergencia sanitaria. Instalaciones militares, de policía, bomberos, defensa civil. Garajes o estacionamientos para vehículos y aviones que atienden emergencias. Torres de control aéreo. Estructuras de centros de telecomunicaciones u otros centros de atención de emergencias. Estructuras que albergan equipos de generación y distribución eléctrica. Tanques u otras estructuras utilizadas para depósito de agua u otras sustancias anti-incendio. Estructuras que albergan depósitos tóxicos, explosivos, químicos u otras sustancias peligrosas.	1.5
Estructuras de ocupación especial	Museos, iglesias, escuelas y centros de educación o deportivos que albergan más de trescientas personas. Todas las estructuras que albergan más de cinco mil personas. Edificios públicos que requieren operar continuamente	1.3
Otras estructuras	Todas las estructuras de edificación y otras que no clasifican dentro de las categorías anteriores	1

Tabla 3-11 Coeficientes de reducción de respuesta estructural en estructuras diferentes a la edificación, NEC-11, Peligro Sísmico

Valores del coeficiente de reducción de respuesta estructural	R
Reservorios y depósitos, incluidos tanques y esferas presurizadas, soportados mediante columnas o soportes arriostrados o no arriostrados.	2
Silos de hormigón fundido en sitio y chimeneas que poseen paredes continuas desde la cimentación	3.5
Estructuras tipo cantiliver tales como chimeneas, silos y depósitos apoyados en sus bordes	3
Naves industriales con perfiles de acero	3
Torres en armadura (auto-portantes o atirantadas)	3
Estructuras en forma de péndulo invertido	2
Torres de enfriamiento	3.5
Depósitos elevados soportados por una pila o por apoyos no arriostrados	3
Letreros y carteleras	3.5
Estructuras para vallas publicitarias y monumentos	2
Otras estructuras no descritas en este documento	2

En el apartado de “Peligro Sísmico” de la NEC-11, se recomienda el uso del valor $R=1$, para estructuras diferentes a la edificación, considerando que las estructuras presentan un grado de ductilidad bajo, se puede utilizar el valor de R entre 3 y 4.

Ya en la práctica, el determinar un valor para el cortante basal y aplicar un espectro de aceleraciones al modelo de la estructura, bastará para considerar el efecto del sismo en el diseño.

Una vez obtenidas las fuerzas cortantes se podrá realizar la distribución de fuerzas, con el fin de aplicar un momento y una fuerza axial derivada de este momento; provocados por el sismo actuante (en el caso del separador, un par de fuerzas debido a que son pedestales independientes sobre los cuales se asientan las sillas del equipo). La distribución de la fuerza se hace con la siguiente fórmula:

$$F_x = \frac{w_x h_x}{\sum_{i=1}^n w_i h_i} V$$

$$M_{\text{sismo}} = F_x * \text{brazo}$$

Dónde:

w_x : peso asignado en el nivel x , (sea x el centro de gravedad del equipo y fracción de la cimentación que sobresale del terreno)

h_x : altura del nivel x

w_i : peso en el nivel i

h_i : altura del nivel i

V : cortante basal en el sentido de análisis

Para w , dependiendo del caso se toma la totalidad de la carga muerta actuante, la cual puede ser el equipo en operación (condición donde se presentará más probablemente el sismo); o el peso propio de la estructura; y puede o no tomarse un porcentaje de la carga viva, de acuerdo a las condiciones de operación de la máquina. Algunos practicantes recomiendan incrementar en 10% el peso w , por efecto de conexiones, tuberías y plataformas.

Según el ACI, el sismo en sentido vertical es casi innecesario en el caso de equipos, sin embargo para un cálculo conservador y debido a la zona de alto riesgo sísmico que constituye el Ecuador se toma de $2/3$ a $3/4$ de la componente horizontal.

3.3.2.2 VIENTO

El viento es una sollicitación importante a considerarse en las estructuras. En el caso de facilidades petroleras, los separadores, torres de chimeneas, bombas, etc. Están expuestos, por lo que pueden ser sensibles a estas fuerzas. Los ingenieros mecánicos consideran esta carga en el diseño de los equipos. En el caso de estructuras también se debe tener en cuenta. La cimentación obviamente no estará expuesta al viento directamente, pero al tratarse de fuerzas horizontales, el viento influye directamente en la estabilidad a volteo y deslizamiento, por lo que en ciertos casos puede definir las dimensiones y la configuración de la cimentación.

Los reportes del ACI dedicados a cimentaciones para equipo estático y a cimentaciones para equipo dinámico, señalan que las cargas debidas

a viento aplicadas sobre la superficie de la máquina, equipo auxiliar y sobre la cimentación se basan en la velocidad de ráfaga registrada para cada lugar específico donde se realice el diseño. Se recomienda además el uso del código ASCE 7-2010 para la determinación de las presiones de viento. A pesar que la mayoría de sistemas estructurales que involucran cimentaciones de máquinas, separadores horizontales, separadores verticales bajos; son considerados rígidos (frecuencia natural en la dirección lateral mayor a 1 Hz)²¹ por lo que se puede simplificar los procedimientos de cálculo. Cuando se trata sin embargo del diseño de cimentaciones para torres altas flexibles de procesos y chimeneas, vessels verticales y pilas de gran altura, es decir estructuras que son claramente afectadas por cargas de viento no se puede utilizar el ASCE 7-2010 ya que esta norma excluye este tipo de estructuras; se recomienda para este efecto el uso del capítulo 4 de ACI 307 así también lo expuesto en el capítulo 5 de ASME/ANSI STS-1-1986. A pesar de que al tratarse de estructuras metálicas como la torre de una chimenea ($h=25\text{m}$), la presión de viento es poco representativa en comparación de las otras cargas, ya que el área de contacto (perfiles de acero) es mínima.

Debido a que el objeto de este estudio es el cálculo de las cimentaciones, y que como requisito principal es que el fabricante del equipo haya previsto el cálculo de las fuerzas de viento que actúan sobre el mismo (incluido la torre de chimenea); se expone brevemente

²¹ "Cimentaciones para Equipo Dinámico" ACI

el método de cálculo de las presiones de viento para cimentaciones de equipo basado en el ASCE 7-2010.

Las siguientes dos ecuaciones representan en general la presión de viento del ASCE 7-2010:

$$1) q_z = 0.613K_zK_{zt}K_d * V^2I$$

$$2) P_z = q_zGC_f$$

En donde:

q_z : presión dinámica a la altura z

V : velocidad básica del viento (m/s)

I : factor de importancia (Se toma generalmente 1.15)

K_z : coeficiente de presión de velocidad evaluado a la altura z

K_{zt} : factor topográfico (sección 26.8 ASCE 7-2010), para el caso de Ecuador se toma 1.

K_d : factor de direccionalidad del viento (tabla 26.6-1, ASCE 7-2010)

P_z : Presión de diseño a la altura z (lb/pie²)

G : Factor de ráfaga, generalmente tomado 0.85 para edificios rígidos (aplicable a equipo rígidos)

C : Coeficiente de presión o succión

La complejidad que presenta los métodos propuestos por el ASCE 7-2010, son muchas veces injustificados cuando se diseñan cimentaciones para equipos rígidos, para lo cual es solo necesaria la selección de un “factor de importancia”, que ajusta la velocidad básica del viento para un intervalo de recurrencia; y la determinación de la “presión de velocidad”, la cual es función de la exposición de la

estructura (topografía, si existen árboles, montañas o es una planicie) y de la altura sobre el nivel terminado.

El factor de ráfaga ajusta la presión media de velocidad al valor máximo dado por la exposición y altura. El coeficiente “Cf” justamente dependerá de la geometría de la estructura y del área de la misma que esté expuesta al viento, además de la orientación relativa al flujo de la corriente y según se define en el ASCE es el valor usado para otras estructuras dentro de los cuales se incluyen estos equipos.



Figura 3.18 Cuarto de generación Wartsila

Por tanto, las estructuras tipo galpones con grandes áreas de cubiertas y paneles metálicos son aquellas susceptibles a que la presión de viento domine la envolvente de cargas, debido a su altura y a las superficies de exposición. Un claro ejemplo de ello son las estructuras de los cuartos de generación que cubren un generador Wartsila, como se muestra en la figura 3.18.

3.3.2.3 TIPOS DE EQUIPO DINÁMICO

No todo el equipo y maquinaria transmite las mismas fuerzas a una cimentación, esto dependerá de su funcionamiento. Se puede hacer varias clasificaciones del equipo industrial, para propósitos de diseño, una de ellas es la siguiente:

- *Grupo A:* Maquinaria para cuyo diseño genera fuerzas desbalanceadas relativamente constantes y que actúa en un rango pequeño de frecuencias. En este grupo se encuentran las trituradoras, compresores recíprocos²², bombas o motores y tamices vibratorios.
- *Grupo B:* Maquinaria que es diseñada para ser balanceada pero que debido al desgaste o acumulación de material y a las altas frecuencias de operación (sobre 800 rpm) puede aún transmitir fuerzas dinámicas a su cimentación. Se incluyen en este grupo: ventiladores, escapes de gas centrífugos y bombas centrífugas. En este grupo también se pueden considerar equipos que almacenan grandes volúmenes de fluidos o gases que se mueven a velocidades altas.
- *Grupo C:* Maquinaria que tiene grandes fuerzas incidentales de impacto. Por ejemplo, trituradoras de impacto, molinos.

El tipo de equipo dinámico ciertamente influye en la elección de la cimentación a ser diseñada, sin embargo, sea cual sea el equipo, su diseñador deberá proveer los datos de: tamaño, peso, momento de

²² Tipo de equipo dinámico a base del movimiento de un pistón y la rotación de un cigüeñal, ver "Manual de diseño de cimentaciones tipo bloque para Equipo Dinámico", Miguel Ángel Angos Taco, ESPE 2009

inercia de masas, localización del centro de masas de la máquina y en algunas ocasiones hasta una recomendación de las dimensiones mínimas de la cimentación.

3.3.2.4 VIBRACIONES

En el caso de las vibraciones la premisa de diseño a considerar es *limitar la amplitud de la respuesta de la cimentación y de sus modos de vibración a una tolerancia específica*. Esta tolerancia puede ser:

- Tolerancia del equipo dada por el fabricante
- Tolerancia de las normas o bibliografía especializada
- Tolerancia humana (que no se sienta grandes movimientos)
- Tolerancia especificada por el cliente

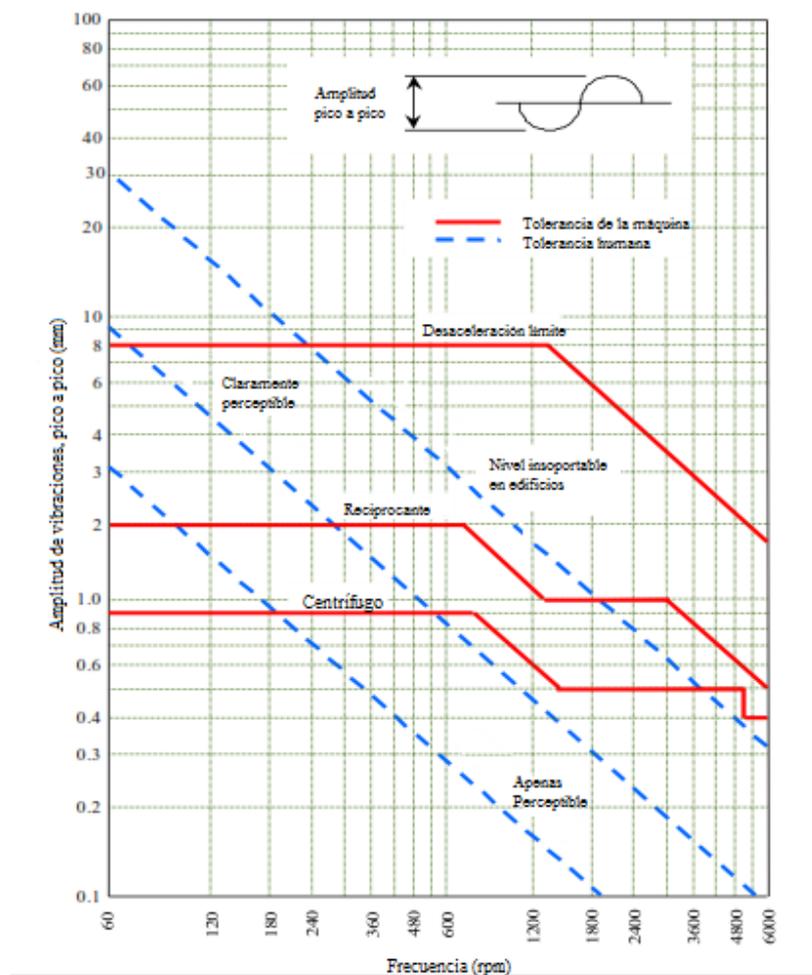


Figura 3.19 Límite de Amplitudes según frecuencia de operación. Fuente: “Fundaciones de Equipos Vibratorios”, Fernando Yévenes U.

Además otra de las premisas será siempre evitar que el sistema máquina-cimentación caiga en resonancia, es decir, procurar que la frecuencia de operación de operación de la máquina sea diferente de la frecuencia natural de la cimentación, en al menos 30%.

Se recomienda el análisis dinámico en las siguientes condiciones:

- Equipos reciprocantes > 200HP
- Equipos centrífugos > 500HP
- El peso del equipo > 2.270kg (5000Lb)

Según el reporte del ACI 351.3R-04, “Fundaciones para equipo Dinámico”, se puede clasificar a las vibraciones o cargas dinámicas de acuerdo a la naturaleza del equipo, como se resume a continuación:

Tabla 3-12 Cargas dinámicas en equipo rotatorio

EQUIPO ROTATORIO	
<p>Se caracterizan por el movimiento rotacional de uno o más rotores o impulsores. Incluye compresores centrífugos de gas y aire, bombas de flujo horizontal y vertical, generadores, turbinas de gas y vapor, centrífugas, motores eléctricos y ventiladores.</p> <p>Resultado del desequilibrio de las partes giratorias (rotor), además cargas centrífugas desbalanceadas se presentan después de años de servicio, por el uso.</p>	
TIPO DE CARGA	CARACTERÍSTICAS/ CLASIFICACIÓN
A. Debido a desbalance de masas	a. Cargas dinámicas provistas por el fabricante
	b. Desbalance de la máquina provista por el fabricante
	c. Desbalance de la máquina que

	satisface los criterios de la industria
	d. Carga dinámica determinada por fórmulas empíricas
	e. Desbalance de máquina debido al nivel de vibración y rigidez efectiva
B. Cargas de máquinas rotatorias múltiples	Cuando se asientan varias máquinas sobre una misma cimentación.

Tabla 3-13 Cargas dinámicas en equipo recíprocante

EQUIPO RECÍPROCANTE/ RECÍPROCO	
Se caracterizan por el movimiento de un cigüeñal principal el movimiento lineal de los pistones conectados. Incluye motores de combustión interna, compresores y bombas tipo pistón. Resultado de fuerzas de inercia (debido a la variación de aceleraciones de las partes del equipo).	
TIPO DE CARGA	CARACTERÍSTICAS/ CLASIFICACIÓN
A. Cargas recíprocantes primarias y secundarias	Un mecanismo simple de manivela (un solo cilindro).
B. Cargas de compresor de gas	Un compresor eleva la presión de un flujo de gas impartiendo un movimiento recíprocante en un pistón que contiene un cilindro.
C. Cargas de inercia recíprocantes para máquinas multicilindros	La mayoría de máquinas tienen más de un cilindro.

<p style="text-align: center;">D. Fuerzas de inercia reciprocantes estimadas para máquinas multicilindros</p>	<p style="text-align: center;">Cuando el fabricante no proporciona las fuerzas o algunos componentes van a ser reemplazados</p>
--	---

Tabla 3-14 Cargas dinámicas en equipo de impulsión

EQUIPO DE IMPULSIÓN
<p>Las cargas se generan por un martillo de forja, cuando un pistón golpea contra un yunque.</p>
TIPO/ CARACTERÍSTICAS
<p style="text-align: center;">El impacto transfiere energía cinética hacia todo el conjunto.</p>

El análisis de vibraciones en el diseño de una cimentación se menciona en el capítulo 4.

3.3.3 COMBINACIONES DE CARGA

Las siguientes son las combinaciones de carga aplicables para cimentaciones de equipo y maquinaria industrial, tomadas de las recomendaciones del ACI:

- Cargas Admisibles
 - $Ra1 = D$
 - $Ra2 = D + L$
 - $Ra3 = D + Inst$
 - $Ra4 = D + 0.75 L + 0.75 Inst$
 - $Ra5 = Op \pm (0.7 E \text{ ó } W)$
 - $Ra6 = Op \pm 0.75 * (0.7 E \text{ ó } W) + 0.75 L + 0.75 Inst$
 - $Ra7 = 0.6 (Op) \pm W$

- $Ra7' = 0.6 (D + \text{Líquido}) \pm W$
 - $Ra8 = 0.6 (Op) \pm 0.7 E$
 - $Ra8' = 0.6 (D + \text{Líquido}) \pm 0.7 E$
- Cargas Mayoradas
- $Ru1 = 1.4 D$
 - $Ru2 = 1.2 D + 1.6 L + 0.5 \text{ Inst}$
 - $Ru3 = 1.2 D + (L \text{ ó } \pm 0.8 W) + 1.6 \text{ Inst}$
 - $Ru4 = 1.2 D + L \pm 1.6 W + 0.5 \text{ Inst}$
 - $Ru5 = 1.2 Op + L \pm E$
 - $Ru6 = 0.9 (Op) \pm 1.6 W$
 - $Ru6' = 0.9 (D + \text{Líquido}) \pm 1.6 W$
 - $Ru7 = 0.9 (Op) \pm E$
 - $Ru7' = 0.9 (D + \text{Líquido}) \pm E$

Donde:

D: Carga Muerta

L: Carga Viva

Inst: Carga de instalación

W: Carga Viento

E: Carga de Sismo

Op: Carga en operación (provista por el fabricante)

Las combinaciones de carga antes mencionadas se han elegido de acuerdo a la práctica ingenieril, tomando en cuenta las especificaciones de operación del equipo y el comportamiento a lo largo de su vida útil. La carga muerta "D" se ha sustituido por la carga de Operación en las combinaciones pertinentes, para tomar en cuenta un posible episodio de

sismo severo o viento extremo en el periodo de funcionamiento. Un separador de crudo trabaja de manera continua casi sin interrupciones, al igual que un generador de energía.

En otro caso también se puede añadir la carga de movimiento de líquido (porcentaje del peso del equipo lleno), para tomar en cuenta la presión constante con la que se llena un separador, esto acompañado de un factor de reducción a la sumatoria para no sobredimensionar. El movimiento de entrada del líquido dentro de un separador es relativamente pequeño en comparación a la carga estática de operación propiamente dicha, provista por el fabricante.

En el caso de otros equipos, se toma como base las combinaciones de carga antes mencionadas y de acuerdo a un análisis del comportamiento que va a tener dicho equipo queda a criterio del diseñador el acoplar adecuadamente las combinaciones de carga para el caso que se presente.

CAPÍTULO IV

EJEMPLO PRÁCTICO

Para efectos de diseño se extraerán datos de suelo relevantes de dos estudios de suelos de diferentes locaciones ubicadas en el oriente ecuatoriano, esto debido a que el del generador Wartsila y la torre del silenciador deben colocarse aledaños y existe un estudio específico para estos elementos. A pesar de que la capacidad portante y la composición de los suelos es similar como se muestra a continuación.

4.1 EQUIPOS ESTÁTICOS

4.1.1 DISEÑO DE LA CIMENTACIÓN PARA UN SEPARADOR TRIFÁSICO HORIZONTAL

4.1.1.1 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

El separador a ser cimentado es un vessel horizontal instalado para la compañía PETROBRAS que deberá ser operado para las siguientes características:

Tabla 4-1 Características de Operación de Separador Horizontal

CARACTERÍSTICA	CONDICIÓN
Capacidad estimada (m³)	94
Flujo crudo (BPD)	20080
Flujo agua (BPD)	24070
Flujo gas (MMSCFD)	5.9
Temperatura de operación (°F)	100
Presión de Operación (PSI)	65

Densidad Aceite (Lb/ft³)	55.2
Densidad agua (Lb/ft³)	62.1
Viscosidad Aceite (Cp)	19.1
Viscosidad del agua (Cp)	0.71
Viscosidad del gas (Cp)	0.014
Nivel de liquido	60%

En donde:

BPD: Barriles por día

MMSCFD (Million Standart Cubic Feet per Day):

El diseño de las sillas soportantes del equipo, se ha realizado por el área mecánica tomando en cuenta fuerzas sísmicas y de viento para garantizar la estabilidad. A pesar de que opera a un nivel de líquido del 60%, la cimentación se calculará tomando en cuenta un recipiente totalmente lleno.

Además la hoja de datos del equipo (ver Anexo B), provee los siguientes pesos:

Tabla 4-2 Resumen de Pesos de Separador Horizontal

CONDICIÓN	PESO ESTIMADO (kg)
Fabricación	23666
Vacío	23666
Prueba	117638
Operación	117630

4.1.1.2 DATOS DE SUELO Y MATERIALES

De acuerdo al estudio de suelos para este equipo perteneciente a los bloques 7 y 21, el subsuelo está compuesto en general y a diferentes profundidades de limo arcilloso, de plasticidad media, arena de grano fino o medio y material aluvial.

Se considera una profundidad de desplante mínima de 1m.

Este separador puede ser considerado como “estructura menor” en comparación al tanque de 20000 BBLs para el cual el estudio recomienda cimentación con pilotes. La capacidad de carga varía entre 5-10 t/m² en suelo natural a la profundidad señalada de desplante más mejoramiento, en el siguiente esquema se encuentra la recomendación del tipo de cimentación y el mejoramiento a usarse:

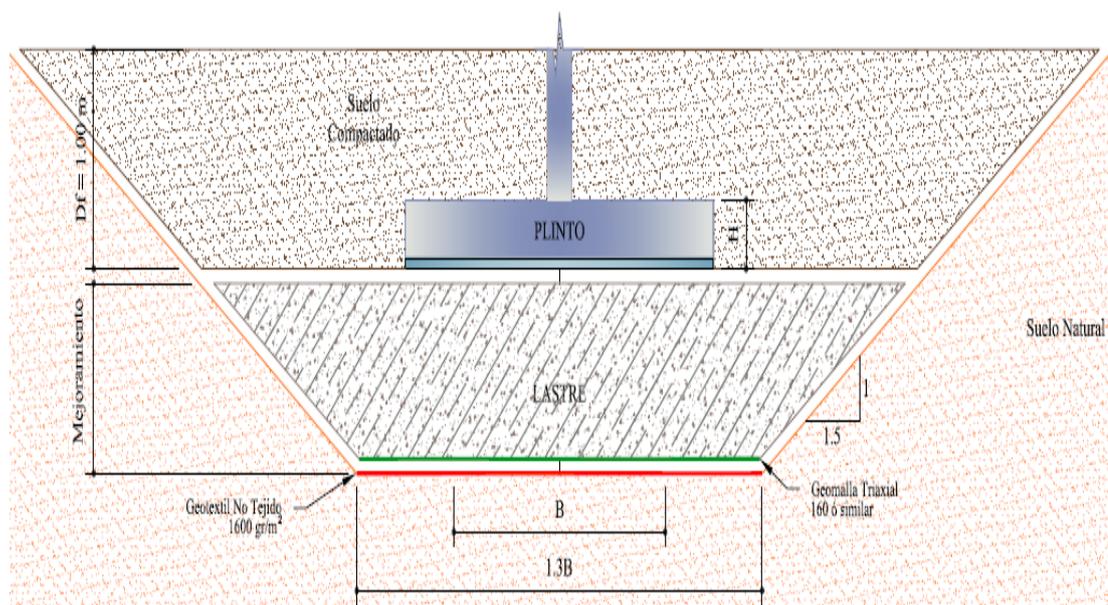


Figura 4.1 Esquema de cimentación para separador horizontal

El hormigón para esta cimentación será de 240 kg/cm² y el acero de refuerzo un esfuerzo de fluencia correspondiente a 4200 kg/cm².

El diseño realizado considera 10 t/m^2 como esfuerzo admisible sin considerar el aumento de este valor con el mejoramiento, con el fin de garantizar que el peso impuesto por la cimentación más el mejoramiento no exceda la capacidad admisible del suelo natural, con lo que además se puede aumentar la profundidad de desplante.

4.1.1.3 SELECCIÓN DEL TIPO DE CIMENTACIÓN

Los que priman en la selección de la cimentación para este caso son los proporcionados por el estudio de suelos y por el reporte del ACI 351.2R-94.

La capacidad portante del suelo es baja, pero aun así es recomendable una cimentación superficial para este equipo.

La configuración rectangular de la zapata y del pedestal es la indicada debido a la forma del anclaje de las sillas (véase Anexo B, esquema del separador).

Podría usarse una zapata corrida con dos pedestales para asentar el equipo, con esto se cuidaría de no exceder la capacidad admisible del suelo, sin embargo dado que la distancia entre los ejes de las sillas es de 7.93 m, resultaría antieconómica esta elección. El cimentar con pilotes es también una opción conveniente siempre y cuando existan dentro de la facilidad otros equipos que requieran pilotes, con el fin de que justifique el costo del hincado de los mismos masivamente.

4.1.1.4 CARGAS Y COMBINACIONES

En el siguiente cuadro se resumen las cargas transmitidas. En el anexo H, se encuentra la memoria de cálculo de dichas cargas y sus respectivas combinaciones.

Tabla 4-3 Resumen de Cargas actuantes en cimentación de Separador

Resumen Final de Cargas					
Apoyo	Tipo de Carga	P	Vx	Vy	Mx
Fijo	Muerta (D)	58818.00			
	P. Hidro (Ph)	58818.00			
	Instalación (Inst)	1183.30			
	Sismo x (Ex)	10255.28	34406.78		
	Sismo y (Ey)			34406.78	40703.2
	Viento x (Wx)	185.75	135.16		
	Viento y (Wy)			311.60	737.24
	Operación (Op)	58815.00			
	Temperatura (t)	17644.50			
Móvil	Muerta (D)	58818.00			
	P. Hidro (Ph)	58818.00			
	Instalación (Inst)	1183.30			
	Sismo x (Ex)	- 10255.28			
	Sismo y (Ey)			34406.78	40703.2
	Viento x (Wx)	-185.75			
	Viento y (Wy)			311.60	737.24
	Operación (Op)	58815.00			
	Temperatura (t)	17644.50			

4.1.1.5 DIMENSIONAMIENTO Y MODELO ESTRUCTURAL

Los siguientes son parámetros mínimos especificados en el manual de PDVSA para una dimensión de pedestal segura:

- Ancho de pedestal:

Siendo el ancho de la silla de “a”, la separación entre los pernos de anclaje a’ (en la dirección correspondiente), el diámetro del perno ϕ_p ; y A, el ancho de concreto del pedestal se debe cumplir:

A será el mayor valor entre:

- a+100 mm
- 200 mm
- a’+12 ϕ_p
- a’+180 mm

- Longitud de pedestal:

Siendo el largo de la silla de “l”, la separación entre los pernos de anclaje l’ (en la dirección correspondiente), el diámetro del perno ϕ_p ; y L la longitud de concreto del pedestal se debe cumplir:

- l+100 mm
- l’+12 ϕ_p
- l’+180 mm

El área de la zapata viene dada preliminarmente por el esfuerzo admisible y la carga del equipo en operación.

$$A = \frac{\sigma_{adm}}{P_{Op}}$$

La profundidad de desplante mínima es 1m, se define inicialmente una altura de zapata preliminar; con esto y el área definida se chequea

esfuerzos y se realiza un reajuste de acuerdo a los resultados obtenidos.

Una de las zapatas se considera apoyo fijo y la otra, apoyo móvil, sin embargo esto es únicamente debido a que este tipo de equipos tienden a tener desplazamiento debido a fuerzas de expansión térmica. La cimentación no sufre las fuerzas generadas por dicho desplazamiento sino que una de las sillas del equipo presenta agujeros para los pernos de diámetro mayor para permitir el movimiento del separador durante su operación. Además se considera que una placa debe ir embebida en el “apoyo móvil” con el fin de permitir el deslizamiento del equipo.

4.1.1.6 DISEÑO

En la memoria de cálculo se especifica los valores de esfuerzos obtenidos para el modelo planteado. Debido las grandes dimensiones del resultado obtenido, el armado de los pedestales es el mínimo compresión.

Se carga el modelo de la zapatas en el programa SAP2000 y se obtiene resultados, con los cuales se verifica el cálculo, dichos resultados también se muestran en los gráficos de la memoria de cálculo.

A partir del Anexo M, se encuentran los planos estructurales con la propuesta de armado de los elementos.

4.1.2 DISEÑO DE LA CIMENTACIÓN PARA UNA TORRE DE SILENCIADOR, EXHAUST SYSTEM

4.1.2.1 DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

La torre del sistema exhaust por donde se liberan los gases provenientes del generador, tiene una altura de 25 m, en su interior se alberga el sistema propiamente dicho, en el Anexo D, se proporciona la vista 3D provista por el fabricante del modelo de cada torre. La ubicación es en el CPF del bloque 10 de AGIP OIL, que se encuentra en la provincia de Pastaza (véase división de bloques petroleros en el Ecuador Capítulo II), y es el sexto generador Wartsila a ser instalado, pero se prevé la instalación de un séptimo, por lo que la cimentación se extiende a una segunda torre adosada a la primera.

Las torres están diseñadas con perfiles HEB200, HEB160 y llega a tener un peso de 28.075 toneladas. El diseño del conjunto de las torres proporciona las fuerzas y momentos de las bases de las columnas, provisto por el SAP2000.

4.1.2.2 DATOS DE SUELO Y MATERIALES

El estudio de suelos proporcionado por la empresa MasterLab, presenta los resultados de sondeos para estructuras específicas, entre ellas el generador, datos que serán utilizados para la cimentación de esta torre (y su ampliación) debido a la cercanía con el equipo principal.

Se presenta material limoso (MH y ML), con contenidos de humedad sobre 50%, sin embargo sin presencia de nivel freático alto. Se recomienda en el estudio el uso de pilotes hincados a 12 m de profundidad, ya que la capacidad portante de diseño llega únicamente

a 4.5 t/m². Sin embargo se procede a hacer el cálculo de una cimentación superficial (losa) para comprobar si la misma puede soportar las cargas impuestas.

El hormigón para esta cimentación será de 240 kg/cm² y el acero de refuerzo un esfuerzo de fluencia correspondiente a 4200 kg/cm². Los pilotes (si fueren necesarios) son circulares metálicos de $\phi 12.75''$, y espesor de pared 0.38'', hincados a una profundidad de 12 m.

4.1.2.3 SELECCIÓN DEL TIPO DE CIMENTACIÓN

Por cuestiones de tránsito de personas, instalación y mantenimiento del "stack"²³, es necesaria una losa de base en la torre. Sin embargo, se realizará el análisis de la losa sin pilotes para comprobar si el suelo puede soportar sin problema las cargas transmitidas por la torre que recibe al silenciador, que debido a que es una estructura metálica y estática no son altas como se reporta a continuación. En el caso de que el suelo no sea capaz de soportar dichas cargas con seguridad se procederá a modelar la estructura con pilotes.

4.1.2.4 CARGAS Y COMBINACIONES

En el Anexo I, se presenta la memoria de cálculo detallada de la cimentación de la torre. La tabla 4.4, resume las cargas que transmite la torre a la cimentación:

²³ Escape de gases dentro de la torre, proveniente del generador.

Tabla 4-4 Resumen de Cargas de la Torre del silenciador

Eje	Pu(kg)	Mxu(kg.m)	Muy (kg.m)
A1	9721.5	26.0	3.84
A2	9906.9	17.1	3.79
B1	14424.7	0.0	15.2
B2	14424.7	0.0	13.3
C1	9721.5	26.0	3.84
C2	9906.9	17.1	3.79

4.1.2.5 DIMENSIONAMIENTO Y MODELO ESTRUCTURAL

La geometría de la losa es fácil definir debido a que ya se tiene la distancia entre ejes de las torres, se decide además dejar un espacio de 1m a cada extremo con el fin de permitir el tránsito de personas y el mantenimiento.

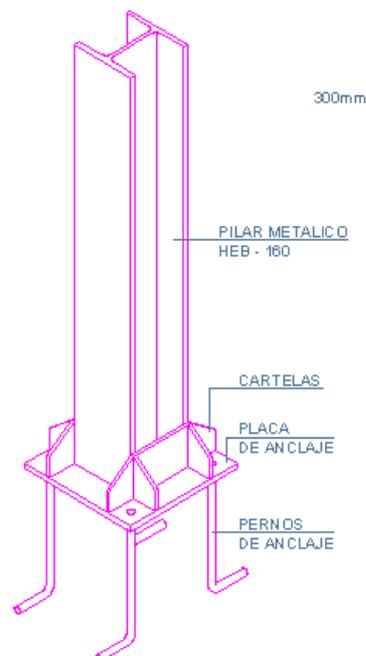


Figura 4.2 Detalle de Anclaje de perfil a
cimentación

La altura de la losa que va enterrada se define de acuerdo a varias condiciones, en primer lugar se debe considerar que ya que el sistema de silenciador es acoplado al generador Wartsila tiene que mantener un nivel exacto definido por las especificaciones mecánicas, el mismo que debe ser regulado con la cimentación; en segundo lugar y como más importante para el área civil se deberá considerar enterrada la altura necesaria para que la cimentación tenga la estabilidad necesaria y que funcione de manera adecuada y sobretodo cumpla con la verificación a esfuerzo cortante. Las columnas son perfiles de sección HEB, para apoyarse sobre la cimentación deberán soldarse en placas metálicas las mismas que se embeben en grout cementicio autonivelante y se sujetan a la fundación con pernos de anclaje, formándose generalmente una canastilla con estribos que eviten que los pernos se abran ya que están sometidos a solicitaciones de cortante debido a las fuerzas laterales actuantes en la cimentación; no es objeto de este estudio el análisis de pernos de anclaje, sin embargo se realizará un chequeo de los mismos para verificar la longitud necesaria que deberá ir embebida en el hormigón, lo cual también se constituye en un parámetro a tomar en cuenta en la determinación de la altura de la losa.

El área crítica a cortante se encuentra a una distancia $x/2$ de la cara del perfil siendo x , la porción de placa de anclaje desde su extremo hasta la cara de la columna, como lo indica la figura 4.3

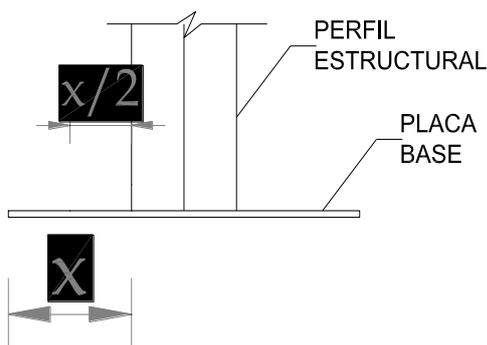


Figura 4.3 Sección crítica a cortante en
perfiles metálicos

4.1.2.6 DISEÑO

Se especifica en la memoria de cálculo del Anexo I todas las consideraciones hechas para el diseño, de una losa de cimentación apoyada directamente sobre el suelo, que soporta una estructura metálica de 25m de altura, con un equipo contenido de solicitaciones netamente estáticas. Las cargas que se transfieren a la fundación son muy pequeñas, siempre una estructura metálica a pesar de su altura tiende a ser liviana, además la poca área de contacto reduce la acción del viento hasta poder considerarse nula; los perfiles HEB son de dimensiones simétricas en ambos sentidos y el peso del silenciador (ver esquema en Anexo C) en sí, está soportado por la misma torre.

Se presenta el modelo en el SAP 200, en el cual se verifican los esfuerzos obtenidos y se procede al armado de la losa.

Finalmente, en el Anexo M, se encuentran los planos correspondientes a la propuesta de cimentación de la losa del sistema exhaust correspondiente a dos generadores Wartsila de 7MW.

4.2 EQUIPOS DINÁMICOS

4.2.1 DISEÑO DE LA CIMENTACIÓN PARA UNA BOMBA DE INYECCIÓN DE AGUA

4.2.1.1 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

La bomba a instalarse es de marca Sulzer, de tipo centrífuga con los siguientes pesos extraídos de lo proporcionado del fabricante. (En el Anexo E se encuentra las hojas de datos).

Tabla 4-5 Pesos de la bomba y elementos

Peso de la bomba=	4900	kg
Peso del motor=	6200	kg
Peso de la placa base (skid)=	3400	kg
Elementos auxiliares=	1300	kg
<i>Peso del conjunto (bomba, skid, motor)=</i>	<i>15800</i>	<i>kg</i>

Generalmente este tipo de bombas se instalan en grupos de tres o cuatro ya que una siempre servirá de repuesto debido a la necesidad de operación continua, es decir si se necesita la operación de dos bombas de inyección, se instalan tres por si existiere un desperfecto en alguna de las anteriores. La cimentación será la misma, pues se considera individual a menos que las bombas sean pequeñas y vengan montadas sobre una base metálica varias de ellas.

Los datos necesarios para el análisis de vibraciones también los proporciona el fabricante en la respectiva hoja de datos (ver Anexo E) y se resumen más adelante en el análisis dinámico.

4.2.1.2 DATOS DE SUELO

El suelo donde se va a cimentar la bomba es de las mismas características donde se asienta el separador de producción, la capacidad de carga es de 5-10 t/m².

4.2.1.3 SELECCIÓN DEL TIPO DE CIMENTACIÓN

Sin duda el tipo de cimentación óptimo para una bomba de estas características es un bloque de cimentación, en primera instancia debido a que puede presentar una masa suficiente para contrarrestar el efecto de la vibración, pero además es requerimiento del área mecánica que el nivel de dicho equipo sea un determinado (generalmente bajo, cercano al nivel terminado de plataforma) con el fin de que lleguen las conexiones con facilidad.

4.2.1.4 CARGAS Y COMBINACIONES

En el caso de equipos que presentan fuerzas dinámicas, se deben identificar las cargas estáticas y dinámicas que actuarán sobre la cimentación. A continuación se presenta un cuadro con el resumen de cargas estáticas actuantes sobre el bloque de cimentación de la bomba:

Tabla 4-6 Cargas estáticas en cimentación de bomba

Tipo de Carga	P (t)	V (t)	M (T.m)
D	62682.50		
L	7196.88		
Inst	1580.00		
E		4621.50	6081.894

Las cargas anteriores son previas a las respectivas combinaciones, en el anexo J se detalla la obtención de estas cargas en la memoria respectiva.

Las combinaciones de carga respectivas y aplicables a la cimentación de la bomba también se detallan en la memoria de cálculo, sin embargo cabe resaltar que el viento no se ha tomado en consideración debido a que el equipo no presenta altura significativa respecto al nivel del terreno y el área de contacto es muy pequeña y difícil de estimar, además que el resultado obtenido es extremadamente pequeño como para justificar un cálculo que puede resultar engorroso.

4.2.1.5 DIMENSIONAMIENTO Y MODELO ESTRUCTURAL

Las dimensiones en planta de la bomba están definidas por el tamaño de la base que proporciona el fabricante (ver Anexo E, planos del fabricante de la bomba). Como punto de partida para determinar la altura se puede aplicar la relación de masas, donde como se ha mencionado para equipo centrífugo es de 3 (masa de la cimentación) a 1 (masa total del equipo).

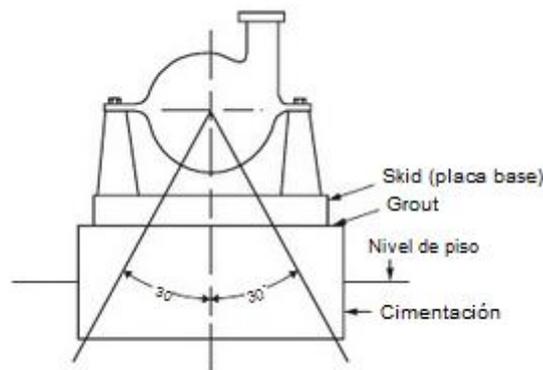


Figura 4.4 Dimensión preliminar de la altura de la cimentación. Fuente: “Plant Engineering Hand Book” de Mobley R. Keith

Además se aplica lo descrito en la fig. 4.4 con el fin de prevenir movimientos lineales o torsionales:

La altura de cimentación sobre el terreno será casi siempre definida por el nivel al que deben encontrarse las bocas de conexión, sin embargo se debe cuidar de dejar enterrada al menos el 75% del bloque de cimentación con el fin de garantizar el confinamiento del mismo y ayudar así a contrarrestar las acciones dinámicas.

El análisis se divide en dos partes bien definidas: análisis estático y dinámico.

En un principio, tomando en cuenta el área y el peso de la cimentación preliminar se debe chequear que el bloque propuesto no exceda la capacidad portante del suelo y que sea capaz de resistir sin problemas las sollicitaciones suponiendo un equipo netamente de comportamiento estático.

En segundo lugar, una vez que se ha dimensionado el bloque para carga estática, se procede al análisis de las vibraciones que impone el comportamiento de la bomba. El proceso a seguir es el cálculo de las propiedades de la sección, inercia, rigidez y demás parámetros necesarios, con el fin de establecer la frecuencia del sistema, dicha frecuencia se compara con la frecuencia de operación de la máquina. El análisis de las vibraciones se detalla en la memoria de cálculo del Anexo J y se sigue el procedimiento simplificado basado en el libro “Suelos, Fundaciones y Muros”, de Maria Graciela Fratelli.

4.2.1.6 DISEÑO

Una vez realizado el análisis de cargas estáticas y dinámicas y habiéndose comprobado la estabilidad del bloque ante las mismas, se realiza el cálculo del acero de refuerzo correspondiente.

Los momentos y esfuerzos para el diseño se obtienen modelando la geometría de la estructura en el programa SAP2000, resultados que se presentan en la memoria de cálculo del Anexo J.

4.2.2 DISEÑO DE LA CIMENTACIÓN PARA UN GENERADOR DE ENERGÍA DE 7MW

4.2.2.1 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

La instalación de un generador Wartsila se compone de una gran cantidad de elementos, se debe prever la instalación de tanques de almacenamiento de combustible, con sus respectivas bombas, transformadores, compresores, soportería de tubos y bandejas eléctricas, toda la instrumentación y control de la estación estructuras

metálicas, como pasarelas y cubiertas, cuarto de generación, etc. Todo lo anterior dispuesto para el correcto desempeño de la planta de generación.

La cimentación del cuarto de generación (estructura de cubierta que alberga al generador y a los accesorios), es sin embargo independiente a la cimentación que soporta al generador en sí, por tanto únicamente la memoria del Anexo K, se trata al generador Wartsila como un equipo aislado, sin considerar cargas impuestas por otras estructuras.

El fabricante del equipo es el encargado de entregar los planos del equipo, en el Anexo F se muestra un esquema del generador. En la tabla siguiente se encuentran los datos (para análisis estático) provisto por Wartsila:

Tabla 4-7 Pesos de instalación de Generador-Motor de 7MW

Peso del motor=	83000	kg
Peso del generador=	38300	kg
Peso de la placa base (skid de bomba y generador)=	15930	kg
Volante y acoplamiento=	2547	kg
Agua y aceite=	6000	kg
<i>Peso del conjunto (con fluidos)=</i>	<i>145777</i>	<i>kg</i>
<i>Peso del conjunto (en seco)=</i>	<i>139777</i>	<i>kg</i>

Amortiguamiento: en el esquema del equipo (ver Anexo F) se puede apreciar que el motor y el generador se asientan sobre resortes amortiguadores, sin embargo el fabricante considera la acción de dichos elementos con lo que los datos provistos de velocidad y frecuencia de operación son los definitivos que deben usarse para el cálculo de la cimentación; además estos elementos son los que transmiten las fuerzas dinámicas a la cimentación.

4.2.2.2 DATOS DE SUELO

4.2.2.3 SELECCIÓN DEL TIPO DE CIMENTACIÓN

La ubicación en altura de un equipo de estas características responde también a varios requerimientos, el fabricante determina niveles necesarios para el funcionamiento, debido a que es un sistema acoplado con varios elementos. Un bloque de cimentación de grandes dimensiones (debido a las dimensiones propias del equipo) será el indicado y recomendado para cimentar este equipo. La capacidad del suelo portante es bastante baja según el estudio de suelos, 4.5 t/m^2 , y debido a la gran carga estática transmitida es casi obligatorio el verificar si es necesario o no el uso de pilotes. El análisis realizado confirma lo recomendado por el estudio de suelos, es necesario el hincado de pilotes para cimentar el generador. Los pilotes son de 12" de diámetro, metálicos hincados a una profundidad de 7 m, los datos se encuentran especificados en la memoria de cálculo de la losa del generador (ver Anexo K)

4.2.2.4 CARGAS

De acuerdo a los datos proporcionados se realizó las respectivas combinaciones (ver memoria de cálculo de losa de generador, Anexo K) de carga aplicables al generador con lo que se obtuvo el siguiente cuadro:

Tabla 4-8 Resumen de Cargas transmitidas a losa de Generador

No.	Cargas Admisibles		
	P (t)	V (t)	M (T.m)
1	408577		
2	424817		
3	423155		
4	431690		
5	0	30664	61327
6	431690	21465	42929
7	245146	28619	57239

4.2.2.5 DIMENSIONAMIENTO Y MODELO ESTRUCTURAL

La base del equipo acoplado, motor + generador proporciona las dimensiones de la cimentación, se ha tomado inicialmente lo propuesto por el fabricante.

Se inicia dimensionando la altura de acuerdo a la relación de masas, sin embargo dado el peso tan grande de este equipo se decide partir con una altura menor, la cual será modificada de ser necesario después del análisis dinámico.

La capacidad admisible del suelo portante se revisa con el área establecida y al determinarse excedida se opta por pilotes, cuya

dimensión y profundidad de hincado la proporciona el estudio de suelos. Se debe verificar sin embargo, que tampoco se exceda con la losa la capacidad admisible del suelo de mejoramiento.

Se divide la carga axial (de servicio) actuante para la capacidad de cada pilote y se determina el número requerido. Se toma como espaciamiento mínimo entre pilotes tres veces el diámetro de los mismos y se realiza una distribución uniforme en el área de la losa.

4.2.2.6 DISEÑO

Una vez realizado el análisis de cargas estáticas y dinámicas y habiéndose comprobado la estabilidad del bloque ante las mismas, se realiza el cálculo del acero de refuerzo correspondiente.

Los momentos y esfuerzos para el diseño se obtienen modelando la geometría de la estructura en el programa SAP2000, resultados que se presentan en la memoria de cálculo del Anexo K.

CAPÍTULO V

RESUMEN DE PROCEDIMIENTO PARA EL DISEÑO DE CIMENTACIONES

Como aporte del presente documento, a continuación se presenta un resumen para el análisis simplificado de vibraciones en una cimentación tipo bloque para un equipo mecánico, el cual no solo puede estar presente en el campo petrolero sino en cualquier otro sector de la industria.

Chequeo Condiciones Estáticas: Es importante mencionar que los siguientes pasos a seguir son aplicables para todas las cimentaciones que se analicen, de dares el caso y el equipo

- a. Reconocimiento del equipo o estructura y recopilación de datos: una vez obtenido el estudio de suelos y los datos del fabricante es conveniente aislar los datos necesarios para el cálculo. Del estudio generalmente se obtiene: capacidad admisible del suelo, asentamientos máximos, ángulo de fricción interna, coeficiente de balasto, módulo de elasticidad y cortante, cohesión, profundidad de desplante; y además recomendación del tipo de cimentación a usar y de requerirse pilotes, las características de los mismos. De las hojas de datos de equipos es conveniente aislar: pesos, en condiciones de operación y prueba, así como peso de placa base y accesorios que pueden ser tomados como carga viva; de funcionar con líquido como aceites o agua, el peso lleno o de la prueba hidrostática; y lo primordial para empezar a predimensionar la base, las dimensiones en planta del equipo, ya sean distancia entre ejes o dimensiones de la placa base.

- b. Predimensionamiento: Se toma de acuerdo al equipo una distancia más grande que las dimensiones de la placa base, mínimo 30 cm para el tránsito de personal y máximo el requerido si se deben colocar soportes, escaleras, etc. La altura de la cimentación, de tratarse de un bloque se puede partir de la relación de masas o se establece una aleatoria para el cálculo iterativo (ya que las cargas consideran el peso propio de la cimentación) el cual se comprueba más adelante a cortante y posteriormente con el análisis dinámico.
- c. Cargas y Combinaciones: Se identifica las cargas necesarias para el análisis, se calcula las cargas de sismo y viento tomando en cuenta donde se realiza el proyecto y se determinan las componentes en cada carga, tanto en axial, cortante y momento (en ambas direcciones).
- d. Capacidad portante del suelo: se considera el peso de la máquina más el peso de la cimentación (diseñada preliminarmente con las dimensiones que cumplan los requerimientos estáticos) dividido para el área de contacto con el suelo (P/A), cuidando de no exceder la capacidad portante del suelo, además de los asentamientos máximos permisibles; los cuales se evalúan para cada equipo dependiendo de las tolerancias permitidas por los accesorios acoplados (como tuberías) y de la necesidad de nivelación para funcionamiento. Se considera aceptable un asentamiento inicial aceptable máximo de 1" o de acuerdo a lo que establezca el estudio de suelos; y a largo plazo de $\frac{1}{2}$ " según lo dictado por el reporte del ACI: Cimentaciones para Equipo Estático
- e. Capacidad portante ante cargas estáticas y dinámicas equivalentes: La suma de la carga estática (cimentación más peso de la máquina) y la

carga dinámica equivalente²⁴ no debe exceder el 75% de la presión admisible del suelo.

Condiciones Dinámicas

- a. *Amplitud de la vibración a la frecuencia de operación:* Una vez realizado el cálculo de frecuencias y amplitudes, se debe comparar la amplitud de vibración obtenido del sistema para la frecuencias actuante, con la siguiente tabla:

T A B L A 11.2

Tipo de vibraciones	Amplitudes máximas admisibles A_{adm} en mm. para máquinas con frecuencia operacional en rev/min							
	rev/min < 500	500	750	1.000	1.500	3.000	5.000	10.000
Horizontales	0,2	0,16	0,13	0,11	0,09	0,05	0,02	0,0075
Verticales	0,15	0,12	0,09	0,075	0,06	0,03	0,015	0,005

- b. *Velocidad:* El producto $2\pi f * \text{amplitud de desplazamiento}$, donde f es la frecuencia en ciclos por minuto (cpm) y la amplitud tomada bajo las condiciones anteriormente mencionadas; puede ser comparado con los valores de la siguiente tabla, al menos para el caso de “buena operación”:
- c. *Aceleración:* No es necesaria si se satisfacen las dos condiciones anteriores.

²⁴ Carga que en ocasiones provee el fabricante, como resultado del impacto que producen las cargas dinámicas de los componentes de la máquina sobre la cimentación, transformada en una carga vertical aplicada en el centro de gravedad de la cimentación.

Tabla 5-1 Datos de severidad de las vibraciones en maquinaria en general

Pico de velocidad horizontal (plg/s)	Operación de la máquina
<0.005	Extremadamente suave
0.005-0.010	Muy suave
0.010-0.020	Suave
0.020-0.040	Muy buena
0.040-0.080	Buena
0.080-0.16	Moderada
0.160-0.315	Ligeramente brusca
0.315-0.63	Brusca
>0.63	Suave

MODELADO EN SAP 2000

El modelado de la cimentación en el programa SAP 2000 tiene como finalidad la obtención de los esfuerzos últimos a los que se va a someter, con esto se comprueba que las dimensiones obtenidas en el análisis sean correctas y se realiza el cálculo de la armadura necesaria

El análisis supone el suelo como un medio semi-infinito elástico, representado por resortes sin peso, para la simplificación.²⁵ El coeficiente de Balasto²⁶ obtenido en el estudio de suelos es la rigidez de cada resorte.

²⁵ "Suelos, Fundaciones y Muros", María Graciela Fratelli

²⁶ Coeficiente de proporcionalidad entre asentamientos y presiones, determinado con el ensayo de carga con placa.

El caso de las zapatas para los separadores, se ha obtenido fuerzas y momentos para cada una por lo que pueden modelarse independientemente, debido al gran tamaño de los elementos, se han modelado como elementos tipo “solid” en el programa.

Las losas son elementos tipo “shell”, dividida en elementos para hacer más preciso el cálculo. Cada resorte se ubica en la división y además cada estado de carga aplicado se debe dividir para el número de puntos de división y aplicarse como cargas puntuales. Dependiendo del espesor de la losa o zapata a modelar, se puede elegir entre un elemento “Shell thin” o “Shell thick”, la diferencia está en que el primero no considera el análisis de deformación por corte, el segundo sí. Entonces, si:

$$\frac{L}{h} > 20 \rightarrow \text{elemento shell thin}$$

Dónde:

L: la dimensión larga de la losa

h: altura

El análisis sísmico se ha hecho de modo que se introduzca el espectro sísmico dentro del programa, en el Anexo L, se muestra la hoja de cálculo del espectro sísmico con los parámetros suscritos por la NEC-11.

La losa del generador al tratarse de una losa apoyada sobre pilotes, es un caso especial. Se considera a los pilotes elementos “frame” sometidos únicamente a carga axial; y la losa apoyada sobre estos elementos. En el análisis de resultados se cuida de que las cargas transmitidas a los pilotes no sobrepasen la capacidad de los mismos.

Se debe tomar en cuenta los ejes locales de referencia al momento de mostrar los resultados para poder interpretarlos de la manera correcta y así asignar el esfuerzo que corresponde al cálculo de la armadura correspondiente.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

- El Ecuador es un país cuya actividad petrolera sigue en auge, es la principal fuente de ingresos para la economía del país, por lo que la ingeniería de diseño y construcción asociado a esta rama está en demanda constante.
- El oriente ecuatoriano es donde se desarrolla en su mayoría las actividades petroleras, además de cierta actividad en la costa.
- La normalización ecuatoriana en el ámbito civil está actualizada y comprende un gran número de ítems a ser considerados, específicamente la parte sísmica. A diferencia de otros países, Ecuador no cuenta con una normativa específica que regule la actividad petrolera. Las empresas cuentan también con normativa interna tanto para diseño como para construcción.
- El término facilidad petrolera, está asociado con varias instalaciones: de producción, de refinación, de tratamiento, incluso de generación de energía; una facilidad de producción comprende desde la extracción del petróleo del pozo, separación de fases (agua-gas-crudo) hasta su destino final, sea en el oleoducto (crudo), re inyección el pozo (agua) y/o aprovechamiento o quema (gas).
- El adecuado funcionamiento de las instalaciones de producción requiere de una fuente de suministro de energía continua y confiable, por lo cual se instala en primera instancia plantas de generación de energía eléctrica y sus equipos asociados.

- El trabajo civil y estructural dentro de una facilidad de producción comprende entre otros, topografía, vías, rellenos, drenajes, estructuras metálicas, cimentaciones masivas y profundas.
- Un estudio geotécnico completo, incluye también una recomendación del tipo de cimentación que debe ser usado, tomando en cuenta únicamente los resultados en los ensayos relacionados al suelo, será responsabilidad del ingeniero diseñador elegir finalmente el tipo de fundación a ser usada.
- Es imprescindible realizar un estudio de suelos en el lugar del proyecto; tomando en cuentas las propiedades trascendentales como la apariencia de textura, la densidad, el contenido de humedad, la consistencia, la permeabilidad, la compresibilidad y la resistencia a los esfuerzos cortantes; y también las recomendaciones para la estabilización y mejoramiento. Tomando en cuenta si el material necesario se encuentra disponible por la zona y además cómo este material puede contribuir a optimizar el diseño y que sucedería de no ser posible colocar el mejoramiento propuesto por el estudio de suelos.
- Las cimentaciones que requieren más de las pruebas ordinarias son aquellas con cargas pesadas o dinámicas o las que están sobre suelos débiles o inciertos ya que un material con buena graduación es relativamente estable, resistente a la erosión y a los lavados; y fácilmente puede ser compactado a una condición muy densa y desarrollar alta resistencia al esfuerzo cortante y capacidad de carga.

- La parte constructiva es importante al momento de realizar el diseño de una cimentación. Se debe tomar en cuenta parámetros como posibles obras de reforzamiento, drenaje, apoyo y forma de la armadura a colocar, fundición del hormigón por secciones, juntas de construcción y dilatación, tipo y forma de encofrado, condiciones climáticas de la zona, disponibilidad de material y costos.
- El diseño de una cimentación deberá, en general, soportar las siguientes cargas: el peso de la estructura o equipo, las cargas vivas; y también las cargas siguientes cuando se presenten: la presión de la tierra, el peso del relleno sobre los elementos de la estructura, las fuerzas de tracción, las fuerzas centrífugas, la nieve y el hielo, las cargas hidrostáticas e hidrodinámicas, cargas de operación y las sobrecargas. Además el proyecto debe calcularse para los momentos producidos por estas cargas.
- Los equipos de la industria petrolera van generalmente acoplados con varios elementos como tuberías y cables, lo cual debe ser considerado al momento de establecer los niveles de implantación de la cimentación, cuidando de mantener enterrada la porción de la cimentación necesaria para su confinamiento. Se debe respetar la profundidad mínima de desplante descrita en el estudio de suelos y prever que el relleno junto con la cimentación no excedan la capacidad de carga del suelo a esa profundidad.
- Los recipientes horizontales son equipos que se comportan estáticamente, sus bases están generalmente supeditadas a las dimensiones de la placa base del anclaje y se considera una viga

simplemente apoyada ya que es propio del equipo permitir el movimiento en el eje principal por expansión térmica gracias al diámetro mayor de los ojales de los pernos en uno de los apoyos, por ende las cimentaciones tipo zapata pueden calcularse de manera independiente sin esperar que se sobre esfuercen debido a movimientos propios del funcionamiento del separador.

- Se pueden esperar grandes masas de hormigón en equipos como separadores de producción, debido a la geometría propia del equipo ya que son en su mayoría de capacidades enormes, por lo que en ocasiones los esfuerzos no llegan a solicitar una necesidad de acero significativa, teniendo que colocar armadura mínima. Es importante tomar en cuenta la retracción de fraguado y la necesidad de colocar armadura mínima de temperatura para evitar el agrietamiento debido al volumen del elemento.
- El pedestal de una zapata en el caso de edificaciones, es la porción entre la zapata misma y el inicio de una columna, lo cual generalmente indica que el armado longitudinal de la columna debe prolongarse hasta la zapata, por ende también su armado transversal. En el caso analizado, el ACI recomienda analizar el pedestal en sí como una columna corta, la cual se deforma únicamente a compresión.
- Se desconocen las condiciones del relleno, por lo que el pedestal no se analiza tomando en cuenta el confinamiento que brinda el suelo adyacente, lo que constituye una condición aún más crítica y que lleva a un cálculo conservador.
- El tamaño del pedestal obtenido es tan grande en comparación a la

carga axial que únicamente debe ser armado con acero mínimo para columnas. En el caso particular de cimentaciones la cuantía mínima de acero en columnas del 1% es extremadamente grande, por lo que se toma otra recomendación del mismo código ACI y se considera una cuantía de armado de entre 0.5%-0.7% del área del pedestal.

- Las cimentaciones para una estructura metálica alta que soporte cargas debidas a equipo no reciben esfuerzos axiales significativos debido a la configuración y al material usado en la estructura. El peso del sistema silenciador es pequeño por lo que es absorbido por la estructura misma, aun así se lo ha considerado distribuido en el área de la cimentación.
- Sea cual sea la cimentación elegida para una torre de acero es necesario revisar la estabilidad a volteo y deslizamiento, factores que afectan las dimensiones; es decir a pesar de que el análisis de fuerzas axiales y momentos actuantes arroje resultados de una cimentación de altura menor, el volteo provocado por el accionar del sismo en una estructura de mucha altura puede requerir aumentar las dimensiones preliminares de la cimentación.
- Los pernos de anclaje de la estructura deben calcularse con el fin de resistir el corte provocado por las fuerzas horizontales, la longitud de pernos derivada de este cálculo será además determinante para revisar la altura de la losa escogida, debiéndose dejar al menos 5cm de recubrimiento de hormigón desde los pernos de anclaje.
- La porción de cimentación elevada sobre el nivel del terreno depende únicamente de los niveles necesarios para el funcionamiento del

silenciador del generador, niveles proporcionados por el área mecánica.

- Las bombas de inyección de agua se cimentan sobre bloques de concreto, en un principio debido a la configuración de su base la cual tiene orificios para pernos de anclaje distribuidos en todo su perímetro, además de la necesidad de contrarrestar las vibraciones generadas por el equipo.
- Las dimensiones del bloque deben cumplir con los parámetros como espacios libres de al menos 15cm a partir de la base de la bomba, altura enterrada en el suelo mayor o igual al 75% de la altura total del bloque; y lo importante que el esfuerzo actuante sobre el suelo con el área elegida del bloque no sobrepase el esfuerzo admisible del suelo de fundación.
- La hoja de datos proporciona 3 velocidades de operación, sin embargo aquella de la bomba de 3560rpm, que corresponde a una frecuencia de operación de 60Hz, en el motor, es la que más atención requiere. El método de análisis utilizado arroja el resultado de tener que incrementar la altura de la losa a 1.10, no solo por cumplir la regla de mantener una diferencia de 30% entre frecuencias, sino además para no exceder la amplitud máxima. Se realiza la comprobación para las otras velocidades de operación y el resultado es satisfactorio. En cuanto a la diferencia de frecuencias en el modo torsional, no se ha tomado en cuenta que no llegue a 30%, debido a que al estar enterrada y confinada al menos el 75% de la cimentación, el movimiento torsional, de existir se limita a niveles bajos.

- Un generador Wartsila se instala acoplado a una serie de elementos de los cuales algunos se encuentran dentro del cuarto de generación como escaleras, pasarelas, soportes; y otros fuera como variadores de frecuencia, sistema silenciador y escape de gases. La cubierta del cuarto de generación no se considera nunca apoyada en la cimentación del generador, siendo ésta independiente debido a la necesidad de resistir la carga impuesta y aún más importante a que por ningún motivo se transmitan vibraciones generadas por el equipo a estructuras adyacentes.
- El suelo juega un papel determinante, la capacidad de carga admisible baja presentada en el caso expuesto y la carga extremadamente grande que representa un generador de estas características obliga necesariamente por razones de economía a cimentar con pilotes para reducir el tamaño del bloque que soporta al equipo. Tratándose de un hormigón de 240kg/cm² como requiere el diseño, el costo de un metro cúbico en el Oriente donde se realiza el proyecto varía entre \$800 y \$1000, lo cual es representativo en el costo total del proyecto, versus el costo del metro lineal de pilotaje (incluye descabezado) que varía entre \$78 y \$100 por metro lineal.
- Los pilotes evitan cualquier circunstancia de volteo o deslizamiento y resisten directamente las cargas axiales, siendo la función del bloque la transmisión de dichas cargas y la disipación de las vibraciones. Deberán además ser distribuidos uniformemente en el área del bloque cuidando de ubicarlos a un espaciamiento mínimo de 3 veces su diámetro, en este caso con un $\Phi=12''$, será de al menos 0.91m, la

placa que sirve de tapa del pilote se suelda al mismo y deberá existir un recubrimiento de hormigón de al menos 15cm, valor que se descuenta de la altura del bloque, debiendo ser la altura efectiva “d” del hormigón medida de acuerdo a esta consideración.

- Una altura superior a 1 m de hormigón supone colocar varillas distribuidas en la parte intermedia, para evitar el agrietamiento del bloque por retracción de fraguado, los planos deben especificar además de esta armadura, vinchas de amarre de las mismas y especificaciones para la fundición de grandes masas de hormigón.
- No opta por la altura que recomienda la relación de masas ya que luego del análisis de vibraciones, el bloque de altura 1.20 m es satisfactorio para contener al generador sin ser afectado por movimientos dinámicos. En cuanto a la diferencia de frecuencias en el modo torsional, se desprecia debido a que la losa del generador deberá estar al ras del nivel terminado de la plataforma.

6.2 RECOMENDACIONES

- La localización del proyecto debe ser tomada muy en cuenta pues de ésta dependen factores importantes en el diseño civil y estructural: tipo de suelo, zonificación sísmica, suministro de material, etc.
- En el diseño se deberá hacer referencias y consultas a normas extranjeras, de ser posible, latinoamericanas (por la cercanía de las localidades), las cuales puedan proveer criterios complementarios y específicos para el desarrollo de actividades asociadas a facilidades petroleras.
- Es necesario para un ingeniero civil saber diferenciar desde el principio los tipos de facilidades para poder enfocar correctamente el trabajo que se va a realizar.
- Una facilidad de producción petrolera involucra el trabajo en conjunto del área de ingeniería mecánica, eléctrica, procesos, instrumentación y control y por supuesto, el área civil. Es importante que se coordine adecuadamente el trabajo con las áreas asociadas con el fin de considerar todos los aspectos que puedan influir en el trabajo civil, ya sea datos necesarios en el diseño, o cualquier interrupción o requerimiento especial; todo esto con el propósito de realizar una ingeniería de calidad.
- Con el objeto de asegurar esta continuidad en el suministro de energía, las plantas deben ser extremadamente seguras por si se presentara un evento sísmico; de ahí la necesidad de que el diseñador estructural conozca no solo la importancia del buen uso de factores de seguridad sino también el comportamiento de los equipos presentes.

- Las cimentaciones son una rama extensa y trascendental, por lo que es imprescindible la correcta estimación de las cargas actuantes y aplicación de las combinaciones y factores de mayoración, analizando cada caso particular.
- El plano es el documento final a ser emitido por el área civil y la guía para el trabajo en campo, de ahí la importancia de una buena elaboración del mismo. La ingeniería de detalle realizada en la industria petrolera requiere una atención especial diferente a otras áreas civiles como la industria inmobiliaria o vial; los montos de los contratos son extremadamente altos debido a los costos de los equipos aquí utilizados, es mera responsabilidad del diseñador y constructor civil y estructural el garantizar el buen funcionamiento de las instalaciones que recibirán a la maquinaria y estructuras que conformen una facilidad de producción petrolera.

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- M. MÁRQUEZ LUCERO, M. C. ROJAS OCAMPO Y ALEJANDRO ANAYA DURAND, “Selección y prediseño de separadores trifásicos”
- Manual de Diseño de Proceso: Separación física, tambores separadores, Principios básicos, PDVSA
- EFRAÍN E. BARBERII, “El pozo Ilustrado”
- DR. FERNANDO PINO, “Diagrama de fases para los hidrocarburos”, Marzo 2006
- CASTRO FERNANDO HUAMANI, El Petróleo, Universidad Nacional Federico Villarreal, Lima – Perú
http://www.alipso.com/monografias/petroleo_comercio_mundial/, Octubre de 1999
- Plataforma petrolífera, <http://es.wikipedia.org/wiki/Plataforma>
- Bombeo Mecánico – Diseño.
<http://blogpetrolero.blogspot.com/2009/06/bombeo-mecanico-diseno.html>
- Bombeo Mecánico, <http://www.monografias.com/trabajos16/bombeo-mecanico/bombeo-mecanico.shtml>
- Bombeo Mecánico – Optimización.
<http://es.scribd.com/doc/19661146/Bombeo-Mecanico-Avanzado>
- Bombeo Mecánico, <http://es.scribd.com/doc/68715718/2/VENTAJAS-Y-DESVENTAJAS-DEL-BOMBEO-MECANICO>
- JHONLESS MORALES, Bombeo electro sumergible, Universidad de Oriente, Núcleo de Anzoátegui, <http://es.scribd.com/doc/25613277/Bombeo-Electrosumergible>, Puerto La Cruz, septiembre 2008
- “Bombeo Electro sumergible”,

- <http://industria-petrolera.lacomunidadpetrolera.com/2009/05/bombeo-electrosumergible-bes.html>
- “Método de Levantamiento Artificial por Bombeo Electro sumergible”,
<http://yacimientos-de-gas-condensado.lacomunidadpetrolera.com/2008/12/metodo-de-levanvatamiento-artificial.html>
 - “La Industria del petróleo y del gas”
<http://www.ingenieroambiental.com/apunte-oil-gas-.pdf> *
 - ÁLVARO MUÑOZ RODRÍGUEZ Y EDGAR TORRES TORRES, Evaluación Técnica de las Estrategias de Levantamiento Artificial implementadas en campos maduros. Diseño de una herramienta a software de selección, Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería de Petróleos, Bucaramanga, 2007
 - URIEL FERNANDO FERRERIA Y MIGUEL ÁNGEL MEDINA, Bombeo Hidráulico Tipo Jet.
 - JHAHAIRA PATRICIA LUDEÑA LUDEÑA/ CÉSAR GONZALO BASTIDAS MORENO, “Análisis y Optimización de la Calidad de la energía eléctrica para pozos de producción petrolera Oriente-Ecuador, realizado por la empresa EQUIPOIL S.A.”, 2009, ESPE
 - “Facilidades superficie industria petrolera”,
<http://es.scribd.com/doc/69484804/71/Bomba-de-Circulacion-de-Petróleo>
 - Kenneth J., “Bombas, Selección Uso y Mantenimiento”
 - UNELLEZ BARINAS, ING. JUAN RUIZ, Bombas Centrífugas, Universidad Nacional Experimental de los Llanos Occidentales “Ezequiel Zamora”
(<http://petro-villa.blogspot.com/2009/03/bombas-centrifugas.html>)

-
- “Generación de energía eléctrica” <http://es.wikipedia.org/wiki/Generacion>
 - Turbogenerador, <http://www.secmotor.es/8-turbo-generator.html>
 - PROF. ING. WILFREDO GUTIÉRREZ LAZARES, Ingeniería Geotécnica, “Cimentaciones profundas”.
 - SURESH ARYA, MICHAEL O’NEILL, GEORGE PINCUS, “Design of structures and foundations for vibrating machines”.
 - CARLOS EDUARDO NÚÑEZ, “En Relación a los Tamices Normalizados”.
 - PEMEX, Comité de Normalización de petróleos mexicanos y Subsidiarios, “Cimentaciones de estructuras y equipo”
 - ACI Committee 351, “Foundations for Dynamic Equipment”
 - ACI Committee 351, “Foundations for Static Equipment”
 - MARIA GRACIELA FRATELLI, “Suelos, Fundaciones y Muros”.
 - ROBBY DÍAZ CONDORI, UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN, “Criterios de diseño y análisis para cimentaciones de máquinas”
 - NEXT, “Instalaciones de Superficie para la Producción de Petróleo y Gas”, curso de facilidades.
 - M.J. TOMLINSON, “Diseño y construcción de Cimientos”
 - JOSEPH E. BOWLES, “Foundation Analysis and Design”
 - F. MAÑÁ, “Cimentaciones Superficiales”
 - FREDERICK S. MERRITT, McGraw Hill, “Manual del Ingeniero Civil Tomo 1”
 - ASCE 7-10 Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures
 - NEC-11 Norma Ecuatoriana de la Construcción