

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL



EVALUACIÓN DE LA FUNDACIÓN DEL SOPLADOR DE CALDERA 32-U-601C EN LA PLANTA DE FERTILIZANTES NITROGENADOS PEQUIVEN; UBICADA EN EL COMPLEJO PETROQUÍMICO JOSÉ ANTONIO ANZOÁTEGUI, ESTADO ANZOÁTEGUI, VENEZUELA. AÑO 2024

Realizado por:

Br. Gerónimo Miguel Ramírez Poyer

Br. Jorge Luis Álvarez Characoto

Trabajo de Grado Presentado ante la Universidad de Oriente como Requisito Parcial para Optar al Título de:

INGENIERO CIVIL

Barcelona, Junio 2025

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL



EVALUACIÓN DE LA FUNDACIÓN DEL SOPLADOR DE CALDERA 32-U-601C EN LA PLANTA DE FERTILIZANTES NITROGENADOS PEQUIVEN; UBICADA EN EL COMPLEJO PETROQUÍMICO JOSÉ ANTONIO ANZOÁTEGUI, ESTADO ANZOÁTEGUI, VENEZUELA. AÑO 2024

Realizado por:

Br. Gerónimo Miguel Ramírez Poyer

Br. Jorge Luis Álvarez Characoto

Profesor Carlos Guzmán Gómez

Tutor Académico

Barcelona, Junio 2025

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL



EVALUACIÓN DE LA FUNDACIÓN DEL SOPLADOR DE CALDERA 32-U-601C EN LA PLANTA DE FERTILIZANTES NITROGENADOS PEQUIVEN; UBICADA EN EL COMPLEJO PETROQUÍMICO JOSÉ ANTONIO ANZOÁTEGUI, ESTADO ANZOÁTEGUI, VENEZUELA. AÑO 2024

El Jurado hace constar que asigno a esta tesis la calificación de:

Profesor Narciso Carreño
Jurado Principal

Profesor Jesús Moreno
Jurado Principal

Profesor Carlos Guzmán
Asesor Académico

RESOLUCIÓN

De acuerdo al Artículo 41 del Reglamento de Trabajo de Grado:

“Los Trabajos de Grado son propiedad exclusiva de la Universidad y sólo podrán ser utilizados para otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien lo participará en Consejo Universitario, para su aprobación”



DEDICATORIA

A través de estas sinceras líneas quiero agradecer a Dios primeramente por brindarme la dicha de poder vivir esta experiencia única e irrepetible llamada Universidad de Oriente.

A mi señores padres Jorge Álvarez y Lilibeth Characoto quienes fueron el pilar fundamental y apoyo durante esta largo camino no existen palabras que puedan retribuir todo lo que me han dado, aunque mi madre no esté físicamente se que desde el lugar especial que dios tiene para ella me está acompañando.

A mi hermana Wendy Álvarez por ser fiel testigo de esta proceso a mi sobrino Diego García por siempre preguntar "¿Cuándo te gradúas, te falta mucho?".

A todos mis amigos y hermanos que la universidad me regaló que entré risas nos hicimos este camino más ameno: Virginia Cañizales, Yirsi Martínez, Cireidy Rojas, Bárbara Bianchi, Carlos Rodríguez, George Ortega, Karen Aguirre, María Cañizales, Mariam Aristimuños, Wilmi Maraima, Katerine Fernández, Luis Miguel Figueroa, Margiet Barazarte, Andrelina Bastardo, Andrea Marín, Laura Gómez. Gracias a todos esos a los que por falta de caracteres no pude mencionar, ustedes también son parte de esta logró.

A la señora Gladys Román por abirme las puertas de su casa y permite que fuera mi refugio en tiempo de tempestad.

En especial a mí amigo y compañero de tesis Gerónimo Ramírez pieza clave y mancuerna perfecta para poder llevar a feliz término este ciclo, infinitas gracias.

Gracias infinitas a todos lo que fueron parte de este procesó, las palabras se quedan cortas para lo agradecido que estoy.

Jorge Luis Álvarez Characoto

DEDICATORIA

Dedicatoria Gerónimo Ramírez

AGRADECIMIENTOS

Con profunda gratitud, agradecemos a Dios por iluminar nuestro camino y fortalecernos en los momentos difíciles.

A nuestras familias, pilares fundamentales, por su amor incondicional, apoyo constante y aliento en cada paso.

A los profesores de la Universidad de Oriente, por compartir su conocimiento y experiencia a lo largo de nuestra carrera con dedicación y profesionalismo.

A nuestro tutor y amigo, Profesor Carlos Guzmán, por su invaluable guía y apoyo en la culminación de este trabajo.

A los profesores Jesús Moreno y Narciso Carreño, por sus valiosas directrices durante diferentes etapas del proyecto.

A los ingenieros José Allen, Guillermo Linero y Emma Acosta, por su invaluable apoyo y colaboración desde Fertilizantes Nitrogenados PEQUIVEN. Su disposición para aportar información necesaria fue fundamental para la realización de este estudio.

Extendemos también nuestro agradecimiento a todos aquellos que, con su cariño, consejos y apoyo, contribuyeron a hacer posible este logro.

Álvarez Characoto, Jorge Luis y. Ramírez Poyer, Gerónimo Miguel.

INDICE GENERAL

RESOLUCIÓN.....	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTOS	vii
INDICE GENERAL	viii
LISTA DE FIGURAS.....	xiii
LISTA DE TABLAS.....	xviii
RESUMEN.....	xx
INTRODUCCIÓN.....	xxi
1. CAPITULO I.....	23
EL PROBLEMA	23
1.1. Planteamiento del problema	23
1.2. Objetivos	26
1.2.1. Objetivo General	26
1.2.2. Objetivos Específicos.....	26
1.3. Justificación	27
1.4. Delimitación	29
2. CAPITULO II.....	30
MARCO TEORICO.....	30

2.1.	Antecedentes de la investigación.....	30
2.2.	Bases teóricas	32
2.2.1.	Definición de Suelo	33
2.2.2.	Comportamiento de los suelos.....	33
2.2.3.	Exploración del Suelo o subsuelo	35
2.2.4.	Prueba de penetración de cono (CPT).....	35
2.2.5.	Vibración	36
2.2.6.	Tipos de Vibraciones.....	37
2.2.7.	Efectos de las vibraciones en el suelo	39
2.2.8.	Fundaciones o Cimentaciones.....	40
2.2.9.	Cimientos de maquinas.....	41
2.2.10.	Resonancia y su efecto.....	41
2.2.11.	Propiedades Dinámicas del Suelo de Fundación.....	42
2.2.12.	Tipos de maquinas.....	43
2.2.13.	Maquinaria rotativa.....	45
2.2.14.	Tipos de cimientos de maquinas.....	45
2.2.15.	Materiales empleados	50
2.2.16.	Anclajes.....	51
2.2.17.	Tipos de cargas en fundaciones de maquinas	54
2.2.18.	Fundamentos del Modelo del Semiespacio Elástico	59

2.2.19.	Información requerida para el análisis	60
2.2.20.	Dimensionamiento de la Fundación	60
2.2.21.	Constante de Resorte o constante de rigidez	61
2.2.22.	Radio Equivalente (r_0)	63
2.2.23.	Coeficientes de enterramiento (N)	65
2.2.24.	Amortiguamiento	66
2.2.25.	Análisis Dinámico de la Fundación	70
2.2.26.	Frecuencia Natural (F_n)	70
2.2.27.	Factor de Amplificación Dinámica (M)	71
2.2.28.	Factor de Transmisibilidad (T_r)	71
2.2.29.	Frecuencia de Resonancia (f_r)	72
2.2.30.	Amplitudes de la Fundación	72
2.2.31.	Estudio de Resonancia	75
3.	CAPITULO III	77
	MARCO METODOLÓGICO	77
3.1.	Tipo de investigación	77
3.2.	Nivel de la investigación	78
3.3.	Población	79
3.4.	Muestra	79
3.5.	Técnicas e instrumentos utilizados	80

3.6.	Etapas del proyecto	82
3.6.1.	Especificar el estado de las instalaciones de la cimentación del soplador de caldera 32 U 601C con respecto a su proyecto original.	82
3.6.2.	Identificar las maquinas rotativas sobre la infraestructura del soplador de caldera 32-U-601C.....	98
3.6.3.	Obtener la caracterización de las condiciones geotécnicas del suelo de la cimentación mediante un estudio de suelos suministrado por la empresa..	109
3.6.4.	Diseñar la cimentación para el soplador en función al método propuesto en el “Manual de ingeniería de diseño. Volumen 18 – I PDVSA”.....	113
3.6.5.	Comparar los resultados obtenidos del diseño de la cimentación para el soplador de caldera con su proyecto original.	128
4.	CAPITULO IV	130
	ANÁLISIS DE RESULTADOS	130
4.1.	Especificar el estado de las instalaciones de la cimentación del soplador de caldera 32-U-601C con respecto a su proyecto original.	130
4.1.1.	Análisis de la información.....	136
4.2.	Identificar las maquinas rotativas sobre la infraestructura del soplador de caldera 32-U-601C.	140
4.2.1.	Turbina Dresser-Rand Modelo RLH 24 estándar	141
4.2.2.	Ventilador de Tiro Forzado Chicago Blowers Modelo 1902 DW ...	142
4.2.3.	Motor US Motors Modelo Titan JCE 5809ML.....	143

4.3.	Obtener la caracterización de las condiciones geotécnicas del suelo de la cimentación mediante un estudio de suelos suministrado por la empresa.	145
4.4.	Diseñar la cimentación para el soplador en función al método propuesto en el “Manual de ingeniería de diseño. Volumen 18 – I PDVSA”.	147
4.4.1.	Resultados del Diseño	153
4.5.	Comparar los resultados obtenidos del diseño de la cimentación para el soplador de caldera con su proyecto original.	164
4.5.1.	Análisis FODA del Diseño Original.....	165
4.5.2.	Análisis FODA del Nuevo Diseño Propuesto	170
4.5.3.	1. Resultados del Análisis FODA	175
5.	CAPITULO V	179
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	179
5.1.	Conclusiones	179
5.2.	Recomendaciones	182
6.	BIBLIOGRAFÍA.....	185
7.	ANEXOS.....	190
	METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO	203

LISTA DE FIGURAS

FIGURA	pp.
Figura 1.1 <i>Inspección del soplador de caldera 32-U-601C.</i>	28
Figura 2.1 <i>Análisis espectral y de la forma de onda de una bomba centrífuga.</i>	39
Figura 2.2 <i>Propagación de ondas en el suelo debidas a un impulso vibratorio.</i>	42
Figura 2.3 <i>Excitador armónico.</i>	43
Figura 2.4 <i>Cimientos macizos.</i>	46
Figura 2.5 <i>Cimiento de placa.</i>	47
Figura 2.6 <i>Cimentación tipo bloque combinado.</i>	48
Figura 2.7 <i>Cimientos aporticados.</i>	49
Figura 2.8 <i>Cimiento sobre pilotes de una planta que produce vibraciones.</i>	49
Figura 2.9 <i>Pernos ahogados en el concreto.</i>	52
Figura 2.10 <i>Pernos desmontables.</i>	53
Figura 2.11 <i>Coeficientes β_z, β_x, β_y para cimentaciones rectangulares.</i>	62
Figura 2.12 <i>Grafica de demandas medioambientales.</i>	75
Figura 2.13 <i>Grafica relación de frecuencia Vs Factor de magnificación.</i>	76
Figura 3.1 <i>Ubicación de la cimentación dentro de la empresa.</i>	85
Figura 3.2 <i>Plano de planta de la fundación del conjunto VTF.</i>	86
Figura 3.3 <i>Sección longitudinal de la fundación del conjunto VTF.</i>	87
Figura 3.4 <i>Secciones transversales de la fundación del conjunto VTF.</i>	88
Figura 3.5 <i>Detalle de continuidad de la losa de cimentación.</i>	89
Figura 3.6 <i>Vaciado de mortero grout 101 en ventilador VTF y motor.</i>	90
Figura 3.7 <i>Alineación y acople entre ventilador VTF y motor.</i>	91

Figura 3.8 <i>Comportamiento del valor global de vibración en la chumacera lado turbina (Ago 14 a Mar 15).</i>	92
Figura 3.9 <i>Tendencia en valor global de amplitudes del soplador, lado turbina y motor (Abr 13 a Ago 15).</i>	93
Figura 3.10 <i>Muestra de deformación y espacios vacios en el concreto (lado motor).</i>	94
Figura 3.11 <i>Muestra incremento en RMS de amplitud de vibraciones (Lado Turbina horizontal y Lado Motor horizontal)</i>	95
Figura 3.12 <i>Muestra de fractura de la soldadura en los soportes.</i>	96
Figura 3.13 <i>Lista de verificación de fundaciones de equipos, Pag. 1 de 4.</i>	97
Figura 3.14 <i>Plano de vista frontal de la Turbina. Paralelo al eje de rotación.</i>	100
Figura 3.15 <i>Plano de vista lateral de la Turbina. Perpendicular al eje de rotación.</i>	100
Figura 3.16 <i>Ubicación de los agujeros y pies de apoyo de la turbina.</i>	101
Figura 3.17 <i>Placa solera de apoyo sobre la cimentación de la turbina.</i>	101
Figura 3.18 <i>Plano de vista frontal del Ventilador VTF. Paralelo al eje de rotación.</i>	103
Figura 3.19 <i>Vista lateral izquierda y derecha. Perpendicular al eje de rotación.</i>	104
Figura 3.20 <i>Dimensiones de las placas bases. Disposición para pernos de anclaje.</i>	105
Figura 3.21 <i>Plano de vista frontal del motor. Perpendicular al eje de rotación.</i>	107
Figura 3.22 <i>Plano de vista lateral del motor. Perpendicular al eje de rotación.</i>	107

Figura 3.23 <i>Dimensiones de la placa base del motor. Disposición para pernos de anclaje.</i>	108
Figura 3.24 <i>Simulación de la fundación en SAFE con las cargas de peso de cada máquina.</i>	127
Figura 3.25 <i>Simulación de la fundación en SAFE con las cargas dinámicas de cada máquina.</i>	128
Figura 4.1 <i>Inspección Visual de la cimentación.</i>	131
Figura 4.2 <i>Muestra de deformación y espacios vacíos entre el concreto (lado turbina).</i>	132
Figura 4.3 <i>Muestra de fractura de la soldadura en el soporte (lado motor).</i>	133
Figura 4.4 <i>Inspección del pedestal de Turbina y elementos del VTF.</i>	134
Figura 4.5 <i>Muestra a través de tendencia del incremento de valores de velocidad de vibración en la chumacera lado turbina</i>	135
Figura 4.6 <i>Muestra de soltura a través del espectro de vibración e influencia en armónicos de velocidad de giro.</i>	136
Figura 4.7 <i>Memoria de cálculo: Chequeo por punzonado de la Losa Fundación del Diseño original</i>	137
Figura 4.8 <i>Memoria de Cálculo: Dimensionamiento de los pedestales del VTF</i>	138
Figura 4.9 <i>Espectro de vibración ventilador lado motor, horizontal 3H.</i>	139
Figura 4.10 <i>Turbina Dresser-Rand RLH 24 estándar</i>	142
Figura 4.11 <i>Ventilador de Tiro Forzado (VTF) Chicago Blowers. Modelo 1902 DW</i>	143

Figura 4.12 <i>Motor US Motors. Modelo Titán JCE 5809ML</i>	144
Figura 4.13 <i>Características del perfil de suelo en la prueba CPT en la unidad 32</i>	146
Figura 4.14 <i>Propiedades dinámicas del suelo para cimentaciones de máquinas.</i>	147
Figura 4.15 <i>Plano de planta de fundación propuesta para el soplador 32-U-601C.</i>	148
Figura 4.16 <i>Plano longitudinal de la fundación para el soplador 32-U601C.</i>	149
Figura 4.17 <i>Simulación de asentamientos de la fundación.</i>	153
Figura 4.18 <i>Diagrama de momentos en dirección longitudinal de la fundación.</i>	154
Figura 4.19 <i>Diagrama de momentos en dirección transversal de la fundación.</i>	155
Figura 4.20 <i>Diagrama de fuerza cortante en dirección longitudinal de la fundación.</i>	156
Figura 4.21 <i>Diagrama de fuerza cortante en dirección transversal de la fundación.</i>	156
Figura 4.22 <i>Diagrama de Torsión en dirección longitudinal de la fundación.</i>	157
Figura 4.23 <i>Diagrama de Torsión en dirección transversal de la fundación.</i>	158
Figura 4.24 <i>Diagrama de distribución de acero en dirección longitudinal de la fundación.</i>	159
Figura 4.25 <i>Diagrama de distribución de acero en dirección transversal de la fundación.</i>	160
Figura 4.26 <i>Distribución de cabillas en dirección longitudinal.</i>	161

Figura 4.27 Armado de cabillas #5 para pedestales.	162
Figura 4.28 Armado de cabillas #5 para zapata.	163
Figura 4.29 <i>Diagrama de barras de las fortalezas del Diseño Original.</i>	166
Figura 4.30 <i>Diagrama de barras de las debilidades del Diseño Original.</i>	167
Figura 4.31 <i>Diagrama de barras de las oportunidades del Diseño Original.</i>	168
Figura 4.32 <i>Diagrama de barras de las amenazas del Diseño original.</i>	169
Figura 4.33 <i>Diagrama de barras de las fortalezas del nuevo diseño propuesto.</i>	171
Figura 4.34 <i>Diagrama de barras de las debilidades del nuevo diseño propuesto.</i>	172
Figura 4.35 <i>Diagrama de barras de las oportunidades del nuevo diseño propuesto.</i>	173
Figura 4.36 <i>Diagrama de barras de las amenazas del nuevo diseño propuesto.</i>	174
Figura 4.37 <i>Factor de Oportunidades Vs Factor de Riesgo del diseño Original.</i>	176
Figura 4.38 <i>Factor de oportunidades Vs. Factor de riesgos del nuevo diseño propuesto.</i>	177

LISTA DE TABLAS

TABLA	pp.
Tabla 2.1 <i>Longitud mínima Lo de anclaje de los pernos.</i>	53
Tabla 2.2 <i>Combinaciones de cargas propuestas por norma COVENIN 1756.</i> ...	58
Tabla 2.3 <i>Valores típicos de amortiguamiento interno.</i>	70
Tabla 3.1 <i>Características de la Turbina 32-TU-601C.</i>	102
Tabla 3.2 <i>Características del ventilador de tiro forzado VTF 32-U-601C.</i>	105
Tabla 3.3 <i>Características del motor 32-MU-601C</i>	109
Tabla 3.4 <i>Perfil del suelo obtenido de la prueba CPT en la unidad 32.</i>	110
Tabla 3.5 <i>Parámetros geotécnicos del suelo en el área de estudio.</i>	112
Tabla 3.6 <i>Evaluaciones de asentamiento en la unidad 32.</i>	113
Tabla 3.7 <i>Medidas obtenidas luego de dimensionamiento de la fundación.</i>	114
Tabla 3.8 <i>Elementos que componen la fundación y sus características.</i>	116
Tabla 3.9 <i>Maquinas que componen la fundación y sus características de masa.</i>	117
Tabla 3.10 <i>Tabla de cálculos para determinar el centro de gravedad del sistema.</i>	118
Tabla 4.1 <i>Peso y Masa de los elementos de la cimentación y de las máquinas.</i>	149
Tabla 4.2 <i>Centro de gravedad del sistema calculado.</i>	150
Tabla 4.3 <i>Momentos de inercia de elementos de la cimentación y momento de inercia total del sistema.</i>	150
Tabla 4.4 <i>Parámetros de diseño calculados.</i>	151

Tabla 4.5 <i>Frecuencias Natural y de Resonancia. Factores de Magnificación y Transmisibilidad.</i>	152
Tabla 4.6 <i>Fuerzas transmitidas, Amplitudes y Presión del Suelo.</i>	152
Tabla 4.7 <i>Fortalezas del Diseño original</i>	165
Tabla 4.8 <i>Debilidades del Diseño original</i>	166
Tabla 4.9 <i>Oportunidades del Diseño original</i>	167
Tabla 4.10 <i>Amenazas del Diseño original</i>	168
Tabla 4.11 <i>Valores ponderados para cada categoría FODA del Diseño original.</i>	169
Tabla 4.12 <i>Fortalezas del nuevo diseño propuesto</i>	170
Tabla 4.13 <i>Debilidades del nuevo diseño propuesto</i>	171
Tabla 4.14 <i>Oportunidades del nuevo diseño propuesto</i>	172
Tabla 4.15 <i>Amenazas del nuevo diseño propuesto</i>	174
Tabla 4.16 <i>Valores ponderados para cada categoría FODA del Diseño propuesto.</i>	175



UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

EVALUACIÓN DE LA FUNDACIÓN DEL SOPLADOR DE CALDERA 32-U-601C EN LA PLANTA DE FERTILIZANTES NITROGENADOS PEQUIVEN; UBICADA EN EL COMPLEJO PETROQUÍMICO JOSÉ ANTONIO ANZOÁTEGUI, ESTADO ANZOÁTEGUI, VENEZUELA. AÑO 2024

Autores: Br. Álvarez Characoto, Jorge Luis y Br. Ramírez Poyer, Gerónimo Miguel

Tutor: Profesor Carlos Guzmán Gómez

Fecha: Febrero, 2025.

RESUMEN

El presente trabajo de grado tiene como objetivo evaluar la fundación del soplador de caldera 32-U-601C en la planta de Fertilizantes Nitrogenados PEQUIVEN, ubicada en el Complejo Petroquímico José Antonio Anzoátegui, Venezuela. La investigación surge de la problemática detectada en las bases del soplador, el cual ha presentado un problema recurrente y agravado de vibraciones excesivas, a pesar de mantenimientos y balanceos, los picos de vibración superaron consistentemente los límites de alarma, culminando en fracturas de soldaduras en soportes de chumaceras. El objetivo general de esta investigación fue evaluar la cimentación del soplador para determinar si las fallas se originan por errores en su diseño o construcción. Los objetivos específicos incluyeron: especificar el estado original de la cimentación, caracterizar el suelo, identificar las máquinas rotativas, diseñar una nueva cimentación según el Manual de Diseño de PDVSA, y comparar este diseño con el original. La metodología empleó una investigación mixta, combinando el análisis documental con investigación de campo. Se identificaron la turbina, el ventilador y el motor como los equipos que operaban sobre la cimentación a frecuencias similares. El estudio geotécnico reveló arcillas consolidadas, con su modulo de corte dinámico y presión admisible calculados. Los resultados del diseño propuesto, bajo el método del semiespacio elástico y modelado en el programa SAFE, mostraron la necesidad de una losa más robusta y mayores cuantías de refuerzo que el diseño original. El análisis FODA comparativo reveló un mayor Factor de Riesgo en el diseño original frente a un mayor Factor de Optimización en el rediseño propuesto. En conclusión, las fallas del soplador se atribuyen a deficiencias en el diseño y la rigidez de la cimentación original. Se recomienda la implementación del rediseño propuesto o la exploración de alternativas, siempre respaldadas por un análisis costo-beneficio que garantice la estabilidad y confiabilidad operativa a largo plazo.

Palabras clave: Fundación, maquinaria rotativa, vibraciones, suelos, rediseño.

INTRODUCCIÓN

La construcción de fundaciones es una disciplina fundamental en la ingeniería civil, ya que estas estructuras son las encargadas de transmitir las cargas de la superestructura o generadas por maquinas de la industria al suelo. Un diseño y construcción adecuados son esenciales para garantizar la estabilidad y seguridad de cualquier edificación o instalación industrial.

Este trabajo se realizó con la finalidad de evaluar la fundación del soplador de caldera 32-U-601C, ubicada en la planta de Fertilizantes Nitrogenados PEQUIVEN, dentro del Complejo Petroquímico José Antonio Anzoátegui, Estado Anzoátegui, Venezuela. La planta de PEQUIVEN es una instalación petroquímica clave en la producción de amoníaco anhidro y urea granulada. La unidad 32, donde se encuentra el soplador de caldera, es esencial para la generación de vapor, un proceso crítico para la producción. El soplador de caldera 32-U-601C, instalada en 2010, presentó problemas de vibraciones y fallas estructurales en los soportes de las chumaceras, lo que generó preocupación en la gerencia de confiabilidad de la planta.

Este estudio se enfocó en la evaluación técnica integral de la fundación del soplador de caldera, utilizando análisis teóricos y numéricos. Se realizó una revisión exhaustiva de la documentación existente, incluyendo planos originales, memorias de cálculo, informes de construcción y reportes de inspección. Se caracterizaron las maquinarias del soplador (turbina, ventilador de tiro forzado y motor), recopilando datos

geométricos y de operación. Se obtuvo la caracterización de las condiciones geotécnicas del suelo mediante el análisis de un estudio de suelos proporcionado por la empresa.

Se modeló la cimentación en el software SAFE y se diseñó una nueva cimentación según las indicaciones del "Manual de ingeniería de diseño. Volumen 18 – I PDVSA". Se aplicó el análisis FODA para evaluar la factibilidad de la cimentación existente y del rediseño propuesto. Este estudio tiene como objetivo principal evaluar la condición actual y proponer mejoras en la cimentación del soplador de caldera 32-U-601C, contribuyendo a la prevención de fallas y a la mejora de la seguridad y eficiencia en la industria petroquímica de Anzoátegui.

La estructura de este trabajo se organiza en cinco capítulos. El Capítulo I presenta el planteamiento del problema, enfocándose en el riesgo asociado a las vibraciones excesivas en la fundación del soplador de caldera 32-U-601C, y establece los objetivos, la justificación y las limitaciones del estudio. El Capítulo II desarrolla los fundamentos teóricos para el diseño de fundaciones de máquinas vibratorias. El Capítulo III detalla la metodología de investigación, un proyecto factible con apoyo en investigación documental y de campo. El Capítulo IV se dedica al análisis de resultados y a la presentación del nuevo diseño de la fundación. Finalmente, el Capítulo V presenta las conclusiones y recomendaciones derivadas del estudio.

CAPITULO I

EL PROBLEMA

1.1. Planteamiento del problema

Fertilizantes Nitrogenados PEQUIVEN es una compañía petroquímica especializada en la fabricación y distribución de amoníaco anhidro y urea granulada de alta calidad. La empresa está compuesta por dos líneas de producción idénticas, cada una conformada por dos plantas de producción de amoníaco anhidro con capacidad máxima de 1,800 toneladas diarias cada una, y dos plantas de urea granulada con una capacidad máxima de 2,200 toneladas diarias por unidad. Además, cuenta con áreas de servicios industriales, que incluyen generación de vapor, agua desmineralizada, tratamiento de agua de enfriamiento, aire de servicio, nitrógeno de servicio, y un sistema de efluentes. También está el área de logística que se encarga del almacenamiento y envío de los productos.

En el área de servicios industriales se encuentra la unidad 32, donde se genera vapor de dos maneras: por combustión en las calderas auxiliares y por recuperación de calor. Ambos tipos de sistemas de vapor operan en forma integrada para producir vapor en cuatro niveles principales de presión. Las calderas auxiliares 32-B-601 A/B son del tipo de circulación natural, estas funcionan en la planta desde sus inicios en el año 2000. A partir del año 2010 se incluyó una caldera acuatubular tipo paquete, en asociación con Colmaquinas S.A., empresa de Bogotá, Colombia. Fue denominada 32-B-601C y sus componentes llevan similitud a esta nomenclatura.

Una vez puesta en marcha la nueva caldera, con el paso del tiempo se empezó a evidenciar incremento de las vibraciones en las chumaceras del soplador (32-U-601C). Reemplazando las piezas afectadas se logró reducir las vibraciones en el equipo de manera significativa, pero sólo temporalmente. Con el paso de los meses, se volvieron a detectar aumentos en las vibraciones durante la monitorización. El departamento de Confiabilidad decidió llevar a cabo inspecciones regulares del comportamiento de los equipos para asegurarse de que estén funcionando sin incidencias que superen los límites de alarma. Durante este período se informó de fracturas en las soldaduras de los soportes de las chumaceras del ventilador de la caldera, tanto en el lado del motor como en el lado de la turbina, así como en la superficie de concreto. Por lo tanto, la Gerencia de Confiabilidad quiso realizar una evaluación exhaustiva de la infraestructura del equipo que ha presentado fallas.

Se debe iniciar el proyecto con revisiones del diseño original de la cimentación, sus planos y memoria de cálculo, verificar los reportes de inspección de la empresa para la maquinaria soportada por la cimentación. La fiabilidad de este elemento estructural debe ser estudiada entre las causas que pudieron originar el incidente en el soplador de caldera. Al presentarse la posibilidad de que las causas de las fallas de la maquinaria puedan ser originados en consecuencia de errores cometidos durante el diseño o la construcción de la cimentación. Seguidamente a esto se realizará un cotejo haciendo uso de la matriz FODA, entre el diseño original de la cimentación y un nuevo análisis y diseño de una cimentación para este equipo, siguiendo las normativas venezolanas vigentes.

En este sentido el presente proyecto de investigación tiene como propósito determinar si las causas de las fallas de la maquinaria se originan en consecuencia de algún error en las cimentaciones de la misma, ya sea por errores ocurridos durante la fase de diseño de la cimentación o durante su construcción.

El alcance del presente proyecto de investigación está delimitado en desarrollar una evaluación técnica que incluya el conjunto de actividades de análisis y diseño asociadas a la cimentación del soplador de caldera, para determinar si es por un error en estas que se presentan las fallas en el equipo. Brindando recomendaciones para el diseño de la cimentación de la maquinaria, como también para la inspección y evaluación de este tipo de infraestructura.

El presente problema en el soplador de caldera (32 U 601C) de la planta de Fertilizantes Nitrogenados PEQUIVEN, no ha sido investigado previamente en tesis de grado, por lo cual no se cuenta con antecedentes de forma directa sobre la misma, sin embargo, se han encontrado trabajos similares realizados, lo que significa un sustento para el desarrollo del proyecto.

La importancia del presente proyecto es fundamental para la industria del estado Anzoátegui, debido que las condiciones que se generan en los pedestales y cimientos de concreto de esta maquinaria, y su interacción con el suelo generan impacto en la dinámica de los equipos, considerando la necesidad que existe de contar con este soplador en un óptimo funcionamiento para lograr la mayor producción y seguridad de las plantas, es importante una respuesta global de esta situación.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Evaluar los cimientos del soplador de Caldera 32-U-601C ubicado en la unidad 32 de la planta de fertilizantes nitrogenados PEQUIVEN; Complejo Petroquímico José Antonio Anzoátegui, Estado Anzoátegui, Venezuela.

1.2.2. Objetivos Específicos

1. Especificar el estado de las instalaciones de la cimentación del soplador de caldera 32-U-601C con respecto a su proyecto original.
2. Identificar las maquinas rotativas sobre la infraestructura del soplador de caldera 32-U-601C.
3. Obtener la caracterización de las condiciones geotécnicas del suelo de la cimentación mediante un estudio de suelos suministrado por la empresa.
4. Diseñar la cimentación para el soplador en función al método propuesto en el *“Manual de ingeniería de diseño. Volumen 18 – I PDVSA”*.
5. Comparar los resultados obtenidos del diseño de la cimentación para el soplador de caldera con su proyecto original.

1.3. Justificación

La planta de Fertilizantes Nitrogenados PEQUIVEN, ubicada en el Complejo Petroquímico José Antonio Anzoátegui, es una instalación clave en la industria petroquímica venezolana. La producción continua y eficiente de amoníaco anhidro y urea granulada depende en gran medida de la integridad y confiabilidad de sus equipos, incluyendo el soplador de caldera 32-U-601C (figura 1.1), cuyo funcionamiento es esencial para la generación de vapor en la unidad 32.

El incremento progresivo de las vibraciones en las chumaceras del soplador, a pesar de los mantenimientos correctivos, y la posterior fractura de los soportes evidencian un problema subyacente en la cimentación, afectando la disponibilidad operativa del equipo y representando un riesgo para la seguridad del personal e instalaciones. Esta situación genera la necesidad de evaluar la cimentación del soplador de caldera 32-U-601C, motivada por la preocupación por la seguridad y la continuidad operativa de la planta, ya que las vibraciones excesivas y las fallas estructurales pueden ocasionar daños mayores a los equipos, paradas no programadas de la producción y, en el peor de los casos, accidentes que pongan en peligro la integridad del personal y las instalaciones.

Este estudio se justifica por la necesidad de comprender las causas de las fallas en la fundación, determinar si existen errores de diseño o construcción, y proponer soluciones que garanticen la estabilidad y el correcto funcionamiento del soplador de caldera a largo plazo. La evaluación de la fundación permitirá identificar las deficiencias estructurales, analizar las características geotécnicas del suelo, y diseñar una

cimentación que cumpla con las normas y estándares de seguridad, incluyendo el "Manual de ingeniería de diseño. Volumen 18 – I PDVSA".

Figura 0.1 *Inspección del soplador de caldera 32-U-601C.*



Fuente: Fotografía propia.

1.4. Delimitación

Este estudio se enfoca en la evaluación de la fundación del soplador de caldera 32-U-601C en la planta de Fertilizantes Nitrogenados PEQUIVEN, ubicada en el Complejo Petroquímico José Antonio Anzoátegui, Venezuela. Se revisará la cimentación existente, incluyendo planos, cálculos, reportes y condiciones actuales, y se diseñará una nueva cimentación según el "Manual de ingeniería de diseño. Volumen 18 – I PDVSA". El estudio no abarca otros equipos, factores externos (ambientales o mantenimiento), ni la ejecución del estudio geotécnico del suelo. Basado en información proporcionada por PEQUIVEN y utilizando software especializado, se espera que este estudio evalúe integralmente la cimentación, identifique las causas de fallas y vibraciones, y proponga recomendaciones para futuras cimentaciones similares.

CAPITULO II

MARCO TEORICO

2.1. Antecedentes de la investigación

Diversos autores han llevado a cabo investigaciones relacionadas con el estudio de cimentaciones para maquinarias dinámicas que generan vibraciones, similares a las analizadas en este trabajo. Estas investigaciones serán consideradas como antecedentes para el presente estudio, proporcionando información amplia y variada que servirá como base de soporte. Entre los investigadores más destacados se encuentran los siguientes:

Khazam, J. y Osechas, G. (2008). Su proyecto “Metodología numérica para analizar y diseñar fundaciones de maquinas alternativas, rotativas y de impacto”, presentado ante la ilustre Universidad Central de Venezuela, tiene como propósito facilitar la elección del tipo de cimentación más adecuada para soportar los diferentes tipos de máquinas y sus vibraciones, en condiciones seguras de operación. En su trabajo de investigación realizaron un estudio acerca de los parámetros principales que afectan las vibraciones en una fundación, para máquinas de impacto, reciprocantes y rotativas. Analizan los diversos parámetros de diseño de fundaciones, estos parámetros abarcan constante de resorte, factores de embutimiento, frecuencias naturales y de resonancia, velocidades iniciales de las partes de la máquina, cálculo de cargas en la fundación. Se declaran los límites que deben tener los parámetros, para que las amplitudes generadas por las vibraciones no excedan los límites medio ambientales, y se encuentren en un rango seguro para las máquinas y los usuarios. Al recopilar toda la información teórica y experimental, la presentan en una metodología

que se ilustra con un ejemplo numérico, que facilita los cálculos a la hora de analizar una fundación.

Angos, M. (2009). Su proyecto titulado “Manual de Diseño de Cimentaciones Tipo Bloque para Equipo Dinámico”, presentado ante la Escuela Politécnica del Ejército para la obtención del título de Ingeniero Civil. El propósito de esta investigación es que planificadores, diseñadores y constructores conozcan los aspectos fundamentales de las cimentaciones para un equipo dinámico con la finalidad de producir diseños eficientes y confiables. Proporcionando un manual con los distintos aspectos de planificación, análisis y diseño de cimentaciones tipo bloque para equipo dinámico mediante ejemplos prácticos, presentando la importancia de la medición de vibración en el sistema equipo-cimentación, dando un significado práctico de la prioridad de las frecuencias y amplitudes en el análisis de cimentaciones tipo bloque para equipo dinámico. El alcance de este manual incluye el análisis de equipos sujetos a fuerzas de impacto y a fuerzas periódicas. También se incluye el análisis y diseño de la cimentación para un equipo recíproco.

Carpintero, J. (2009). Su trabajo de grado “Desarrollo de un procedimiento de inspección técnica de obras civiles asociadas a la planta de producción de metanol, Metanol de Oriente, METOR S.A. Jose, Estado Anzoátegui.” presentado ante la Universidad de Oriente para optar al título de Ingeniero Civil. En este proyecto de investigación se desarrolló un procedimiento de inspección técnica que involucró el conjunto de actividades de construcción y mantenimiento de instalaciones civiles asociadas a la planta de METOR S.A., basado en criterios, normas y especificaciones del Sistema de Gestión de Calidad de la empresa, con certificación de calidad ISO: 9002. Dando un soporte técnico que optimiza los controles de calidad en el área de

construcción civil y así optimizar los controles de calidad y el mantenimiento de las estructuras soportantes de los equipos y procesos de la planta, permitiendo incluir dentro de la programación de las paradas de planta las actividades de mantenimiento de infraestructuras.

Ortega, M. y Ortigoza, E. (2009). Trabajo especial de grado titulado “Automatización del cálculo para Fundaciones Aisladas Superficiales sometidas a Vibraciones inducidas por Motores Acoplados a Compresores o Bombas Centrifugas y Reciprocantes”, presentado en la Universidad Rafael Urdaneta para obtener el título de Ingeniero Civil. El objetivo principal de esta investigación fue automatizar los procedimientos de cálculo para cimentaciones aisladas superficiales sujetas a vibraciones provocadas por motores acoplados a compresores o bombas centrífugas y reciprocantes. Para lograrlo, se utilizó el programa Microsoft Office Excel como herramienta informática, desarrollando una hoja de cálculo destinada a agilizar el procedimiento, reducir errores y disminuir significativamente el tiempo de cálculo. Para alcanzar este propósito, se establecieron criterios para el prediseño de las cimentaciones mencionadas y se definieron los algoritmos necesarios para su cálculo, los cuales fueron proporcionados por la industria PDVSA en sus manuales de ingeniería de diseño. La confiabilidad del método fue verificada comparando los resultados obtenidos manualmente con aquellos generados automáticamente por la hoja de cálculo, comprobándose la similitud entre ambos

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Definición de Suelo

Según Juárez B. (2005), los suelos comprenden una amplia variedad de materiales terrosos, que van desde escombros hasta rocas parcialmente cementadas o arcillas suaves. Sin embargo, esta definición excluye a las rocas ígneas o metamórficas sólidas y a los depósitos sedimentarios altamente compactados que no se degradan fácilmente por la intemperie. La presencia de agua es esencial en el comportamiento mecánico del suelo y, por lo tanto, debe ser considerada como una parte integral del mismo.

2.2.2. Comportamiento de los suelos

Según Fratelli (1993), las propiedades mecánicas de los suelos que influyen en su comportamiento y capacidad portante son diversas:

Composición del suelo: Incluye elementos sólidos (rocas, arcillas, capa vegetal, etc.), líquidos (agua higroscópica, capilar y gravitacional) y gaseosos (oxígeno, dióxido de carbono, etc.).

Relación de vacíos: Índice entre el volumen de vacíos y de sólidos.

Porosidad: Volumen de vacíos como porcentaje del volumen total de la muestra.

Contenido de humedad: Porcentaje que relaciona el peso del agua y el peso de los sólidos.

Grado de saturación: Porcentaje del volumen del agua con relación al volumen total de vacíos ($S=100\%$ saturación completa, $0\% < S < 100\%$ saturación parcial, $S > 100\%$ sobresaturación).

Densidad específica: Relación de masa por unidad de volumen (Kg/m^3 o gr/cm^3).

Peso específico: Relación entre el peso de la muestra y su volumen.

Peso específico relativo de la masa: Relación entre su peso y el de igual volumen de agua.

Peso específico relativo de los sólidos: Peso unitario del material dividido por el peso unitario del agua a 4°C.

Tamaño de las partículas: Clasificación según los granos dominantes.

Forma de las partículas: Pueden ser redondeadas, con bordes lisos, pulidos, planos, en forma de escamas o bastones.

Textura y color: La textura (tamaño y forma de las partículas) puede ser rugosa, lisa, estriada, picada o pulida. El color proporciona información sobre el drenaje (rojizo = buen drenaje, amarillos/marrones claros = mal drenaje, grises = poco drenaje), presencia de material orgánico (negro/marrón oscuro) o presencia de cal y aluminio (blanco).

Consistencia y contenido de humedad: La consistencia varía desde un estado sólido (seco) hasta líquido y viscoso (húmedo).

Permeabilidad y capilaridad: La permeabilidad es la capacidad de permitir el flujo de agua, mientras que la capilaridad es la capacidad de retener agua mediante ascenso por un canal delgado.

Compresibilidad: Capacidad de mantenerse comprimido después de ser sometido a compresión.

Capacidad portante: Capacidad para soportar cargas.

Retracción y expansión: Variación en el tamaño debido a la presión y la humedad.

Asentamientos: Proceso de hundimiento del suelo bajo carga. Su magnitud depende de la intensidad de la carga y de la compresibilidad del suelo. Es crucial calcular

con precisión los asentamientos de las fundaciones, ya que un asentamiento considerable puede afectar la apariencia de la obra, causar daños estructurales, pérdida de funcionalidad e incluso el colapso de elementos resistentes.

Licuefacción del suelo: Este fenómeno sucede cuando los suelos no cohesivos o las arcillas sensibles repentinamente pierden su resistencia debido a una vibración, un impacto o un esfuerzo cortante intenso y se comportan como un líquido viscoso, resultando en el colapso de las estructuras que se apoyan en ellos.

2.2.3. Exploración del Suelo o subsuelo

La exploración del subsuelo, según Das B. M. (2013), es el proceso de identificar las capas de suelo debajo de una estructura y determinar sus características físicas. Esta información es crucial para el ingeniero en tareas como: seleccionar el tipo y profundidad de cimentación, evaluar la capacidad de carga, estimar asentamientos, identificar problemas potenciales (suelos expansivos, colapsables, rellenos sanitarios), determinar el nivel freático, predecir presiones laterales y establecer métodos constructivos. Los datos recopilados permiten un diseño seguro y eficiente de la cimentación.

2.2.4. Prueba de penetración de cono (CPT)

Según Das B. M. (2013), la prueba de penetración de cono (CPT) es un método geotécnico útil para la exploración de suelos. Se introduce un cono sin necesidad de perforaciones y se miden dos parámetros principales:

Resistencia de punta (q_c): Fuerza vertical aplicada al cono / Área proyectada.

Resistencia de fricción (f_c): Fuerza vertical aplicada al manguito / Área superficial.

2.2.4.1. Penetrómetro de cono de fricción mecánica.

En este dispositivo, la punta se empuja para obtener la resistencia de punta, y luego un empuje adicional acciona la fricción del manguito. La fuerza medida en la varilla interior representa la suma de las fuerzas verticales sobre el cono y el manguito. La resistencia lateral se obtiene restando la fuerza sobre el cono.

2.2.4.2. Penetrómetro de cono eléctrico de fricción.

En este caso, la punta está unida a una serie de varillas de acero, y se introduce en el suelo a una velocidad de 20 mm/s. Los cables de los transductores, que se encuentran en el centro de las varillas, transmiten continuamente las resistencias de punta y lateral.

Para estimar las propiedades de los suelos, se utilizan correlaciones que relacionan la resistencia de punta (q_c) y la relación de fricción (F_r) obtenidas en las pruebas CPT.

2.2.5. Vibración

Según la definición de Hibbeler (2004), una vibración consiste en el movimiento repetitivo de un cuerpo o un sistema interconectado de cuerpos que se apartan de su estado de equilibrio. Fundamentalmente, se distinguen dos categorías de vibración: libre y forzada. La vibración libre se manifiesta cuando el movimiento persiste gracias a fuerzas restauradoras, ya sean gravitacionales, como en el vaivén de un péndulo, o elásticas, como en la oscilación de una barra flexible. Por otro lado, la vibración forzada se origina por la aplicación de una fuerza externa que actúa sobre el sistema de manera periódica o discontinua. Es importante destacar que ambos tipos de vibración pueden

presentarse de forma amortiguada o no amortiguada. En el análisis de vibraciones no amortiguadas, se idealiza la situación despreciando los efectos de la fricción, lo que implicaría que la vibración podría continuar indefinidamente. Sin embargo, en la realidad, la presencia inevitable de fuerzas de fricción, tanto internas como externas, conlleva a que el movimiento de todo cuerpo vibrante sea inherentemente amortiguado.

2.2.6. Tipos de Vibraciones

Como afirma Fratelli (1993) las vibraciones de los sólidos se clasifican en dos tipos principales:

Vibraciones Libres: Son aquellas originadas por un único impulso aislado. El sistema vibra libremente hasta que las fuerzas de amortiguamiento disipan la energía.

Vibraciones Forzadas: Son aquellas generadas por una excitación continua o periódica. El sistema vibra continuamente mientras actúe la fuerza externa.

2.2.6.1. Medición de Vibraciones

El proceso de medición de vibraciones generadas por máquinas, conocido como cadena de medición, según Saavedra P. (2010), comprende las siguientes etapas:

1. **Etapla transductora:** El transductor, primer eslabón de la cadena, convierte la magnitud física de la vibración en una señal eléctrica (voltaje) proporcional. Los acelerómetros son los transductores más utilizados en la actualidad debido a su tamaño, amplio rango de frecuencia y la capacidad de integrar la señal para obtener velocidad o desplazamiento.

2. **Etapa de acondicionamiento de la señal:** La señal eléctrica generada por el transductor se acondiciona para eliminar el ruido y amplificar la señal útil para su posterior análisis.
3. **Etapa de análisis y/o medición:** Se aplican diversas técnicas de análisis para extraer información relevante de la señal, tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia.
4. **Etapa de registro:** La señal analizada se registra para su posterior estudio y comparación.

2.2.6.2. Técnicas de Análisis de Vibraciones

Indica Saavedra P. (2010) que el análisis de vibraciones tiene como objetivo extraer la máxima información relevante de la señal. Se utilizan diversas técnicas tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia, cada una con ventajas específicas para diferentes aplicaciones. Algunas de las técnicas más utilizadas son:

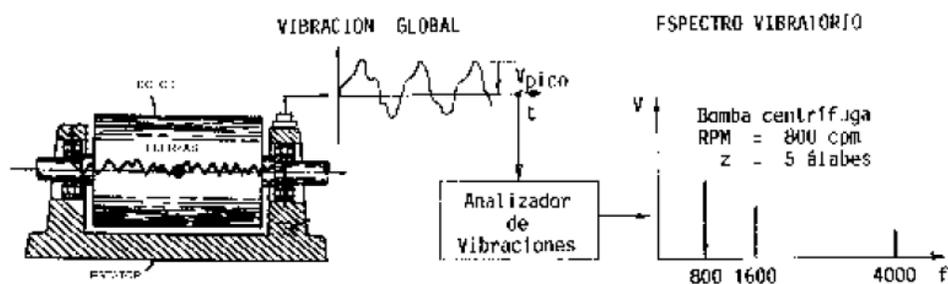
1. **Análisis espectral:** Descompone la señal vibratoria en el dominio del tiempo en sus componentes espectrales en frecuencia, permitiendo correlacionar las vibraciones medidas con las fuerzas que actúan dentro de la máquina.
2. **Análisis de la forma de onda:** Proporciona información complementaria al análisis espectral, siendo útil para identificar impactos, rozamientos intermitentes, modulaciones, transientes y truncaciones.
3. **Análisis de fase de vibraciones:** Permite determinar los movimientos relativos entre diferentes puntos de la máquina y diferenciar problemas como

desbalanceamiento, desalineamiento, eje doblado, resonancia y poleas excéntricas.

4. **Análisis de los promedios sincrónicos en el tiempo:** Suma y promedia señales vibratorias en el dominio del tiempo mediante un pulso de referencia repetitivo, facilitando la identificación del origen de las componentes vibratorias.

Además de las técnicas mencionadas, existen otras herramientas valiosas como el análisis de órbitas, demodulaciones y vibraciones en partidas y paradas. La selección de la técnica de análisis adecuada dependerá del tipo de vibración y del problema a diagnosticar. La combinación de diferentes técnicas puede proporcionar una visión más completa del comportamiento vibratorio y facilitar la identificación de fallas.

Figura 0.1 *Análisis espectral y de la forma de onda de una bomba centrífuga.*



Fuente: Saavedra P. (2010) Tomado de Medición y análisis de las vibraciones como técnica de inspección de equipos y componentes.

2.2.7. Efectos de las vibraciones en el suelo

Barkan D. D. (1962) expone que los estudios y observaciones de modelos sometidos a choques y vibraciones muestran que pueden experimentar asentamientos

muchas veces mayores que los impuestos por cargas estáticas. Indica que considerables asentamientos causados por la acción conjunta de cargas estáticas y vibraciones aparecen particularmente en suelos no cohesivos, como arenas saturadas de agua, incluso si las arenas se caracterizan por valores bajos de porosidad. Las investigaciones estáticas de estos suelos no cohesivos, como arenas saturadas, pueden tener una alta resistencia bajo cargas estáticas. Sin embargo, la presencia de vibraciones, incluso en suelos con baja porosidad, reduce considerablemente su resistencia, lo que puede resultar en asentamientos significativos.

2.2.8. Fundaciones o Cimentaciones

Según Crespo (2004), las fundaciones o cimentaciones son el componente estructural esencial que sirve de nexo entre la superestructura, la parte visible de la construcción, y el terreno subyacente. Su propósito fundamental es distribuir las cargas concentradas de la superestructura al suelo de manera segura, asegurando que el terreno pueda resistir estos esfuerzos sin experimentar fallas ni asentamientos excesivos, ya sean uniformes o diferenciales, que comprometan la estabilidad de la edificación. En esencia, la cimentación constituye la subestructura, la parte oculta que garantiza la firmeza y durabilidad de toda construcción, clasificándose de forma general en dos grupos, las cimentaciones directas, que transmiten las cargas directamente al suelo mediante elementos ensanchados, y las cimentaciones indirectas, que emplean elementos como pilotes para alcanzar estratos resistentes a mayor profundidad.

2.2.9. Cimientos de maquinas

Srinivasulu P. y Vaidyanathan C. V. (1976) señalan que el diseño de una base para máquinas es más complejo que el de una que solo soporta cargas estáticas. En el caso de una base para máquinas, es esencial considerar tanto las cargas estáticas como las fuerzas dinámicas generadas durante su funcionamiento. Estas fuerzas dinámicas se transmiten a la base que sostiene la máquina, por lo que el diseñador debe estar bien informado sobre el método de transmisión de carga desde la máquina y los problemas relacionados con el comportamiento dinámico de la base y el suelo subyacente.

Este campo ha quedado rezagado en comparación con otras áreas de la tecnología, en parte porque la responsabilidad del desempeño de una máquina se divide entre el diseñador de la máquina, por lo general un ingeniero mecánico, y el diseñador de la fundación, que debe crear una base que cumpla con los requisitos mecánicos y las tolerancias necesarias. Por ello, es fundamental que ingenieros mecánicos y civiles colaboren desde la etapa de planificación hasta la instalación de la maquinaria en su base.

2.2.10. Resonancia y su efecto

Tal como señalan Srinivasulu y Vaidyanathan (1976), todo sistema físico posee una frecuencia inherente, denominada "frecuencia natural". Esta representa la frecuencia a la cual el sistema oscilaría si experimentara vibraciones libres. Un aspecto crucial en el comportamiento dinámico de las máquinas y sus cimentaciones es que, al acercarse la frecuencia de operación de la máquina a la frecuencia natural de su base, las amplitudes de vibración tienden a incrementarse significativamente. Cuando ambas frecuencias se igualan, se alcanza un fenómeno conocido como "resonancia". En esta

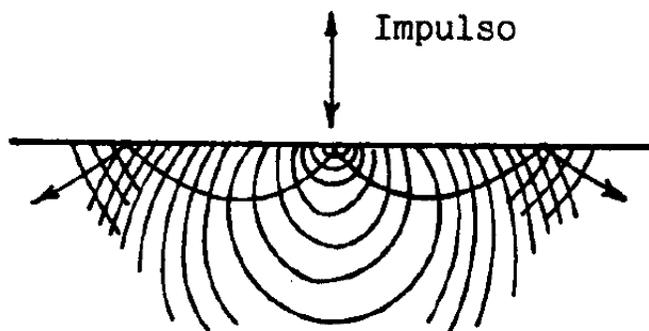
condición, además de observarse amplitudes excesivas, también suelen ocurrir asentamientos considerables en la cimentación.

Por consiguiente, un criterio fundamental en el diseño de cimentaciones para maquinaria radica en prevenir la resonancia, con el fin de limitar las amplitudes de vibración a niveles aceptables.

2.2.11. Propiedades Dinámicas del Suelo de Fundación

De acuerdo con Fratelli (1993), las vibraciones de las máquinas se transmiten a través del suelo en forma de ondas hemisféricas y elipsoidales que emanan del cimiento, como se muestra en la figura 2.2. Estas ondas, al propagarse, se atenúan y pueden ser reflejadas o refractadas por estratos de diferente densidad u obstáculos. Las ondas elásticas en el suelo son principalmente longitudinales (primarias, 5-13 km/s) y transversales (secundarias, 3-8 km/s), además de ondas superficiales como las de Rayleigh y Love. Las ondas de Rayleigh pueden tener una amplitud mayor que las primarias y secundarias a cierta distancia del origen.

Figura 0.2 *Propagación de ondas en el suelo debidas a un impulso vibratorio.*

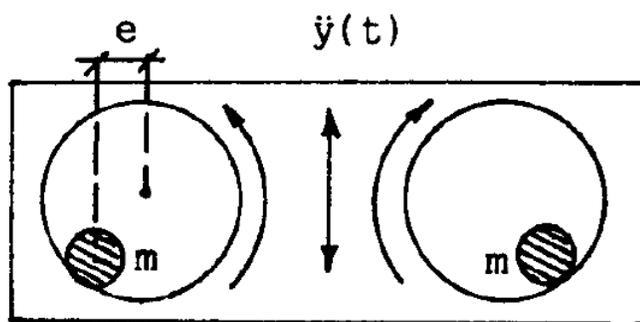


Fuente: Fratelli (1993) Tomado de Suelos, fundaciones y muros.

Explica Fratelli (1993) que las vibraciones del suelo se miden mediante ensayos con vibradores de doble masa (Figura 2.3). Estos vibradores generan oscilaciones verticales y horizontales. La interpretación de los resultados se basa en un modelo de suelo semi-infinito, elástico e isótropo. La frecuencia natural del vibrador se relaciona con las propiedades del suelo. Si la frecuencia del vibrador excede los 2/3 de la frecuencia natural del suelo, se producen asentamientos significativos.

La frecuencia relevante es la del conjunto suelo-cimiento-máquina, que depende de varios factores, como las propiedades del suelo, el área de apoyo, la masa del cimiento y el tipo de vibraciones. Los suelos blandos tienen frecuencias propias bajas, que aumentan con la compactación, la resistencia o la disminución del contenido de agua.

Figura 0.3 *Excitador armónico.*



Fuente: Fratelli (1993) Tomado de Suelos, fundaciones y muros.

2.2.12. Tipos de maquinas

La gran diversidad de tipos de maquinaria dificulta una clasificación rigurosa. Por lo tanto, como indica Fratelli (1993), se agruparán globalmente según su régimen de trabajo, considerando dos criterios principales:

2.2.12.1. Clasificación según las Fuerzas Dinámicas

Las fuerzas dinámicas producidas por las máquinas son de dos tipos: Cargas periódicas, y cargas aperiódicas.

Cargas periódicas: Oscilaciones sinusoidales (movimientos de vaivén o fuerzas centrífugas). Ejemplos: máquinas de biela-manivela, maquinas rotativas como bombas, turbinas.

Cargas aperiódicas: Choques o percusiones. Ejemplos: martinetes, prensas.

2.2.12.2. Clasificación según la Frecuencia de Excitación

Las máquinas también se pueden clasificar según su frecuencia operacional (número de revoluciones o ciclos completos por minuto) en tres categorías principales:

Baja frecuencia ($0 < f \leq 300$ rev/min): Grandes máquinas rotativas, motores diésel pesados, motogeneradores, máquinas de émbolo, máquinas de biela-manivela, motores de combustión, bombas y compresores de pistón, entre otros.

Frecuencia media ($300 < f \leq 1000$ rev/min): Máquinas de émbolo medianas, turbomáquinas lentas, motores diésel intermedios, máquinas sincrónicas estándar con partes rotativas y motores alternativos de compresores, entre otros.

Frecuencia alta o muy alta: Alta ($1000 < f \leq 3000$ rpm). Muy alta ($3000 < f \leq 10000$ rpm). Turbogeneradores, turbinas de vapor, turbodínamos y turbomáquinas en general.

Es crucial conocer la frecuencia de excitación de una máquina para diseñar cimientos cuya frecuencia natural evite la resonancia.

2.2.13. Maquinaria rotativa

De acuerdo a la American Concrete Institute (ACI, 2018) esta categoría incluye turbinas de gas, vapor y otros expansores; turbobombas y compresores; ventiladores; motores; y centrífugas. Estas máquinas se caracterizan por el movimiento giratorio de sus impulsores o rotores.

Las fuerzas desequilibradas, comunes en estas máquinas, se deben a la falta de coincidencia entre el centro de masa y el centro de rotación. Esta fuerza dinámica depende de la masa, la velocidad de rotación y el desplazamiento, el cual puede aumentar por desalineación, resonancia, pérdida de álabes u otras condiciones. La carga dinámica continua realista es la vibración justo por debajo del límite de disparo.

2.2.14. Tipos de cimientos de maquinas

Los cimientos para maquinas según Fratelli (1993) se pueden clasificar en:

1. Cimientos apoyados directamente sobre el suelo de fundación, entre los cuales define los cimientos de bloque o macizos, y cimientos de placa.
2. Cimientos indirectamente sustentados, entre los cuales define los cimientos apoticados y cimientos sobre pilotes

2.2.14.1. Cimientos de bloque o macizos

Fratelli (1993) los describe como grandes masas de concreto armado, caracterizadas por su considerable resistencia y rigidez. Se apoyan directamente sobre el suelo de fundación o se ubican dentro de fosos aislados con lechos elásticos para amortiguar vibraciones. Su altura varía entre 1.5 y 4 metros, dependiendo de la máquina. La calidad del concreto no debe ser inferior a $f'c = 200$ a 240 kg/cm^2 .

En la figura 2.4 el esquema a) muestra un cimiento macizo de una sola masa para una prensa neumohidráulica. El esquema b) presenta un cimiento macizo de doble masa (concreto armado y ciclópeo) para reducir costos.

Figura 0.4 Cimientos macizos.

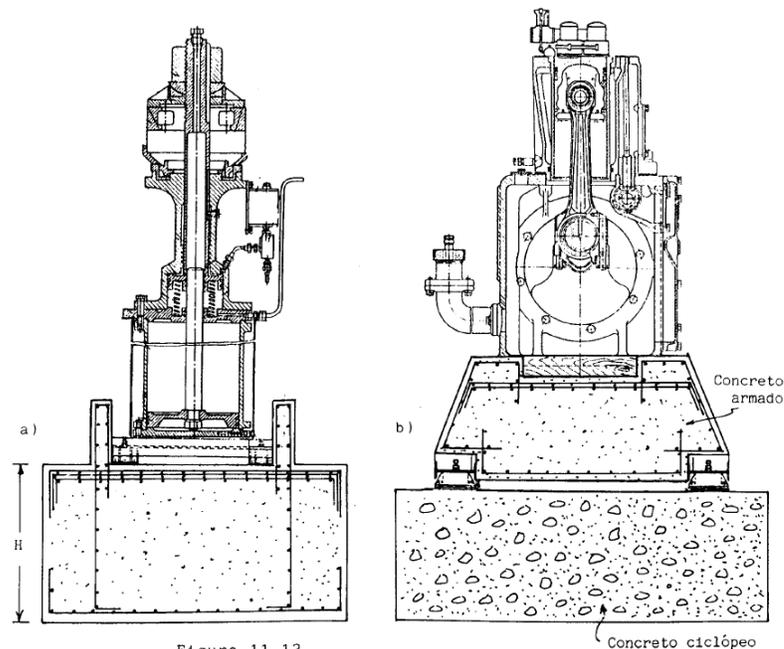


Figura 11.12

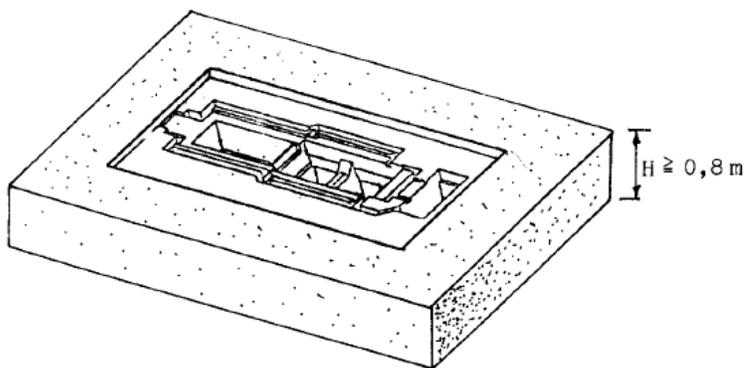
Fuente: Fratelli (1993) Tomado de Suelos, fundaciones y muros.

Resalta Fratelli (1993) que la baja frecuencia natural de los cimientos macizos ($f < 300$ rpm) los hace adecuados para máquinas de alta frecuencia ($\omega > 1500$ rpm), evitando la resonancia. Para máquinas con velocidad > 1000 rpm, recomienda frecuencias propias $f_n < 1/3$ a $1/2$ de la frecuencia de excitación. Para máquinas pesadas de baja frecuencia, $f_n > 2$ a 3 veces la frecuencia de excitación.

2.2.14.2. Cimientos de placas

Indica Fratelli (1993) que las placas de concreto armado se utilizan para aumentar la frecuencia natural y disminuir la amplitud de las oscilaciones en cimientos. Esto se logra incrementando el área de apoyo y disminuyendo la altura, mínimo 0,8 metros por razones constructivas, como se puede apreciar en la figura 2.5. Ampliar el área permite soportar varias máquinas, rigidizando la placa en forma de cajón. Simplificando el análisis del conjunto, modelándolo como un bloque rígido sobre una base elástica (suelo). Aunque el problema matemático así planteado es complejo de resolver, por lo cual en la práctica se buscan soluciones aproximadas, como asumir que cada máquina se apoya independientemente en un área proporcional a su peso y potencia, pero las amplitudes obtenidas deben incrementarse en un 25-30% como medida de seguridad

Figura 0.5 *Cimiento de placa.*



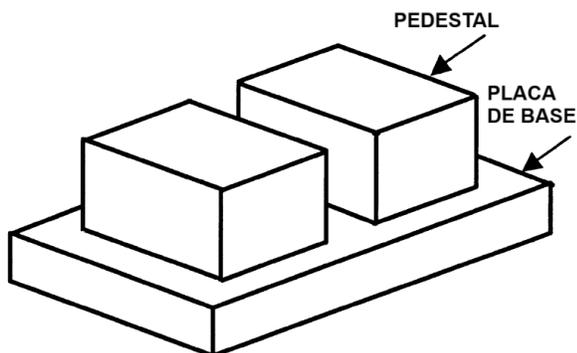
Fuente: Fratelli (1993) Tomado de Suelos, fundaciones y muros.

2.2.14.3. Cimientos de bloques combinados

Como indica ACI (2018) Cuando se requiere soportar máquinas muy próximas, se utilizan bloques combinados, un ejemplo de sus formas se puede apreciar en la figura

2.6. Su diseño es más complejo debido a la interacción de las fuerzas de dos o más máquinas y la necesidad de asegurar la rigidez de la placa de cimentación.

Figura 0.6 Cimentación tipo bloque combinado.

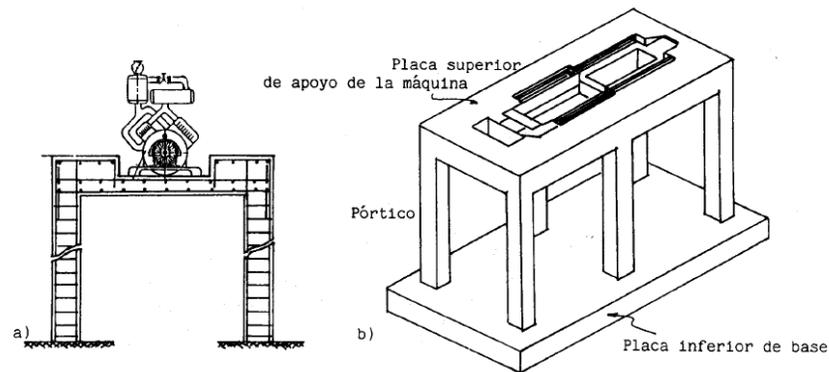


Fuente: ACI (2018) Tomado de Reporte sobre fundaciones para equipos dinámicos.

2.2.14.4. Cimientos aporticados

Según Fratelli (1993), estos cimientos consisten en placas con vigas perimetrales aporticadas con las columnas. Las placas deben armarse ortogonalmente y el concreto debe tener una resistencia mayor a 240 kg/cm². No se permiten losas armadas en una dirección. Es usual construir una placa inferior que enlace los pies de las columnas para mayor rigidez, como se puede apreciar en la figura 2.7. Este tipo de cimientos facilita la ubicación de la máquina y sus accesorios, permite una inspección más directa y es más económico. Se usan preferentemente para máquinas de alta frecuencia ($\omega \geq 3000$ rev/min).

Figura 0.7 *Cimientos aporticados.*

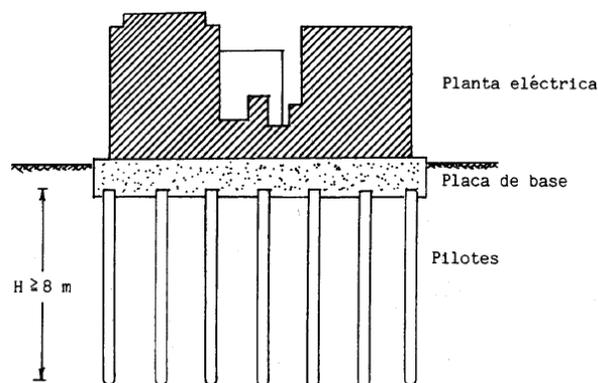


Fuente: Fratelli (1993) Tomado de Suelos, fundaciones y muros.

2.2.14.5. Cimientos sobre pilotes

Tal como propone Fratelli (1993), cuando el suelo de cimentación es débil o no homogéneo, se recurre a soluciones alternativas como la compactación o el uso de pilotes. Los pilotes, preferiblemente trabajando por punta, transfieren la carga a estratos más profundos y resistentes, tal como se observa en la figura 2.8. Para aumentar la frecuencia natural del cimiento sin aumentar el área de apoyo, se utilizan pilotes de hasta 10 metros de altura, usualmente macizos prefabricados de concreto.

Figura 0.8 *Cimiento sobre pilotes de una planta que produce vibraciones.*



Fuente: Fratelli (1993) Tomado de Suelos, fundaciones y muros.

2.2.15. Materiales empleados

Para el diseño de fundaciones, la Comisión Venezolana de Normas Industriales 1753 (COVENIN, 2006) establece que los materiales principales para la construcción de fundaciones son el concreto y el acero de refuerzo, cuyas propiedades mecánicas son fundamentales para su desempeño. Siendo el concreto armado capaz de resistir y transmitir diversas clases de esfuerzos de manera eficaz. Además, su alta densidad contribuye a que las fundaciones logren una gran masa, lo que ayuda a minimizar las vibraciones generadas por las máquinas.

2.2.15.1. Concreto

El concreto para fundaciones debe tener una resistencia a la compresión ($f'c$) mínima de 210 kgf/cm², según COVENIN (2006). Si se usan agregados livianos, $f'c$ no debe superar los 300 kgf/cm², a menos que se demuestre una resistencia y disipación de energía equivalentes al concreto de peso normal. $f'c$ se determina mediante ensayos de compresión en cilindros a los 28 días (o la edad especificada), promediando los resultados de al menos dos cilindros de la misma muestra.

2.2.15.2. Acero de Refuerzo

El acero de refuerzo, utilizado para resistir esfuerzos de tracción, corte y torsión, también debe cumplir con especificaciones de resistencia. La norma COVENIN (2006) afirma que la resistencia a la fluencia especificada para el acero de refuerzo en elementos solicitados por corte o torsión no debe exceder los 4200 kgf/cm². Para mallas de alambres electrosoldados, este límite se establece en 5600 kgf/cm².

2.2.15.3. Grouting

De acuerdo con COVENIN (2006), el grouting son morteros utilizados como relleno para la nivelación de equipos o reparaciones. Según ACI (2018), existen dos tipos básicos de grouting: Grouting cementosos, a base de cemento tienen un menor costo, y Grouting poliméricos que ofrecen mayor resistencia a los productos químicos, a los impactos y a las cargas vibratorias.

2.2.15.3.1. Funciones del Grouting

Como indica la ACI (2012) después de la colocación y endurecimiento del grouting en el espacio entre la base de una máquina o equipo y la fundación, se espera que este cumpla alguna de sus diversas funciones: mantener la alineación de la maquinaria y transferir cargas a la base; actuar junto con dispositivos de alineación en la transferencia de cargas; o solo proporcionar soporte y protección contra la corrosión.

El grouting para cimentaciones debe tener estabilidad volumétrica para garantizar un llenado completo y duradero. Los grouting simples (cemento, agregado, agua) no cumplen con esta condición, ya que pueden presentar asentamiento, contracción y sangrado, resultando en un relleno incompleto, perdiendo contacto con la placa y dejando la carga principal o completamente en las cuñas u otros dispositivos de alineación.

2.2.16. Anclajes

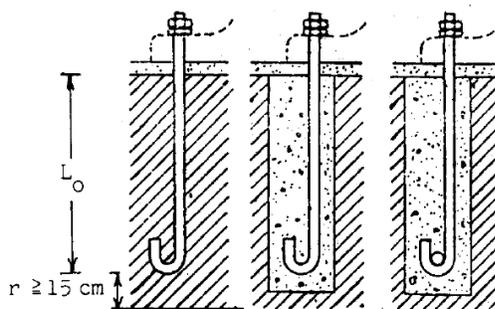
Los anclajes tienen la función de conectar la fundación con la base de la máquina para garantizar su estabilidad. Esto mediante pernos o bulones de anclaje. Como indica

Fratelli (1993), generalmente se utilizan pernos de cabeza cuadrada o hexagonal y pueden ser fijos o desmontables.

2.2.16.1. Pernos Fijos

En máquinas livianas, se suelen emplear pernos fijos con ganchos ahogados en el concreto antes del vaciado. Este método es sencillo pero permanente.

Figura 0.9 Pernos ahogados en el concreto.

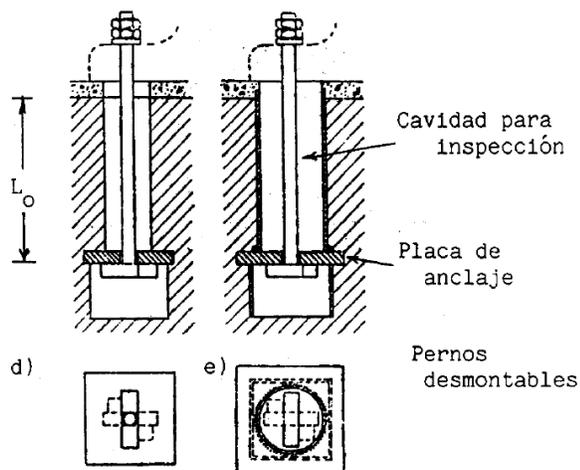


Fuente: Fratelli (1993) Tomado de Suelos, fundaciones y muros.

2.2.16.2. Pernos Desmontables

Se crean cavidades durante el vaciado del concreto, donde luego se colocan los pernos y se rellenan con concreto de alta calidad. Esto facilita el ajuste, mantenimiento y reemplazo. Los pernos se sujetan a placas de anclaje fijadas al concreto. La cavidad permanece vacía para inspección.

Figura 0.10 Pernos desmontables.



Fuente: Fratelli (1993) Tomado de Suelos, fundaciones y muros.

La longitud de anclaje usual de los pernos en concreto es de 15 a 20 veces su diámetro (ver Tabla 2.1). Se recomienda extender la longitud ahogada lo máximo posible, con un recubrimiento mínimo de 15 cm para proteger contra la corrosión y asegurar la adherencia.

Tabla 0.1 Longitud mínima L_o de anclaje de los pernos.

Pernos ϕ (mm)	L_o (cm)	
	Pernos fijos	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

Fuente: Fratelli (1993) Tomado de Suelos, fundaciones y muros.

2.2.17. Tipos de cargas en fundaciones de maquinas

Según la ACI (2018), las fundaciones para maquinaria deben resistir todas las fuerzas esperadas. Estas cimentaciones se diferencian por soportar cargas dinámicas significativas, además de las estáticas. Las cargas operativas varían según la máquina. La comunicación entre fabricante e ingeniero es clave para definir las cargas dinámicas y asegurar un diseño adecuado. Los siguientes apartados describen métodos para determinar estas cargas y otras de diseño, incluyendo definiciones y datos requeridos.

2.2.17.1. Cargas Estáticas (Carga muerta)

La cimentación soporta cargas gravitatorias (estáticas) del peso de la máquina, equipos auxiliares, tuberías y la propia estructura de cimentación. El fabricante proporciona los pesos de la máquina, y la distribución de este peso depende de los puntos de apoyo y la flexibilidad del bastidor. Generalmente, se asume que el bastidor es rígido y el peso se distribuye equitativamente entre los puntos de apoyo, a menos que el fabricante proporcione un diagrama de carga específico.

2.2.17.2. Cargas Vivas

Las cargas como el personal y equipos de mantenimiento, se consideran cargas máximas previstas durante la vida útil de la máquina y se distribuyen uniformemente sobre las áreas de acceso.

2.2.17.3. Cargas de Viento

Las cargas de viento se calculan según la normativa local, como la Norma COVENIN 2003-89 en Venezuela o la ASCE 7 en otros contextos, basándose en la

velocidad del viento de diseño. Generalmente, no son un factor crítico en el diseño de cimentaciones de maquinaria, excepto en casos específicos, por lo cual para el caso de estudio no serán consideradas.

2.2.17.4. Cargas Sísmicas

El diseño de cimentaciones en zonas sísmicas requiere un análisis que incorpore las cargas sísmicas. Para este análisis, se utilizan códigos de construcción y normativas como la COVENIN 1756-01, que establece los requisitos para edificaciones sismorresistentes en Venezuela.

2.2.17.5. Cargas Estáticas de Funcionamiento

Incluyen el peso de fluidos en el equipo y fuerzas como el torque de accionamiento. La ACI (2018) indica que el torque normal se puede calcular y se aplica a la cimentación, considerando la ubicación de los puntos de apoyo. Su magnitud se calcula a partir de la siguiente fórmula:

$$Nt = \frac{(9550) * Ps}{fo}$$

(Ecuación 2.1)

Donde:

Nt: Torque normal (m-N)

Ps: Potencia que transmite el eje en la conexión (KW)

fo: velocidad de operación (rpm)

Este se aplica a la cimentación como un par de fuerzas verticales, y su magnitud se calcula dividiéndolo por la distancia entre centros de las placas o puntos de anclaje.

También se deben considerar torques de arranque y momentos por cortocircuito, este último como una carga accidental.

2.2.17.6. Cargas de Montaje y Mantenimiento

Son cargas temporales de equipos como grúas, necesarias para instalar o mantener la maquinaria. Se incluyen en el plano de cargas del fabricante.

2.2.17.7. Cargas Térmicas

Los cambios de temperatura causan dilataciones y contracciones, generando fuerzas de fricción que dependen de varios factores. Se pueden calcular cargas de fricción aproximadas, pero un análisis riguroso es complejo. Se deben considerar las temperaturas de la superficie del concreto y los gradientes térmicos.

2.2.17.8. Cargas de Máquinas Rotativas

De acuerdo con ACI (2018), las máquinas rotativas, caracterizadas por el movimiento giratorio de sus rotores, experimentan fuerzas dinámicas debidas principalmente a masas desequilibradas. Estas fuerzas centrífugas, proporcionales al cuadrado de la velocidad, se transmiten a los cimientos a través de los rodamientos. La magnitud de la fuerza depende del desequilibrio, la geometría del rotor, la velocidad y las características del sistema rotor-rodamiento. Idealmente un análisis dinámico del sistema, realizado por el fabricante, determina la fuerza transmitida y proporciona la información al ingeniero de diseño de la cimentación. Cuando no se dispone de información sobre estas fuerzas la norma ACI 351 proporciona fórmulas que resultan

útiles para el diseño de la fundación y que se detallan algunas de las más importantes a continuación:

2.2.17.8.1. Excentricidad de la máquina proporcionado por el fabricante

Cuando el desequilibrio de la masa (excentricidad) es conocido o indicado por el fabricante, la amplitud de la fuerza dinámica resultante es:

$$F_o = m_r * e_m * \omega_o^2 * Sf / 1000$$

(Ecuación 2.2)

Donde:

F_o : Amplitud de la fuerza dinámica (de cero a pico) (N).

m_r : Masa giratoria (kg).

e_m : Excentricidad de la masa (mm).

ω_o : Frecuencia de funcionamiento circular de la máquina (rad/seg).

Sf : Factor de servicio, que considera el desequilibrio durante la vida útil de la máquina, suele ser mayor o igual a 2.

2.2.17.8.2. Excentricidad de la maquina desconocida

Ante la falta de información sobre la excentricidad en máquinas rotativas, se emplean fórmulas empíricas para el diseño de cimentaciones. Estas fórmulas consideran un desequilibrio mínimo, con un margen para su incremento. Un enfoque común asume que el equilibrado mejora con la velocidad y que las fuerzas de desequilibrio varían linealmente con dicha velocidad. La amplitud de la fuerza centrífuga se determina mediante esta fórmula:

$$F_o = W_r * f_o / 6000$$

(Ecuación 2.3)

Donde:

F_0 : Amplitud de la fuerza dinámica (de cero a pico) (N)

W_r : Peso giratorio (N)

f_0 : Velocidad de operación (rpm)

2.2.17.8.3. Cargas de Varias Máquinas Giratorias

Si una fundación soporta varias máquinas giratorias, la ACI (2018) indica se debe calcular la fuerza desequilibrada para cada componente y luego combinarlas para determinar la respuesta total. El método de combinación depende del criterio individual y puede implicar aproximaciones. Se deben considerar los efectos de batido cuando dos máquinas funcionan a velocidades similares.

2.2.17.9. Combinaciones de Carga.

De acuerdo con la norma COVENIN 1756 (2001), el diseño de fundaciones superficiales y pilotes exige el uso de combinaciones de carga específicas para cada condición de carga, aplicando los factores de carga correspondientes. Los casos de carga a considerar se detallan en la Tabla 2.2.

Tabla 0.2 *Combinaciones de cargas propuestas por norma COVENIN 1756.*

Caso de análisis	Q
Con solicitaciones sísmicas	1.1 CP + CV ± S 0,9 CP ± S
Postsísmico	1.1 CP + CV

Donde:

Q: Solicitaciones para la verificación de la capacidad portante.

CP: Efecto de cargas permanentes.

CV: Efecto de cargas variables.

S: Efecto de acciones sísmicas, calculado según el Artículo 8.6.

2.2.18. Fundamentos del Modelo del Semiespacio Elástico

El manual de ingeniería de diseño de PDVSA (1991) especifica el uso de la "Teoría del Semiespacio Elástico" para una evaluación más confiable de los parámetros dinámicos en el diseño de fundaciones para maquinaria. Esta teoría, desarrollada inicialmente por Reisner, modela el sistema como un oscilador de disco rígido, que representa la cimentación rígida de base circular, apoyado sobre un semiespacio elástico, isótropo, homogéneo y semi-infinito, que representa el suelo sobre el cual descansa la cimentación. El comportamiento elástico del semiespacio se define mediante dos parámetros principales: el módulo de corte (G_s) y la relación de Poisson (ν).

El trabajo de Reisner permitió simplificar el sistema dinámico real a un modelo de un grado de libertad (masa, resorte, amortiguador), facilitando el análisis. Ensayos de campo corroboraron la validez de este enfoque, mostrando concordancia con la Teoría del Semiespacio Elástico. Se han desarrollado aproximaciones del modelo que representan el suelo mediante constantes equivalentes de rigidez y amortiguamiento viscoso. La rigidez y el amortiguamiento dependen de la frecuencia, lo que complica el análisis.

El modelo básico del semiespacio es estrictamente válido para fundaciones aisladas, no representa la interacción entre fundaciones cercanas. Señalan que la experiencia indica que la presencia de fundaciones adyacentes disminuye la rigidez y el

amortiguamiento geométrico del suelo para cada zapata individual. Estos efectos de interacción deben considerarse en el diseño de grupos de fundaciones.

2.2.19. Información requerida para el análisis

El manual de ingeniería de diseño de Petróleos de Venezuela (PDVSA, 1991) para “Fundaciones de compresores reciprocantes destaca la importancia de la información del fabricante para el diseño de fundaciones para maquinaria que genera vibraciones. Los datos que deben ser proporcionados se pueden clasificar en:

- a) Parámetros de Operación: Velocidad nominal y potencia nominal.
- b) Cargas Dinámicas: Tipo, magnitud, punto de aplicación y frecuencia.
- c) Cargas Estáticas: Distribución y peso total.
- d) Características Físicas: Tamaño y forma de la base, ubicación y dimensiones de orificios, y planos o diagramas de la máquina.

2.2.20. Dimensionamiento de la Fundación

Como señala PDVSA (1991), la fundación de un compresor consiste en un pedestal de concreto y una zapata. El pedestal debe sobresalir un mínimo de 38 mm de la base del compresor y cumplir con la distancia entre pernos y borde. El ancho de la zapata será 1.5 veces la distancia desde el eje del compresor hasta el fondo de la fundación, y su longitud 610 mm mayor que la del pedestal. El espesor de la zapata será $\frac{2}{3}$ de la distancia entre el borde del pedestal y la zapata, y nunca menor a 457 mm. Cuando varios compresores comparten una placa común, cuyo espesor se determinará considerando el ancho y largo efectivo de cada compresor. La placa se extiende hasta

los bordes de la edificación, pero esto puede transmitir vibraciones a las columnas. La superficie superior de la placa estará 152 mm sobre el nivel del terreno.

2.2.21. Constante de Resorte o constante de rigidez

Khazam y Osechas (2008) destacan la importancia de la constante de resorte en el análisis de sistemas de un grado de libertad. Esta constante representa la resistencia del suelo a la deformación. Existen fórmulas (Suresh, 1979) para calcularla en diferentes modos de vibración (vertical, horizontal y rotacional) para fundaciones circulares y rectangulares sobre un semiespacio elástico, considerando la geometría de la fundación y las propiedades del suelo.

Para las Zapatas Rectangulares tenemos las siguientes formulas para cada modo de vibración:

Vertical:

$$K_z = \frac{G_s * \beta_z * \sqrt{B * L} * N_z}{1 - \nu}$$

(Ecuación 2.4)

Horizontal:

$$K_x = 2 * (1 + \nu) * G_s * \beta_x * \sqrt{B * L} * N_x$$

(Ecuación 2.5)

Rotación horizontal:

$$K_\psi = \frac{G_s * \beta_\psi * (B * L)^2 * N_\psi}{1 - \nu}$$

(Ecuación 2.6)

En donde:

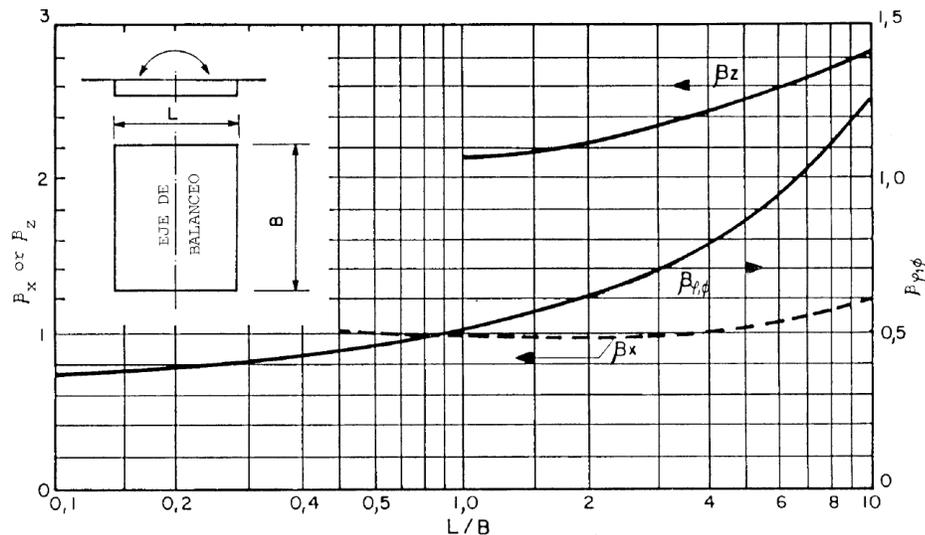
B: Longitud paralela al eje de balanceo de la fundación.

L: Longitud perpendicular al eje de balanceo de la fundación.

β : Los valores de β_z , β_x , β_y , se obtendrán con la figura 2.11

N: Coeficientes de enterramiento, se obtendrán con sus respectivas formulas.

Figura 0.11 Coeficientes β_z , β_x , β_y para cimentaciones rectangulares.



Fuente: PDVSA (1991). Tomado de: Manual de Ingeniería de Diseño. "Fundaciones de compresores recíprocos."

En el análisis del modo de rotación vertical en zapatas rectangulares, se recurre al concepto de radio equivalente (r_0) debido a la falta de soluciones analíticas directas. Este radio equivalente permite aproximar la zapata rectangular a una circular, facilitando la aplicación de las fórmulas correspondientes.

El cálculo de las constantes de resorte para zapatas circulares se realiza mediante fórmulas específicas para cada modo de vibración.

Vertical:

$$K_z = \frac{4 * (G_s * 1000) * r_0 * N_z}{1 - \nu}$$

(Ecuación 2.7)

Horizontal

$$K_x = \frac{32 * (1 - \nu) * (Gs * 1000) * r_0 * N_h}{7 - 8 * \nu}$$

(Ecuación 2.8)

Rotación horizontal:

$$K_\psi = \frac{8 * (Gs * 1000) * r_0^3 * N_\psi}{3 * (1 - \nu)}$$

(Ecuación 2.9)

Rotación vertical:

$$K_\theta = \frac{16 * (Gs * 1000) * r_0^3}{3}$$

(Ecuación 2.10)

Las fórmulas derivadas del modelo del semiespacio elástico son aplicables principalmente a fundaciones superficiales o poco profundas. El enterramiento de la fundación influye en la frecuencia natural del sistema; sin embargo, este efecto se vuelve significativo solo cuando la profundidad de enterramiento es comparable con el ancho de la base de la fundación.

2.2.22. Radio Equivalente (r_0)

Khazam y Osechas (2008) explican que las fórmulas del semiespacio elástico se basan en fundaciones circulares. Para aplicar estas fórmulas a fundaciones rectangulares, se introduce el concepto de radio equivalente (r_0). Este radio representa una fundación circular con un comportamiento dinámico similar al de la rectangular. Existen fórmulas específicas para calcular r_0 en cada modo de vibración (vertical, horizontal, balanceo y torsión) se formulan a continuación:

Vertical

$$r_0 = \sqrt{\frac{B * L}{\pi}}$$

(Ecuación 2.11)

Horizontal

$$r_0 = \sqrt{\frac{B * L}{\pi}}$$

(Ecuación 2.12)

Rotación horizontal

$$r_0 = \sqrt[4]{\frac{B * L^3}{3 * \pi}}$$

(Ecuación 2.13)

Rotación vertical

$$r_0 = \sqrt[4]{\frac{B * L * (B^2 + L^2)}{6 * \pi}}$$

(Ecuación 2.14)

PDVSA (1991) establece las siguientes conclusiones sobre el uso del radio equivalente (r_0) en el cálculo de la constante de resorte:

- a) Vibración vertical: La constante de resorte es comparable para fundaciones con una relación largo/ancho (L/B) menor o igual a 3.
- b) Vibración horizontal: La constante de resorte es comparable para fundaciones con L/B menor o igual a 6.

- c) Vibración de balanceo: La constante de resorte es comparable para fundaciones con L/B entre 0.5 y 2.

En resumen, r_0 puede utilizarse para determinar la constante de resorte siempre que la forma de la fundación cumpla con estos requisitos.

2.2.23. Coeficientes de enterramiento (N)

Khazam y Osechas (2008) señalan que el enterramiento de la fundación afecta la rigidez y el amortiguamiento. Sin embargo, este efecto puede reducirse con el tiempo. Por lo tanto, se recomienda usar 2/3 de la profundidad real de enterramiento.

Los coeficientes de enterramiento, que cuantifican el efecto del enterramiento en la rigidez y el amortiguamiento, se calculan mediante las siguientes fórmulas:

Vertical:

$$N_z = \frac{1 + 0,61 * (1 - \nu) * h}{r_0}$$

(Ecuación 2.15)

Horizontal

$$N_x = \frac{1 + 0,55 * (2 - \nu) * h}{r_0}$$

(Ecuación 2.16)

Rotación horizontal

$$N_\psi = 1 + 1,2 * (1 - \nu) * \frac{h}{r_0} + 0,2 * (2 - \nu) * \left(\frac{h}{r_0}\right)^3$$

(Ecuación 2.17)

Donde:

h = Profundidad de enterramiento

Consideran importante señalar que, para el modo de rotación vertical, no existen fórmulas analíticas directas para determinar el factor de enterramiento. Generalmente, el enterramiento incrementa la frecuencia natural del sistema, pero este cambio es significativo solo cuando la profundidad es comparable al ancho de la base.

2.2.24. Amortiguamiento

Como indica el manual de ingeniería de diseño de PDVSA (1991), el amortiguamiento en un sistema suelo-fundación consta de dos componentes principales:

2.2.24.1. Amortiguamiento Geométrico

Representa la energía disipada por la propagación de ondas elásticas lejos de la fundación, y se obtiene mediante el modelo del semiespacio elástico. Existen ecuaciones para calcular la relación de amortiguamiento geométrico (D) en cimentaciones rígidas circulares, considerando la geometría de la fundación y las propiedades del suelo. Las fórmulas para calcular las relaciones de amortiguamiento geométrico para los diferentes modos de vibración son:

Vertical:

$$D_z = \frac{0,425 * \alpha_z}{\sqrt{B_z}}$$

(Ecuación 2.18)

Horizontal:

$$D_h = \frac{0,288 * \alpha_h}{\sqrt{B_h}}$$

(Ecuación 2.19)

Rotación horizontal:

$$D_{\psi} = \frac{0,15 * \alpha_{\psi}}{(1 + N_{\psi} * B_{\psi})\sqrt{N_{\psi} * B_{\psi}}}$$

(Ecuación 2.20)

Rotación vertical:

$$D_{\theta} = \frac{0,5}{1 + 2 * B_{\theta}}$$

(Ecuación 2.21)

El efecto del enterramiento en estas ecuaciones se modela mediante dos factores: N, el coeficiente de enterramiento, y α , el factor de amortiguamiento por embutimiento. Además del factor B que representa la relación de masas o inercias del sistema suelo fundación.

2.2.24.1.1. Relación de masas o inercias

Las relaciones de amortiguamiento geométrico se calculan a partir de las relaciones de masa o inercia. Las fórmulas para calcular las relaciones de masa para cada modo de vibración son las siguientes:

Vertical:

$$B_z = \frac{(1 - \nu)}{4} * \frac{W_t}{\gamma * r_0^3}$$

(Ecuación 2.22)

Horizontal:

$$B_h = \frac{(7 - 8\nu)}{(32 * (1 - \nu))} * \frac{W_t}{\gamma * r_0^3}$$

(Ecuación 2.23)

Rotación horizontal:

$$B_{\varphi} = \frac{3 * (1 - \nu)}{8} * \frac{I_{\varphi}}{\rho * r_0^5}$$

(Ecuación 2.24)

Rotación vertical:

$$B_{\theta} = \frac{I_{\theta}}{\rho * r_0^5}$$

(Ecuación 2.25)

Donde:

W = Peso del sistema Fundación + Máquina

I = Momento de Inercia

 ρ = Densidad del suelo

2.2.24.1.2. Factor de amortiguamiento por embutimiento (α)

Los factores α son coeficientes que ajustan la relación de amortiguamiento para reflejar el incremento debido al enterramiento efectivo. Para el cálculo de la relación de amortiguamiento en los diferentes modos de vibración, se utilizan las siguientes fórmulas:

Vertical:

$$\alpha_z = \frac{\left(1 + 1,9 * (1 - \nu) * \left(\frac{h}{r_0}\right)\right)}{\sqrt{N_z}}$$

(Ecuación 2.26)

Horizontal:

$$\alpha_x = \frac{(1 + 1,9 * (2 - \nu) * \left(\frac{h}{r_0}\right))}{\sqrt{N_x}}$$

(Ecuación 2.27)

Rotación horizontal:

$$\alpha_{\psi} = \frac{(1 + 0,7 * (1 - \nu) * \left(\frac{h}{r_0}\right) + 0,6 * (2 - \nu) * \left(\frac{h}{r_0}\right)^3)}{\sqrt{N_{\psi}}}$$

(Ecuación 2.28)

Rotación vertical:

$$D_{\theta} = \frac{0,5}{1 + 2 * B_{\theta}}$$

(Ecuación 2.29)

Para el cálculo del Factor de amortiguamiento también se recomienda utilizar un valor conservador de la profundidad de enterramiento, generalmente 2/3 de la real.

2.2.24.2. Amortiguamiento interno

Indica PDVSA (1991) que este representa la energía disipada por la fricción interna entre las partículas del suelo o el movimiento relativo entre la matriz del suelo y el fluido intersticial, es un factor importante en el análisis de vibraciones. En suelos no cohesivos secos, la pérdida de energía se debe principalmente a la fricción entre partículas, mientras que en suelos saturados o húmedos, la pérdida se debe al movimiento relativo entre la matriz del suelo y el agua intersticial. Según Richart (1970), se puede asumir un valor de 0.05 para la relación de amortiguamiento interno ($D_i = 0.05$). Este valor se suma al amortiguamiento geométrico. Para vibraciones horizontales y verticales, el amortiguamiento geométrico suele ser significativamente mayor que el interno, por lo que este último podría despreciarse en estos casos. Sin embargo, para vibraciones torsionales y de balanceo, los valores de amortiguamiento geométrico suelen

ser bajos y similares a los del amortiguamiento interno. En estos casos, se debe sumar el valor de amortiguamiento interno de 0.05 al geométrico.

En todo caso la relación de amortiguamiento interno también puede estimarse utilizando los valores de la tabla 2.3.

Tabla 0.3 Valores típicos de amortiguamiento interno.

Tipo de suelo	Amortiguamiento interno (D_i)
Arena y grava secas	0,03 a 0,07
Arena seca y saturada	0,01 a 0,03
Arena seca	0,03
Arenas y gravas secas y saturadas	0,05 a 0,06
Arcillas	0,02 a 0,05
Arena sedimentada	0,03 a 0,1

Fuente: Richart, Hall y Woods (1970) Vibrations of soils and foundations.

2.2.25. Análisis Dinámico de la Fundación

Finalmente, se realiza el análisis dinámico de la fundación utilizando los parámetros calculados. Los factores a calcular en este análisis son la frecuencia natural, el factor de amplificación dinámica, el factor de transmisibilidad, la frecuencia de resonancia y las amplitudes de vibración los cuales se definen de la siguiente forma:

2.2.26. Frecuencia Natural (F_n)

La frecuencia natural de la cimentación según Khazam y Osechas (2008), representa la frecuencia a la que el sistema vibrará libremente sin ninguna fuerza externa aplicada. Se calcula de la siguiente manera:

Traslación en los ejes X, Y, Z:

$$F_n = \frac{60}{2\pi} * \sqrt{\frac{K_z}{m}}$$

(Ecuación 2.30)

Rotación en los ejes X, Y, Z:

$$F_n = \frac{60}{2\pi} * \sqrt{\frac{K}{I}}$$

(Ecuación 2.31)

En los cálculos de rotación, se sustituye la masa (m) por el momento de inercia (I) respecto al eje de rotación.

2.2.27. Factor de Amplificación Dinámica (M)

Como señalan Khazam y Osechas (2008) este factor es la relación entre la amplitud dinámica de la masa a una frecuencia dada y la amplitud que se obtendría si la fuerza dinámica se aplicara estáticamente. Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$M = \sqrt{\frac{1}{\left[\left(1 - \left(\frac{F}{Fn} \right)^2 \right)^2 + \left(2 * D * \frac{F}{Fn} \right)^2 \right]}}$$

(Ecuación 2.32)

Donde:

F = Frecuencia de operación de la máquina

D = Amortiguamiento total (relación de amortiguamiento)

2.2.28. Factor de Transmisibilidad (Tr)

Khazam y Osechas (2008) señalan que las fuerzas y momentos que actúan sobre el terreno son diferentes de los generados por la máquina. Esta diferencia se debe al

Factor de Transmisibilidad (T_r), definido como la relación entre la fuerza o momento transmitido al terreno y la fuerza o momento original generado por la máquina. Se calculan mediante la siguiente ecuación:

$$T_r = M * \sqrt{1 + [2 * D * (F/F_n)]^2}$$

(Ecuación 2.33)

Donde:

M: es el Factor de Amplificación Dinámica.

El factor de transmisibilidad se calcula para las fuerzas en las direcciones X, Y, Z y los momentos en las direcciones X, Y, Z.

2.2.29. Frecuencia de Resonancia (f_r)

La definen Khazam y Osechas (2008) como la frecuencia a la cual se produce la máxima amplitud de vibración. Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$f_r = \frac{F_n}{\sqrt{1 - 2 * D^2}}$$

(Ecuación 2.34)

2.2.30. Amplitudes de la Fundación

PDVSA (1991) indica que establecer un valor máximo absoluto para las amplitudes de vibración es complejo, ya que depende de diversos factores como:

La velocidad de la máquina: A mayor velocidad, menor amplitud tolerable, esto se debe a que las vibraciones de mayor frecuencia pueden ser más perjudiciales tanto para la máquina como para las estructuras circundantes.

Entorno de la máquina: Las amplitudes tolerables son menores en entornos sensibles a las vibraciones.

2.2.30.1. Determinación de Amplitudes Permisibles

La figura 2.12 muestra los niveles de tolerancia humana y de la maquinaria a las vibraciones, lo que ayuda a determinar la amplitud permisible para varios modos de vibración, tomando en cuenta tanto los requerimientos de la máquina como la sensibilidad del entorno. Estos valores, sugeridos por Richart, podrían ser adoptados para diseños preliminares. La línea sombreada indica solo el límite de seguridad, y no, el límite para el funcionamiento satisfactorio del equipo dinámico.

Las amplitudes de la fundación se calculan con las siguientes ecuaciones:

Traslación (para los ejes X, Y, Z):

$$A = \frac{M * F}{K}$$

(Ecuación 2.35)

Donde:

F: es la carga sobre el centro de gravedad del sistema.

Rotación (para los ejes X, Y, Z):

$$A = \frac{M * M_0}{K}$$

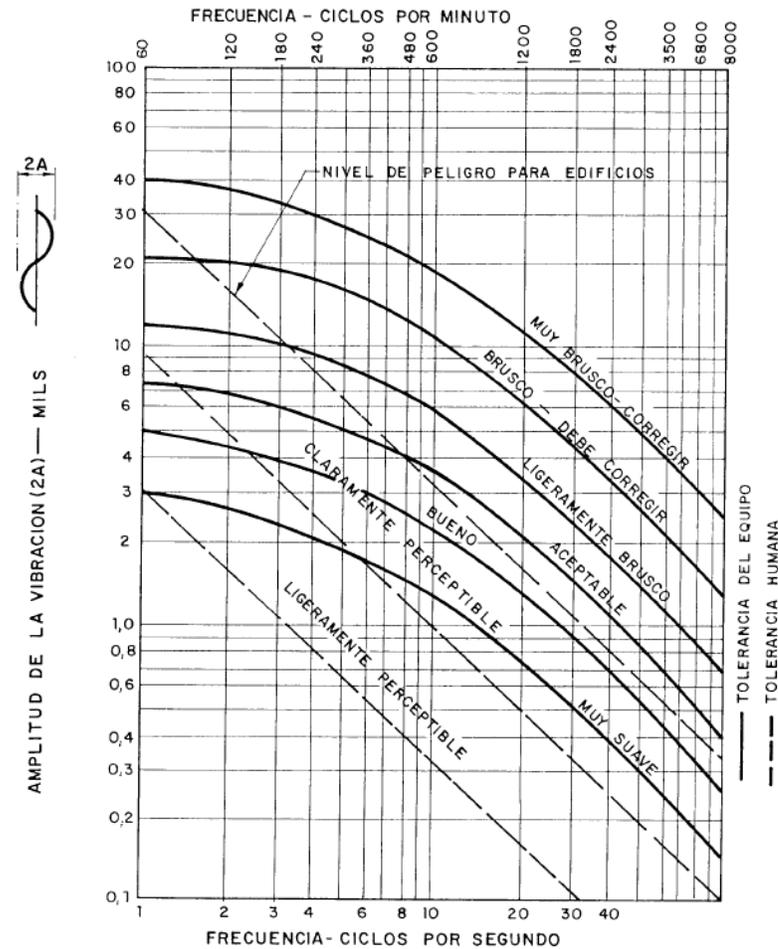
(Ecuación 2.36)

Donde:

M_0 : es el momento actuante en la fundación.

Amplitudes de vibración elevadas en la fundación pueden generar riesgos para estructuras cercanas, inestabilidad y asentamientos no uniformes, e incluso la destrucción de la fundación y daños a la máquina. Es importante notar que las ecuaciones de cálculo de amplitudes entregan valores sencillos, mientras que los instrumentos de medición registran amplitudes pico a pico (doble de la sencilla). Por lo tanto, para usar la Figura 2.12, se debe duplicar el valor de amplitud calculado.

Figura 0.12 Grafica de demandas medioambientales.

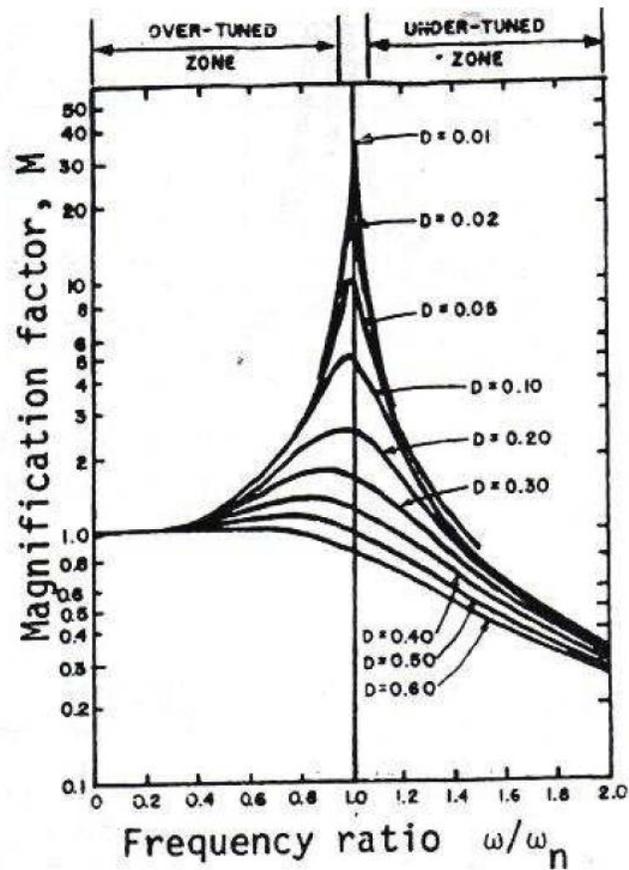


Fuente: PDVSA (1991). Tomado del manual de Ingeniería de Diseño. "Fundaciones de compresores recíprocos."

2.2.31. Estudio de Resonancia

Como señala PDVSA (1991), en un sistema no amortiguado, si la frecuencia natural (f_n) coincide con la frecuencia de operación, la amplitud teórica es infinita. Con amortiguamiento, la amplitud es finita, pero puede ser excesiva. La Figura 2.13 ilustra este fenómeno. Para evitar la resonancia (la zona de altas amplitudes), la relación de frecuencias $R = F/F_n$ (frecuencia de operación entre frecuencia natural) debe estar preferiblemente fuera del rango de valores entre 0.7 y 1.4.

Figura 0.13 Grafica relación de frecuencia Vs Factor de magnificación.



Fuente: Suresh, O'Neill y Pincus. (1979) Design of Structures and Foundations for Vibrating Machines.

Los modos traslacionales de vibración suelen tener un alto amortiguamiento, por lo que la resonancia no suele ser crítica. Sin embargo, los modos rotacionales, con menor amortiguamiento, requieren mantener la relación de frecuencias fuera del rango de resonancia.

CAPITULO III

MARCO METODOLÓGICO

Este capítulo aborda la metodología seguida en la realización del proyecto de investigación, detallando los procedimientos y técnicas utilizados. Inicialmente, se presenta el tipo y diseño de la investigación, junto con las técnicas empleadas para la recolección de datos y sus características. A continuación, se describe el proceso metodológico dividido en etapas, siguiendo una secuencia lógica para clarificar los diversos procedimientos necesarios para llevar a cabo el proyecto de investigación.

3.1. Tipo de investigación

El proyecto de investigación se fundamenta en la tipología de investigación mixta, combinando elementos documentales y de campo, según la clasificación propuesta por Arias (2012).

Investigación documental: Se basa en la revisión de fuentes bibliográficas como proyectos de investigación, libros especializados, páginas web y manuales, para establecer las bases teóricas y normativas para el diseño de cimentaciones, y realizar comparaciones con el caso específico del soplador de caldera 32-U-601C.

Investigación de campo: Se centra en el estudio de la cimentación existente mediante un diseño "post facto", ya que se analizan las condiciones de la cimentación y el equipo después de que han ocurrido eventos o fallas. Donde se describen y examinan las condiciones de los componentes sin manipular variables. El análisis de la cimentación existente permitirá identificar las fallas y áreas de mejora.

En resumen, este proyecto combina la investigación documental y de campo para abordar de manera integral el análisis y diseño de la fundación del soplador de caldera 32-U-601C. La investigación documental proporciona el marco teórico y conceptual, mientras que la investigación de campo aporta los datos primarios y la evidencia empírica necesaria para comprender la situación actual y proponer soluciones de diseño adecuadas para la fundación del soplador de caldera 32-U-601C cumpla con los requerimientos técnicos y normativos.

3.2. Nivel de la investigación

Arias (2012) sostiene que el nivel de investigación se relaciona con la profundidad con la que se analiza un fenómeno u objeto de estudio. Es fundamental tener en cuenta que el tipo de investigación realizada influye en el nivel de profundidad que se deba explorar.

A partir de sus conceptos, se pudieron establecer los diferentes niveles de investigación que fueron llevados a cabo en el presente proyecto.

Investigación Descriptiva: Se trata de identificar y describir un hecho, fenómeno, individuo o grupo, con el objetivo de determinar su estructura y comportamiento. Los resultados de este tipo de investigación se encuentran en un nivel intermedio en términos de profundidad de conocimiento.

Investigación Explicativa: Se centra en encontrar la razón detrás de los hechos estableciendo relaciones causa-efecto. De esta manera, los estudios explicativos pueden abarcar tanto la identificación de causas (investigación post facto) como de efectos (investigación experimental), a través de la verificación de hipótesis. Sus resultados y conclusiones proporcionan el nivel más profundo de conocimientos.

Este proyecto de investigación se caracterizó por un enfoque descriptivo-explicativo. Se buscó identificar y describir las maquinarias que se asentaron sobre la cimentación, así como explicar las cargas que actuaron sobre la misma, mediante cálculos específicos. El estudio abarcó la descripción, registro e interpretación de los resultados obtenidos, para luego analizarlos y determinar las dimensiones y características necesarias para garantizar la resistencia y estabilidad de la cimentación, respondiendo a las necesidades del proyecto.

3.3. Población

De acuerdo con Sampieri, Fernández y Baptista (2006), la población o universo de estudio se define como el conjunto total de elementos, sujetos, objetos, sucesos o comunidades que comparten características comunes y que son objeto de investigación, según el enfoque de la misma.

En este estudio, la población se delimita a las fundaciones presentes en la planta de fertilizantes nitrogenados PEQUIVEN, específicamente aquellas que soportan máquinas rotativas que generan vibraciones. Estas fundaciones se encuentran ubicadas en el Complejo Petroquímico José Antonio Anzoátegui, en el Estado Anzoátegui, Venezuela.

3.4. Muestra

Tal como señalan Sampieri, Fernández y Baptista (2006), la muestra es un subgrupo de la población, un subconjunto de elementos que forman parte de ella y que reflejan fielmente sus características. Dado que no siempre es factible estudiar a la

totalidad de la población, se selecciona una muestra representativa para obtener información relevante.

En este estudio, se ha elegido como muestra la fundación del soplador de caldera 32-U-601C, ubicada en el Complejo Petroquímico José Antonio Anzoátegui. Esta selección se justifica por su representatividad en términos de cargas, tiempo de servicio y el aumento significativo de las vibraciones registradas. Adicionalmente, es una fundación con características típicas de las cimentaciones de maquinaria presentes en la industria petroquímica, lo que la convierte en un caso de estudio pertinente.

3.5. Técnicas e instrumentos utilizados

El procedimiento para obtener los datos necesarios para responder a los objetivos propuestos en correspondencia con el problema y el diseño de la investigación, fue haciendo uso de las técnicas de investigación:

Técnica de análisis Documental: Se realizó una revisión bibliográfica exhaustiva sobre cimentaciones de máquinas rotativas, abarcando fuentes como proyectos de investigación, libros especializados, páginas web y manuales. Esto permitió construir una base teórica sólida, conocer los pasos a seguir, las características relevantes para el diseño, así como recomendaciones y lineamientos para este tipo de cimentaciones.

Técnica de la Observación: La investigación de campo presente en este proyecto requirió el uso de esta técnica, consiste en captar visualmente, de forma sistemática, la situación producida, en función de los objetivos preestablecidos. De acuerdo al alcance de la inspección están establecidos dos tipos:

Observación no estructurada: Denominada en el proyecto como “*Inspección tipo A1*” esta se realizó con equipos básicos, sin requerimientos de facilidades de acceso, ni preparación de superficie.

Observación estructurada: Denominada en el proyecto como “*Inspección tipo A2*” en la cual se aplicaron mediciones que requirieron facilidades de acceso y preparación de superficies.

Estas observaciones son reflejadas en tablas y gráficos, para ser viable el proceso de análisis y planteamiento de resultados.

Entrevista no estructurada Se recopiló información relevante para la solución del problema a través de entrevistas no estructuradas con personal con experiencia en la operación de las estaciones y equipos. Esto permitió obtener una visión general de las capacidades, funcionamiento y posibles fallas presentes en los mismos.

Fichas o Planillas de Recolección de Datos: Se utilizaron fichas o planillas para registrar de forma organizada los datos relevantes observados durante la inspección y el diseño de la infraestructura. Esto facilitó la clasificación y el análisis de los datos, permitiendo obtener conclusiones sobre el tema.

Técnica de análisis FODA: Se realizó un análisis FODA para comparar el diseño original de la cimentación con el nuevo diseño propuesto en este proyecto. Esto permitió identificar las debilidades, fortalezas, amenazas y oportunidades de cada diseño, facilitando la toma de decisiones.

Los instrumentos que se emplearon en la recolección y análisis de datos son los siguientes:

Planilla de Revisión: Son planillas con formatos previamente establecidos que se emplearon para anotar la información recabada durante la investigación de campo, en relación al estado y características observadas en la infraestructura.

Cámara: Se usó para obtener un registro audiovisual de las instalaciones y su estado, sirviendo como respaldo visual.

Libreta de Anotaciones: En esta se asentó la información obtenida al momento de realizar cálculos de diseño que son relevantes, también como diario de campo, así como cualquier otra eventualidad.

Computadora: Fue usada como medio para investigar a través de internet, emplear programas para elaboración de contenido del presente proyecto de investigación, como también para almacenamiento, control de datos e información necesarios para el avance de la investigación.

Equipos y herramientas:

Para la realización de la investigación de campo se utilizó: casco de seguridad con orejeras, guantes de seguridad, cepillo de alambre, cinta métrica, vernier, martillo, linterna, lupa, nivel óptico.

3.6. Etapas del proyecto

3.6.1. Especificar el estado de las instalaciones de la cimentación del soplador de caldera 32 U 601C con respecto a su proyecto original.

3.6.1.1. Revisión bibliográfica.

Consistió en consultar diversas fuentes bibliográficas para la obtención de información relacionada con el proyecto de investigación realizado, así como reportes y manuales de los equipos sobre la cimentación.

En este trabajo de grado, se llevó a cabo una revisión y aplicación de las normas generales para el diseño de cimentaciones de compresores reciprocantes, con el objetivo de calcular las dimensiones mínimas requeridas y definir las sollicitaciones a las que se somete este tipo de cimentación. Se consultó la obra de Fratelli, *Suelos, fundaciones y muros y diseño en concreto estructural*, como fuente bibliográfica complementaria. El desarrollo del proyecto se ajustó a los lineamientos establecidos en el *Manual de Ingeniería de Diseño. Procedimiento de ingeniería: Fundaciones de compresores reciprocantes*, la Norma Venezolana COVENIN 1753:2006, "Proyecto y construcción de obras en concreto estructural", y la norma del American Concrete Institute (ACI 351.3R-18, 2018), *Report on Foundations for Dynamic Equipment*.

3.6.1.2. Inspección Tipo A1 de la cimentación.

Mediante visitas de campo, se realizaron inspecciones para evaluar el estado actual de los equipos. Complementariamente, se recopiló información sobre el estado de la fundación a partir de la documentación suministrada por la empresa, clasificada en tres categorías principales: Documentación del diseño original, documentación de la construcción y documentación del estado de la cimentación durante su vida útil.

El análisis integrado de estos tres conjuntos de documentos permitió obtener una visión completa del estado actual de la cimentación, identificando posibles discrepancias

entre el diseño original y la construcción, así como la respuesta de la estructura a las cargas dinámicas generadas por la operación de los equipos. Esta información es fundamental para evaluar la integridad estructural de la cimentación.

3.6.1.3. Documentación del diseño original de la fundación.

Para comprender las bases del diseño inicial, se revisaron en detalle los planos estructurales, arquitectónicos y de uso de la fundación, incluyendo planos de detalle del acero de refuerzo, memorias de cálculo y especificaciones técnicas. Este análisis permitió identificar las características geométricas, estructurales y geotécnicas consideradas originalmente, así como los criterios de dimensionamiento y los materiales especificados.

3.6.1.4. Descripción de la cimentación

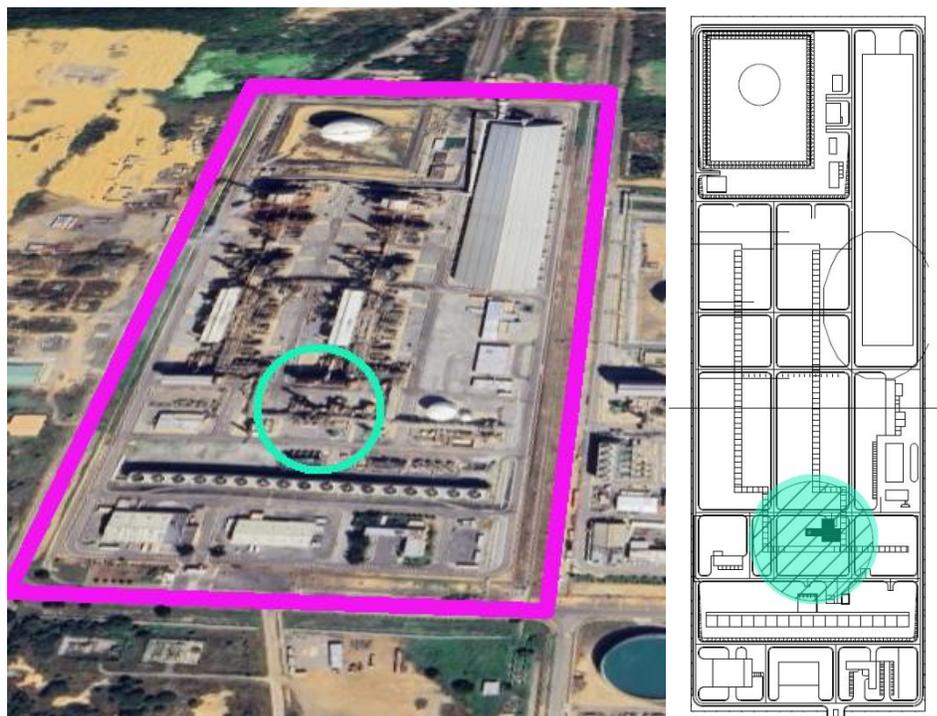
3.6.1.4.1. Ubicación

Fertilizantes Nitrogenados de Pequiven (antiguamente FertiNitro), ubicada en el Complejo Petroquímico "General de División José Antonio Anzoátegui", Estado Anzoátegui, Venezuela, es una empresa petroquímica dedicada a la producción y venta de amoníaco anhidro y urea granulada. Opera con dos trenes de producción casi idénticos, cada uno compuesto por dos plantas de amoníaco anhidro y dos plantas de urea granulada.

En el área de servicios industriales, específicamente en la unidad 32 (señalada en la figura 3.1), se genera el vapor que se distribuye a todo el complejo. Esta unidad cuenta con dos calderas auxiliares (32-B-601 A/B) operativas desde el año 2000, y una caldera acuatubular tipo paquete (32-B-601C) que se incorporó en 2010. Es en esta última

caldera donde se encuentra la cimentación del soplador 32-U-601C, objeto de estudio en este trabajo de grado.

Figura 0.1 *Ubicación de la cimentación dentro de la empresa.*



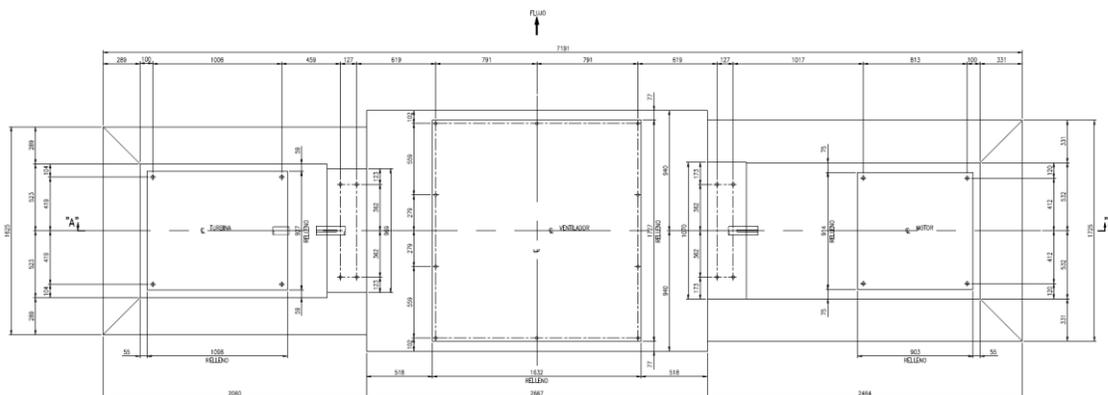
Fuente: Google Earth (2025).

3.6.1.4.2. Descripción

En primera instancia, se examinó el diseño original de la fundación del soplador de caldera 32-U-601C, proporcionado por la empresa de fertilizantes nitrogenados PEQUIVEN. El diseño actual de la cimentación fue desarrollado por NAVEDA, C.A., una empresa especializada en el mantenimiento de equipos industriales. La solución de fundación propuesta consiste en un pedestal de sección variable con forma de pirámide truncada para las secciones que soportan la turbina y el motor, el cual se asienta sobre

una losa de cimentación. En la figura 3.2 se presentan los planos correspondientes al diseño original de la cimentación del soplador de caldera 32-U-601C.

Figura 0.2 Plano de planta de la fundación del conjunto VTF.



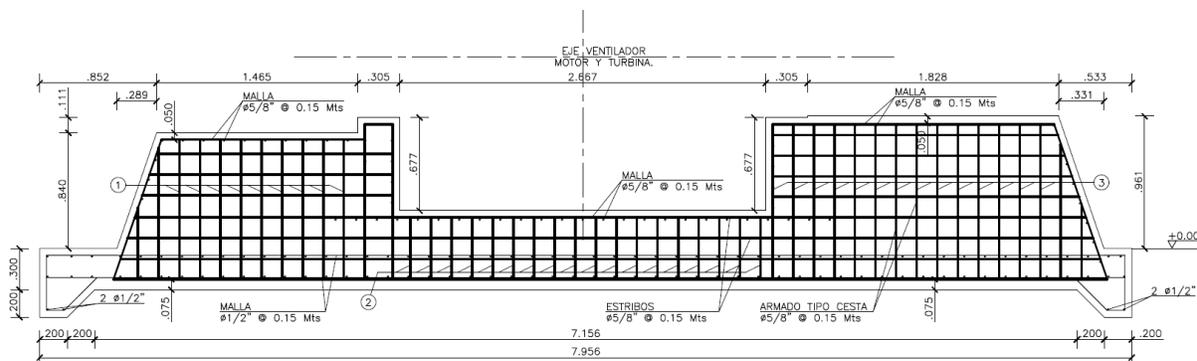
Fuente: Colmaquinas S.A. (2010). Tomado de: Plano de Fundación Turbina-Ventilador-Motor.

En la memoria de cálculo elaborada por NAVEDA CA., se observa que el sistema compuesto por elementos como un condensador, un economizador, un sistema de turbinas y la caldera, se apoya sobre una losa de cimentación. Sin embargo, la caldera y el economizador cuentan con zapatas colaborantes como cimentaciones definitivas, las cuales transmiten los esfuerzos al suelo.

El espesor de esta losa de cimentación lo determinan mediante un diseño por punzonamiento, utilizando la máxima reacción de las estructuras como criterio. NAVEDA CA., consideró este criterio conservador pero válido, ya que según ellos las cargas transmitidas por los equipos que se apoyan directamente sobre la losa son menores. Los pedestales de los equipos en estudio, que también descansan sobre la losa de cimentación, presentan una sección variable y fueron diseñados como cabezales debido

a sus grandes dimensiones. El armado de estos cabezales consiste en cabillas en forma de U en ambos sentidos y estribos transversales formando una cesta, como se puede apreciar en el corte longitudinal de la figura 3.3.

Figura 0.3 Sección longitudinal de la fundación del conjunto VTF.



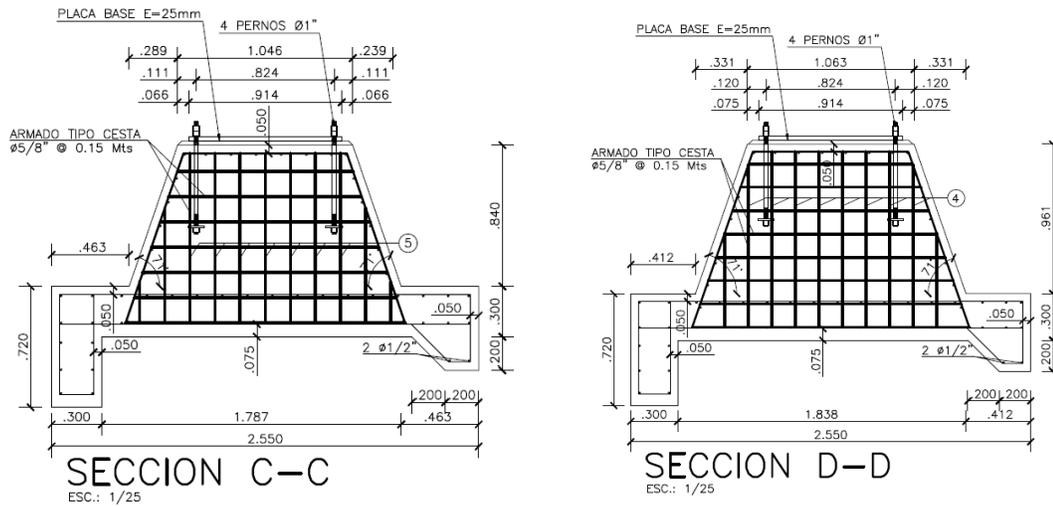
Fuente: Colmaquinas S.A. (2010). Tomado de: Plano de Fundaciones VTF. Secciones y Detalles.

Las dimensiones de los pedestales para cada máquina que compone el conjunto del ventilador 32-U601C lo determinaron basándose en las especificaciones proporcionadas por los fabricantes de cada equipo. Los cálculos realizados por NAVEDA CA., arrojaron un espesor mínimo de 30 cm para la losa de cimentación. Sin embargo, en los planos se observa que se añadió un volumen de concreto de 20 cm en los bordes de la cimentación, manteniendo un espesor de 30 cm en el centro, donde se unen los pedestales que soportan las máquinas del conjunto del ventilador.

En la memoria de cálculo, se observa que para el diseño del refuerzo de los pedestales se adoptó una cuantía de acero de 0.0018 como acero principal para cada área, disponiendo cabillas de 5/8" cada 15 cm en forma de "U" en ambos sentidos,

conformando un armado tipo cesta como se muestra en los cortes transversales de la figura 3.4.

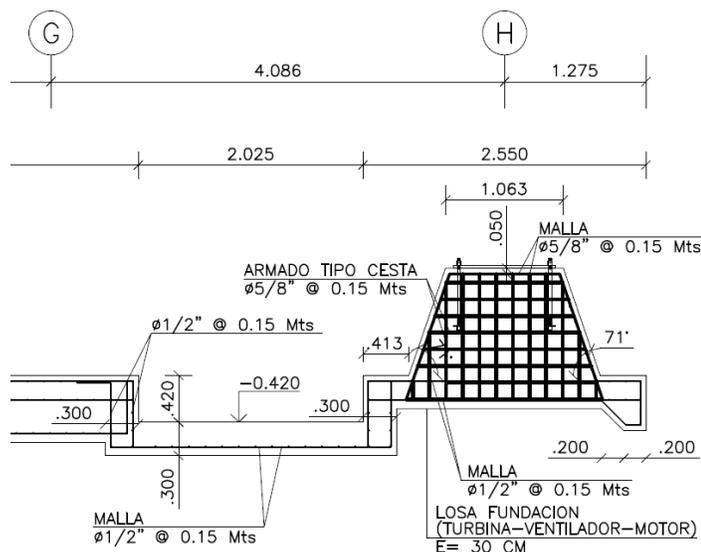
Figura 0.4 Secciones transversales de la fundación del conjunto VTF.



Fuente: Colmaquinas S.A. (2010). Tomado de: Plano de Fundaciones VTF. Secciones y Detalles.

La configuración de la losa de cimentación, que soporta otros equipos y columnas además del soplador de caldera, plantea una preocupación. Por detalles observados, parece que la losa de fundación fue diseñada considerando principalmente el corte y torsión del miembro, en lugar de priorizar una cimentación lo más rígida posible, lo cual es lo más recomendable. Esta práctica no es recomendable a menos que se realicen estudios de vibraciones, para verificar que las vibraciones generadas por el soplador de caldera y sus tres máquinas componentes no afecten a las estructuras adyacentes. Adicionalmente, esta configuración genera una rigidez asimétrica en la cimentación, paralela al eje de giro, dejando el otro lado libre, como se detalla en la figura 3.5.

Figura 0.5 Detalle de continuidad de la losa de cimentación.



Fuente: Colmaquinas S.A. (2010). Tomado de: Plano de Sección A-A'. Detalle de Fundaciones.

Es importante destacar que se desconoce si este diseño fue sometido a un análisis dinámico. La memoria de cálculo proporcionada por la empresa no incluye detalles al respecto, limitándose a dimensionar el acero de los pedestales y calcular el espesor de la losa de cimentación, resultando este último inferior al recomendado para una losa que soportará tres máquinas de las características del soplador de caldera. Esta falta de análisis dinámico genera incertidumbre sobre la capacidad de la cimentación para resistir las cargas dinámicas y vibraciones generadas por los equipos.

3.6.1.5. Documentación sobre la construcción de la fundación.

Se examinaron los registros de construcción, tales como informes de ejecución, reportes de inspección y cualquier otra documentación que registre el proceso

constructivo. Esta revisión permitió verificar la correspondencia entre la construcción y el diseño original, así como el cumplimiento de los estándares de calidad establecidos.

En los reportes semanales de la contratista a cargo de la obra, se documentó el proceso constructivo de la cimentación, incluyendo el vaciado de concreto, la toma de muestras para ensayos de resistencia y el grouting. También se registraron detalles de la alineación previa al vaciado del grouting y de la instalación de las placas de las máquinas sobre la cimentación, como se puede observar en la figura 3.6.

Figura 0.6 *Vaciado de mortero grout 101 en ventilador VTF y motor.*



Fuente: Fertinitro (2010). Tomado de: Reporte de inspección (civil).

La documentación también registra la nivelación de las tres máquinas, tal como se muestra en la figura 3.7, y su posterior puesta en marcha. Así como se registraron las vibraciones y amplitudes generadas durante los primeros arranques. Se verificó que estas vibraciones se mantuvieron dentro de los valores permitidos, lo que permitió la aprobación y puesta en marcha del equipo.

Figura 0.7 Alineación y acople entre ventilador VTF y motor.



Fuente: Fertinitro (2010). Tomado de: Reporte de inspección (mecánica).

3.6.1.6. Documentación del estado de la cimentación durante su vida útil

Se analizaron los informes de inspección, mantenimiento y monitoreo de vibraciones de los equipos rotativos soportados por la cimentación. Estos reportes proporcionaron información valiosa sobre el comportamiento dinámico de los equipos, la transmisión de vibraciones a la cimentación y cualquier problema o anomalía detectada durante la vida útil de la instalación.

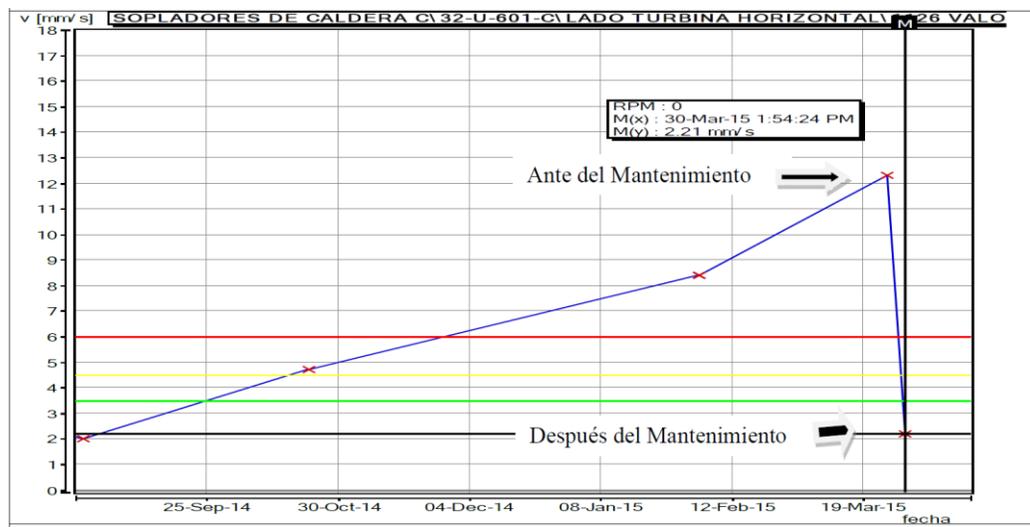
3.6.1.7. Reportes de inspección

3.6.1.7.1. Periodo 2013-2016: Incremento progresivo de vibraciones y problemas en el acople.

Durante el periodo comprendido entre enero de 2013 y noviembre de 2016, se registraron repetidos incrementos en los niveles de vibración del soplador de caldera 32 U 601C, superando en varias ocasiones el valor de alarma de 6 mm/s, tal como se aprecia en la figura 3.8. Las inspecciones revelaron la presencia recurrente de soldadura

mecánica y deformación en las láminas del acople, lo que incidía en la dinámica del equipo y generaba desbalance, afectando principalmente las chumaceras. Se realizaron intervenciones de mantenimiento que incluyeron la verificación y ajuste de holguras, el reemplazo de componentes y la búsqueda de perpendicularidad entre las chumaceras y el pedestal de apoyo.

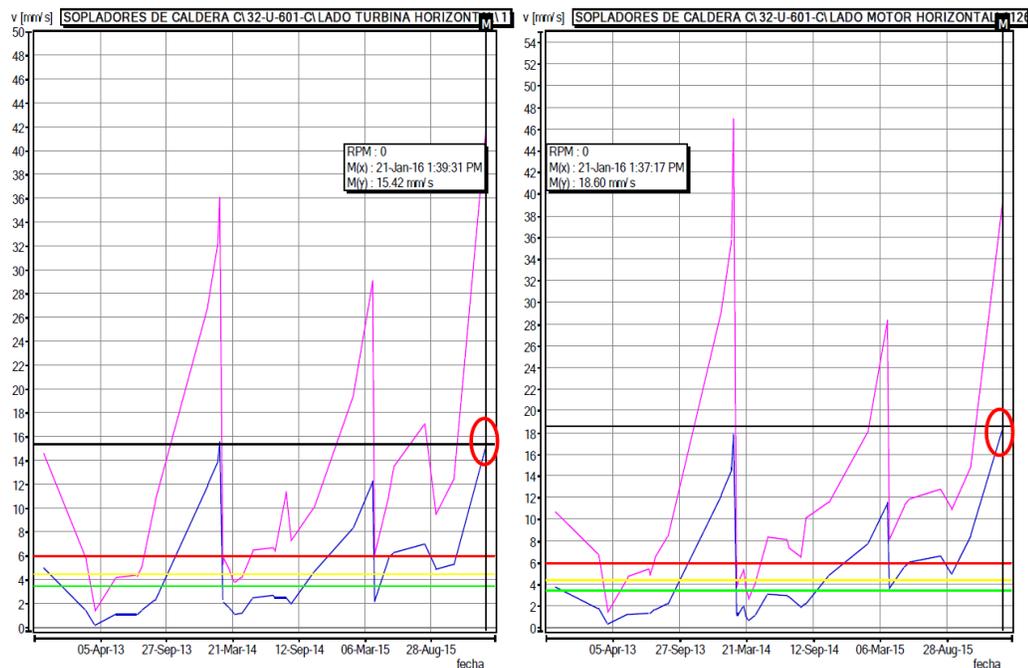
Figura 0.8 Comportamiento del valor global de vibración en la chumacera lado turbina (Ago 14 a Mar 15).



Fuente: Fertinitro (2015). Tomado de: Reporte de inspección de equipos rotativos.

Sin embargo, los problemas de vibración persistieron, tal como se evidencia en la figura 3.9, indicando posibles deficiencias en la rigidez de la estructura de soporte.

Figura 0.9 Tendencia en valor global de amplitudes del soplador, lado turbina y motor (Abr 13 a Ago 15).



Fuente: Fertinitro (2015). Tomado de: Reporte de inspección de equipos rotativos.

3.6.1.7.2. Periodo 2017: Énfasis en la rigidez de los soportes y la resonancia.

Durante este periodo, las inspecciones y mantenimientos se enfocaron en la rigidez de los soportes metálicos de las chumaceras. Se realizaron ajustes con pernos de doble tuerca, se lapiaron los asientos de apoyo, se soldaron travesaños y se colocaron shims para mejorar el paralelismo entre el pedestal y el eje del rotor donde se mejoró la holgura del rodamiento en ambas chumaceras con ajuste de 0.04mm. A pesar de estas acciones, las bases de fijación de los pedestales continuaron presentando deformación, y corrosión, tal como se aprecia en la figura 3.10.

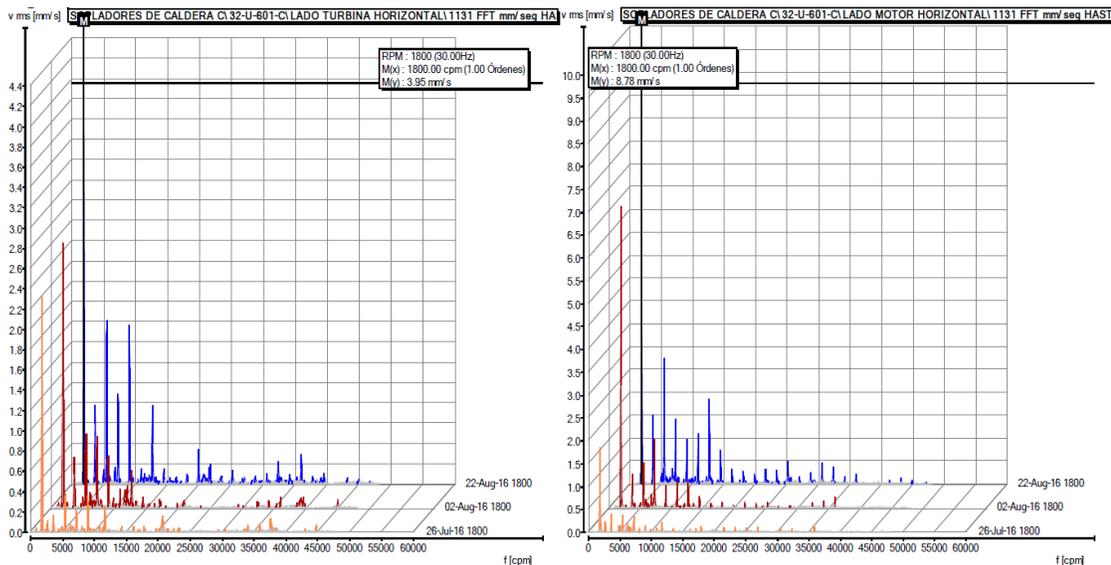
Figura 0.10 *Muestra de deformación y espacios vacíos en el concreto (lado motor).*



Fuente: Fertinitro (2016). Tomado de: Reporte de inspección de equipos rotativos.

Se observó una clara tendencia al incremento progresivo en las amplitudes de vibración, con picos que consistentemente superaban los valores de alarma con cada arranque del soplador, tal como lo evidencia la Figura 3.11. Este comportamiento se vio agravado por un debilitamiento estructural detectado en los pedestales, el cual influía directamente en la dinámica del motor, generando armónicos de la velocidad de giro y exacerbando el desbalance del sistema.

Figura 0.11 Muestra incremento en RMS de amplitud de vibraciones (Lado Turbina horizontal y Lado Motor horizontal)



Fuente: Fertinitro (2016). Tomado de: Reporte de inspección de equipos rotativos.

3.6.1.7.3. Periodo 2018: Fractura de los soportes y roce del soplador.

En enero de 2018, se reportó la fractura de los soportes de las chumaceras, tanto del lado del motor como del lado de la turbina tal como se puede apreciar en la figura 3.12, como consecuencia del incremento en los valores de vibración y la falta de rigidez de las estructuras. El desbalance del equipo generó fuerzas que desplazaron el eje de su centro geométrico, amplificando las vibraciones y afectando la estructura. Se observó que los soportes entraron en resonancia, lo que aceleró el deterioro de los componentes. Durante el apagado del equipo, se percibió roce interno del soplador con la tolva de succión, evidenciando la soltura general en los soportes.

Figura 0.12 *Muestra de fractura de la soldadura en los soportes.*



Fuente: Fertinitro (2018). Tomado de: Reporte de inspección de equipos rotativos.

El análisis de los reportes de inspección revela una problemática recurrente relacionada con la cimentación del soplador de caldera 32 U 601C. Se evidencia una deficiencia en la rigidez de los soportes de las chumaceras, lo que genera vibraciones excesivas, desbalance, soltura mecánica y, finalmente, la fractura de los soportes.

3.6.1.8. Estudio de listas de verificación.

Para recopilar los datos clave de la fundación del soplador de caldera, se emplearon listas de verificación detalladas, siguiendo el formato que se muestra como ejemplo en la Figura 3.13. Estas listas, basadas en la normativa interna de la empresa, fueron completadas específicamente para abordar las particularidades de este caso de estudio.

Figura 0.13 Lista de verificación de fundaciones de equipos, Pag. 1 de 4.

 Pequiven <small>Petroquímica de Venezuela S.A.</small>	GERENCIA DE PRODUCCIÓN PEQUIVEN	CODIGO: GPGA-B-C-LV-010
	SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD	REVISIÓN N°: 0 EMISIÓN: ABR / 2006
	LISTA DE VERIFICACIÓN DE FUNDACIONES DE EQUIPOS	PAGINA 1 DE 4

Nombre del Proyecto:		Código:		Elaborador:	Fecha:
Sub-Proyecto:				Revisor:	Fecha:
Organización (Consultora):					
Descripción del Documento:		Revisión N°:			
Código:					
Reng.	Descripción	Elab.	Rev.	Notas	
1	Formato planos:				
1.1	Formato del plano es el de PDVSA.				
1.2	Título, revisión del plano coincide con el de PDVSA.				
1.3	Planos de referencias (incluye planos de topografía modificada, planta de fundaciones, implantación, etc.)				
1.4	Leyenda y simbología.				
1.5	Notas:				
1.5.1	Datum de referencia.				
1.5.2	Sistema de coordenadas empleado y su equivalencia a coordenadas UTM.				
1.5.3	Sistema de medidas utilizado.				
1.5.4	Notas especiales/notas bien redactadas/notas y llamadas con igual numeración.				
1.6	Escalas adecuadas/tamaño de letras/grosor de líneas				
1.7	Firmas de las personas involucradas (tanto por la unidad ejecutante como la unidad requiriente)				
2.	Plano de Planta de Fundaciones:				
2.1	Indicar coordenadas ejes de referencia (al menos dos coordenadas para replanteo).				
2.2	Indicar ejes de la fundación.				
2.3	Dimensión pedestales, fundaciones (ancho largo zapata, recubrimiento, profundidad de enterramiento), confrontar con dimensiones del equipo.				
2.4	Vigas de riostras y fundación.				
2.5	Indicar planos de referencia.				
2.6	Escala.				
2.7	Norte geográfico, norte de planta y dirección predominante del viento.				

Fuente: Pequiven (2006). Tomado de: Listas de Verificación de Obras Civiles.

Un aspecto importante en estas listas es la metodología a seguir: primero, obtener la información de diseño directamente de los planos constructivos y, segundo, verificar y contrastar estos datos 'in situ' con la cimentación existente del equipo. Permitiendo documentar sistemáticamente la siguiente información necesaria para el análisis de la cimentación:

- Dimensiones: Ejes, pedestales (ancho, largo, altura), zapata (ancho, largo), recubrimiento y profundidad de enterramiento, confrontándolas con las dimensiones del equipo.

- Materiales: Tabla de calidad de materiales y despiece de aceros. Pernos: Tipo, distancia entre pernos y recubrimiento mínimo según diámetro.
- Otros: Coordenadas de equipos, ubicación de la plancha deslizante, tipo de grout de nivelación (epóxico para equipos vibratorios, cementoso para otros casos) y dimensiones de planchas embebidas.

La inspección en campo, realizada en conjunto con el encargado de la instalación y cumpliendo normas de seguridad, incluyó:

- Mediciones: Se trazaron rutas y determinaron puntos de medición, obteniendo valores consistentes con el diseño original de la fundación del soplador de caldera.
- Análisis visual: Se revisaron los detalles de la cimentación, incluyendo los elementos mencionados en la lista de verificación.

3.6.2. Identificar las maquinas rotativas sobre la infraestructura del soplador de caldera 32-U-601C.

3.6.2.1. Inspección Tipo A2 de la cimentación.

Durante esta etapa se realizó una inspección más profunda y con equipos de medición para la verificación de la instalación de la cimentación.

3.6.2.2. Información requerida de la maquinaria

Como paso preliminar al diseño de la cimentación del soplador de caldera 32-U-601C, y en cumplimiento con la metodología establecida en el manual de ingeniería de

diseño L-STC-003, se recabó información relativa a las características de las máquinas apoyadas sobre la fundación.

3.6.2.3. Descripción de las maquinarias

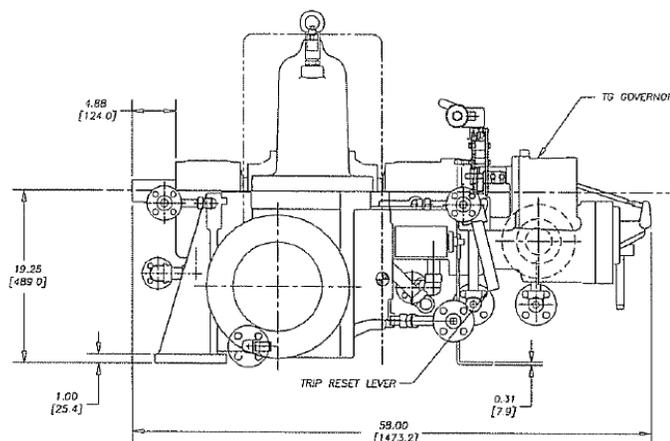
El soplador de caldera 32-U-601C se compone de tres máquinas principales: la turbina, el ventilador de tiro forzado (VTF) y el motor. Las características, condiciones de fabricación y parámetros de operación de cada una se obtuvieron de las hojas de datos proporcionadas por los fabricantes. A continuación, se presentan los datos recopilados para cada equipo.

3.6.2.4. Turbina

La fundación del sistema en estudio soporta una turbina *Dresser-Rand RLH 24 estándar*, una máquina de impulso de una sola etapa con rotor de velocidad compuesta. Esta turbina, cuya carcasa transmite a la cimentación las cargas estáticas correspondientes a su peso y las cargas dinámicas generadas por su operación. El soporte del rotor se realiza mediante cojinetes de manguito, y su posicionamiento axial, mediante un cojinete de empuje. El funcionamiento de la turbina se basa en la expansión del vapor a través de boquillas que dirigen el flujo hacia los álabes del rotor.

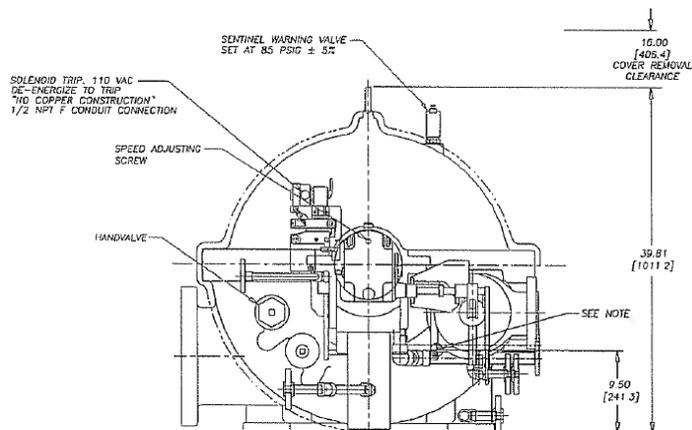
Las figuras 3.14 y 3.15 proporcionan planos de vista frontal y lateral de la turbina de acuerdo a su hoja de datos proporcionada por el fabricante a la empresa.

Figura 0.14 Plano de vista frontal de la Turbina. Paralelo al eje de rotación.



Fuente: Dresser-Rand (2008). Tomado de: Manual de Instrucciones de turbina.

Figura 0.15 Plano de vista lateral de la Turbina. Perpendicular al eje de rotación.

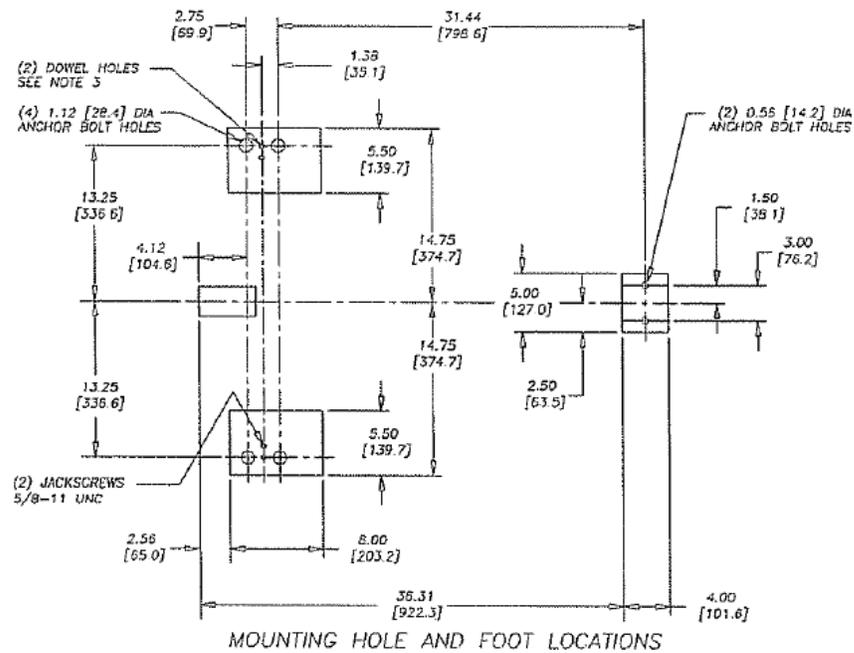


Fuente: Dresser-Rand (2008). Tomado de: Manual de Instrucciones de turbina.

3.6.2.4.1. Características geométricas de la turbina

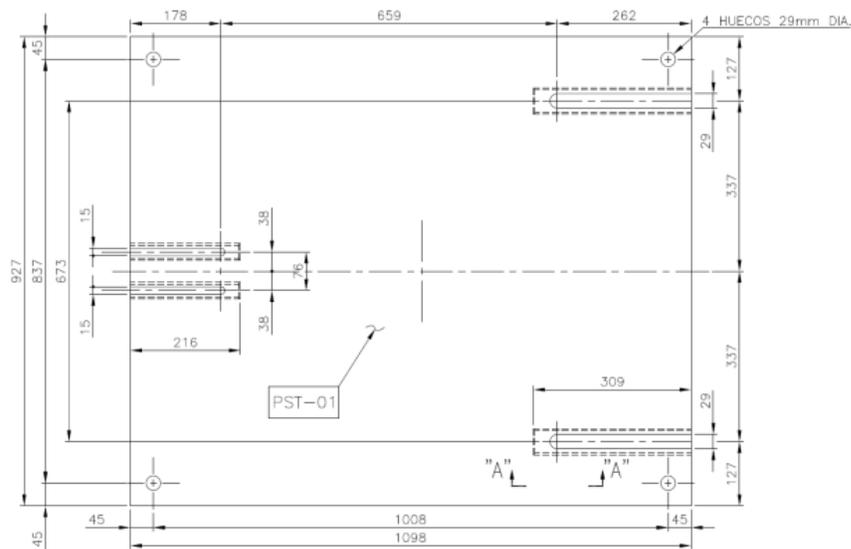
Las especificaciones del fabricante incluyen tanto las dimensiones de la base de la turbina del soplador de caldera 32-U-601C como la configuración y características de sus pernos de anclaje. Estos detalles se ilustran en las figuras 3.16 y 3.17.

Figura 0.16 Ubicación de los agujeros y pies de apoyo de la turbina.



Fuente: Dresser-Rand (2008). Tomado de: Manual de Instrucciones de turbina.

Figura 0.17 Placa solera de apoyo sobre la cimentación de la turbina.



Fuente: Dresser-Rand (2008). Tomado de: Manual de Instrucciones de turbina.

3.6.2.4.2. Características de operación de la turbina

La hoja de datos del fabricante de la turbina proporcionada a la empresa incluye las especificaciones de operación (velocidad de operación 1800 rpm y potencia 307 HP), las cargas estáticas (1180 Kg sin contar el peso de la placa de apoyo) y dinámicas generadas por la máquina en condiciones óptimas de funcionamiento, el centro de gravedad y la inercia del equipo, y en ciertos casos, su excentricidad tras la instalación. Estos detalles se obtuvieron de la mencionada hoja de datos y se encuentran especificados en la tabla 3.1.

Tabla 0.1 Características de la Turbina 32-TU-601C.

Turbina			TAG: 32-TU-601C		
Marca: Dresser Rand			Modelo: RLHA 24		
Parámetros de operación					
Velocidad de operación: 1800 rpm			Potencia normal: 307.0 HP – 400 BHP		
Velocidad de operación: 188.50 rad/sec			Potencia nominal: 225.80 KW		
Centro de gravedad e inercia de la maquina					
Coord. en X: 1.053 m		Coord. en Y: 1.40 m		Coord. en Z: 2.142 m	
Momento de inercia: 75 lbs-pie²			3.16 kg.m²		
Cargas Dinámicas					
Pares de torsión: Breakdown (175 %F.L.). F.L. Full load 2370 lb – ft					
<i>F_x</i>	<i>M_x</i>	<i>F_y</i>	<i>M_y</i>	<i>F_z</i>	<i>M_z</i>
4217 N	3213 Nm	2108 N	1607 Nm	5271 N	1607 Nm
430.01 kgf	32763.48 kgf-cm	214.96 kgf	16386.84 kgf-cm	537.49 kgf	16386.84 kgf-cm
Cargas estáticas					
Peso del rotor: 118.8 Kg			Peso de placa de apoyo: 313 Kg		
Peso de maquina: 1180 Kg			Peso total: <u>1493 Kg</u>		

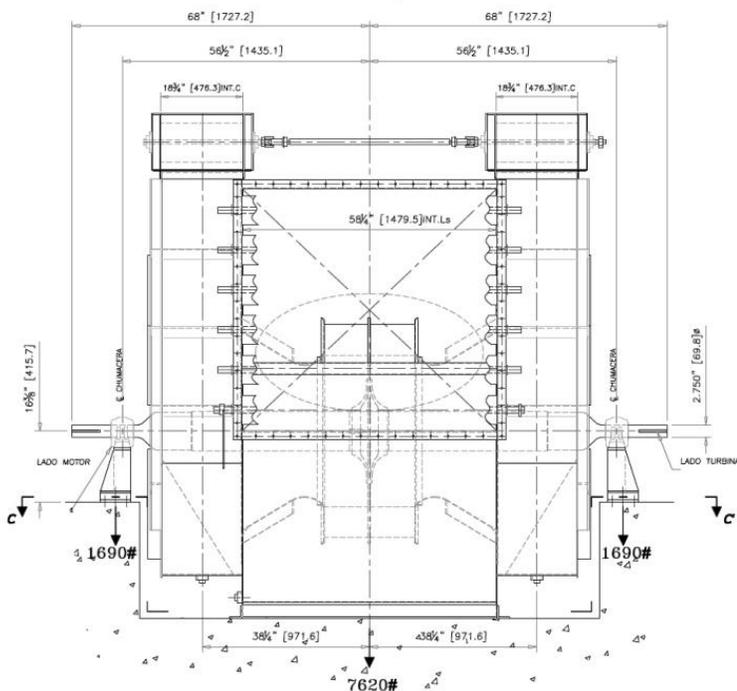
Fuente: Dresser-Rand (2008). Tomado de: Manual de Instrucciones de turbina.

3.6.2.5. Ventilador de Tiro Forzado (VTF)

El Ventilador de Tiro Forzado (VTF) del soplador de caldera 32-U-601C es un ventilador Airfoil diseñado a medida, modelo 1902 DW con dos cajas de entrada, fabricado por la empresa Chicago Blowers. Cuenta con una carcasa robusta y totalmente soldada, transmite cargas dinámicas a la cimentación a través de sus chumaceras y su estructura de soporte.

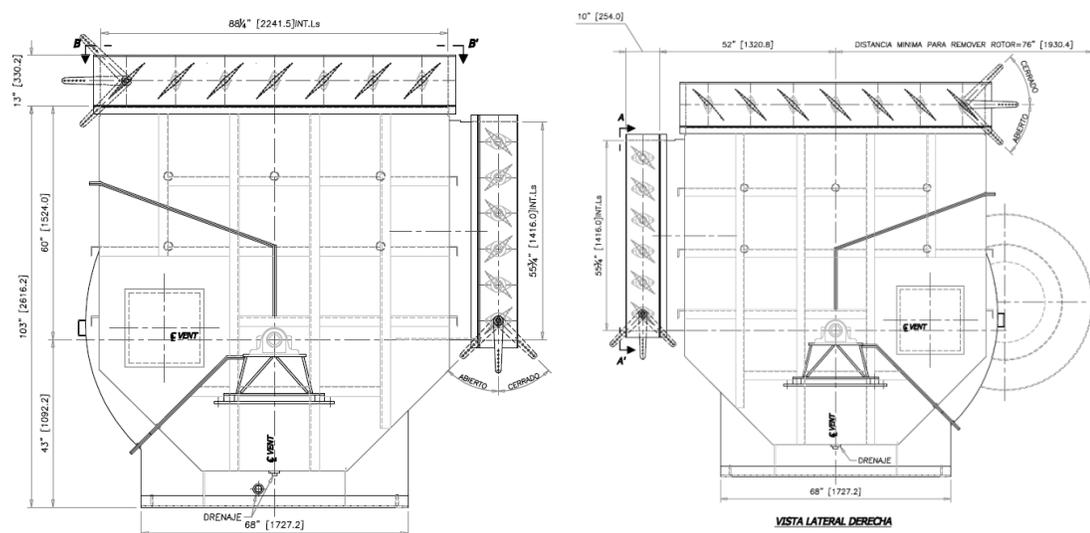
Las figuras 3.18 y 3.19 muestran los planos de vista frontal y vistas laterales del Ventilador de Tiro Forzado, según la información contenida en la hoja de datos que el fabricante entregó a la empresa.

Figura 0.18 Plano de vista frontal del Ventilador VTF. Paralelo al eje de rotación.



Fuente: Chicago Blower Corporation (2008). Tomado de: Manual de Instalación y operación ventilador VTF.

Figura 0.19 Vista lateral izquierda y derecha. Perpendicular al eje de rotación.



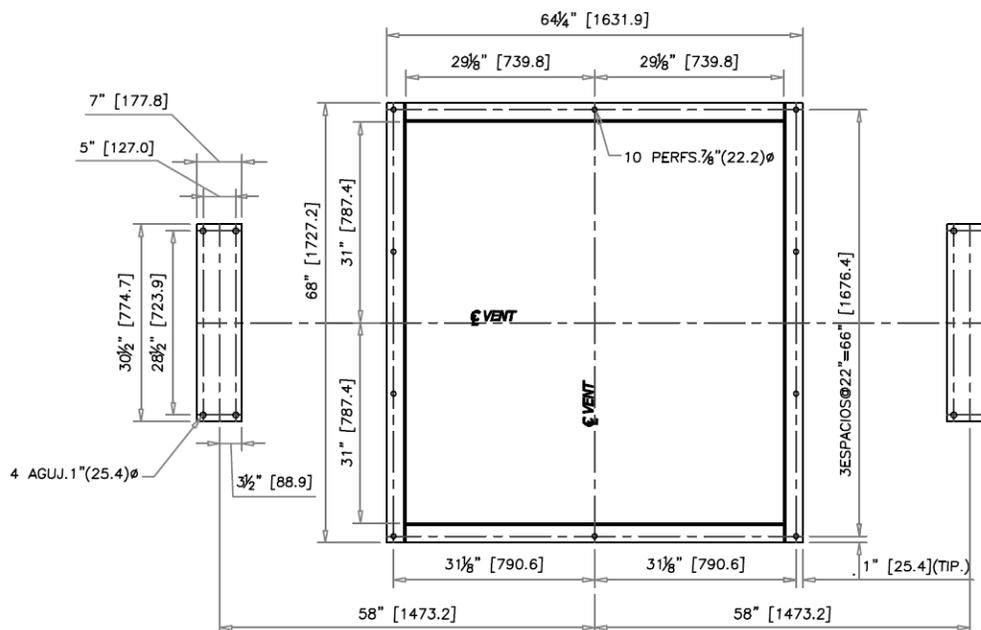
Fuente: Chicago Blower Corporation (2008). Tomado de: Manual de Instalación y operación ventilador VTF.

La robustez de su diseño, incluyendo carcasas reforzadas, ejes y chumaceras dimensionados para trabajo pesado, junto con sus ruedas dinámicamente equilibradas, tiene como objetivo minimizar las vibraciones producidas durante su funcionamiento.

3.6.2.5.1. Características geométricas del ventilador (VTF)

Tanto las dimensiones de las bases como la disposición y características de los pernos de anclaje del Ventilador de Tiro Forzado (VTF) del soplador de caldera 32-U-601C han sido suministradas por el fabricante. Los detalles correspondientes se presentan en la figura 3.20.

Figura 0.20 Dimensiones de las placas bases. Disposición para pernos de anclaje.



Fuente: Chicago Blower Corporation (2008). Tomado de: Manual de Instalación y operación ventilador VTF.

3.6.2.5.2. Características de operación del ventilador (VTF)

El manual de instalación y operación del ventilador de tiro forzado (VTF) entregado a la empresa por Chicago Blower Corporation, contiene las especificaciones operativas de velocidad (entre 1760 rpm y 1800 rpm) y potencia (350 HP), las cargas estáticas (4200 Kg sin contar el peso de los dámper) y dinámicas que la máquina generaba en condiciones ideales de funcionamiento, la ubicación de su centro de gravedad, su inercia. Estos datos se extrajeron de dicho documento y se detallan en la tabla 3.2.

Tabla 0.2 Características del ventilador de tiro forzado VTF 32-U-601C.

Ventilador de Tiro Forzado (VTF)	TAG: 32-U-601C
Marca: Chicago Blower	Modelo: 1902 DW con cajas de entrada

Parámetros de operación					
Velocidad de operación: 1760 rpm			Potencia nominal: 350 HP – 258 KW		
Velocidad máxima: 1800 rpm			Velocidad máxima: 188.50 rad/sec		
Centro de gravedad e inercia de la maquina					
Coord. En X: <i>3.583 m</i>		Coord. En Y: <i>1.40 m</i>		Coord. En Z: <i>2.142 m</i>	
Momento de inercia: 2097 lbs-pie²			Momento de inercia 88.6 kg-m²		
Cargas Dinámicas					
Pares de torsión: Breakdown (175 %F.L.). Full load 1030.833 lb – ft					
<i>F_x</i>	<i>M_x</i>	<i>F_y</i>	<i>M_y</i>	<i>F_z</i>	<i>M_z</i>
5885 N	6150 Nm	5885 N	1690 Nm	9820 N	1690 Nm
600.1 kgf	62712.55 kgf-cm	600.1 kgf	17233.20 kgf-cm	1001.36 kgf	17233.20 kgf-cm
Cargas estáticas					
Peso dámper succión: 309 Kg			Peso dámper de descarga: 290 Kg		
Peso de maquina: 4200 Kg			Peso total: <u>4799 Kg</u>		

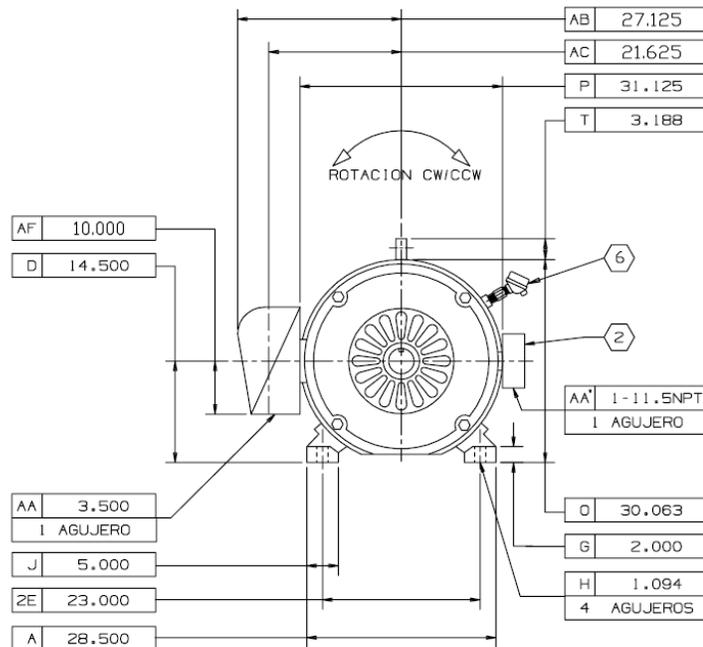
Fuente: Chicago Blower Corporation (2008). Tomado de: Manual de Instalación y operación ventilador VTF.

3.6.2.6. Motor

El motor del soplador de caldera 32-U-601C es un modelo Titan JCE 5809ML, fabricado por US Motors, división de Emerson Motor Company. Su manual al cliente indica que esta línea de motores, diseñada para uso intensivo ofrece una alta eficiencia energética. Siendo adecuados para aplicaciones de larga duración en bombas, compresores, ventiladores, sopladores o cintas transportadoras.

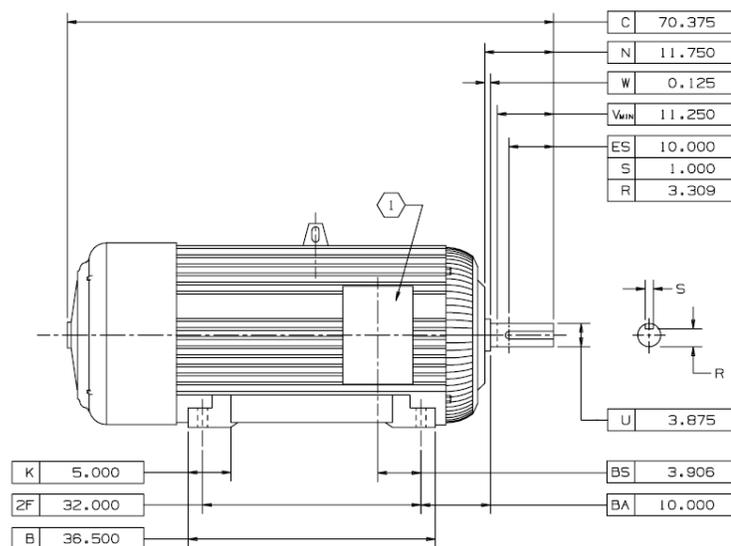
Las figuras 3.21 y 3.22 ilustran las vistas frontal y lateral del motor, según los planos incluidos en la hoja de datos que el fabricante suministró a la empresa.

Figura 0.21 Plano de vista frontal del motor. Perpendicular al eje de rotación.



Fuente: Emerson Motor Company (2008). Manual de Instalación y operación del motor.

Figura 0.22 Plano de vista lateral del motor. Perpendicular al eje de rotación.

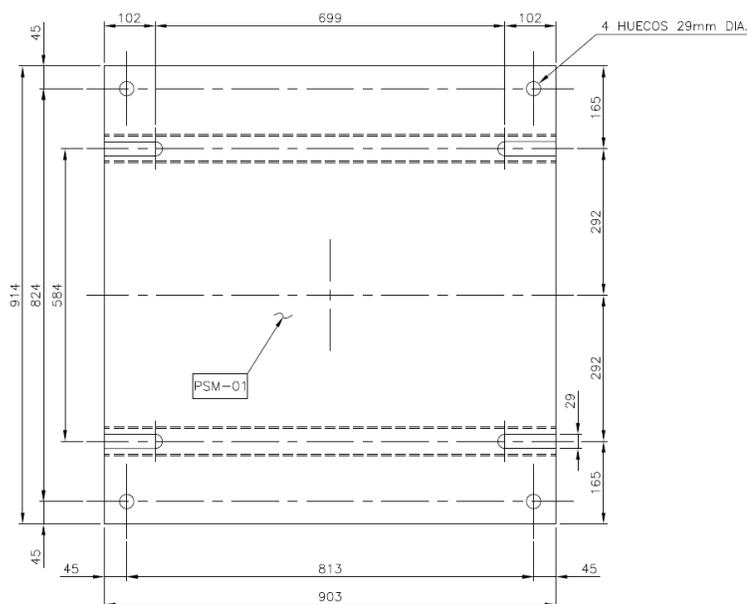


Fuente: Emerson Motor Company (2008). Manual de Instalación y operación del motor.

3.6.2.6.1. Características geométricas

Las especificaciones técnicas del fabricante, incluyen las dimensiones de las bases y la configuración de los pernos de anclaje del motor del soplador de caldera 32-MU-601C. Estos detalles se ilustran en las Figuras 3.23.

Figura 0.23 Dimensiones de la placa base del motor. Disposición para pernos de anclaje.



Fuente: Emerson Motor Company (2008). Manual de Instalación y operación del motor.

3.6.2.6.2. Características de operación del motor

El manual de instalación y operación del motor, facilitado a la empresa por su fabricante, especifica los parámetros de funcionamiento (velocidades de 1760 rpm a 1800 rpm y una potencia de 400 HP), las cargas estáticas (un peso de 2400 kg sin considerar la placa de apoyo) y dinámicas generadas por la máquina en condiciones óptimas, la posición de su centro de gravedad, su inercia. Esta información se obtuvo del mencionado manual y se presenta detalladamente en la tabla 3.3.

Tabla 0.3 Características del motor 32-MU-601C

Motor		TAG: 32-MU-601C			
Marca: US Motors		Modelo: Emerson JCE 5809ML			
Parámetros de operación					
Velocidad de operación: 1760 rpm			Potencia nominal: 400 Hp -- 298.28 Kw		
Velocidad máxima: 1800 rpm			Velocidad máxima: 188.50 rad/sec		
Centro de gravedad e inercia de la maquina					
Coord. en X: 6.5435 m		Coord. en Y: 1.40 m		Coord. en Z: 2.142 m	
Momento de inercia: 3092 lbs-pie²			130.30 kg-m²		
Cargas Dinámicas					
Pares de torsión: Breakdown (%F.L.) 175. F.L. Full load: 1175,5 lb – ft					
<i>F_x</i>	<i>M_x</i>	<i>F_y</i>	<i>M_y</i>	<i>F_z</i>	<i>M_z</i>
3200 N	1594 Nm	7845 N	1590 Nm	7620 N	1590 Nm
326.31 kgf	16254.28 kgf-cm	799.97 kgf	16213.49 kgf-cm	777.02 kgf	16213.49 kgf-cm
Cargas estáticas					
Peso del rotor: 800 Kg			Peso de placa de apoyo: 256 Kg		
Peso de maquina: 2400 Kg			Peso total: <u>2656 Kg</u>		

Fuente: Emerson Motor Company (2008). Manual de Instalación y operación del motor.

3.6.3. Obtener la caracterización de las condiciones geotécnicas del suelo de la cimentación mediante un estudio de suelos suministrado por la empresa.

3.6.3.1. Inspección tipo A2 de la cimentación.

Se obtiene la información necesaria de los estudios de suelo realizados a la empresa sobre la caracterización de las condiciones geotécnicas del suelo donde está apoyada la cimentación.

3.6.3.2. Características del suelo

La información geotécnica para el diseño de la fundación se obtuvo del estudio del área industrial elaborado por Fugro-McClelland Marine Geosciences-Venezuela (1999). Específicamente para la unidad 32, donde se sitúa el soplador de caldera, este estudio reporta los resultados de una única prueba de penetración de cono (CPT). Esta prueba permitió definir un perfil estratigráfico hasta los 11.0 metros de profundidad, identificando tres estratos distintos, tal como se detalla en la Tabla 3.4.

Tabla 0.4 Perfil del suelo obtenido de la prueba CPT en la unidad 32.

Capa 1		
Profundidad	De: 0 metros	A: 5.0 – 5.1 metros
Compuesta por arcilla limosa rígida ($Q_c = 15-25 \text{ kg/cm}^2$, $FR = 3.5-7.0 \%$) con niveles ocasionales de arena limosa medianamente densa ($Q_c = 20-30 \text{ kg/cm}^2$, $FR = 1.0-1.5 \%$).		
Peso unitario (γ): 20 kN/m^3 Resistencia al corte no drenado (s_u): $\geq 100-150 \text{ kPa}$ Módulo de confinamiento (M_0): $\geq 7-8 \text{ MPa}$		
Capa 2		
Profundidad	De: 5.0 – 5.1 metros	A: 7.5 – 7.6 metros
Arcilla limosa y arcilla suave a muy suave ($Q_c = 5-15 \text{ kg/cm}^2$; $FR = 3.0-5.0 \%$).		
Peso unitario (γ): 20 kN/m^3 Resistencia al corte no drenado (s_u): $30-60 \text{ kPa}$ Módulo de confinamiento (M_0): $2.5-5 \text{ MPa}$		
Capa 3		
Profundidad	De: 7.5 – 7.6 metros	A: 10.8 – 11.0 metros

Arena limosa y arena medianamente densa ($Q_c = 40-50 \text{ kg/cm}^2$; $FR = <1.0 \%$). a muy densa al aumentar la profundidad ($Q_c = 100-150 \text{ kg/cm}^2$; $FR = <1.0-1.2 \%$). En la base de esta capa, la prueba CPT registró rechazo ($Q_c = 250-300 \text{ kg/cm}^2$) en el estrato arenoso portante.
Peso unitario (γ): $19-20 \text{ kN/m}^3$ Ángulo de fricción interna (ϕ'): $\geq 35-38^\circ$

Fuente: Snamprogetti (1999). Geotechnical report. Jose first fertilizer project.

3.6.3.3. Parámetros Geotécnicos

El perfil estratigráfico superior del suelo con un espesor mínimo de 4.0m a 5.0m, se compone principalmente de arcillas consolidadas (producto de la desecación) con intercalaciones ocasionales de arenas limosas densas. La resistencia al corte no drenado (s_u) de las arcillas en esta capa generalmente excede los 100-200 kPa. También se menciona que al identificarse espesores considerables de estratos de arcilla blanda, se sugiere adoptar un valor de presión admisible de 150 kPa para condiciones de carga estática y un valor de 225 kPa para condiciones de carga transitoria, tales como cargas sísmicas y eólicas.

3.6.3.3.1. El módulo de corte dinámico (G_s) y Relación de Poisson (ν)

Estos valores fueron estimados en el reporte geotécnico mediante correlaciones empíricas a partir de los datos de pruebas de laboratorio, y se muestran en la tabla 3.5. Se obtuvo un rango de $G_s = 50-70 \text{ MPa}$, considerando los valores medios de las relaciones de vacíos de los suelos cohesivos en las zonas relevantes. Para el diseño, se adoptó un valor promedio de $G_s = 50 \text{ MPa}$ y una relación de Poisson de 0.25.

Tabla 0.5 *Parámetros geotécnicos del suelo en el área de estudio.*

Peso específico (γ)	2040 Kg/m ³
Modulo de corte (Gs)	510 kg/cm ²
Coeficiente de Poisson (ν)	0.25
σ adm	1.53 kg/cm ²

Fuente: Snamprogetti (1999). Geotechnical report. Jose first fertilizer project.

El informe geotécnico concluye que es factible el uso de cimentaciones superficiales, incluso para estructuras de gran tamaño en el área 32, donde se encuentra la cimentación en estudio. No obstante, la presión admisible real podría estar limitada por la tolerancia a asentamientos de la estructura, según los criterios de diseño. En consecuencia, la Tabla 3.6 presenta los resultados de las evaluaciones de asentamiento para el área unitaria considerada en la caracterización estratigráfica y geotécnica, los cuales son útiles para el dimensionamiento de zapatas superficiales.

Tabla 0.6 *Evaluaciones de asentamiento en la unidad 32.*

Footing dimensions				Settlements (cm)	
B (m)	L (m)	D (m)	q (kN/m ²)	Flexible foundations	Rigid foundations
1.0	1.0	1.5	150	1.88	1.50
2.0	2.0	1.5	150	3.91	3.13
3.0	3.0	1.5	150	6.35	5.08
4.0	4.0	1.5	150	8.24	6.59
5.0	5.0	1.5	150	9.95	7.96
1.0	1.5	1.5	150	2.26	1.80
1.0	2.0	1.5	150	2.54	2.03
1.0	2.5	1.5	150	2.85	2.28
2.0	3.0	1.5	150	5.01	4.01
2.0	4.0	1.5	150	5.76	4.61
2.0	5.0	1.5	150	6.19	4.95
3.0	4.5	1.5	150	7.52	6.02
3.0	6.0	1.5	150	8.29	6.63
3.0	7.5	1.5	150	8.78	7.03

Fuente: Snamprogetti (1999). Geotechnical report. Jose first fertilizer project.

3.6.4. Diseñar la cimentación para el soplador en función al método propuesto en el “Manual de ingeniería de diseño. Volumen 18 – I PDVSA”.

3.6.4.1. Diseñar una cimentación para el soplador de caldera

Usando el modelo de semiespacio elástico, empleado en el análisis de cimentaciones ante vibraciones, el sistema se idealiza mediante un elemento de masa, un resorte y un amortiguador. Las solicitaciones y las respuestas resultantes en la fundación fueron evaluadas utilizando el software SAFE, mientras que el diseño estructural se realizó con AutoCAD.

3.6.4.2. Dimensionamiento de la Cimentación

La cimentación del conjunto de maquinas en estudio está compuesto en tres pedestales, uno para cada máquina que componen el soplador de caldera en estudio, y una zapata común donde estos pedestales están apoyados. En este caso, se asumió un ancho y largo efectivo de la zapata para cada máquina para determinar el espesor adecuado para esta, usando los criterios propuestos para su dimensionamiento por PDVSA (1991) en la Guía de diseño para Fundaciones de compresores reciprocantes.

Tabla 0.7 Medidas obtenidas luego de dimensionamiento de la fundación.

Elemento	Ancho(mm)	Largo (mm)	Espesor (mm)
Pedestal Turbina	1064	1800	840
Pedestal VTF	1880	2668	275
Pedestal Motor	1064	2133	961
Zapata	2800	7300	750

Fuente: Elaboración propia.

3.6.4.3. Materiales de la cimentación

Para el diseño teórico de la fundación, se utilizaron materiales con las características especificadas para fundaciones en la norma COVENIN 1753.

Resistencia del Concreto: 250 kg/cm².

Fluencia del Acero de Refuerzo: 4200 kg/cm²

Peso unitario del concreto armado 2500 kg/m³.

3.6.4.4. Cálculos de Volumen, Peso y Masa

3.6.4.4.1. Pedestal 1

La turbina 32-TU-601C se apoyará sobre este pedestal. El volumen de este se calcula sumando el volumen de un prisma rectangular que soporta la turbina y el volumen del prisma rectangular que soporta la placa de la estructura de la chumacera del ventilador VTF.

$$PED_1 = (l_{PED1} * b_{PED1} * h_{PED1}) + (Arec * l)$$

$$PED_1 = (1.80m * 1.064m * 0.84m) + (0.32452m^2 * 0.112m) = \mathbf{1.64511 m^3}$$

3.6.4.4.2. Pedestal 2

Para el cálculo del volumen del pedestal que sirve de soporte a la base del ventilador VTF 32-U-601C, se adoptará la geometría de un prisma rectangular.

$$PED_2 = l * b * h = 1.88m * 2.668m * 0.275m = \mathbf{1.37936 m^3}$$

3.6.4.4.3. Pedestal 3

El pedestal que soporta el motor 32-MU-601C tiene forma de prisma rectangular, con una altura diseñada para coincidir con la placa de apoyo para estructura de la chumacera del ventilador VTF. Su volumen se calcula de la siguiente manera:

$$PED_3 = l_{PED3} * b_{PED3} * h_{PED3}$$

$$PED_3 = 1.064 m * 2.133 m * 0.961 m = \mathbf{2.18100 m^3}$$

3.6.4.4.4. Zapata

Para calcular el volumen de la zapata que soporta los pedestales de las máquinas, se utilizará la geometría de un prisma rectangular como modelo simplificado. A continuación, se presenta el cálculo del volumen:

$$ZAPATA = l * b * h$$

$$ZAPATA = 2.80m * 7.30m * 0.75m = 15.33 m^3$$

El peso de la cimentación se determinó multiplicando el volumen de cada uno de sus elementos por el peso unitario del concreto armado (2500 kg/m³). La masa de cada elemento se calculó dividiendo su peso por la aceleración de la gravedad, cuyo valor se asume como 9.81 m/s². Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 3.8, la cual se muestra a continuación:

Tabla 0.8 Elementos que componen la fundación y sus características.

Fundación						
Elemento	Coordenadas del centro de gravedad			Volumen (m ³)	Peso (kg)	Masa (kg*s ² /m)
	X (m)	Y (m)	Z (m)			
PED1	1.2816	1.40	1.1606	1.64511	4112.7750	419.24312
PED2	3.583	1.40	0.8875	1.37936	3448.40000	351.51886
PED3	6.0628	1.40	1.181	2.18100	5452.5000	555.81040
ZAPATA	3.650	1.40	0.375	15.33	38325.0000	3906.72783
Total					51338.6750	5233.30020

Fuente: Elaboración propia.

El peso de cada máquina se obtuvo de sus hojas de datos o manuales proporcionados por sus fabricantes. Para calcular la masa correspondiente, se dividió el

peso de cada máquina entre la aceleración de la gravedad. Los resultados obtenidos se presentan en la siguiente tabla 3.9:

Tabla 0.9 Maquinas que componen la fundación y sus características de masa.

Maquinaria					
Equipo	Coordenadas del centro de gravedad			Peso (kg)	Masa (kg*s ² /m)
	X (m)	Y (m)	Z (m)		
Turbina	1.053	1.40	2.142	1180	120.28542
VTF	3.583	1.40	2.142	4799	489.19470
Motor	6.5435	1.40	2.142	2400	244.64832
Total				8379	854.12844

Fuente: Elaboración propia.

3.6.4.4.5. Peso total del sistema

$$Pt = 51338.675 \text{ Kg} + 8379 \text{ Kg} = 59717.675 \text{ Kg}$$

3.6.4.4.1. Masa total del sistema

$$mt = 5233.30020 \frac{\text{kg} * \text{s}^2}{\text{m}} + 854.12844 \frac{\text{kg} * \text{s}^2}{\text{m}} = 6087.42846 \text{ kg} * \text{s}^2 / \text{m}$$

3.6.4.5. Centro de gravedad del sistema

Para determinarlo, se multiplicó la masa de cada componente de la cimentación y de las maquinarias por sus correspondientes coordenadas X, Y y Z. Posteriormente, se sumaron los valores resultantes para cada coordenada, tal como se detalla en la Tabla 3.10, y se dividieron entre la masa total del sistema, como se muestra en los cálculos que siguen:

Tabla 0.10 *Tabla de cálculos para determinar el centro de gravedad del sistema.*

	X	Y	Z	VOLUMEN	PESO	MASA	M*X	M*Y	M*Z
PED1	1,2816	1,4000	1,16060	1,64511	4112,7750	419,24312	537,3020	586,9404	486,5736
PED2	3,5830	1,4000	0,88750	1,37936	3448,4000	351,51886	1259,4921	492,1264	311,9730
PED3	6,0628	1,4000	1,18610	2,18100	5452,5000	555,81040	3369,7673	778,1346	659,2467
ZAPATA	3,6500	1,4000	0,37500	15,33000	38325,0000	3906,72783	14259,5566	5469,4190	1465,0229
				SUMATORIA	51338,6750	5233,30020	19426,11790	7326,62029	2922,81620
	X	Y	Z	PESO	MASA				
TUR	1,0530	1,4000	2,1420	1180,0000	120,28542		126,66055	168,39959	257,65137
VTF	3,5830	1,4000	2,1420	4799,0000	489,19470		1752,78461	684,87258	1047,85505
MOTOR	6,5435	1,4000	2,1420	2400,0000	244,64832		1600,85628	342,50765	524,03670
			SUMATORIA	8379,0000	854,12844		3480,30144	1195,77982	1829,54312

Fuente: Elaboración propia

$$X_o = \frac{19426.1179 + 3480.30144}{6087.42846} = 3.762906 \text{ m}$$

$$Y_o = \frac{7326.62029 + 1195.77982}{6087.42846} = 1.40 \text{ m}$$

$$Z_o = \frac{2922.8162 + 1829.54312}{6087.42846} = 0.780684 \text{ m}$$

3.6.4.6. Cálculo de los momentos de inercia de los elementos

Calculo del momento de inercia de las maquinas con respecto al eje X que pasa por el CG del sistema.

$$I_{mx1} = m_{m1} * [(X_{m1} - X_o)^2 + (Z_{m1} - Z_o)^2]$$

$$I_{xTUR} = 120.28542 * [(1.053 - 3.762906)^2 + (2.142 - 0.780684)^2] = 1106.237556$$

$$\text{Turbina} = 1106.237556 \text{ kg*s}^2\text{*m}$$

$$\text{VTF} = 922.399805 \text{ kg*s}^2\text{*m}$$

$$\text{Motor} = 2344.925828 \text{ kg*s}^2\text{*m}$$

Cálculo del momento de inercia de la masa del cimientó con respecto al eje que pasa por su centro de gravedad y es paralelo al eje de rotación.

$$I_{fy1} = \frac{m_{f1}}{12} * (y_1^2 + z_1^2) + m_{f1} * [(X_1 - X_o)^2 + (Z_1 - Z_o)^2]$$

$$I_{yPED1} = \frac{419.24312}{12} * (1.064^2 + 0.84^2) + 419.24312 * [(1.2816 - 3.762906)^2 + (1.1606 - 0.780684)^2] = \mathbf{2705.94475}$$

$$\mathbf{PED1= 2705.94475 \text{ kg*s}^2*\text{m}}$$

$$\mathbf{PED2= 121.13735 \text{ kg*s}^2*\text{m}}$$

$$\mathbf{PED3= 3126.53294 \text{ kg*s}^2*\text{m}}$$

$$\mathbf{ZAPATA= 3428.29277 \text{ kg*s}^2*\text{m}}$$

3.6.4.7. Cálculo de la Inercia total del sistema

$$I_y = I_{yTur} + I_{yVTF} + I_{yMotor} + I_{yPED1} + I_{yPED2} + I_{yPED3} + I_{yZAP}$$

$$I_y = 1106.237556 + 922.399805 + 2344.925828 + 2705.94475 + 121.13735 + 3126.53294 + 3428.29277 = \mathbf{13755.475929 \text{ kg} * \text{s}^2 * \text{m}}$$

3.6.4.8. Cálculo densidad del suelo

$$\rho = \frac{\gamma}{9.81} = \frac{2040 \text{ Kg/m}^3}{9.81 \text{ m/s}^2} = \mathbf{207.95 \text{ kg} * \text{s}^2 / \text{m}^4}$$

3.6.4.9. Cálculo de los parámetros de diseño

Una vez recopilada la información necesaria para el análisis, se calcularon los parámetros de diseño descritos para la teoría del Semiespacio Elástico. Estos parámetros incluyen: radio equivalente, constante de resorte, relación de masas, factor de empotramiento, relación de amortiguamiento geométrico y relación de amortiguamiento interno.

3.6.4.9.1. Radio equivalente

Para rotación horizontal usamos la ecuación 2.12 para obtener el siguiente resultado:

$$r_{o\psi} = \sqrt[4]{\frac{7.30m * (2.80m)^3}{3 * \pi}} = 2.03063 m$$

3.6.4.9.2. Cálculo de coeficiente de enterramiento (N)

El coeficiente de enterramiento para rotación horizontal se calculó utilizando la ecuación 2.16, obteniendo los siguientes resultados:

$$N_{\psi} = 1 + 1.2(1 - 0.25) * \frac{0.40 m}{2.03063 m} + 0.2(2 - 0.25) * \left(\frac{0.40 m}{2.03063 m}\right)^3 = 1.17996$$

h: Es la profundidad efectiva de embutimiento, se usa un valor reducido para "h", siendo este 2/3 de la real.

3.6.4.9.3. Coeficiente de resorte

$$\frac{L}{B} \therefore \frac{2.8 \text{ m}}{7.3 \text{ m}} = 0.38356$$

Con el valor obtenido de 0.38356, se utiliza la figura 2.11, ingresando por el eje de abscisas hasta interceptar la curva correspondiente a $\beta\phi$ para vibraciones de rotación horizontal, obteniendo un valor de:

$$\beta\phi = 0.42$$

3.6.4.9.4. Constante de resorte equivalente

Para el análisis de fundaciones rectangulares sometidas a rotación horizontal, se aplicó la ecuación 2.6, cuyos resultados se presentan a continuación:

$$K_{\psi} = \frac{(510 \text{ kg/cm}^2 * 10^4) * 0.42 * (7.30\text{m} * 2.80\text{m})^2 * 1.17996}{1 - 0.25} = 1407950126.75 \text{ kg/m}$$

$$K_{\psi} = 14.08 * 10^8 \text{ kg/m}$$

Para el análisis de fundaciones de base circular sometida a rotación horizontal, se aplicó la ecuación 2.8, obteniendo los siguientes resultados:

$$K_{\psi} = \frac{8 * (510 \text{ kg/cm}^2 * 10^4) * (2.03063 \text{ m})^3}{3(1 - 0.25)} * 1.17996 = 179158461.497 \text{ kg/m}$$

$$K_{\psi} = 17.92 * 10^7 \text{ kg/m}$$

3.6.4.9.5. Cáculo de relación de masas

Para determinar las relaciones de masa en el modo de vibración de rotación horizontal, se aplicó la ecuación 2.23, cuyos resultados se presentan a continuación

$$B_{\psi} = \frac{3(1 - 0.25)}{8} * \frac{13755.475929}{207.95 * (2.03063)^5} = 0.538834$$

3.6.4.9.6. Factor de amortiguamiento por embutimiento.

Los resultados del cálculo del factor de amortiguamiento por embutimiento para el modo de vibración de rotación horizontal, obtenidos mediante la ecuación 2.27, son los siguientes:

$$\alpha_{\psi} = \frac{1}{\sqrt{1.17996}} * \left[1 + 0.7 * (1 - 0.25) * \frac{0.40}{2.03063} + 0.6 * (2 - 0.25) * \left(\frac{0.40}{2.03063} \right)^3 \right]$$

$$\alpha_{\psi} = \mathbf{1.0231824}$$

3.6.4.9.7. Relación de amortiguación geométrica (Dg)

Con el fin de determinar la relación de amortiguamiento geométrico correspondiente al modo de vibración de rotación horizontal, se aplicó la ecuación 2.19. Los resultados obtenidos se detallan a continuación:

$$D_{g\psi} = \frac{0.15 * 1.0231824}{(1 + 1.17996 * 0.538834) * \sqrt{1.17996 * 0.538834}} = \mathbf{0.11766635}$$

3.6.4.9.8. Cálculo de relación total de amortiguamiento

Según Richart (1970), se puede asumir un valor de 0.05 para la relación de amortiguamiento interno (Di), o se puede obtener un valor en la tabla 3, de acuerdo al tipo de suelo donde se encuentra la fundación, el valor asumido se sumará al valor de amortiguamiento geométrico (Dg), obteniendo el siguiente resultado:

$$D_{\psi} = 0.11766635 + 0.05 = \mathbf{0.16766635}$$

3.6.4.9.9. Frecuencia Natural

La frecuencia natural se calculó utilizando la ecuación 2.30, y los resultados obtenidos son los siguientes:

Para base rectangular:

$$F_{n\psi} = \frac{60}{2\pi} * \sqrt{\frac{1407950126.75}{13755.475929}} = \mathbf{3055.112499 \text{ rpm}}$$

Para base circular con el uso de radio equivalente

$$F_{n\psi} = \frac{60}{2\pi} * \sqrt{\frac{179158461.497}{13755.475929}} = \mathbf{1089.813626 \text{ rpm}}$$

3.6.4.9.10. Factor de magnificación dinámica

El factor de amplificación dinámica se calculó mediante la ecuación 2.31, cuyos resultados se detallan a continuación:

$$M_{\psi} = \sqrt{\frac{1}{\left[\left(1 - \left(\frac{1800}{1089.813626} \right)^2 \right)^2 + \left(2 * 0.16766635 * \frac{1800}{1089.813626} \right)^2 \right]}} = \mathbf{0.551095}$$

3.6.4.9.11. Cálculo factor de transmisibilidad

Se procedió a calcular el factor de transmisibilidad mediante la ecuación 2.32, y los resultados obtenidos se detallan a continuación:

$$T_{r\psi} = 0.551095 * \sqrt{1 + [2 * 0.16766635 * \left(\frac{1800}{1089.813626} \right)]^2} = \mathbf{0.629975}$$

3.6.4.9.12. Cálculo de fuerzas transmitidas

Para determinar las fuerzas transmitidas, se multiplicó el factor de transmisibilidad por el momento de rotación horizontal transmitido, y los resultados se detallan a continuación:

$$M_{T\psi} = T_{r\psi} * M_{\psi} \therefore 0.629975 * 47000 \text{ kgf.m} = \mathbf{29608.825 \text{ kgf.m}}$$

3.6.4.9.13. Cálculo de amplitudes

Los valores de las amplitudes permisibles de rotación se obtuvieron a través de la ecuación 2.35, y se presentan a continuación:

$$A_{\psi} = \frac{0.551095 * 47000 \text{ kgf.m}}{179158461.497 \text{ kg/m}} = \mathbf{0.00014457 \text{ rad}}$$

Una vez obtenidos los valores de amplitud, se realizó un ajuste multiplicándolos por 2 y se procedió a su comparación con la velocidad de operación de la maquinaria, en la Figura 2.12. Esta evaluación confirmó que las amplitudes se encuentran dentro de un rango seguro, lo que implica que no representan ningún peligro para la fundación, las máquinas o los elementos adyacentes.

3.6.4.9.14. Frecuencia de resonancia

Con el fin de determinar la frecuencia de resonancia, se procedió a utilizar la ecuación 2.33. Los resultados obtenidos a través de este cálculo se detallan a continuación:

$$F_r = \frac{1089.813626}{\sqrt{1 - 2 * 0.16766635^2}} = \mathbf{1121.806033 \text{ rpm}}$$

3.6.4.9.15. Estudio de resonancia

Se realizaron análisis comparativos entre la frecuencia de operación de la maquinaria, la frecuencia de resonancia para movimientos rotativos y la frecuencia natural de la fundación. El objetivo fue verificar que los resultados se encontraran fuera del rango crítico donde se podría generar resonancia.

$$R_{\psi} = \frac{F}{F_r}$$

$$R_{\psi} = \frac{1800}{1121.806033} = \mathbf{1.60455}$$

$$0.7 \leq \text{Rango de valores de resonancia} \leq 1.40 < 1.60455$$

$$R_{2\psi} = \frac{F}{F_n}$$

$$R_{\psi} = \frac{1800}{1089.813626} = \mathbf{1.651659}$$

$$0.7 \leq \text{Rango de valores de resonancia} \leq 1.40 < 1.651659$$

Dado que las relaciones de frecuencia se encuentran fuera del rango de resonancia, se concluye que el sistema no experimenta resonancia en el modo de vibración de balanceo.

3.6.4.10. Chequeo del criterio de Diseño

3.6.4.10.1. Cálculo de excentricidad

Se calcula la excentricidad resultante entre el centro de gravedad del conjunto equipo-cimentación y el centroide del área de la base.

$$e_x = \frac{\left|X_o - \frac{B}{2}\right|}{B} * 100 \quad \therefore \quad \frac{\left|3.762906 - \frac{7.30m}{2}\right|}{7.30} * 100 = \mathbf{1.546658\%}$$

$$e_y = \frac{\left|Y_o - \frac{L}{2}\right|}{L} * 100 \quad \therefore \quad \frac{\left|1.40 - \frac{2.80}{2}\right|}{2.80} * 100 = \mathbf{0\%}$$

Esto indica que la distribución de masas en el sistema del soplador de caldera es correcta, ya que la excentricidad no se excede del 5%.

3.6.4.10.2. Cálculo de presión del suelo

Se calcula la presión transmitida al suelo considerando el peso total del sistema y el área de contacto de la fundación, obteniendo los siguientes resultados:

$$P_s = \frac{Pt}{B * L * 10000} \quad \therefore \quad \frac{59717.675 \text{ kg}}{2.80m * 7.30m * 10000} = \mathbf{0.292161 \text{ kg/cm}^2}$$

$$0.292161 \text{ kg/cm}^2 < 1.53 \text{ kg/cm}^2$$

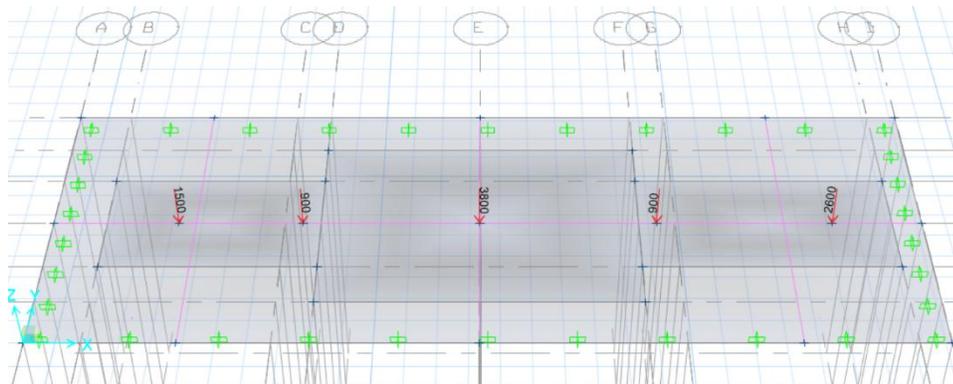
Según los cálculos la presión ejercida sobre el suelo no excede la presión admisible, ni un tercio de la misma, el cual es el valor recomendado para casos similares de maquinaria con vibraciones.

Después de este análisis se puede concluir que el dimensionamiento seleccionado para la cimentación es correcto, y las cargas a las cuales está sometida la fundación no representan ningún peligro para el sistema.

3.6.4.11. Modelado de la fundación en SAFE 2016

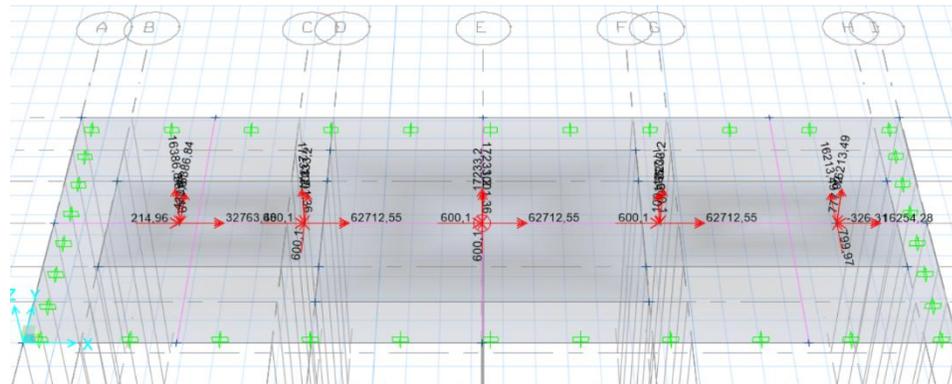
Con los datos recopilados en la investigación, se procedió a modelar la cimentación en el programa SAFE 2016. Se introdujeron los parámetros de diseño relevantes, como las reacciones del suelo, las propiedades del concreto y las cargas estáticas de cada máquina, considerando el área entre pernos de cada placa como el área de carga correspondiente, tal como se puede detallar en la figura 3.23. Adicionalmente, se incorporaron las cargas dinámicas como carga variable. Mediante las combinaciones de carga del programa, se aplicaron los factores de carga necesarios para el análisis, tal como se muestra en la figura 3.24.

Figura 0.24 Simulación de la fundación en SAFE con las cargas de peso de cada máquina.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 0.25 Simulación de la fundación en SAFE con las cargas dinámicas de cada máquina.



Fuente: Elaboración propia.

El software utilizado proporcionó una estimación de los asentamientos, así como de las fuerzas y momentos que actúan sobre la cimentación. Estos datos, junto con otra información relevante para el análisis del diseño, serán presentados y discutidos en el Capítulo IV de esta investigación.

3.6.5. Comparar los resultados obtenidos del diseño de la cimentación para el soplador de caldera con su proyecto original.

3.6.5.1. Análisis FODA e interpretación de la información.

Durante este periodo se organizó, clasificó y se presentaron los resultados de la investigación en la matriz FODA, gráficas elaboradas y sistematizadas con el propósito de hacerlos comprensibles. Este análisis de la información, estuvo orientado a probar cual solución es más conveniente asumir.

Para evaluar la viabilidad de la cimentación existente y la del rediseño propuesto para el soplador de caldera 32-U-601C, se realizó un análisis FODA para cada caso. La metodología consistió en identificar las Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y

Amenazas (FODA) para cada diseño y luego cuantificar cada ítem con un valor de 1 a 3, según su importancia relativa para los objetivos de la investigación. Estos valores se sumaron y ponderaron para cada categoría (FODA), permitiendo calcular un Factor de Optimización (Fortalezas + Oportunidades) y un Factor de Riesgo (Debilidades + Amenazas). La comparación de estos factores determinó la factibilidad de cada opción.

3.6.5.2. Redacción del trabajo de grado

Esta etapa contempló la redacción, desarrollo y revisión del Trabajo de Grado, realizando la presentación de las conclusiones y recomendaciones luego de haber alcanzado los objetivos específicos de dicha investigación. Cabe destacar que esta etapa se ejecutó siguiendo la normativa emitida por la Universidad de Oriente y las sugerencias del tutor académico.

CAPITULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se detalla el procedimiento seguido, junto con su análisis, para dar solución a cada objetivo planteado en esta investigación, cuyo fin es la evaluación de la cimentación del soplador de caldera 32-U-601C en la planta de Fertilizantes Nitrogenados PEQUIVEN, ubicada en el Complejo Petroquímico José Antonio Anzoátegui, Estado Anzoátegui, Venezuela.

4.1. Especificar el estado de las instalaciones de la cimentación del soplador de caldera 32-U-601C con respecto a su proyecto original.

La metodología empleada para alcanzar este objetivo se basó en el análisis de tres categorías principales de documentación, complementado con inspecciones visuales en campo.

Documentación del Diseño Original: Se revisaron planos estructurales, arquitectónicos y de detalle de refuerzo, memorias de cálculo y especificaciones técnicas. Esto permitió comprender las características geométricas, estructurales y geotécnicas usadas originalmente, los criterios de diseño y los materiales especificados.

Documentación de la Construcción: Se examinaron informes de construcción, reportes de inspección y demás documentación del proceso constructivo para verificar la correspondencia entre la construcción y el diseño original, así como el cumplimiento de los estándares de calidad.

Documentación del Estado Durante su Vida Útil: Se analizaron informes de inspección, mantenimiento y monitoreo de vibraciones para conocer el comportamiento dinámico de los equipos, la transmisión de vibraciones y cualquier problema detectado.

Inspección Visual Tipo A1: Se realizaron inspecciones visuales en campo para evaluar el estado actual de los equipos y la cimentación, siguiendo protocolos de seguridad, como se observa en la figura 4.1.

Figura 0.1 *Inspección Visual de la cimentación.*



Fuente: Realización propia.

Se documentaron las deformaciones y espacios vacíos entre el concreto y la placa de apoyo de las chumaceras, como se muestra en la Figura 4.2. Estas anomalías son un claro indicativo de que las fuerzas dinámicas generadas por el funcionamiento del soplador de caldera, específicamente las vibraciones excesivas, no fueron

adecuadamente absorbidas ni transmitidas por la cimentación, lo que llevó a un desprendimiento progresivo entre la placa de apoyo y el concreto.

Figura 0.2 *Muestra de deformación y espacios vacíos entre el concreto (lado turbina).*



Fuente: Realización propia.

Adicionalmente, se constató la fractura de las soldaduras en los soportes de las chumaceras (Figura 4.3), lo que representa una falla estructural directa, resultado de la fatiga del material ante las constantes cargas cíclicas y la amplificación de las vibraciones. Esta rotura comprometió gravemente la estabilidad del equipo y su alineación, generando un ciclo vicioso de aumento de vibraciones y mayores esfuerzos. Complementariamente, se tomaron medidas in-situ de la cimentación que se cotejaron con las dimensiones del diseño original. Esta verificación es para determinar si las desviaciones geométricas, junto con las fuerzas dinámicas no controladas, contribuyeron a las deformaciones y fracturas observadas.

Figura 0.3 *Muestra de fractura de la soldadura en el soporte (lado motor).*



Fuente: Realización propia.

Al momento de realizar esta investigación, el soplador de caldera 32-U-601C en su totalidad, incluyendo la turbina, el ventilador de tiro forzado (VTF) y el motor, así como la caldera misma, se encontraban detenidos y fuera de operación. La turbina de vapor, como se evidencia en la Figura 4.4, había sido desinstalada de la cimentación. Esta parada general del equipo y de la unidad respondía al incidente de las vibraciones excesivas y la consecuente rotura de la soldadura en los soportes de las chumaceras. Todos los demás elementos del ventilador de tiro forzado también estaban siendo sometidos a estudios y procesos de mantenimiento simultáneamente, como parte de la estrategia integral para diagnosticar y corregir las fallas que llevaron a la paralización de la producción.

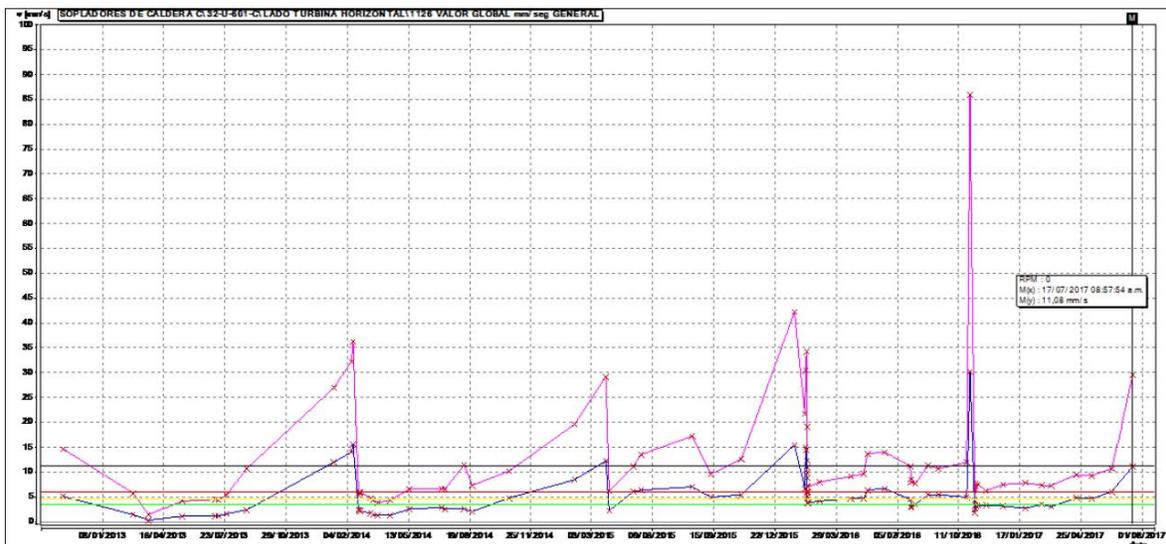
Figura 0.4 Inspección del pedestal de Turbina y elementos del VTF.



Fuente: Realización propia.

El análisis de los reportes de inspección realizados a lo largo del tiempo de vida útil de la fundación reveló un patrón preocupante en el comportamiento vibratorio del soplador de caldera 32-U-601C. Desde enero de 2013 hasta finales de 2017, se observó un incremento progresivo y persistente en las amplitudes de vibración, con picos que superaban consistentemente el valor de alarma de 6 mm/s, tal como lo evidencia la Figura 4.5. Este comportamiento se mantuvo a pesar de múltiples intervenciones de mantenimiento y esfuerzos de balanceo, que incluyeron la verificación y ajuste de holguras, el reemplazo de componentes del acople para corregir soldaduras mecánicas y deformaciones, y la búsqueda de perpendicularidad entre las chumaceras y el pedestal de apoyo.

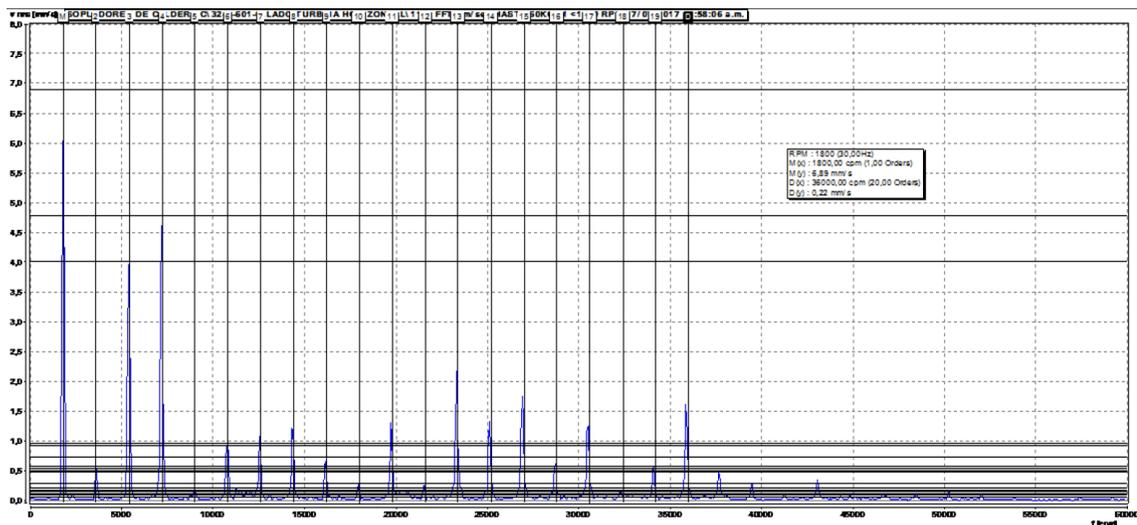
Figura 0.5 Muestra a través de tendencia del incremento de valores de velocidad de vibración en la chumacera lado turbina



Fuente: Fertinitro (2017). Tomado de: Reporte de inspección de equipos rotativos.

A pesar de estas acciones correctivas y preventivas, el problema de las vibraciones no solo persistió, sino que se agravó. Durante el periodo posterior, el deterioro estructural directamente observado en los pedestales influyó negativamente en la dinámica del motor, generando armónicos de la velocidad de giro, como se ilustra en la figura 4.6, lo cual agrava el desbalance inherente al sistema, lo que confirma que el problema de fondo en la cimentación no pudo ser mitigado únicamente con los mantenimientos rutinarios y las intervenciones sobre los equipos. Esto nos lleva a la interrogante fundamental: ¿por qué el balanceo no está logrando reducir la vibración en la forma esperada?

Figura 0.6 Muestra de soltura a través del espectro de vibración e influencia en armónicos de velocidad de giro.



Fuente: Fertinitro (2017). Tomado de: Reporte de inspección de equipos rotativos.

4.1.1. Análisis de la información

El análisis de la documentación y las inspecciones reveló las siguientes observaciones con respecto al diseño original de la cimentación:

Diseño: Se identificaron deficiencias en el diseño original, incluyendo la configuración de la losa de cimentación que soporta otros equipos y columnas, el diseño de los pedestales con sección variable tipo pirámide truncada, el espesor de la losa determinada por punzonado, tal como se muestra en la figura 4.7, dando como espesor mínimo una losa de fundación de 30 cm, valor que se encuentra por debajo del mínimo de 457 mm recomendado por el Manual de Ingeniería de Diseño, Volumen 18 – I PDVSA, el cual establece un espesor de dos tercios de la distancia entre el borde del pedestal y el borde de la zapata, y nunca menor al indicado (457mm).

Figura 0.7 Memoria de cálculo: Chequeo por punzonado de la Losa Fundación del Diseño original



MANTENIMIENTO DE EQUIPOS INDUSTRIALES
 INSTALACIONES HOSPITALARIOS E INDUSTRIALES
 MANTENIMIENTOS A ESTRUCTURAS METALICAS
 OBRAS CIVILES Y ELECTRICAS PARA LA INDUSTRIA
 RIF. J-30806456-4

5.4. CHEQUEO POR PUNZONADO DE LA LOSA FUNDACION

El conjunto de elementos que conforman el sistema de caldera, entre ellos: un condensador, un economizador, un sistema de turbinas y la caldera como tal, reposan sobre una losa fundación, sin embargo, en el caso de la caldera y el economizador, las fundaciones definitivas y las cuales transmiten los esfuerzo al suelo son las zapatas colaborantes. Por lo tanto, el espesor de la losa de cimentación se obtiene mediante el diseño por punzonado, para ello, se utilizo la máxima reacción de las estructuras, siendo este un criterio muy conservador pero válido, ya que **los equipos a los cuales la losa sirve de fundación directa transmiten cargas menores.**

$$P_{U \max} = 86000 + 16000 = 102000 \text{ kg}$$

*Sumatoria de cargas en el soporte frontal de Caldera

$$D = \sqrt{\left(\frac{T_x + T_y}{4}\right)^2 + \frac{P_{U \max}}{(4 * \phi * 1.06 * \sqrt{f'c})}} - \frac{(T_x + T_y)}{4}$$

$$E = D + 10$$

$$D = \sqrt{\left(\frac{553 + 34.4}{4}\right)^2 + \frac{102000}{(4 * 0.85 * 1.06 * \sqrt{210})}} - \frac{(553 + 34.4)}{4} = 7 \approx 10 \text{ cm}$$

$$E = 10 + 10 = 20 \text{ cm} \quad \text{Se adopto un **espesor mínimo de losa fundación de 30 cm**}$$

Chequeo de cortante en losa fundación:

Corte resistente

CARRETERA PRINCIPAL VIA QUISIRO SECTOR EL TARTAGAL LOS PUERTOS DE
 ALTAGRACIA ESTADO ZULIA TELFS: (0266) 3211889 / 5110127 E-MAIL:
 NAVEDACA@GMAIL.COM

Fuente: NAVEDA (2009). Tomado de: Memoria de Cálculo de infraestructura.

Fundaciones de caldera – Fertinitro.

Se apreció que la solución propuesta en la memoria de cálculo del diseño original de la fundación se centró principalmente en el peso estático de los equipos y la necesidad de resistir posibles momentos de vuelco, un enfoque que puede resultar insuficiente para equipos que generan cargas dinámicas sustanciales. Además, se observó que el armado de acero en los pedestales presentaba una cuantía de 0.0018, como se puede apreciar

en la Figura 4.8. Este valor es inferior a lo recomendado por la norma COVENIN 1753, en su subsección 10.4.3, la cual establece que en miembros comprimidos el área de refuerzo longitudinal no debe ser menor de 0.01 ni mayor de 0.06 del área de la sección total de concreto para los niveles de diseño ND3 y ND2.

Figura 0.8 Memoria de Cálculo: Dimensionamiento de los pedestales del VTF



MANTENIMIENTO DE EQUIPOS INDUSTRIALES
 INSTALACIONES HOSPITALARIOS E INDUSTRIALES
 MANTENIMIENTOS A ESTRUCTURAS METALICAS
 OBRAS CIVILES Y ELECTRICAS PARA LA INDUSTRIA
 RIF. J-30806456-4

$A_s \text{ min} = 0.005 * (50 * 50) = 12.5 \text{ cm}^2$

5.7- DIMENSIONAMIENTO DE LOS PEDESTALES DEL VTF

El conjunto VTF consta de tres equipos los cuales son: turbina, ventilador y motor. Estos equipos son dispuestos sobre una especie de pedestal con sección variable que **descansa sobre una losa fundación al igual que el resto de equipos**. El elemento de elevación se diseñó como un cabezal, dadas sus grandes dimensiones, por lo tanto el armado consistirá en cabillas en forma de U en ambos sentidos y estribos transversales formando una cesta.

$A_{s \text{ principal}} = 0.0018 * b * h$

$A_{s \text{ principal}} = 0.0018 * (106.3 * 96.1) = 18.39 \text{ cm}^2$

Se opto por **colocar cabillas 5/8" a cada 15 cm, en forma de "U" en ambos sentidos**.

$A_{s \text{ principal}} = 0.0018 * b * \frac{h}{2}$

$A_{s \text{ principal}} = 0.0018 * (106.3 * 96.1) / 2 = 9.19 \text{ cm}^2$

Se deben **colocar cabillas 5/8" a cada 15 cm, alrededor de toda la sección transversal**.

5.8- DIMENSIONAMIENTO DEL RESTO DE FUNDACIONES

Para el condensador y la torre de escaleras, se plantean zapatas colaborantes de 1x1 metros y 0.60 centímetros de espesor total incluyendo la losa fundación, con el fin de desarrollar la longitud necesaria de anclaje de los pernos.

CARRETERA PRINCIPAL VIA QUISIRO SECTOR EL TARTAGAL LOS PUERTOS DE
 ALTAGRACIA ESTADO ZULIA TELFS: (0266) 3211889 / 5110127 E-MAIL:
 NAVEDACA@GMAIL.COM

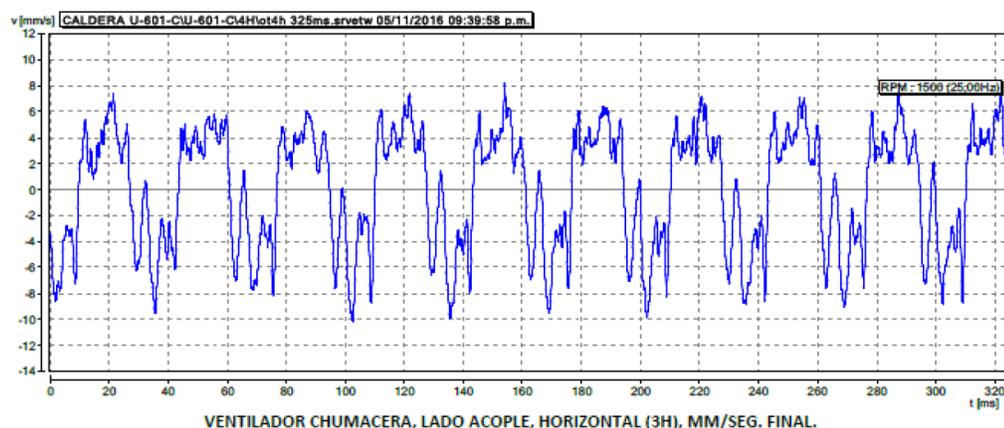
Fuente: NAVEDA (2009). Tomado de: Memoria de Cálculo de infraestructura.

Fundaciones de caldera – Fertinitro.

Se detectó el incumplimiento de recomendaciones dadas en normas americanas como la ACI 351 o el manual de ingeniería de diseño de PDVSA para fundaciones de equipos que generan vibraciones. Tampoco se cumplió la recomendación de trabajar este tipo de fundación como un elemento separado de otras fundaciones, ya que las vibraciones generadas por las máquinas y transmitidas a la fundación afectarían a los demás equipos adyacentes.

La clave para entender la persistencia de las vibraciones reside en la observación de la forma de onda del espectro de vibración de alguno de los apoyos del VTF, tal como se observa en la Figura 4.9. Un desbalanceo típico debería producir una onda de tiempo con forma senoidal, donde la amplitud y la fase del pico 1X RPM (una vez por revolución) están directamente relacionadas con la fuerza centrífuga generada por la masa desbalanceada. El balanceo, al añadir una masa de corrección, busca contrarrestar esta fuerza y reducir la amplitud de la onda.

Figura 0.9 *Espectro de vibración ventilador lado motor, horizontal 3H.*



Fuente: Fertinitro (2016). Tomado de: Reporte de inspección de equipos rotativos.

En este caso, la forma de onda observada es truncada, lo que sugiere un problema de soldadura estructural en el conjunto de pedestales. Esto significa que los pedestales no están lo suficientemente rígidos para resistir las fuerzas dinámicas generadas por la rotación. La onda truncada sugiere que la vibración se debe principalmente por la falta de rigidez más que por el desbalanceo en sí. El balanceo reduciría la vibración causada por la fuerza centrífuga del desbalance. Sin embargo, cuando la estructura carece de rigidez, la energía vibratoria se disipa en movimientos y deformaciones de la estructura en lugar de manifestarse como una onda senoidal típica de desbalanceo.

En resumen, el análisis de la documentación y las inspecciones reveló deficiencias en el diseño original de la cimentación, incluyendo falta de rigidez, configuración inadecuada de la losa de cimentación que une los pedestales, detalles constructivos que no cumplían con la normativa, y la ausencia de un análisis dinámico. Estas observaciones sugieren que el diseño original no es adecuado para las condiciones de operación del soplador de caldera 32-U-601C y que podría haber contribuido a los problemas de vibración y fallas detectadas en la cimentación.

4.2. Identificar las maquinas rotativas sobre la infraestructura del soplador de caldera 32-U-601C.

Este objetivo se enfoca en la caracterización de las maquinarias que componen el soplador de caldera 32-U-601C, un paso fundamental para el análisis de la fundación. El objetivo es recopilar información detallada sobre las características de operación y geométricas de cada máquina, datos esenciales para comprender las cargas estáticas y dinámicas que actúan sobre la cimentación.

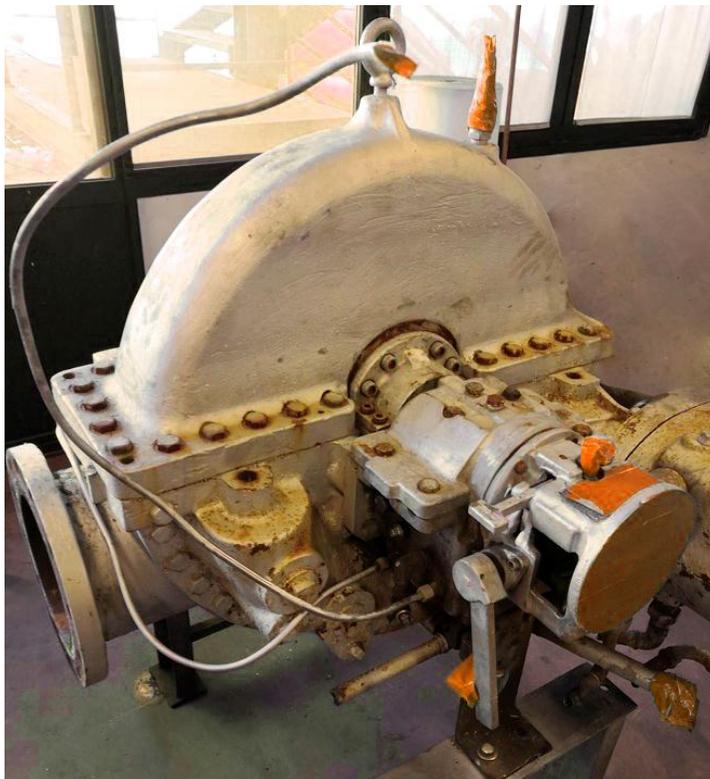
La metodología consistió en la revisión y análisis de la documentación técnica suministrada por los fabricantes de cada equipo (turbina, ventilador de tiro forzado - VTF, y motor), en concordancia con los lineamientos establecidos en el manual de ingeniería de diseño L-STC-003. Se recopilaron datos relativos a las características de operación, dimensiones y detalles de anclaje de cada máquina, complementada con las dimensiones obtenidas de la inspección en campo.

4.2.1. Turbina Dresser-Rand Modelo RLH 24 estándar

La turbina asociada al conjunto del soplador de caldera 32-U-601C es una turbina Dresser-Rand modelo RLH 24 estándar, una unidad de impulso de una sola etapa con un rotor de velocidad compuesta. De acuerdo con la documentación técnica del fabricante, está diseñada para operar a una velocidad nominal de aproximadamente 1800 rpm. Sus dimensiones de base y la disposición de los pernos de anclaje, obtenidos de los planos y verificados en campo, definen la interfaz de carga con uno de los pedestales de la cimentación. Como se puede observar en la Figura 4.10, la carcasa de esta turbina es un componente fundamental, no solo por contener los elementos rotatorios y estacionarios internos, sino primordialmente porque es la estructura que transmite directamente a la cimentación todas las cargas relevantes.

Adicionalmente, un detalle crucial para el diseño de la cimentación, y que se puede inferir de la configuración mostrada en la Figura 4.10, es la ubicación de las conexiones de entrada de vapor y de escape en la mitad inferior del conjunto de la carcasa. Esta disposición determina la interfaz con las tuberías externas y, por ende, la transmisión de fuerzas y momentos provenientes de estas, que la cimentación también debe ser capaz de soportar.

Figura 0.10 *Turbina Dresser-Rand RLH 24 estándar*



Fuente: Fotografía propia.

4.2.2. Ventilador de Tiro Forzado Chicago Blowers Modelo 1902 DW

El Ventilador de Tiro Forzado (VTF) asociado al soplador de caldera 32-U-601C. Se trata de un ventilador modelo Airfoil 1902 DW de diseño personalizado con dos cajas de entrada, fabricado por Chicago Blowers. Es la máquina encargada de suministrar el aire necesario para el proceso de combustión en la caldera. Este equipo, directamente acoplado a la turbina a través de un eje, opera a una velocidad similar a la de la turbina, alrededor de 1800 rpm. La Figura 4.11 muestra el ventilador, el cual con una considerable masa y velocidad de rotación, es un componente crucial para el diseño de su cimentación. Con una carcasa, robusta y totalmente soldada con refuerzos, diseñada

para resistir el movimiento de alta presión y transmitir las fuerzas que genera directamente a sus bases. Desde la perspectiva de la cimentación, las cargas dinámicas se transmiten primordialmente a través de sus chumaceras, la estructura de soporte integral del ventilador y su base directamente vinculada a la robusta carcasa. Las dimensiones de la base y la configuración de los pernos de anclaje, fueron verificadas con la documentación del fabricante y en campo.

Figura 0.11 Ventilador de Tiro Forzado (VTF) Chicago Blowers. Modelo 1902 DW



Fuente: Fotografía propia.

4.2.3. Motor US Motors Modelo Titan JCE 5809ML

Representa el tercer componente rotativo principal del soplador de caldera 32-U-601C. Este motor (figura 4.12), con una velocidad de operación nominal cercana a las

1800 rpm, se encuentra acoplado al sistema para proporcionar una fuente de energía alternativa o de respaldo para el accionamiento del ventilador, aunque su operación principal puede ser en momentos específicos o durante arranques. Sus dimensiones de base y la disposición de los pernos de anclaje, identificados en la documentación y verificados visualmente, definen su apoyo sobre el tercer pedestal de la cimentación. Al igual que la turbina y el VTF, su masa y velocidad de operación son parámetros relevantes para el análisis de las cargas dinámicas transmitidas a la fundación.

Figura 0.12 Motor US Motors. Modelo Titán JCE 5809ML



Fuente: Fotografía propia.

La similitud en la velocidad de operación de las tres máquinas (1800 rpm) exige por recomendación de la norma ACI 351 considerar el efecto de batido y las fuerzas desequilibradas del conjunto, incluyendo los empujes de fluidos (aire, vapor) a través de

los ductos. Conocer estos datos es crucial para modelar con precisión las cargas estáticas y dinámicas sobre la cimentación, lo cual es fundamental para su análisis y rediseño.

4.3. Obtener la caracterización de las condiciones geotécnicas del suelo de la cimentación mediante un estudio de suelos suministrado por la empresa.

Este objetivo presenta el análisis de las condiciones geotécnicas del suelo de cimentación, un factor crucial para el diseño y evaluación de la cimentación del soplador de caldera 32-U-601C. El objetivo principal es caracterizar las propiedades del suelo que influyen en la estabilidad y comportamiento de la cimentación. Para lograrlo, se revisó el estudio de suelos existente y se analizaron los parámetros geotécnicos relevantes.

La metodología consistió en la revisión y análisis del estudio geotécnico del área industrial, elaborado por Fugro-Mc Clelland Marine Geosciences-Venezuela (1999), específicamente los datos correspondientes a la unidad 32 (como se muestra en la figura 4.13) donde se ubica el soplador de caldera. Se identificaron los estratos del suelo y se analizaron los parámetros geotécnicos, incluyendo la resistencia al corte, la presión admisible, el módulo de corte dinámico y la relación de Poisson.

El análisis del estudio geotécnico (figura 4.13) reveló lo siguiente: Se identificaron tres estratos hasta los 11.0 metros, predominando arcillas consolidadas con intercalaciones de arenas limosas densas. La resistencia al corte no drenado (s_u) de las arcillas superó los 100-200 kPa. Se recomendó una presión admisible de 150 kPa para cargas estáticas y 225 kPa para cargas transitorias, considerando la presencia de arcilla blanda.

Figura 0.13 Características del perfil de suelo en la prueba CPT en la unidad 32

Aquater

JOB 360427	DEPT. INSU
REL. 3001	
Sh. 21 of 60	Rev.
0	1

Ref. SP-job 305100, SPC. No. 00-CA-E-11013, Rev. 3

4.9 Unit 32 - Utilities Area (Steam Boilers)

Within the Unit 32 area, an only CPT test has been performed, under steam boilers foundations (item 32 B 601A and 32 B 601B). The CPT results (with reference to CPT 32_100) evidenced the presence of a layer of soft silty clay, between 5.0-5.1 m and 7.5-7.6 m depth, underlying an upper thick layer of stiff silty clay, with some levels of medium dense silty sand, and overlaying a layer of silty sand and sand medium dense to very dense resting on the base bearing sandy stratum found at 10.8-11.0 m depth. Finally the following soil profile can be assumed:

Layer 1 from g.l. to 5.0-5.1 m depth, stiff silty clay ($q_c = 15-25 \text{ kg/cm}^2$, FR = 3.5-7.0 %) with some levels of medium dense silty sand ($q_c = 20-30 \text{ kg/cm}^2$, FR = 1.0-1.5 %).

This upper layer can be characterized by the following geotechnical parameters:

- unit weight, $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$
- undrained shear strength, $S_u \geq 100-150 \text{ kPa}$
- constrained modulus, $M_o \geq 7-8 \text{ Mpa}$

Layer 2 from 5.0-5.1 m to 7.5-7.6 m depth, silty clay and clay, soft to very soft ($q_c = 5-15 \text{ kg/cm}^2$, FR = 3.0-5.0 %)

This layer can be characterized by the following geotechnical parameters¹²:

- unit weight, $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$
- undrained shear strength, $S_u \geq 30-60 \text{ kPa}$
- constrained modulus, $M_o = 2.5-5 \text{ Mpa}$

Layer 3 from 7.5-7.6 m to 10.8-11.0 m depth, silty sand and sand, medium dense ($q_c \geq 40-50 \text{ kg/cm}^2$, FR < 1.0 %) to very dense with depth increasing ($q_c > 100-150 \text{ kg/cm}^2$, FR < 1.0-1.2 %).

At the base of this layer the CPT test registred a refusal ($q_c > 250-300 \text{ kg/cm}^2$) on sandy bearing stratum.

This layer can be characterized by the following geotechnical parameters:

- unit weight, $\gamma = 19-20 \text{ kN/m}^3$
- angle of shearing resistance, $\phi' \geq 35-38 \text{ degree}$
- constrained modulus, $M_o = 25-40 \text{ Mpa}$

Fuente: Snamprogetti (1999). Geotechnical report. Jose first fertilizer project.

El módulo de corte dinámico (Gs) se estimó en 50 MPa y la relación de Poisson en 0.25 (Figura 4.14), mediante correlaciones empíricas. El informe concluyó sobre la viabilidad de cimentaciones superficiales en el área 32, aunque señaló que la tolerancia a asentamientos podría limitar la presión admisible real. En síntesis, el estudio proporcionó datos cruciales sobre el perfil estratigráfico, resistencia, presión admisible y propiedades dinámicas del suelo, enfatizando la consideración de los asentamientos en el diseño de zapatas superficiales.

Figura 0.14 *Propiedades dinámicas del suelo para cimentaciones de máquinas.*

Aquater

JOB 360427	DEPT. INSU
REL. 3001	
Sh. 55 of 60	Rev.
	0 1

Ref. SP: Job 305100, SPC. No. 00-CA-E-11013, Rev. 3

Then, considering the average values of void ratios shown by the cohesive soils in the relevant zones, the following range of values for shear modulus resulted,
 $G = 50000 \div 70000 \cdot \text{kPa} = 50 \div 70 \cdot \text{MPa}$

For design considerations, a conservative value of $G = 50 \text{ Mpa}$ can be properly assumed.

For Poisson's ratio can be assumed a value of,
 $\nu = 0.25$

Zones with dense cohesionless soils at shallow depth.

The value of dynamic shear modulus has been estimated using empirical correlations between G values and N_{SPT} values as that proposed for sand by Imai & Tonouchi (1982)²³ and Crespellani & Vannucchi (1991)²⁴:
 $G = a \cdot N_{SPT}^{b} = 12.3 \cdot N_{SPT}^{0.811}$

Then, considering that:

- the N_{SPT} values generally obtained in the upper part of cohesionless deposits range between a minimum of $N_{SPT} = 12 \div 16$ and a maximum of $N_{SPT} = 25 \div 35$,
- the N_{SPT} values obtained in the upper part of cohesionless deposits by converting the cone bearing q_c of the CPTe tests, using the relationship for sands proposed by Robertson (1982), $q_c / N_{SPT} = 4.5$, range between a minimum of $N_{SPT} = 12$ and a maximum of $N_{SPT} = 25 \div 30$,

for shear modulus the following values can be estimated:

$$G = 60 \div 90 \cdot \text{MPa}$$

For Poisson's ratio can be assumed a value of,
 $\nu = 0.3$

Fuente: Snamprogetti (1999). Geotechnical report. Jose first fertilizer project.

4.4. Diseñar la cimentación para el soplador en función al método propuesto en el "Manual de ingeniería de diseño. Volumen 18 – I PDVSA".

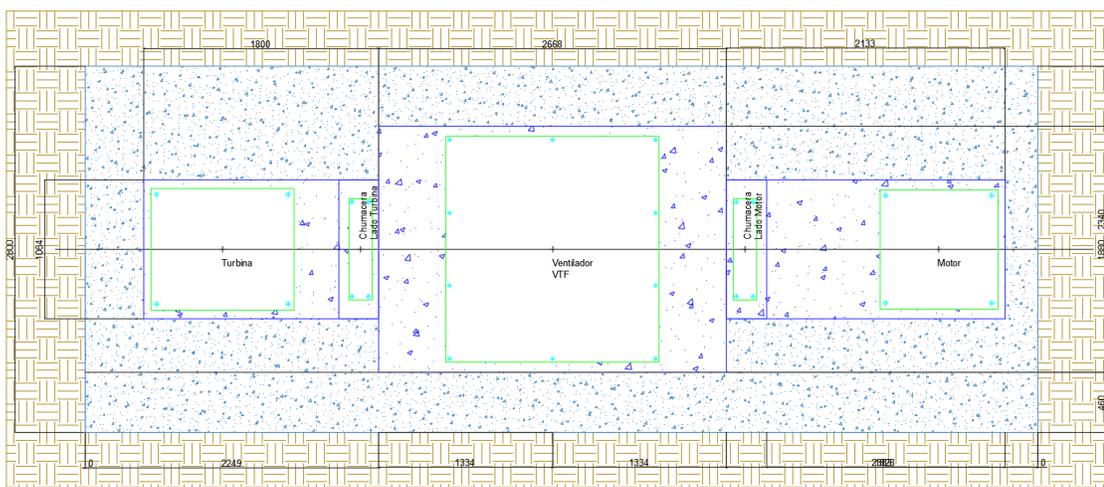
Para el cumplimiento de este objetivo se presenta el análisis de los resultados del diseño de la cimentación del soplador de caldera 32-U-601C, siguiendo la metodología propuesta en el "Manual de ingeniería de diseño. Volumen 18 – I PDVSA". El objetivo principal fue diseñar una cimentación que cumpla con los requisitos de seguridad y

funcionalidad, considerando las características de las maquinarias y las condiciones geotécnicas del suelo.

El diseño de la cimentación se llevó a cabo utilizando el modelo del semiespacio elástico para analizar las vibraciones. Se modeló el sistema como un conjunto de masa, resorte y amortiguador. Se empleó el programa SAFE para estimar las solicitaciones y respuestas en la fundación, y AutoCAD para el diseño de la infraestructura. El proceso de diseño incluyó los siguientes pasos:

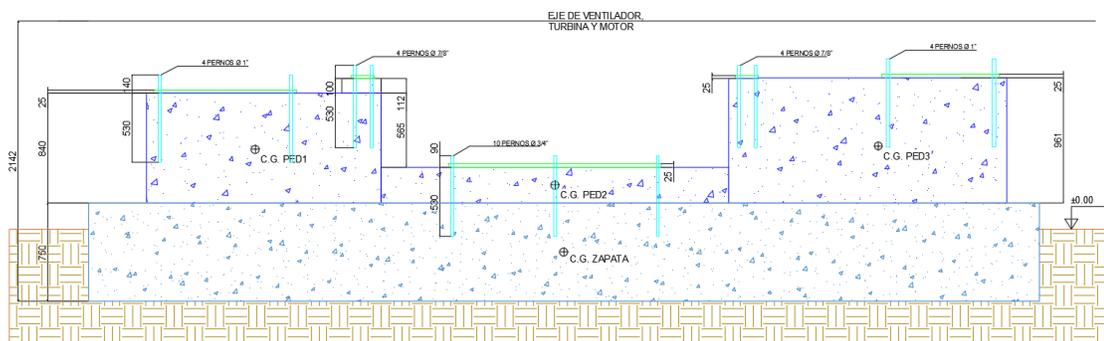
Para el diseño inicial de la cimentación, se consideró una estructura compuesta por tres pedestales individuales, destinados a cada máquina del soplador, integrados a una zapata común, cuya configuración vista en planta se ilustra en la figura 4.9. Las dimensiones preliminares de esta zapata se establecieron siguiendo los criterios propuestos por PDVSA (1991) en su Guía de diseño para Fundaciones de compresores recíprocos.

Figura 0.15 Plano de planta de fundación propuesta para el soplador 32-U-601C.



Fuente: Elaboración propia

Figura 0.16 Plano longitudinal de la fundación para el soplador 32-U601C.



Fuente: Elaboración propia

Se calcularon el volumen, peso y masa de cada elemento de la fundación (pedestales y zapata), así como el peso y masa de las maquinarias, los cuales se muestran en la tabla 4.1, estos valores fueron determinados utilizando los datos proporcionados por los fabricantes y el peso unitario del concreto armado (2500 kg/m^3) por el volumen de cada elemento de la fundación.

Tabla 0.1 Peso y Masa de los elementos de la cimentación y de las máquinas.

Elemento	Volumen	Peso	Masa
PED1	1.64511	4112.7750 Kg	419.24312 $\text{kg} \cdot \text{s}^2/\text{m}$
PED2	1.37936	3445.4000 Kg	351.51886 $\text{kg} \cdot \text{s}^2/\text{m}$
PED3	2.18100	5452.5000 Kg	55.81040 $\text{kg} \cdot \text{s}^2/\text{m}$
ZAPATA	15.33000	38325.0000 Kg	3906.72783 $\text{kg} \cdot \text{s}^2/\text{m}$
TURBINA	N/A	1180.0000 Kg	120.28542 $\text{kg} \cdot \text{s}^2/\text{m}$
VTF	N/A	4799.0000 Kg	489.19470 $\text{kg} \cdot \text{s}^2/\text{m}$
MOTOR	N/A	2400.0000 Kg	244.64832 $\text{kg} \cdot \text{s}^2/\text{m}$

SUMATORIA	59717.675 Kg	6087.42846 kg*s²/m
------------------	---------------------	--------------------------------------

Fuente: Elaboración propia

Se calculó el centro de gravedad del sistema (cimentación y maquinarias) multiplicando la masa de cada elemento por sus coordenadas y dividiendo la suma de los momentos resultantes por la masa total del sistema, los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4.2.

Tabla 0.2 Centro de gravedad del sistema calculado.

X₀	3.762906 m
Y₀	1.40 m
Z₀	0.780684 m

Fuente: Elaboración propia

Se calcularon los momentos de inercia de las máquinas y de la cimentación con respecto al eje que pasa por el centro de gravedad calculado y que a su vez es paralelo al eje de rotación. La Tabla 4.3 presenta los resultados obtenidos.

Tabla 0.3 Momentos de inercia de elementos de la cimentación y momento de inercia total del sistema.

Turbina	1106.237556 kg*s ² *m
VTF	922.399805 kg*s ² *m
Motor	2344.925828 kg*s ² *m
PED1	2705.94475 kg*s ² *m
PED2	121.13735 kg*s ² *m
PED3	3126.53294 kg*s ² *m
ZAPATA	3428.29277 kg*s ² *m
Inercia total del sistema	13755.475929 kg*s ² *m

Fuente: Elaboración propia

Se calcularon los parámetros de diseño necesarios para el análisis dinámico, incluyendo el radio equivalente, la constante de resorte, la relación de masas, el factor de empotramiento, y las relaciones de amortiguamiento geométrico e interno. Los resultados de estos cálculos se exponen en la Tabla 4.4.

Tabla 0.4 *Parámetros de diseño calculados.*

Radio equivalente ($r_{o\psi}$)	2.03063 m
Coefficiente de enterramiento (N_ψ)	1.17996
Coefficiente de resorte ($\beta\phi$)	0.42
Constante de resorte equivalente (K_ψ)	$17.92 \cdot 10^7$ kg/m
Relación de masas (B_ψ)	0.538834
Factor de amortiguamiento por embutimiento (α_ψ)	1.0231824
Relación de amortiguación geométrica (D_g)	0.11766635
Relación total de amortiguamiento (D_ψ)	0.16766635

Fuente: Elaboración propia

Se determinó la frecuencia natural del sistema y se verificó que no haya resonancia con la frecuencia de operación de las máquinas. Se calculó el factor de magnificación dinámica y el factor de transmisibilidad. Los resultados correspondientes se detallan en la Tabla 4.5.

Tabla 0.5 *Frecuencias Natural y de Resonancia. Factores de Magnificación y Transmisibilidad.*

Frecuencia Natural ($F_{n\psi}$)	1089.813626 rpm
Frecuencia de Resonancia (F_r)	1121.806033 rpm
Factor de Magnificación Dinámica (M_ψ)	0.551095
Factor de Transmisibilidad ($T_{r\psi}$)	0.629975

Fuente: Elaboración propia

Se calcularon las fuerzas transmitidas a la cimentación y las amplitudes de vibración resultantes. Una síntesis de los resultados obtenidos se encuentra en la Tabla 4.6. Se verificó que las amplitudes se encuentren dentro de los rangos permisibles. Se verificó que la excentricidad del sistema no exceda el 5% y que la presión del suelo no supere la presión admisible.

Tabla 0.6 *Fuerzas transmitidas, Amplitudes y Presión del Suelo.*

Fuerzas Trasmitidas	29608.825 kgf.m
Amplitudes	0.00014457 rad
Presión del Suelo (P_s)	0.292161 kg/cm ²

Fuente: Elaboración propia

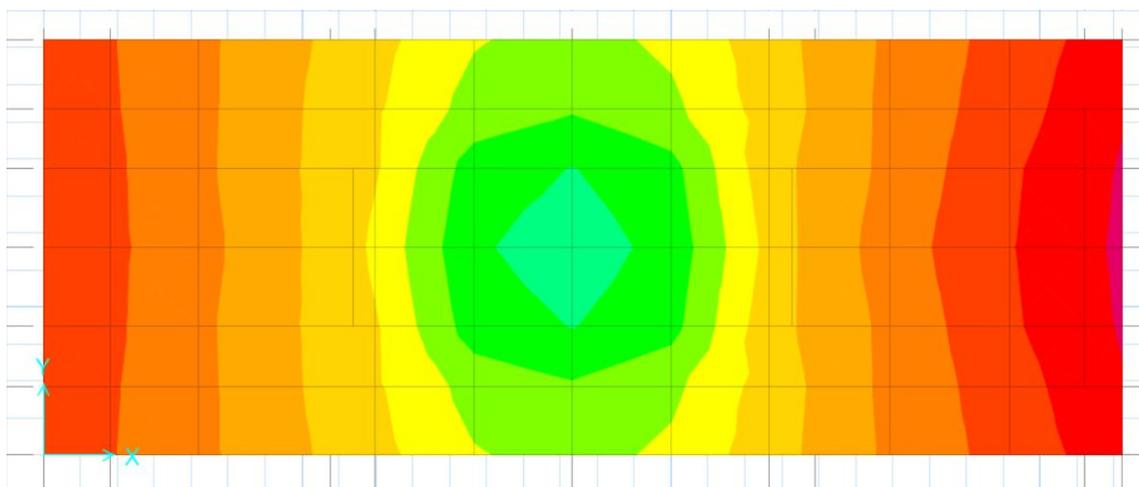
Se modeló la cimentación en el programa SAFE, introduciendo los parámetros de diseño, las propiedades de los materiales (concreto: $f'_c = 250 \text{ kg/cm}^2$, acero: $f_y = 4200$

kg/cm²) y las cargas estáticas y dinámicas. Se obtuvieron valores de asentamientos, fuerzas y momentos actuantes.

4.4.1. Resultados del Diseño

A continuación, se presentan los resultados del análisis de la cimentación obtenido mediante el software SAFE, comenzando con la simulación de los asentamientos para una combinación de cargas permanentes (figura 4.17) y para la combinación de carga permanente más carga variable y sismo (figura 4.18), las cuales revelan una distribución no uniforme a lo largo de la cimentación. Esta variación en los asentamientos no es crítica para la cimentación, aunque los asentamientos diferenciales pueden agravar las vibraciones, generar esfuerzos adicionales y comprometer la alineación de los equipos.

Figura 0.17 *Simulación de asentamientos de la fundación.*



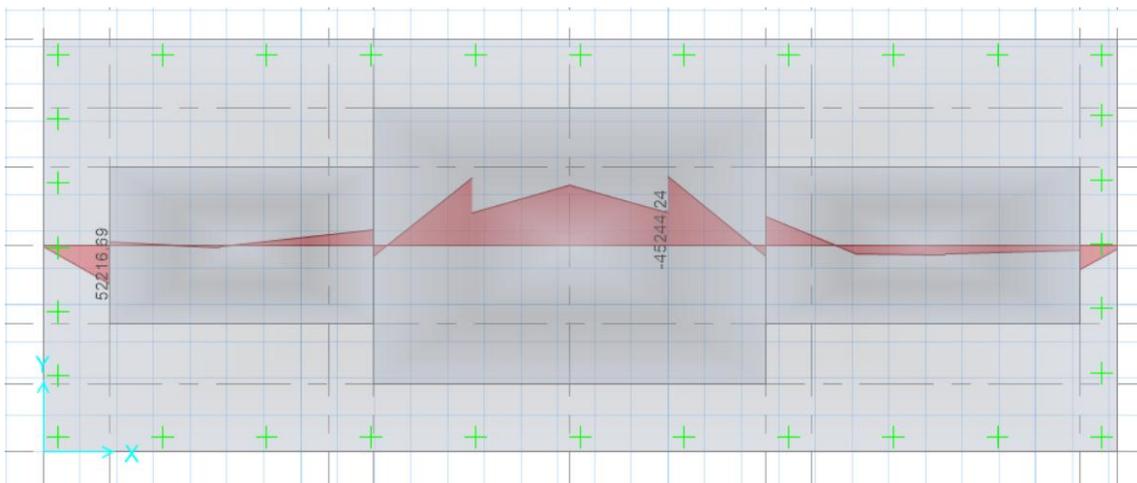
Fuente: Elaboración propia. Tomado de: Software CSI SAFE.

, impactando directamente en su vida útil y eficiencia operativa.

La siguiente figura 4.18, muestra la distribución de los momentos en la dirección longitudinal de la cimentación, observando valores de Momento Máximo de 52216.69

kgf-cm en el borde del pedestal de la turbina, y de Momento Mínimo de -95119.26 kgf-cm a 65 cm del centro de la cimentación, según el análisis realizado en SAFE.

Figura 0.18 *Diagrama de momentos en dirección longitudinal de la fundación.*



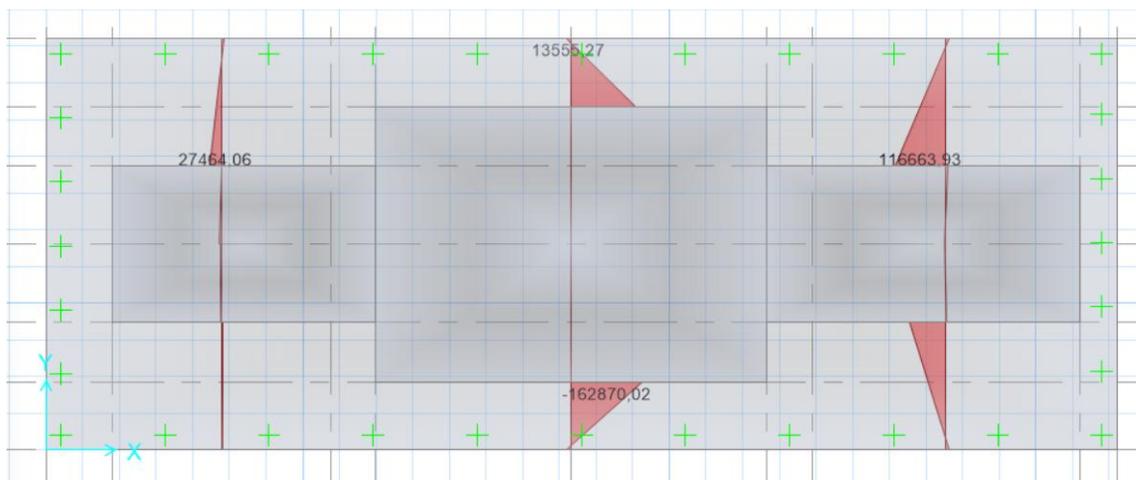
Fuente: Elaboración propia. Tomado de: Software CSI SAFE.

Los diagramas de momentos flectores (Figuras 4.18 y 4.19) revelan concentraciones de momentos en zonas específicas de la cimentación, en los bordes de los pedestales y en el centro de la fundación, lo cual sugiere que la respuesta a las cargas dinámicas es uniforme. En una cimentación para máquinas vibratorias, es vital controlar estos momentos para evitar deformaciones excesivas y garantizar la rigidez necesaria para absorber las vibraciones. La similitud en las frecuencias de operación de las máquinas puede generar picos de momentos en ciertas áreas debido a la superposición de las ondas de vibración.

La Figura 4.19 ilustra la distribución de los momentos en la dirección transversal de la cimentación, donde se pueden observar valores de Momento Máximo de 116663.93

kgf-cm en el borde del pedestal del motor, y de Momento Mínimo de -162870.02 kgf-cm en el borde del pedestal del VTF.

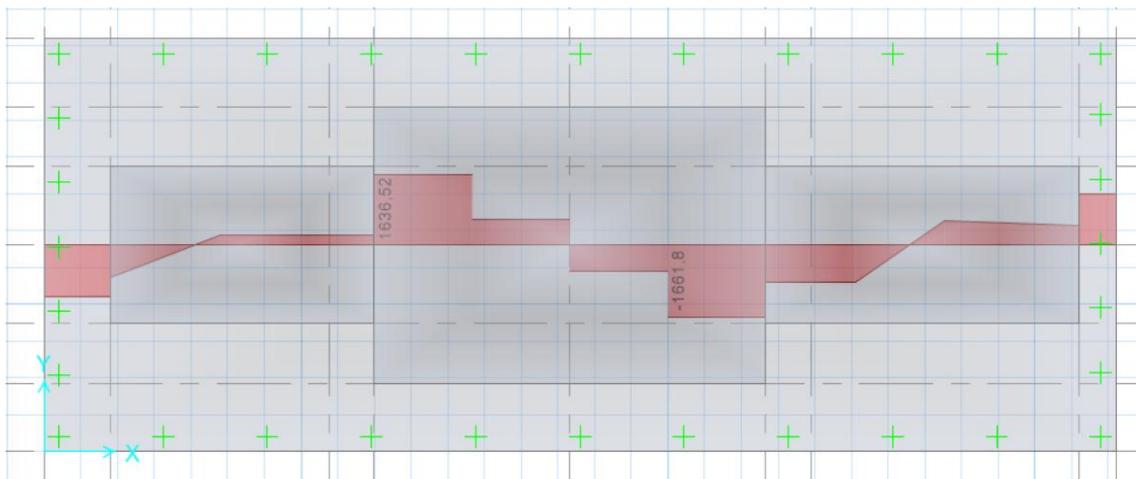
Figura 0.19 *Diagrama de momentos en dirección transversal de la fundación.*



Fuente: Elaboración propia. Tomado de: Software CSI SAFE.

Los diagramas de fuerzas cortantes (Figuras 4.20 y 4.21) indican la presencia de esfuerzos cortantes significativos, pero normales en las zonas cercanas a los pedestales de las máquinas. La figura 4.20, presenta el diagrama de fuerza cortante en la dirección longitudinal de la cimentación, donde se muestran valores de $V_{max} = 1636.52$ kgf en el borde del pedestal del VTF, y $V_{min} = -1661.80$ kgf en el otro borde del mismo pedestal, los valores en la zapata fueron de $V_{max} = 1188.60$ kgf y $V_{min} = 1175.50$ kgf, los cuales fueron obtenidos del análisis en SAFE.

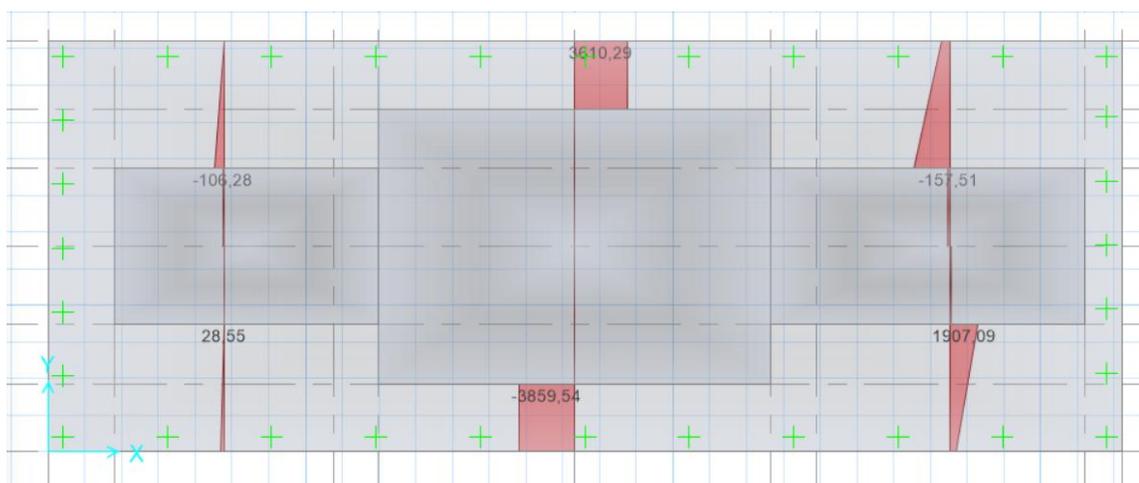
Figura 0.20 Diagrama de fuerza cortante en dirección longitudinal de la fundación.



Fuente: Elaboración propia. Tomado de: Software CSI SAFE.

El siguiente diagrama (Figura 4.21) muestra la distribución de la fuerza cortante en la dirección transversal de la cimentación, donde se observan valores de $V_{max} = 3610.30$ kgf, y $V_{min} = -3859.54$ kgf ambos en los bordes del pedestal del VTF, según el análisis realizado en SAFE.

Figura 0.21 Diagrama de fuerza cortante en dirección transversal de la fundación.

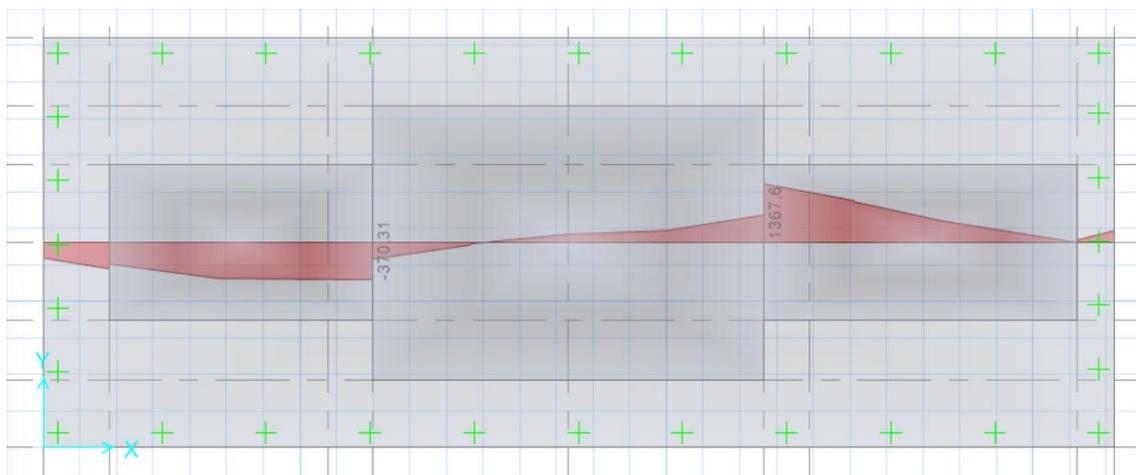


Fuente: Elaboración propia. Tomado de: Software CSI SAFE.

Además de los momentos flectores y las fuerzas cortantes, la torsión es un esfuerzo crucial en cimentaciones de equipos rotativos como el soplador de caldera, que generan vibraciones significativas. Estos momentos de torsión surgen de fuerzas dinámicas excéntricas y vibraciones que se transmiten desde el equipo a la cimentación. Es vital entender su distribución y magnitud para asegurar la integridad y rigidez estructural, permitiendo una correcta disipación de la energía vibratoria. A continuación, se analizan los diagramas de torsión obtenidos del software SAFE, que muestran la respuesta de la cimentación a estas cargas complejas.

La figura 4.22, ilustra el diagrama de torsión en la dirección longitudinal de la cimentación, mostrando valores de $T_{max} = 1367.60$ kgf-cm entre el pedestal del VTF y el pedestal del motor y $T_{min} = -840.27$ kgf-cm entre el pedestal de la turbina y el pedestal del VTF.

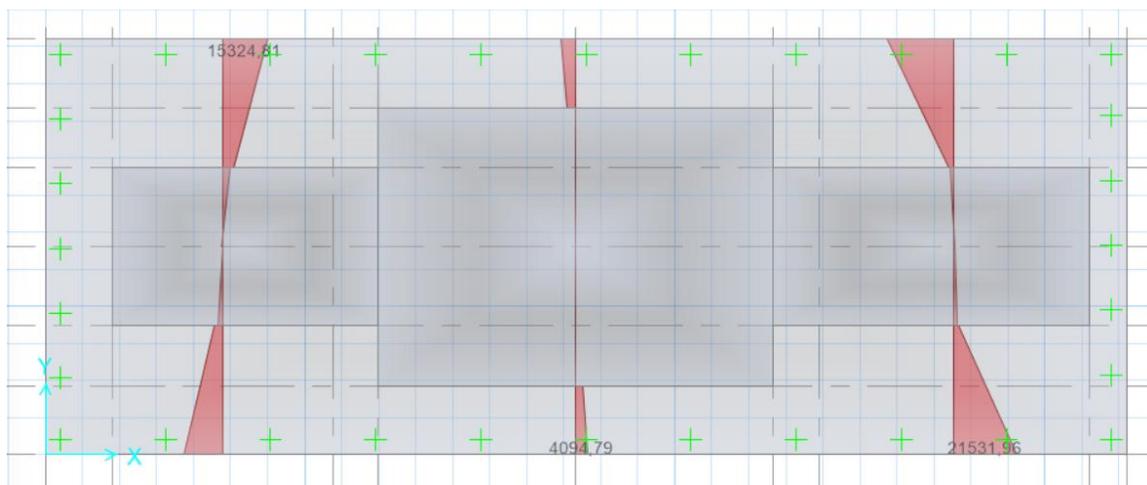
Figura 0.22 Diagrama de Torsión en dirección longitudinal de la fundación.



Fuente: Elaboración propia. Tomado de: Software CSI SAFE.

El diagrama de la Figura 4.23 ilustra la distribución de la torsión en la dirección transversal de la cimentación, según el análisis en SAFE. Se observan valores de $T_{max}=21531.96$ kgf-cm y $T_{min}=-22940.37$ kgf-cm en los bordes de la zapata, ambos ubicados hacia el lado del motor.

Figura 0.23 Diagrama de Torsión en dirección transversal de la fundación.



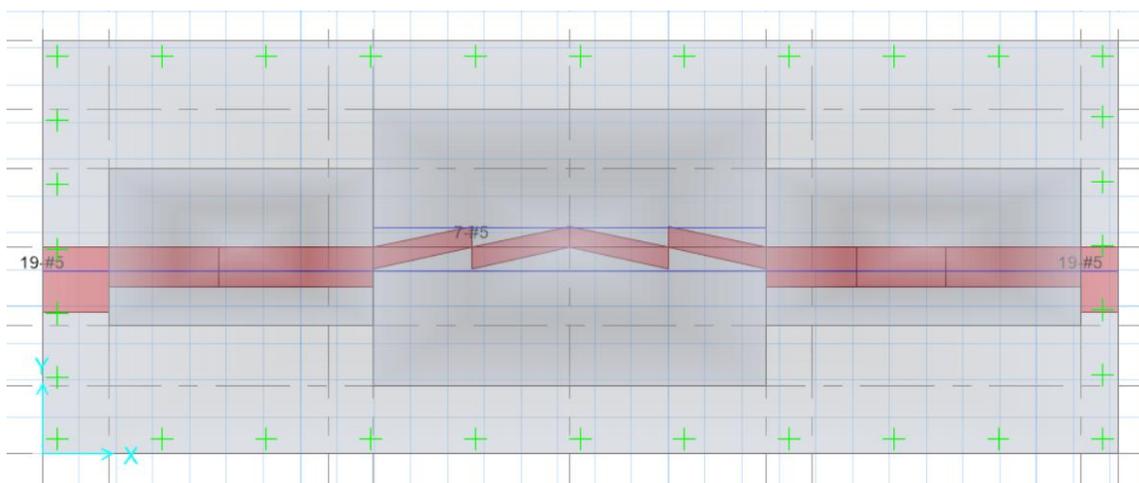
Fuente: Elaboración propia. Tomado de: Software CSI SAFE.

Los diagramas de torsión (Figuras 4.22 y 4.23) muestran la presencia de esfuerzos de torsión en la cimentación siendo esto una señal de que las vibraciones de las tres máquinas no solo generan movimientos verticales o de flexión, sino también rotacionales. La operación sincronizada a la misma frecuencia puede inducir momentos de torsión complejos y resonantes, que exigen un diseño de refuerzo transversal robusto y bien distribuido para absorber y disipar estas energías.

4.4.1.1. Acero de refuerzo

El diseño del refuerzo longitudinal y transversal de la cimentación se basó en los valores propuestos por el programa SAFE 2016, como se observa en la Figura 4.24 y la Figura 4.25. Donde podemos apreciar que estos reflejan la necesidad de concentrar el refuerzo en las zonas donde se presentan los mayores momentos, cortantes y torsiones. En una cimentación para máquinas vibratorias, el refuerzo debe ser capaz de controlar tanto los esfuerzos estáticos como los dinámicos, incluyendo los efectos de fatiga producidos por la vibración constante.

Figura 0.24 Diagrama de distribución de acero en dirección longitudinal de la fundación.

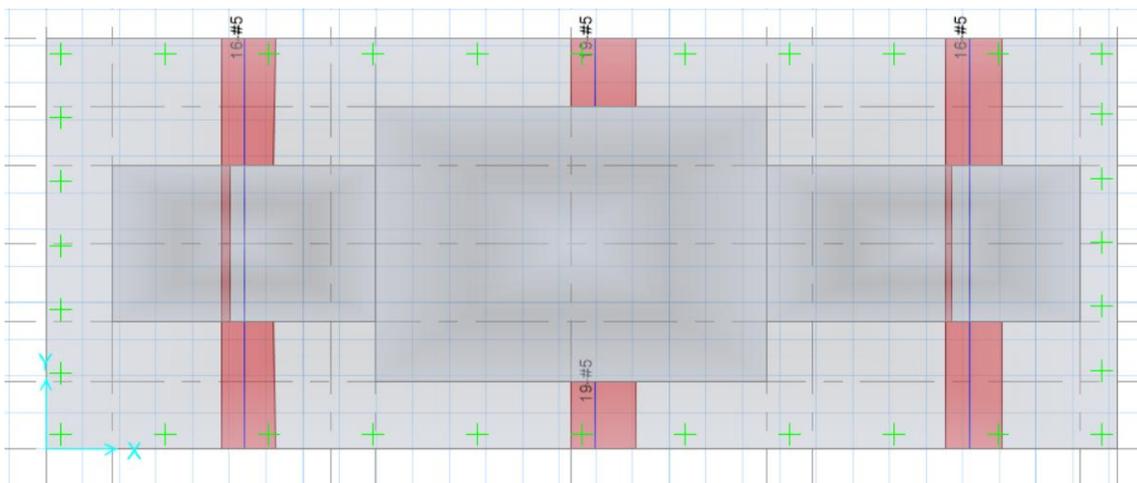


Fuente: Elaboración propia. Tomado de: Software CSI SAFE.

Finalmente, el diagrama que se observa en la figura 4.25 muestra la distribución de las barras de acero en la dirección transversal de la cimentación, según el diseño realizado en SAFE. Adicionalmente, se verificó que estos valores cumplieran con los

requisitos de cuantía mínima y máxima establecidos por la Norma Venezolana 1753:2006.

Figura 0.25 Diagrama de distribución de acero en dirección transversal de la fundación.



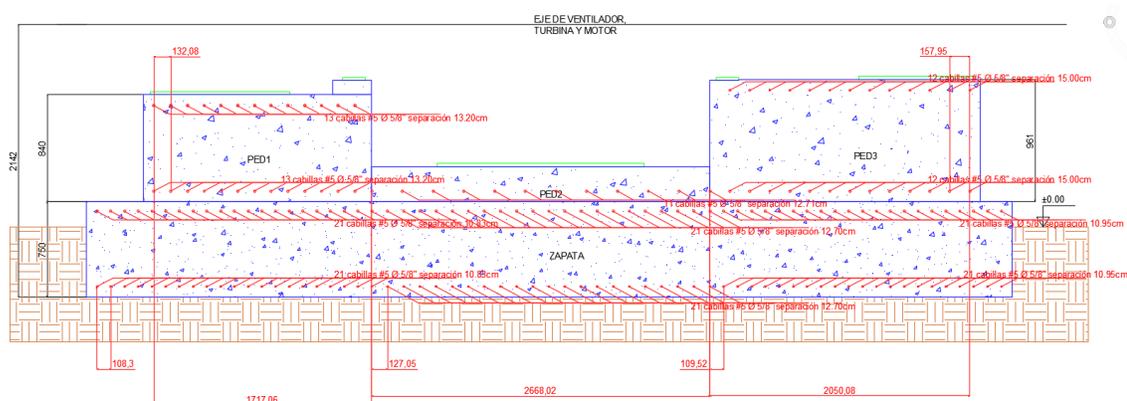
Fuente: Elaboración propia. Tomado de: Software CSI SAFE

Como indica la Norma Venezolana 1753:2006, subsección 10.4.3, el área de refuerzo longitudinal en miembros comprimidos para los niveles de diseño ND2 y ND3 debe estar entre el 1% y el 6% del área total de la sección de concreto.

El ACI 351.3R-2018 proporciona recomendaciones específicas para el acero mínimo en cimentaciones de equipos vibratorios, variando según el tipo de cimentación y la maquinaria. Para cimentaciones de grandes generadores de turbinas, indica que algunas empresas sugieren un refuerzo mínimo de 50 kgf/m^3 (0.64% en volumen) para pedestales y 30 kgf/m^3 (0.38% en volumen) para losas; sin embargo, otras prefieren un valor de 50 kgf/m^3 para las losas. Cabe destacar que ciertos fabricantes europeos requieren el uso de múltiples capas de acero de refuerzo distribuidas en las tres direcciones para estas cimentaciones.

Este diseño consiste en la colocación de mallas armadas con cabillas #5 dispuestas en forma de "U" en ambas direcciones de la cimentación. Este patrón de refuerzo se implementará tanto en la parte inferior como en la parte superior de la zapata, como se ilustra detalladamente en la Figura 4.26. Esta disposición no solo asegura el cumplimiento normativo de cuantías mínimas y máximas, sino que también contribuye significativamente a la capacidad de la losa para resistir los momentos flectores y las fuerzas cortantes resultantes de las cargas dinámicas.

Figura 0.26 Distribución de cabillas en dirección longitudinal.

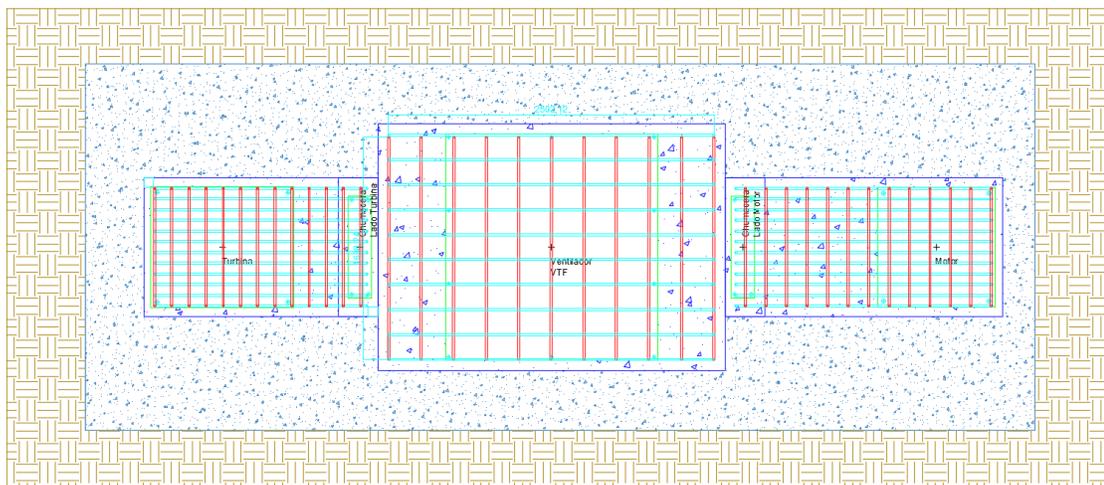


Fuente: Elaboración propia.

De manera análoga, para cada uno de los pedestales que soportan las máquinas, se adoptará un armado tipo cesta, replicando la configuración de las cabillas #5 en "U" en ambas direcciones como se muestra en la figura 4.27. Al integrar los valores propuestos por el programa SAFE y los requerimientos de la Norma COVENIN, este tipo de armado garantiza una distribución homogénea del acero en toda la sección del pedestal. Esta estrategia de refuerzo, que proporciona una rigidez pareja en la cimentación, es fundamental para controlar las amplitudes de vibración y la transmisión

de esfuerzos torsionales generados por la operación de los equipos, asegurando la integridad estructural y la estabilidad a largo plazo del sistema cimentación-maquinaria.

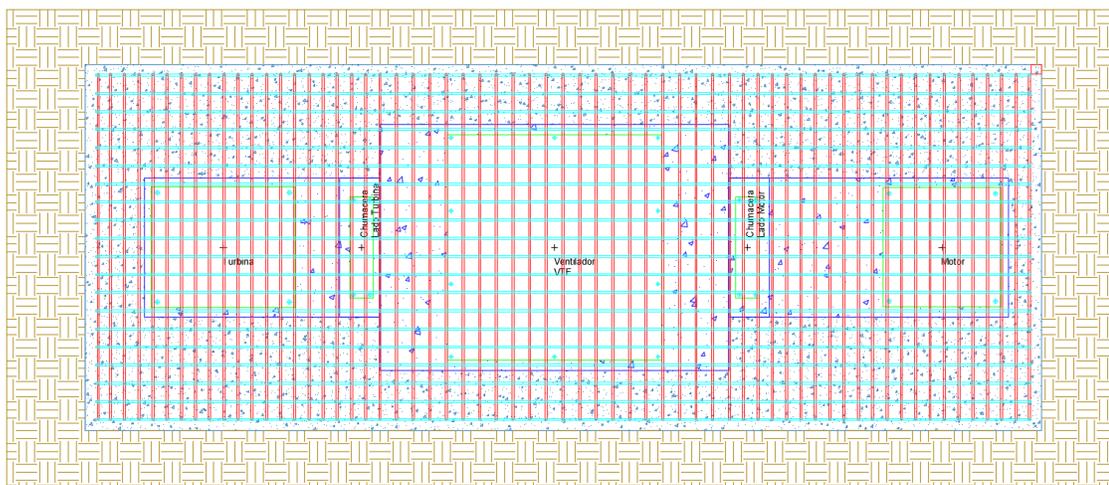
Figura 0.27 Armado de cabillas #5 para pedestales.



Fuente: Elaboración propia.

Para garantizar la integridad estructural y la rigidez necesaria para disipar las vibraciones generadas por el soplador de caldera, se ha optado por implementar una solución de refuerzo robusta para la zapata. Específicamente, se utilizarán mallas armadas de cabillas #5 (5/8 pulgadas) dispuestas en forma de "U" y armadas en ambas direcciones de la cimentación como se presenta en la figura 4.28. Esta configuración no solo asegura el cumplimiento de los valores de acero mínimo requeridos por la Norma Venezolana COVENIN sino que también atiende las recomendaciones particulares de la ACI para cimentaciones de equipos vibratorios, que enfatizan la necesidad de un refuerzo adecuado para contrarrestar esfuerzos dinámicos y de fatiga.

Figura 0.28 Armado de cabillas #5 para zapata.



Fuente: Elaboración propia.

El concreto y el acero de refuerzo para los sistemas de fundación cumplirán con los requisitos del Capítulo 5 y el Artículo 3.6, respectivamente. La resistencia mínima especificada para el concreto es de $= 210 \text{ kgf/cm}^2$.

Los pernos de anclaje y los conectores mecánicos diseñados de acuerdo con el Anexo D, desarrollarán su resistencia de diseño antes de que falle el anclaje o el concreto en que está embebido.

4.4.1.2. Gancho estándar del acero de refuerzo

Para garantizar la correcta transferencia de esfuerzos y el anclaje adecuado del refuerzo longitudinal en el diseño de la cimentación, se ha prestado especial atención a la configuración de los ganchos estándar, en estricto cumplimiento con la Norma Venezolana COVENIN 1753:2006. Específicamente, en su subsección 7.2.2, apartado (b), la normativa establece que para los ganchos estándar en el acero de refuerzo

longitudinal debe considerarse una vuelta de 90° más una extensión recta de 12 veces el diámetro nominal de la barra ($12db$) en su extremo libre. Aplicando esta disposición a las cabillas #5, que poseen un diámetro nominal de 15.88 mm, el cálculo de la extensión requerida es el siguiente:

$$\text{Extensión} = 12 \times db \therefore 12 \times 15.88 \text{ mm} = 190.56 \text{ mm}.$$

Considerando este resultado, y con el fin de proporcionar un margen de seguridad y facilidad constructiva, se ha adoptado un valor de 20 cm (200 mm) para la extensión del gancho después de cada doblez de 90 grados en cada cabilla que conforma el armado tipo cesta. Este valor de 20 cm es ligeramente superior al mínimo normativo calculado, lo que contribuye a una mayor seguridad en el anclaje y a la rigidez integral del sistema de refuerzo, especialmente crucial en una cimentación sometida a cargas dinámicas y vibraciones. Esta medida asegura que cada elemento de refuerzo longitudinal en los armados tipo cesta tanto de la zapata como de los pedestales se encuentre debidamente anclado, permitiendo una colaboración efectiva entre el acero y el concreto en la disipación de la energía vibratoria.

4.5. Comparar los resultados obtenidos del diseño de la cimentación para el soplador de caldera con su proyecto original.

Para el cumplimiento de este objetivo se presenta el análisis de la factibilidad de la cimentación existente y la del rediseño propuesto para el soplador de caldera 32-U-601C, utilizando la herramienta de análisis FODA. El objetivo principal es determinar cuál

opción presenta la mejor relación entre oportunidades y riesgos, considerando tanto el diseño original como el rediseño propuesto.

4.5.1. Análisis FODA del Diseño Original

Se aplicó la metodología de matrices FODA, identificando y cuantificando las Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas del diseño original. La cuantificación de cada ítem FODA se realizó mediante una escala de 1 a 3, reflejando su importancia relativa.

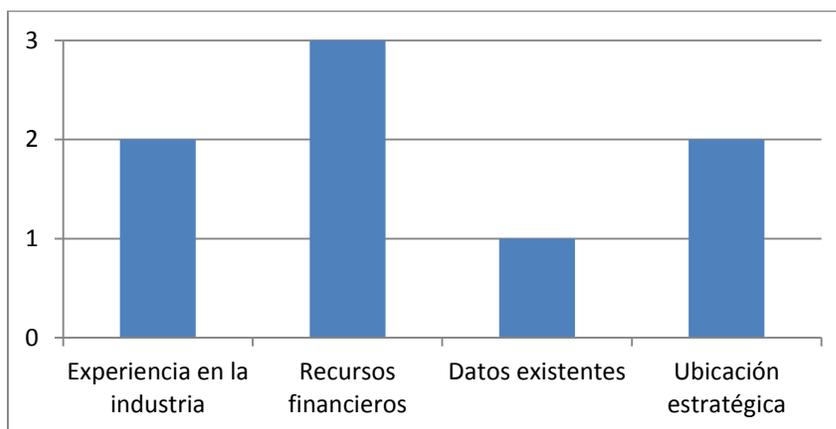
La siguiente tabla, Tabla 4.7, presenta las Fortalezas identificadas en el diseño original de la cimentación, junto con una cuantificación de su importancia relativa en una escala de 1 a 3.

Tabla 0.7 Fortalezas del Diseño original

Experiencia en la industria: Colmaquinas cuenta con experiencia en la operación de proyectos generación de vapor y energía y conocimiento de las particularidades de las cimentaciones en este tipo de industria.	2
Recursos financieros: La empresa cuenta con recursos financieros para realizar mejoras y reparaciones en la cimentación.	3
Datos existentes: Existen datos del diseño original, reportes de inspección, mediciones de vibración y otros registros. Esta información es útil para entender la evolución del problema y evaluar posibles soluciones.	1
Ubicación estratégica: La ubicación de la cimentación en un complejo petroquímico permite acceso a recursos y servicios especializados.	2

Fuente: Realización propia.

Tal como se ilustra en la Figura 4.26, se presenta un diagrama de barras que resume visualmente la cuantificación de las Fortalezas del diseño original, facilitando la comparación entre ellas.

Figura 0.29 Diagrama de barras de las fortalezas del Diseño Original.

Fuente: Realización propia.

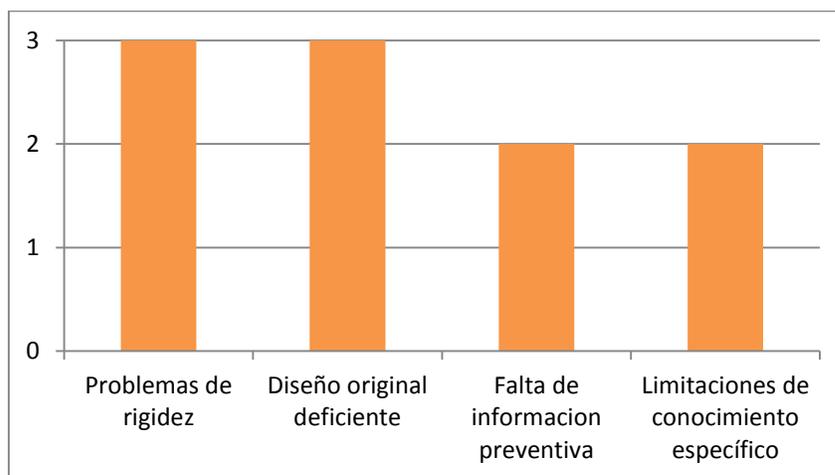
La Tabla 4.8 detalla las Debilidades identificadas en el diseño original, evaluando su impacto potencial en el desempeño y la estabilidad de la cimentación.

Tabla 0.8 Debilidades del Diseño original

Problemas de rigidez: La fundación 32-U-601C presenta problemas de rigidez, lo que genera vibraciones excesivas y afecta la estabilidad del equipo.	3
Diseño original deficiente: Puede no haberse considerado adecuadamente las cargas dinámicas y vibraciones generadas por el equipo.	2
Falta de información preventiva: La falta de un programa de inspección de obras civiles adecuado en la empresa pudo haber contribuido a la falla de la fundación y al aumento de las vibraciones.	2
Limitaciones en el conocimiento específico: El personal técnico interno puede no tener la experiencia o conocimientos especializados en análisis dinámico de cimentaciones y soluciones de ingeniería para este tipo de problemas.	3

Fuente: Realización propia.

La Figura 4.27 muestra gráficamente la valoración de las Debilidades del diseño original, permitiendo una rápida identificación de las áreas que requieren mayor atención.

Figura 0.30 Diagrama de barras de las debilidades del Diseño Original.

Fuente: Realización propia.

La Tabla 4.9 presenta las Oportunidades que podrían aprovecharse para mejorar el diseño y la funcionalidad de la cimentación, considerando aspectos como la optimización del diseño y la implementación de nuevas tecnologías.

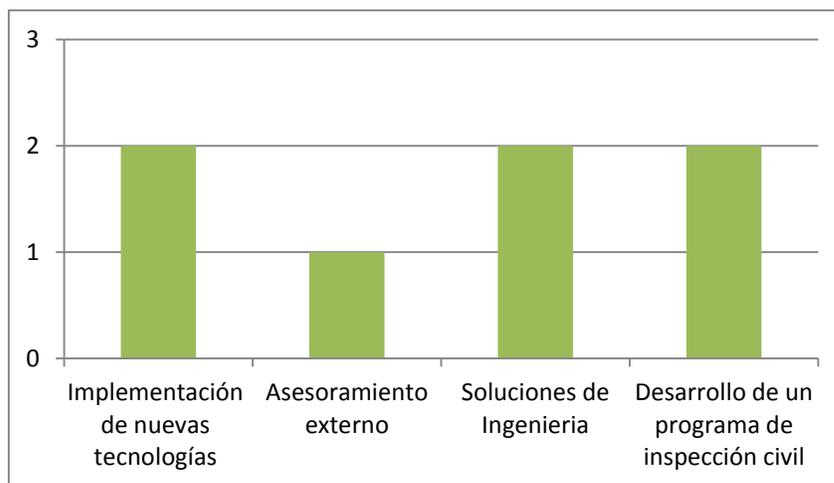
Tabla 0.9 Oportunidades del Diseño original

Implementación de nuevas tecnologías: Se pueden implementar nuevas tecnologías y materiales para mejorar la cimentación y garantizar su durabilidad y estabilidad a largo plazo.	2
Asesoramiento externo: Se puede buscar asesoramiento externo de expertos en ingeniería y cimentaciones para obtener soluciones especializadas y optimizadas.	1
Soluciones de Ingeniería: Se pueden explorar diferentes soluciones para aumentar la rigidez de la fundación: inyección de grout, mejora del suelo, etc.	2
Desarrollo de un programa de inspección civil: Se puede desarrollar e implementar un programa de inspección de obras civiles para equipos de la empresa que incluya inspecciones más detalladas	2

Fuente: Realización propia.

La Figura 4.28 representa gráficamente la evaluación de las Oportunidades para el diseño original, destacando las áreas con mayor potencial de mejora.

Figura 0.31 Diagrama de barras de las oportunidades del Diseño Original.



Fuente: Realización propia.

La Tabla 4.10 enumera las Amenazas que podrían afectar la viabilidad y el éxito del diseño original, incluyendo factores como la inestabilidad del suelo y los riesgos sísmicos.

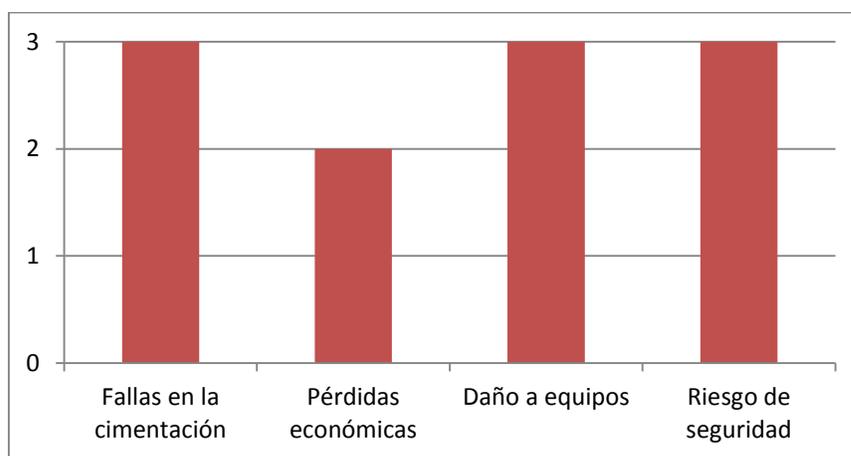
Tabla 0.10 Amenazas del Diseño original

Fallas en la cimentación: El problema de rigidez en la cimentación puede llevar a fallas estructurales, interrupción de la producción y riesgos para la seguridad.	3
Pérdidas económicas: Las fallas en la cimentación y la interrupción de la producción pueden generar pérdidas económicas significativas para la empresa.	2
Daño a equipos: Las vibraciones excesivas pueden dañar los equipos y reducir su vida útil, generando costos de reparación y reemplazo.	3
Riesgos de seguridad: Las fallas en la cimentación y las vibraciones excesivas pueden generar riesgos para la seguridad del personal y del entorno.	3

Fuente: Realización propia.

La Figura 4.29 proporciona una representación visual de la valoración de las Amenazas para el diseño original, facilitando la identificación de los riesgos más críticos.

Figura 0.32 Diagrama de barras de las amenazas del Diseño original.



Fuente: Realización propia.

La Tabla 4.11 presenta los valores ponderados calculados para cada categoría FODA del diseño original, permitiendo determinar el Factor de Optimización (Fortalezas + Oportunidades) y el Factor de Riesgo (Debilidades + Amenazas).

Tabla 0.11 Valores ponderados para cada categoría FODA del Diseño original.

Fortalezas	Debilidades	Oportunidades	Amenazas	Total
Experiencia en la industria (2)	Problemas de rigidez (3)	Implementación de nuevas tecnologías (2)	Fallas en la cimentación (3)	Total= 10 27.78%
Recursos financieros (3)	Diseño original deficiente (2)	Asesoramiento externo (1)	Pérdidas económicas (2)	Total= 8 22.22%
Datos existentes (1)	Falta de información preventiva (2)	Soluciones de Ingeniería (2)	Daño a equipos (3)	Total= 8 22.22%

Ubicación estratégica (2)	Limitaciones en el conocimiento específico (3)	Desarrollo de un programa de inspección civil (2)	Riesgos de seguridad (3)	Total= 10 27.78%
Total= 8 22.22%	Total= 10 27.78%	Total= 7 19.44%	Total= 11 30.56%	Total= 36 (100%)

Fuente: Realización propia.

Factor de optimización: F+O = 41.66%

Factor de riesgo: D + A = 58.34%

El análisis FODA del diseño original reveló un factor de riesgo mayor que el factor de optimización. Este resultado sugiere que continuar utilizando la cimentación existente podría incrementar la exposición a las amenazas identificadas.

4.5.2. Análisis FODA del Nuevo Diseño Propuesto

La Tabla 4.12 resume las Fortalezas identificadas en el diseño propuesto, evaluando su contribución a la viabilidad y el desempeño de la nueva cimentación.

Tabla 0.12 Fortalezas del nuevo diseño propuesto

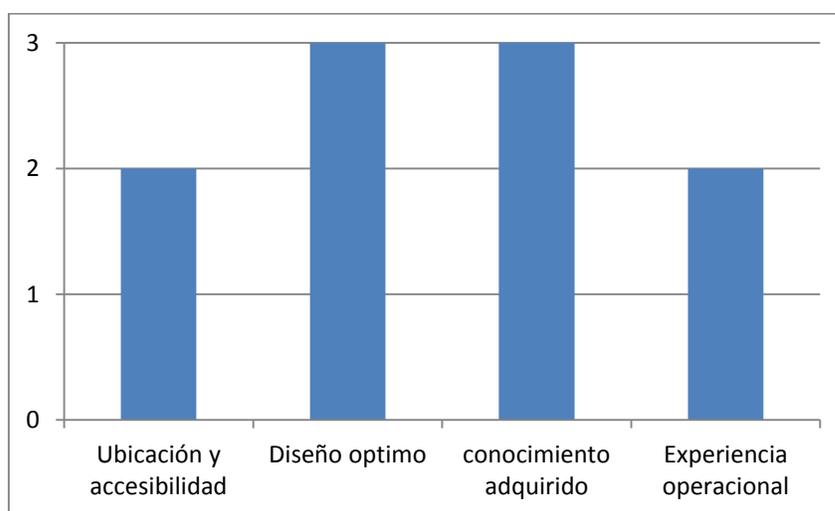
Ubicación y Accesibilidad: La ubicación física de la cimentación es accesible para inspección y reparación, puede facilitar las intervenciones necesarias.	2
Diseño Óptimo: La reconstrucción brinda la oportunidad de diseñar una cimentación con una rigidez adecuada desde el inicio, utilizando los mejores materiales y técnicas de construcción disponibles.	3
Conocimiento Adquirido: Se cuenta con el conocimiento de los problemas de la cimentación existente, lo que permite evitar los errores de diseño o construcción que contribuyeron a la falta de rigidez.	3

Experiencia Operacional: El personal tiene experiencia operando el soplador y lidiando con los problemas de rigidez. Su conocimiento práctico es valioso.	2
---	----------

Fuente: Realización propia.

La Figura 4.30 ilustra gráficamente la valoración de las Fortalezas del diseño propuesto, permitiendo una comparación directa con las Fortalezas del diseño original.

Figura 0.33 Diagrama de barras de las fortalezas del nuevo diseño propuesto.



Fuente: Realización propia.

La Tabla 4.13 detalla las Debilidades asociadas al diseño propuesto, considerando aspectos como costos de reconstrucción y la complejidad del proceso.

Tabla 0.13 Debilidades del nuevo diseño propuesto

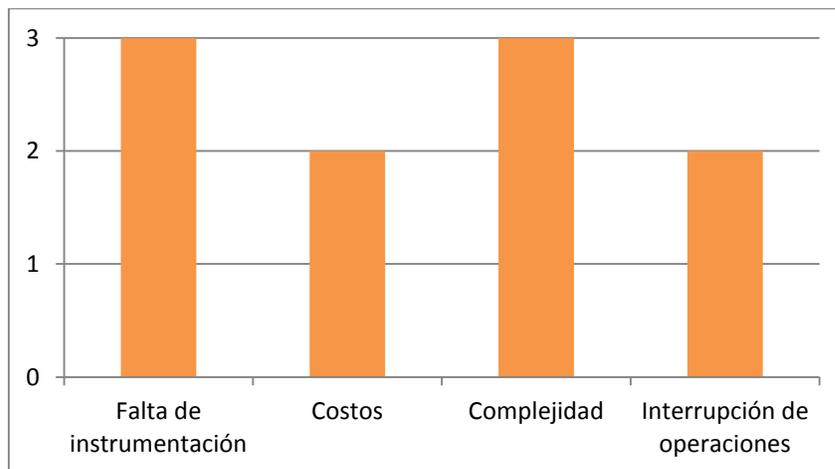
Falta de Instrumentación: No se contó con instrumentación adecuada para monitorear la condición de la cimentación (rigidez del concreto, asentamientos, etc.). La falta de datos objetivos dificulta el análisis.	3
Costos: La reconstrucción de la cimentación implica costos significativos, incluyendo diseño, materiales, mano de obra, equipos y posibles paradas de producción.	2

Complejidad: La reconstrucción de una cimentación existente puede ser un proceso complejo, especialmente si se requiere la demolición de la estructura anterior y la coordinación con otros trabajos en la planta.	3
Interrupción de Operaciones: La reconstrucción de la cimentación puede requerir la interrupción de las operaciones del soplador, lo que podría afectar la producción.	2

Fuente: Realización propia.

La Figura 4.31 presenta un diagrama de barras que resume la evaluación de las Debilidades del diseño propuesto, facilitando la identificación de los desafíos potenciales.

Figura 0.34 Diagrama de barras de las debilidades del nuevo diseño propuesto.



Fuente: Realización propia.

La Tabla 4.14 describe las Oportunidades que ofrece el diseño propuesto, incluyendo la posibilidad de optimizar el diseño y mejorar la capacitación del personal.

Tabla 0.14 Oportunidades del nuevo diseño propuesto

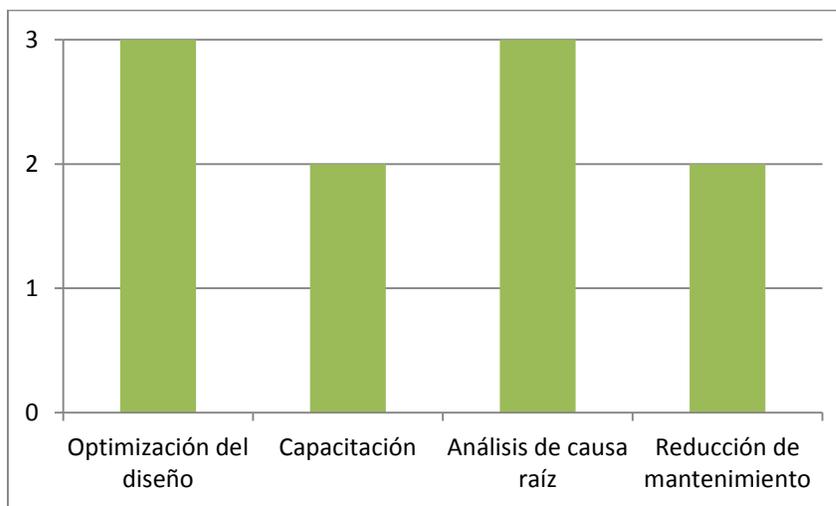
Optimización del Diseño: Se puede optimizar el diseño de la cimentación para que se adapte mejor a las cargas y vibraciones del soplador, así como a las condiciones del suelo y el entorno.	3
--	----------

Capacitación: Capacitar al personal de Fertinitro en el estudio y diseño de cimentaciones a vibración, así como en la interpretación de datos.	2
Análisis de Causa Raíz: Realizar un análisis profundo para identificar las causas fundamentales del problema de rigidez.	3
Reducción de Mantenimiento: Una cimentación bien diseñada y construida puede requerir menos mantenimiento a largo plazo, lo que se traduce en ahorros para Fertinitro.	2

Fuente: Realización propia.

La Figura 4.32 ilustra gráficamente la valoración de las Oportunidades para el diseño propuesto, destacando las áreas con mayor potencial de mejora.

Figura 0.35 *Diagrama de barras de las oportunidades del nuevo diseño propuesto.*



Fuente: Realización propia.

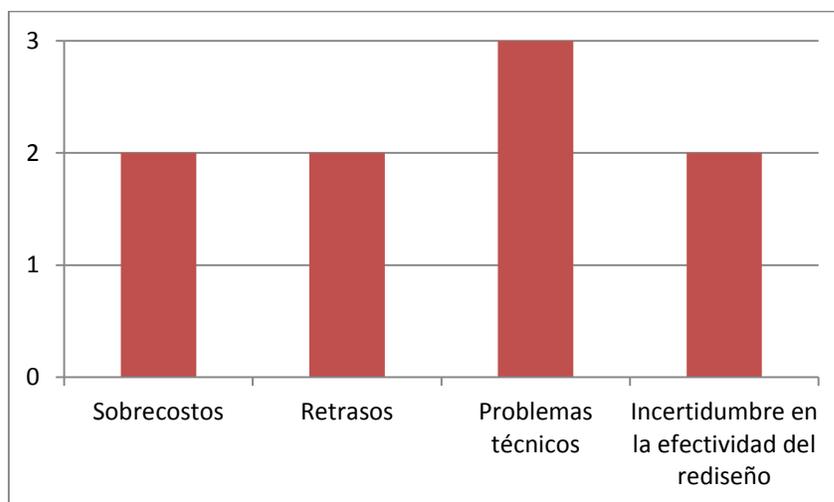
La Tabla 4.15 enumera las Amenazas que podrían afectar la implementación exitosa del diseño propuesto, como los sobrecostos y los retrasos en la ejecución.

Tabla 0.15 Amenazas del nuevo diseño propuesto

Sobrecostos: Los costos de la reconstrucción pueden superar el presupuesto estimado, especialmente si surgen problemas inesperados o si los precios de los materiales aumentan.	2
Retrasos: La reconstrucción puede llevar más tiempo de lo previsto, lo que podría generar retrasos en la producción y afectar la disponibilidad del soplador.	2
Problemas Técnicos: Pueden surgir problemas técnicos durante la reconstrucción, como dificultades con la demolición de la cimentación existente, la cimentación de la nueva estructura o la integración con el soplador.	3
Incertidumbre en la efectividad del rediseño: No se puede garantizar que el rediseño de la cimentación logre reducir las vibraciones a niveles aceptables, especialmente si el equipo ha sufrido daños a causa de las vibraciones previas.	2

Fuente: Realización propia.

La Figura 4.33 representa gráficamente la evaluación de las Amenazas para el diseño propuesto, facilitando la identificación de los riesgos más significativos.

Figura 0.36 Diagrama de barras de las amenazas del nuevo diseño propuesto.

Fuente: Realización propia.

La Tabla 4.16 presenta los valores ponderados calculados para cada categoría FODA del diseño propuesto, permitiendo determinar el Factor de Optimización y el Factor de Riesgo para esta alternativa.

Tabla 0.16 Valores ponderados para cada categoría FODA del Diseño propuesto.

Fortalezas	Debilidades	Oportunidades	Amenazas	Total
Ubicación y Accesibilidad (2)	Falta de Instrumentación(3)	Optimización del Diseño (3)	Sobrecostos (2)	Total= 10 25.64%
Diseño Óptimo (3)	Costos (2)	Capacitación (2)	Retrasos (2)	Total= 9 23.08%
Conocimiento Adquirido (3)	Complejidad (3)	Análisis de Causa Raíz (3)	Problemas Técnicos (3)	Total= 12 30.77%
Experiencia Operacional (2)	Interrupción de Operaciones (2)	Reducción de mantenimiento (2)	Incertidumbre en la efectividad del rediseño (2)	Total= 8 20.51%
Total= 10 25.64%	Total= 10 25.64%	Total= 10 25.64%	Total= 9 23.08%	Total= 39 (100%)

Fuente: Realización propia.

Factor de optimización: F+O = 51.28%

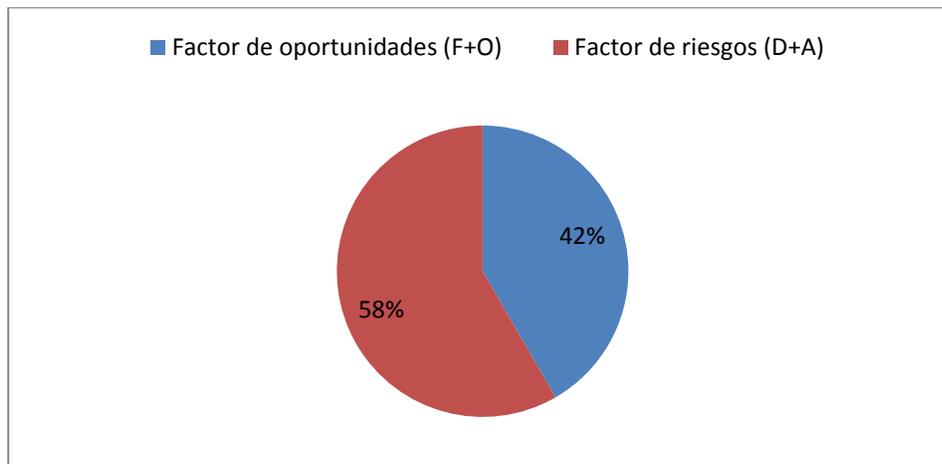
Factor de riesgo: D + A = 48.72%

4.5.3. 1. Resultados del Análisis FODA

El análisis FODA del diseño original reveló que el Factor de Riesgo es mayor que el Factor de Optimización, como se muestra en la figura 4.34. Este resultado sugiere que

mantener la cimentación existente implica una mayor exposición a las amenazas identificadas, lo cual desaconseja su uso continuado.

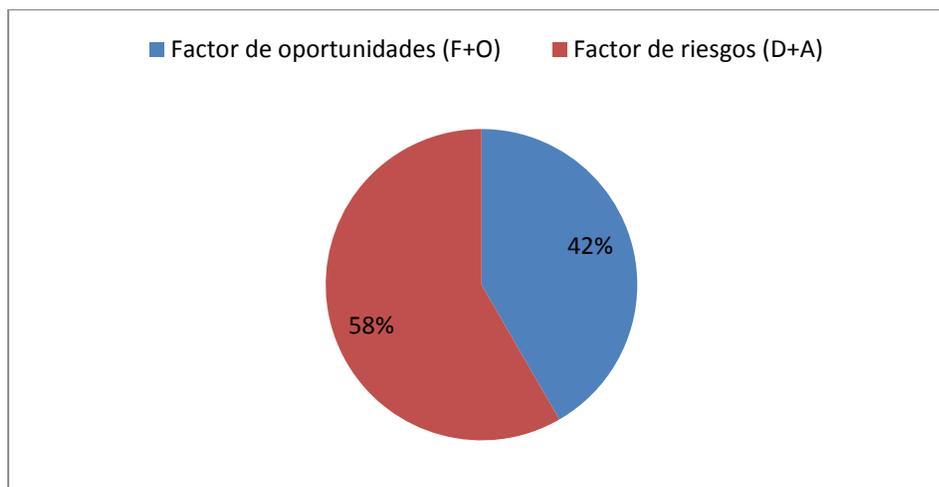
Figura 0.37 Factor de Oportunidades Vs Factor de Riesgo del diseño Original.



Fuente: Realización propia.

Si bien el análisis FODA del rediseño propuesto arrojó un factor de optimización mayor que el factor de riesgo, como se puede observar en la figura 4.35, lo que *a priori* indicaría una mejora, se reconoce que esta no necesariamente representa la solución óptima. Es posible que existan otras alternativas, como el mejoramiento del suelo, que podrían ser más viables. Aunque, se reitera que el diseño original de la cimentación presenta deficiencias constructivas que contravienen las recomendaciones normativas para este tipo de fundaciones, lo que refuerza la necesidad de una solución que considere todos estos detalles.

Figura 0.38 Factor de oportunidades Vs. Factor de riesgos del nuevo diseño propuesto.



Fuente: Realización propia.

El análisis FODA reveló una diferencia fundamental en el balance entre riesgo y optimización entre el diseño original y el rediseño. El diseño original presenta un mayor Factor de Riesgo (58.34%) que el Factor de Optimización (41.66%), lo que sugiere una alta exposición a amenazas y desaconseja su uso continuado. En contraste, el rediseño propuesto invierte esta relación, con un Factor de Optimización (51.28%) superior al Factor de Riesgo (48.72%), indicando una mejora en la factibilidad.

4.5.3.1. Consideraciones Adicionales

Si bien el rediseño presenta una mejor relación optimización/riesgo que el diseño original, se deben considerar otras alternativas, como el mejoramiento del suelo, que podrían ofrecer una solución más integral. Además, las deficiencias constructivas encontradas en el diseño original, que contravienen las recomendaciones normativas, refuerzan la necesidad de una solución que aborde todas las problemáticas identificadas.

Por lo tanto, aunque el rediseño propuesto representa una mejora con respecto a la situación inicial, se recomienda explorar otras opciones y realizar un análisis costo-beneficio que permita seleccionar la solución más adecuada en términos técnicos, económicos y de seguridad.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

1. La evaluación de la cimentación del soplador de caldera 32-U-601C reveló discrepancias significativas con respecto a su diseño original, evidenciándose incumplimientos en recomendaciones normativas como la ACI 351 y el manual de PDVSA, especialmente en lo referente al tratamiento de fundaciones para equipos vibratorios como elementos independientes.

2. La configuración actual de la cimentación para el soplador de caldera, con su aparente falta de priorización de la rigidez, plantea riesgos potenciales significativos, tales como: niveles de vibración elevados, posible inestabilidad debido a la asimetría y una vida útil reducida para el soplador de caldera.

3. El análisis de la memoria de cálculo original evidenció la ausencia de un análisis dinámico y deficiencias en el dimensionamiento del acero de refuerzo en los pedestales, con cuantías inferiores a las mínimas recomendadas por la norma COVENIN 1753, lo que compromete la capacidad de la fundación para resistir las cargas dinámicas generadas por el soplador.

4. El estudio geotécnico analizado reveló el perfil estratigráfico del suelo en la unidad 32, otorgando los parámetros geotécnicos cruciales para el diseño de la

5. cimentación. Incluyendo la resistencia al corte, la presión admisible sugerida para cargas estáticas y transitorias, el módulo de corte dinámico estimado y la relación de Poisson del terreno.

6. El diseño y la construcción de fundaciones para equipos vibratorios requieren la coordinación de diferentes disciplinas, incluyendo ingeniería civil, geotécnica, mecánica y eléctrica. La falta de comunicación y coordinación entre estas disciplinas puede generar errores y omisiones que afecten la seguridad y el funcionamiento de las instalaciones.

7. El estudio geotécnico determinó que es factible el uso de cimentaciones superficiales en el área de la unidad 32, aunque la presión admisible real podría estar limitada por la tolerancia a asentamientos de la estructura, un factor crucial a considerar en el diseño de la fundación del soplador.

8. Se determinó que las tres máquinas rotativas operan a una velocidad aproximadamente uniforme de 1800 rpm. Esta similitud exige considerar el fenómeno de batido y las fuerzas desequilibradas del sistema al diseñar la cimentación. Adicionalmente, resulta crucial evitar la resonancia, dado que la proximidad de las frecuencias de operación de las máquinas podría inducir este efecto.

9. Las vibraciones excesivas fueron un problema recurrente y se agravaron con el tiempo, lo que indica una falta de rigidez en la cimentación y los soportes. La

forma de onda truncada de las vibraciones confirma que el problema principal es la falta de rigidez más que el desbalanceo.

10. El estudio de vibraciones del diseño propuesto determinó las frecuencias naturales del sistema cimentación-suelo para asegurar que estén suficientemente separadas de las frecuencias de operación del soplador y sus componentes, manteniéndose fuera del rango de resonancia.

11. La falta de comunicación efectiva con los proveedores de equipos y maquinaria, especialmente en lo que se refiere a la entrega de datos de diseño y análisis dinámicos, puede generar problemas en el diseño y la construcción de las cimentaciones. Es fundamental establecer canales de comunicación claros y efectivos para garantizar que se disponga de la información necesaria para un diseño adecuado.

12. El diseño de la nueva fundación se distingue del original, principalmente en la configuración de la losa de cimentación. Mientras que el diseño original empleaba una losa de menor espesor al normativo y extendida para soportar otros equipos, la propuesta considera pedestales independientes para cada máquina, asentados sobre una zapata de mayor espesor para asegurar la rigidez entre ellos.

13. Los cálculos para predecir las amplitudes de vibración esperadas bajo condiciones normales de operación para asegurar que estén dentro de los límites

aceptables para el equipo y no representen un riesgo para las estructuras adyacentes o el personal.

14. La falta de un programa de inspección adecuado, desde la perspectiva de la ingeniería civil, y la respuesta tardía a los problemas de vibración contribuyeron significativamente al deterioro de la cimentación y a las fallas en los equipos. Esta situación sugiere una posible falta de atención a los detalles y a las mejores prácticas de ingeniería por parte del personal encargado del mantenimiento y la inspección de obras civiles dentro de la empresa.

15. El análisis FODA confirmó que la cimentación original presenta un alto factor de riesgo, mientras que el rediseño propuesto presenta un factor de optimización mayor. Sin embargo, se recomienda explorar otras alternativas y realizar un análisis costo-beneficio.

16. El análisis FODA subraya las deficiencias constructivas presentes en el diseño original, que contravienen las recomendaciones normativas para este tipo de fundaciones. Esto refuerza la necesidad de una solución que aborde integralmente los problemas identificados, más allá de una simple reparación o mantenimiento.

5.2. Recomendaciones

1. El personal técnico y de ingeniería civil de PEQUIVEN debe recibir una capacitación integral sobre el diseño, construcción, inspección y mantenimiento de

cimentaciones para equipos vibratorios. Esta capacitación debe incluir aspectos teóricos y prácticos, abarcando temas como el análisis dinámico, diseño de refuerzo, control de vibraciones y la importancia de diseñar este tipo de fundaciones como un elemento separado del resto.

2. Es crucial realizar un análisis costo-beneficio de las diferentes alternativas de solución, incluyendo el rediseño de la cimentación, el mejoramiento del suelo y otras opciones, para seleccionar la solución más adecuada en términos técnicos, económicos y de seguridad.

3. La empresa debe implementar un programa de inspección y mantenimiento preventivo de obras civiles que incluya inspecciones periódicas, revisión de documentos y memorias de cálculos para detectar y corregir problemas a tiempo.

4. El diseño de cimentaciones para maquinas debe considerar adecuadamente las condiciones del suelo en el sitio, incluyendo la capacidad de carga, la rigidez y las características de amortiguamiento, ya que estos factores influyen significativamente en el comportamiento dinámico general del sistema.

5. Un margen de separación de al menos el 20% o el 25% entre la frecuencia natural y la frecuencia de operación es un buen objetivo para minimizar la resonancia.

6. Para abordar las problemáticas similares en máquinas, se recomienda la conformación de equipos de trabajo multidisciplinarios dentro de la empresa. Integrados por ingenieros civiles, mecánicos, eléctricos y químicos, quienes aportarán sus conocimientos y perspectivas específicas para el estudio y análisis de cada caso.

7. La empresa debe establecer un proceso más confiable de revisión y aprobación de los diseños y proyectos de cimentaciones realizados por contratistas. Este proceso debe incluir la verificación del cumplimiento de los requisitos establecidos en las normas correspondientes, así como la evaluación de la experiencia y capacidad técnica de los contratistas.

BIBLIOGRAFÍA

Análisis DAFO (s.f.). En Wikipedia. Recuperado el 27 de junio de 2018 de:
https://es.wikipedia.org/wiki/Análisis_DAFO

Angos, M. (2009). Manual de diseño de cimentaciones tipo bloque para equipo dinámico. Trabajo de grado, Escuela Politécnica del Ejército, Sangolquí.

Arias, F. G. (2012). El proyecto de investigación. Introducción a la metodología científica. Caracas: Editorial Episteme.

American Concrete Institute. (N°351.1R-12) (2012) Report on Grouting Between Foundations and Bases for Support of Equipment & Machinery [Informe sobre el grouting entre cimientos y bases para el soporte de equipos y maquinaria]. Recuperado de:
<https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=351112>

American Concrete Institute. (N°351.3R-18) (2018). Report on Foundations for Dynamic Equipment [Informe sobre fundaciones para equipos dinámicos]. Recuperado de: <https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=351318>

Barkan, D. D. (1962). Dynamics of bases and foundations [Dinámica de bases y fundaciones]. New York: Editorial McGraw Hill.

Carpintero, J. (2009). Desarrollo de un procedimiento de inspección técnica de obras civiles asociadas a la planta de producción de metanol, Metanol de Oriente, METOR S.A. Jose, Estado Anzoátegui. Trabajo de grado, Universidad de Oriente, Anzoátegui.

Comisión Venezolana de Normas Industriales (1763). (Marzo 2001). Edificaciones Sismorresistentes.

Comisión Venezolana de Normas Industriales (1753). (Agosto 2006). Proyecto y construcción de obras en concreto estructura.

Comisión Venezolana de Normas Industriales (2002). (Agosto 1988). Criterios y acciones mínimas para el proyecto de edificaciones.

Crespo, C. V. (2004). Mecánica de Suelos y Cimentaciones. Mexico: Editorial Limusa, S.A.

Das, B. M. (2015). Fundamentos de Ingeniería Geotécnica. Mexico: Cengage Learning Editores, S.A.

Fratelli, M. G. (1993). Suelos Fundaciones y Muros. Caracas: Bonalde editores.

Fratelli, M. G. (2003). Reparación de daños estructurales. Caracas: Bonalde editores.

Hernández, M. T. (2003). Manual de trabajos de grado de especialización y maestría y tesis doctorales (3ª. Ed.). Caracas: Fondo editorial de la universidad pedagógica experimental libertador.

Hibbeler, R. C. (2004). Mecánica vectorial para ingenieros. (10ª. Ed.). México: Editorial Prentice Hall.

Juárez, E. y Rico, A. (2005). Mecánica de suelos I: Fundamentos de la mecánica del suelo. México: Editorial Limusa.

Khazam, J. y Osechas, G. (2008) Metodología numérica para analizar y diseñar fundaciones de maquinas alternativas, rotativas y de impacto. Trabajo de grado, Universidad Central de Venezuela, Caracas.

Manual de ingeniería de diseño (N° L-STC-003). (1991, Abril). Fundaciones de compresores reciprocantes.

Ortega, M. y Ortigoza, E. (2009). Automatización del cálculo para fundaciones aisladas superficiales sometidas a vibraciones inducidas por motores acoplados a

compresores o bombas centrifugas y reciprocantes. Trabajo de grado, Universidad Rafael Urdaneta, Maracaibo.

Petróleos De Venezuela S.A. (90615.1.002). (Abril 1991). Manual de Ingeniería de Diseño. Guía de ingeniería: Fundaciones de compresores reciprocantes.

Petróleos De Venezuela S.A. (A-251). (Julio 1990). Manual de Ingeniería de Diseño. Especificación de ingeniería: Diseño de concreto bajo tierra.

Petróleos De Venezuela S.A. (A-261). (Enero 2001). Manual de Ingeniería de Diseño. Especificación de ingeniería: Criterios y acciones mínimas para el diseño de estructuras industriales.

Petróleos De Venezuela S.A. (L-STC-003). (Abril 1991). Manual de Ingeniería de Diseño. Procedimiento de ingeniería: Fundaciones de compresores reciprocantes.

Richart, F. E., Hall, J. R. y Woods, R. D. (1970) Vibrations of soils and foundations. Michigan: Editorial Prentice Hall.

Saavedra, P. N. (2010). La medición y análisis de las vibraciones como técnica de inspección de equipos y componentes, aplicaciones, normativas y certificación. Trabajo de investigación, Universidad de Concepcion. Concepción, Chile.

Sampieri, R., Fernández, C. y Baptista, P. (2006). Metodología de la investigación. México: Editorial McGraw Hill.

Srinivasulu, P. y Vaidyanathan C. V. (1976). Handbook of machine foundations [Manual de fundaciones de máquinas]. New Delhi: Editorial McGraw-Hill.

Suresh, A., O'Neill, M. y Pincus, G. (1979). Design of Structures and Foundations for Vibrating Machines. Houston: Gulf Publishing Company.

Thompson, A. A., Gamble, J. E., Peteraf, M. A. y Strickland III, A. J. (2012) Administración estratégica, teoría y casos. Mexico D.F.: Editorial McGraw-Hill.

Vibración (s. f.) En Wikipedia. Recuperado el 11 de junio de 2018 de: <https://es.wikipedia.org/wiki/Vibración>

ANEXOS

ANEXO N° 1

MEMORIA DE CÁLCULO DE NAVEDA C.A.



MANTENIMIENTO DE EQUIPOS INDUSTRIALES
 INSTALACIONES HOSPITALARIOS E INDUSTRIALES
 MANTENIMIENTOS A ESTRUCTURAS METÁLICAS
 OBRAS CIVILES Y ELECTRICAS PARA LA INDUSTRIA
 RIF. J-30806456-4

$$As_{\min} = 0.005 * (50 * 50) = 12.5 \text{ cm}^2$$

5.7- DIMENSIONAMIENTO DE LOS PEDESTALES DEL VTF

El conjunto VTF consta de tres equipos los cuales son: turbina, ventilador y motor. Estos equipos son dispuestos sobre una especie de pedestal con sección variable que descansa sobre una losa fundación al igual que el resto de equipos. El elemento de elevación se diseñó como un cabezal, dadas sus grandes dimensiones, por lo tanto el armado consistirá en cabillas en forma de U en ambos sentidos y estribos transversales formando una cesta.

$$As_{\text{principal}} = 0.0018 * b * h$$

$$As_{\text{principal}} = 0.0018 * (106.3 * 96.1) = 18.39 \text{ cm}^2$$

Se opto por colocar cabillas 5/8" a cada 15 cm, en forma de "U" en ambos sentidos.

$$As_{\text{principal}} = 0.0018 * b * \frac{h}{2}$$

$$As_{\text{principal}} = 0.0018 * (106.3 * 96.1) / 2 = 9.19 \text{ cm}^2$$

Se deben colocar cabillas 5/8" a cada 15 cm, alrededor de toda la sección transversal.

5.8- DIMENSIONAMIENTO DEL RESTO DE FUNDACIONES

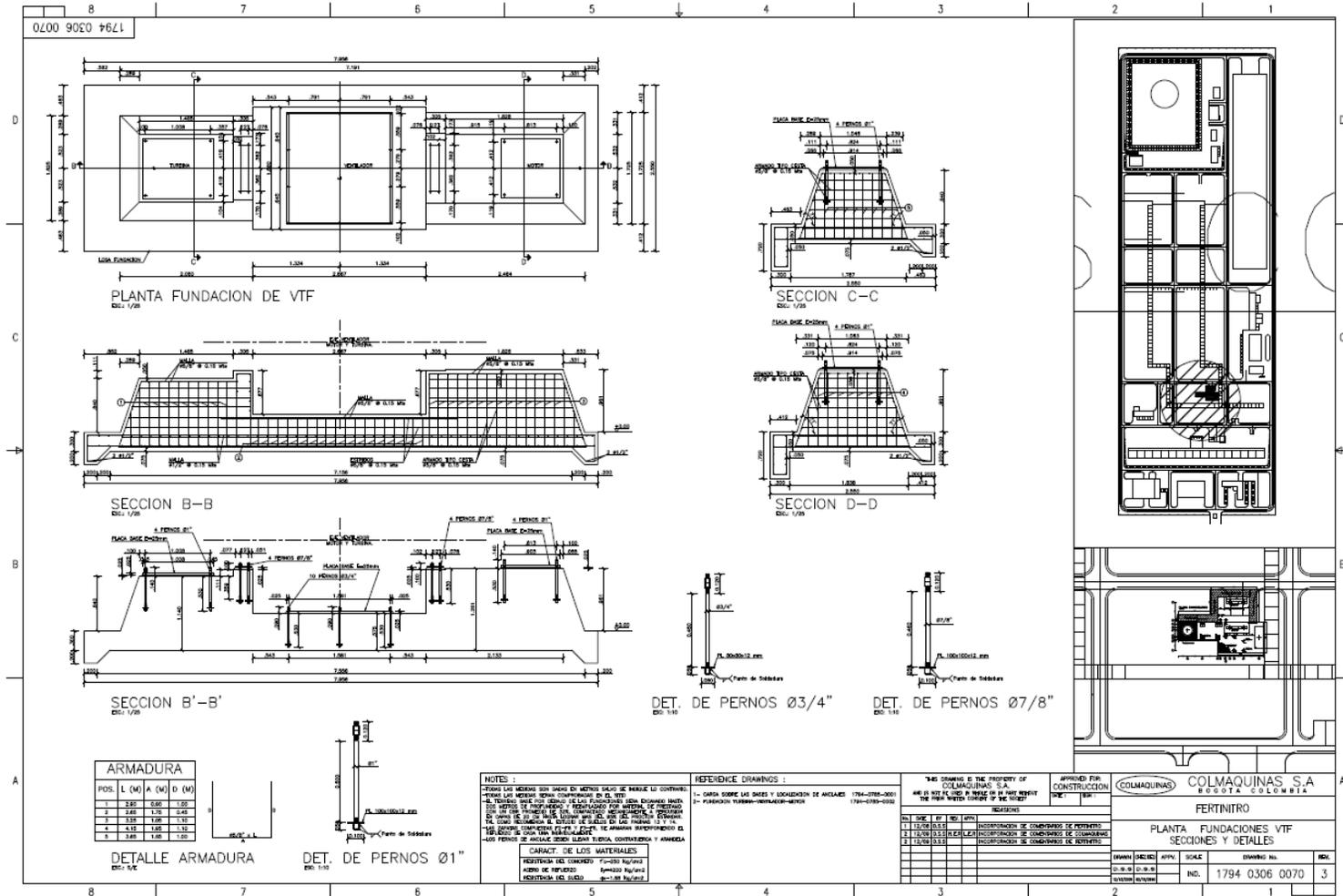
Para el condensador y la torre de escaleras, se plantean zapatas colaborantes de 1x1 metros y 0.60 centímetros de espesor total incluyendo la losa fundación, con el fin de desarrollar la longitud necesaria de anclaje de los pernos.

CARRETERA PRINCIPAL VIA QUISIRO SECTOR EL TARTAGAL LOS PUERTOS DE
 ALTAGRACIA ESTADO ZULIA TELFS: (0266) 3211889 / 5110127 E-MAIL:
 NAVEDACA@GMAIL.COM

Fuente: Naveda C.A (2010).

ANEXO N° 3

PLANO DE DETALLES DE LA FUNDACIÓN DEL SOPLADOR DE CALDERA 32-U-601C.



Fuente: Colmaquinas S.A. (2010).

ANEXO N° 4

REPORTE DE INSPECCIÓN DE VIBRACIONES EN CONJUNTO DEL SOPLADOR DE CALDERA 32-U-601C.

	GERENCIA DE CONFIABILIDAD SUPERINTENDENCIA DE CONFIABILIDAD DE EQUIPOS ROTATIVO	FN-RDI-ROT-15-004-9
		Page 15 de 47

REPORTE TECNICO

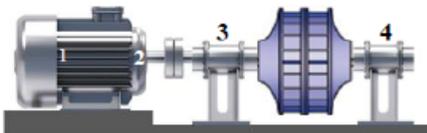
	GTS CONFIABILIDAD, C.A gente + tecnología + servicio	Reporte N° FN-16-03
	REPORTE DE CONDICIÓN DE ACTIVOS	

Para: Gerardo Pernaleta.	Empresa: ICM	Realizado por: David Trocel David.trocel@confiabilidad.com.ve
---------------------------------	--------------	---

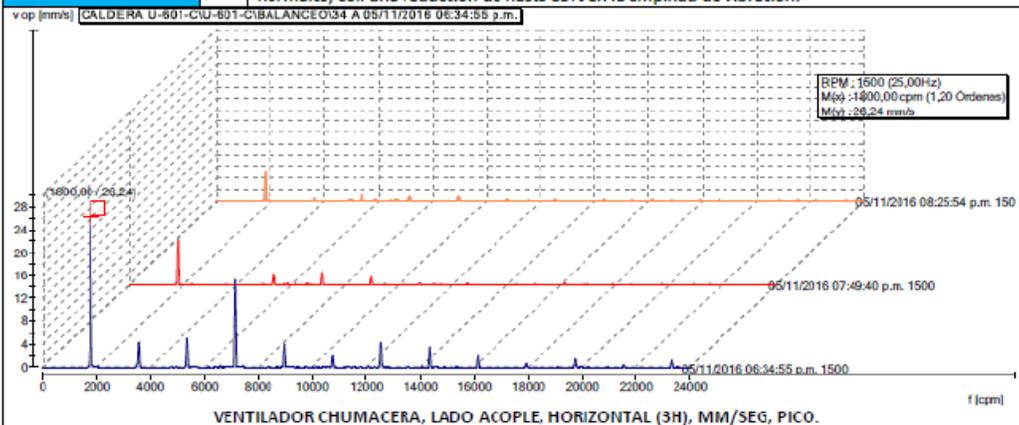
CC: Armando Carrillo.	Fecha del Monitoreo: 5-11-2016	Fecha del Reporte: 7-11-2016
-----------------------	--------------------------------	------------------------------

ACTIVO: VENTILADOR CALDERA C, 32-U601-C

ID: 32-U-601-C	Serial:	Servicio: Sopladores de aire.	Ubicación: ÁREA 32
----------------	---------	-------------------------------	--------------------

	EQUIPOS	CONDUCTOR	CONDUCIDO
		Motor Eléctrico	Ventilador Cent.
	MARCA/MODELO	US ELECTRIC	COLMAQUINAS
	RPM / POTENCIA	1790	1790
	COJINETES	6226 – JC3 X2	
ESTANDAR	ISO-10816-3	ISO-10816-7	
DATOS DE PLACA	400HP, 4000V, 51A	12 ALABES	

SEVERIDAD	ANÁLISIS Y OBSERVACIONES
CRITICO	<p>Luego de la limpieza del impulsor, reparación de grietas en la soldadura de los pedestales y nivelación de planitud de las bases de las chumaceras del ventilador, se procedió a nueva corrida de balanceo dinámico. Se agregaron un total de 145g de masas (pietinas de 5 mm de acero al carbono) soldadas al plano central del impulsor. El equipo queda en servicio bajo condiciones dinámicas normales, con una reducción de hasta 85% en la amplitud de vibración.</p>
ALARMA	
SEGUIMIENTO *	
NORMAL	



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES:
Los valores de vibración global del conjunto quedan bajo los niveles permisibles, la baja rigidez en los pedestales magnifica las amplitudes de vibración. Mantener seguimiento a temperatura de chumaceras.

Realizado por: Jose Martinez	Revisado por: Armando Carrillo	Aprobado por: Mariano Reyes
Fecha Finalización:		

Fuente: Fertinitro (2016). Reporte de inspección de equipos rotativos.

ANEXO N° 5

RESULTADOS DE INSPECCIÓN DE VIBRACIONES EN CONJUNTO DEL SOPLADOR DE CALDERA 32-U-601C.

	GERENCIA DE CONFIABILIDAD SUPERINTENDENCIA DE CONFIABILIDAD DE EQUIPOS ROTATIVO	FN-RDI-ROT-15-004-9
		Page 16 de 47

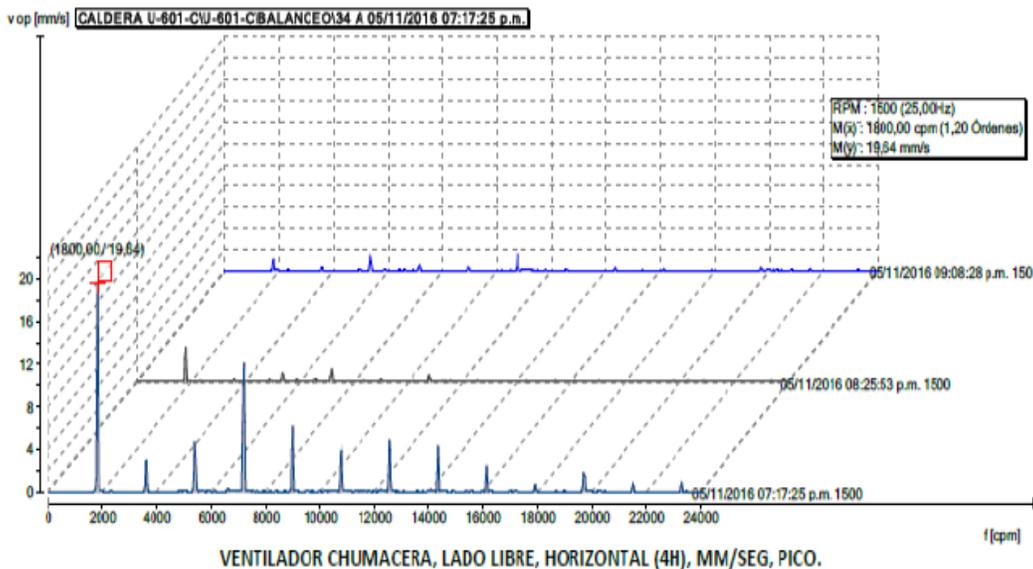
VALORES DE VIBRACIÓN GLOBAL. MM/SEG RMS (PICO)

ACTIVIDAD	MOTOR					VENTILADOR			
	1H	1V	2H	2V	2A	3H	3V	4H	4V
ROTOR LIMPIO, GRIETAS REPARADAS, BASES NIVELADAS	-	-	-	-	-	29,12 (55)	-	26,02 (46,3)	-
BALANCEADO, FINAL, DAMPER 50%	2,91 (4,8)	3,26 (6,8)	3,79 (4,90)	2,02 (4,3)	2,89 (5,9)	4,81 (11,2)	2,15 (5,7)	2,42 (5,8)	1,45 (4,7)

CORRIDAS DE BALANCEO DINÁMICO, PUNTOS 3 Y 4 HORIZONTAL

Ruta de Localización: SERVICIOS\CALDERA U-601-C\U-601-C\BALANCEO\3.srbain
 Número de Valores de Med.: 5
 Tarea Med.: Máquina
 Tipo de Med.: Balanceo en 2 planos
 Unidad: mm/s (OP)

Fecha	Hora	Nº	Masa A (g)	Pos. A (°)	Amplitud A	Fase A (°)	Masa B (g)	Pos. B (°)	Amplitud B	Fase B (°)
05/11/2016	09:07:21 p.m.	0	0,00	0	29,82	180	0,00	0	20,80	191
05/11/2016	09:07:21 p.m.	1	30,00	0*	21,71	187	0,00	0*	19,68	206
05/11/2016	09:07:21 p.m.	2	95,00	17	9,80	242	0,00	0	11,91	215
05/11/2016	09:07:21 p.m.	3	34,08	78	4,84	258	0,00	0	2,85	199
05/11/2016	09:07:21 p.m.	4	16,85	94	4,81	158	0,00	0*	2,10	250



Realizado por: Jose Martinez	Revisado por: Armando Carrillo	Aprobado por: Mariano Reyes
Fecha Finalización:		

Fuente: Fertinitro (2016). Reporte de inspección de equipos rotativos.

ANEXO Nº 8

HOJA DE CARGAS Y REACCIONES GENERADAS POR LA TURBINA DRESSER-RAND RLH 24 ESTÁNDAR

REVISIONS			
REV	DESCRIPTION	DATE	BY
--	ORIGINAL SUBMITTAL	4/14/09	MAD

LIMIT 1: RESULTANTS AT THE INLET CONNECTION
THE TOTAL RESULTANT FORCE F_{RI} AND THE TOTAL RESULTANT MOMENT M_{RI} IMPOSED ON THE TURBINE AT THE INLET CONNECTION ARE LIMITED AS FOLLOWS:

ENGLISH UNITS METRIC UNITS

$3F_{RI} + M_{RI} \leq 1500$ $0.914F_{RI} + M_{RI} \leq 2034$

LIMIT 2: RESULTANTS AT THE EXHAUST CONNECTION
THE TOTAL RESULTANT FORCE F_{RE} AND THE TOTAL RESULTANT MOMENT M_{RE} IMPOSED ON THE TURBINE AT THE EXHAUST CONNECTION ARE LIMITED AS FOLLOWS:

ENGLISH UNITS METRIC UNITS

$3F_{RE} + M_{RE} \leq 4333$ $0.914F_{RE} + M_{RE} \leq 5875$

LIMIT 3: COMBINED RESULTANTS, RESOLVED AT THE CENTERLINE OF THE EXHAUST CONNECTION
THE COMBINED RESULTANTS F_C AND M_C OF THE FORCES F_{RI} AND F_{RE} AND THE MOMENTS M_{RI} AND M_{RE} AND THE MOMENT RESULTING FROM FORCE F_{RI} , RESOLVED AT THE CENTERLINE OF THE EXHAUST CONNECTION ARE LIMITED AS FOLLOWS:

ENGLISH UNITS METRIC UNITS

$2F_C + M_C \leq 2370$ $0.610F_C + M_C \leq 3213$

LIMIT 4: COMPONENTS OF COMBINED RESULTANTS, RESOLVED AT THE CENTERLINE OF THE EXHAUST CONNECTION
THE ABSOLUTE VALUES OF COMPONENTS OF THE COMBINED RESULTANTS F_C AND M_C IN LIMIT 3 ARE LIMITED AS FOLLOWS:

<small>ENGLISH UNITS</small>	<small>METRIC UNITS</small>
$F_{Cx} \leq 474$	$F_{Cx} \leq 2108$
$M_{Cx} \leq 2370$	$M_{Cx} \leq 3213$
$F_{Cy} \leq 1185$	$F_{Cy} \leq 5271$
$M_{Cy} \leq 1185$	$M_{Cy} \leq 1607$
$F_{Cz} \leq 948$	$F_{Cz} \leq 4217$
$M_{Cz} \leq 1185$	$M_{Cz} \leq 1607$

ENGLISH UNITS METRIC UNITS

FORCE (F) = POUNDS FORCE (LBF) FORCE (F) = NEWTONS (N)

MOMENT (M) = FOOT POUNDS FORCE (FT. LBF) MOMENT (M) = NEWTON METERS (Nm)

UNITS FOR FORCES AND MOMENTS

COORDINATE SYSTEM FOR FORCES AND MOMENTS AND THERMAL MOVEMENTS IMPOSED ON THE TURBINE AT THE INLET AND EXHAUST CONNECTIONS

	ESTIMATED STEADY STATE THERMAL MOVEMENT							NORMAL STEAM CONDITIONS		
	INLET FLANGE			EXHAUST FLANGE			SHAFT RISE	INLET TEMP.	INLET PRESSURE	EXHAUST PRESSURE
	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔY			
INCHES	-0.148	0.015	0.071	-0.034	0.004	-0.069	0.038	734.00 °F	630.00 PSIG	64.00 PSIG

ALL FIGURES ARE ESTIMATES. THERMAL MOVEMENT VARIES SIGNIFICANTLY WITH ACTUAL INLET TEMPERATURE, LOAD, INSULATION, SITE CONDITIONS AND TIME.
 INLET AND EXHAUST PIPING DESIGN MUST ALLOW FOR MOVEMENT OF THE TURBINE AND THE PIPING.
 FINAL HOT ALIGNMENT OF THE TURBINE AND DRIVEN EQUIPMENT MUST BE BASED ON ACTUAL MEASURED SHAFT RISE AT STEADY STATE CONDITIONS.

FORCE AND MOMENT LIMITS FOR RLHA24 WITH 3" INLET AND 10" EXHAUST CONNECTIONS

ALLOWABLE FORCES AND MOMENTS ON INLET AND EXHAUST CONNECTIONS

THE LIMITS OF THE ALLOWABLE FORCES AND MOMENTS APPLIED TO THE INLET AND EXHAUST CONNECTIONS, AS DESCRIBED ABOVE, ARE IN ACCORDANCE WITH NEMA SM-23

JUN 2 2009

PURCHASER/USER INFORMATION		
PURCHASER	COLIMADUNAS S.A.	
PURCHASE ORDER NUMBER	3042	
USER	FERTINTRO	
LOCATION	VENEZUELA	
USER EQUIPMENT IDENTIFICATION NUMBER		
DRIVEN EQUIPMENT	FORCED DRAFT FAN	
COPUS TURBINE	Dresser - Rand Company MILWAUKEE, WISCONSIN, USA	PROJECTION
RLHA24 TURBINE ALLOWABLE FORCES & MOMENTS / THERMAL MOVEMENTS		
<small>DRAWING NUMBER</small>		
SERIAL NUMBER	08H8246	-04
DRAWN BY MAD	DATE 4/14/09	
CHECKED BY EHA	DATE 4/20/09	

Fuente: Dresser-Rand. Manual de Instalación y operación de turbina.

ANEXO N° 9

CURVAS CON DATOS DE DISEÑO Y OPERACIÓN DEL VENTILADOR DE TIRO FORZADO (VTF) CHICAGO BLOWERS MODELO1902 DW.



CHICAGO BLOWER CORPORATION

• 1675 Glen Ellyn Road

• Glendale Heights, IL

• 60139

an ISO 9001 Company

Description

October 15, 2008

Job Description: COLMAQUINAS S.A.
 Reference: 08-266-1 VENTILADOR FERTINITRO
 Fan Type: Airfoil Custom Engineered Fans
 Fan Model: Design 1902 DW With Inlet Boxes
 Fan Size: 4900
 Fan Width: 82.5%

COIN LTDA
 MARCO ZAMBRANO
 Phone: 572-8644703
 Fax: 572-8648036
 e-mail: coin@cointltda.com.co

Performance

Values are in accordance with AMCA Standard 210

	Design	Net #1
Volume Flow Rate (CFM)	71420	66140
Static Pressure (IN. WG)	25.6	23.6
Density (LB/FT ³)	0.071	0.074
Temperature (°F)	99	79
Altitude (FT)	13	13
Speed (RPM)	1760	1760
Power Required (BHP)	345.7	317.3
Static Efficiency (%)	81.1	75.5
Outlet Velocity (FT/MIN)	3239	3000
Damper Opening (%)	100	60
Control Type	Prespin Inlet Box Damper	
Outlet Area (FT ²)	22	

Sound

Values are in accordance with AMCA Standard 300

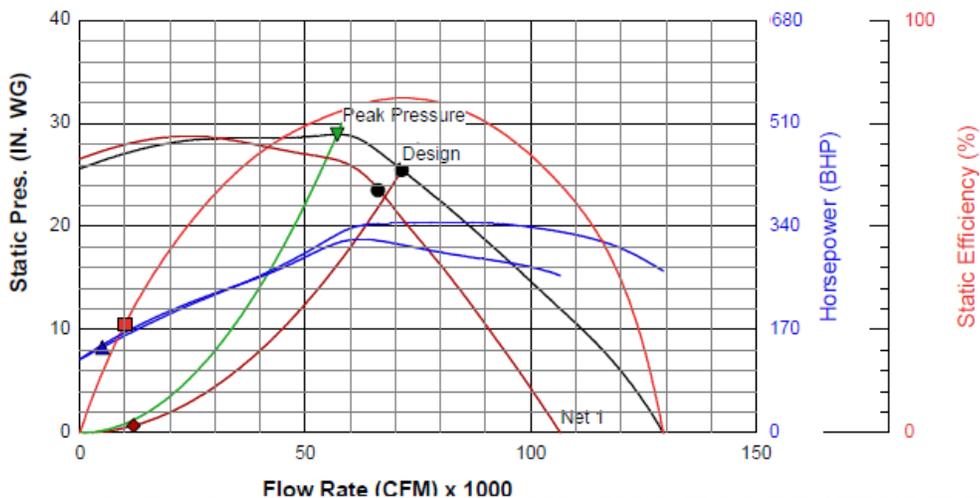
External Sound Power Levels (dB):

Center Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
L _w Design	120	126	122	115	109	106	99	92
ERC	4	2						

Sound Pressure 3.3 FT from Fan (dBA) 110

L_w (L_w) is sound power at the fan inlet (outlet) airstream, less ERC.

● - Design Point ◆ - System Curve ▼ - Peak Pressure ▲ - Power vs. Vol ■ - SE vs. Vol



Fuente: Chicago Blower Corporation. Manual de Instalación y operación ventilador VTF.

ANEXO N° 10

HOJA DE DATOS DE DISEÑO Y OPERACIÓN DEL VENTILADOR DE TIRO FORZADO (VTF) MARCA CHICAGO BLOWERS MODELO1902 DW.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL VENTILADOR		ANEXO N° 2	
Cali, 24-Oct-2008 Señores: <u>COLMAQUINAS S.A.</u> ITEM # <u>1</u> CANT: <u>1</u> S/REF: <u>VENTILADOR FERTINITRO</u> REVISIÓN: <u>3</u> N/REF: <u>08-266</u> FECHA DEL PEDIDO: _____		 Cra 34 No. 10-446 AGOPI Tel: 87-2-6644703 / 891-4444 Fax: 87-2-6648036 E-MAIL: coin@cointltda.com.co Cali-Colombia	
PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO SOLICITADOS	SIST. TRANSMISIÓN DE POTENCIA	MOTOR SELECCIONADO	
Caudal: 71420 CFM (121414 m3/h) Presión Estática: 25.5 "H ₂ O (648 mm) Temperatura: 99 °F (37 °C) Humedad Relativa: - % Elevación s.n.m.: 13 Pies (4 m) Gas a Manejar: AIRE LIMPIO Corrosivo: NO Abrasivo: NO Explosivo: NO Aplicación o uso: VTF	Rotor acoplado en el eje del motor: NO Transmisión por acople: SI Acople Marca: _____ Guarda Acople: SI Transmisión por bandas: NO Guarda de Poleas Tipo OSHA: NO Poleas en hierro fundido con bushing tipo OD: NO Polea motor: - Polea ventilador: - Bandas Preliminares: N° Bandas - Bandas sujetas a cambio durante la fabricación: -	Suministra: CLIENTE Marca: US MOTORS Tipo: JCE Voltaje: 3/60/460 V Potencia: 400 H.P. (298.5 Kw) Velocidad: 1760 R.P.M. Factor Servicio: 1.15 Protección: TEFC Tipo Arranque: DIRECTO WR ² Motor: 3092 Lbs.Pie ² (76537 Kg.m2) MOTOR CON WR ² ESTANDAR	
CARACTERÍSTICAS DEL VENTILADOR OFRECIDO	ACCESORIOS	PRUEBAS REALIZADAS EN:	
Tipo: CENTRÍFUGO Diseño: 1902 Tamaño: 49 Clase: HEAVY DUTY Arreglo: 3 Ancho parcial: 82.5 % Tipo de Succión: DIDV Tipo Rotor: AERODINÁMICO	Brida(s) en la(s) succión(es): SI Caja(s) de entrada: SI Damp(er)s en la succión(es) de Acc. Manual: SI Damp(er) en la descarga de Acc. Manual: SI Rotor de enfriamiento con guarda protección: NO Puerta de inspección: SI Drenaje en la carcasa: SI Ampliación en la descarga (Evase): NO Carcasa partida: SI Lámina antidesgaste: NO Base de motor ajustable: NO Chasis (Base integral ventilador-motor): NO Bases antivibratorias en caucho: NO Tornillos galvanizados: SI Guarda Eje: SI Otros: _____	Análisis de Vibraciones: CLIENTE Balanceo dinámico: CLIENTE Funcionamiento mecánico: CLIENTE Alineación por LASER: NO ANEXOS Certificación sobre licencia de fabricación de CHICAGO BLOWER CORP.: SI Curva de rendimiento: SI Dimensiones preliminares: SI Fotografía ilustrativa: NO	
PARÁMETROS DEL VENTILADOR OFRECIDO	RODAMIENTOS	DETALLES DE SUMINISTRO	
Caudal: 71420 CFM (121414 m3/h) Presión Estática: 25.5 "H ₂ O (648 mm) Densidad: 0.071 Lbs/Pie ³ (1.14 Kg/m3) Eficiencia estática: 81.1 % Potencia al freno: 345.7 BHP (258.0 Kw) Velocidad de rotación: 1760 RPM Velocidad máxima a 104 °F @1800 RPM Nivel de ruido a 1 m 110 dBA en campo abierto WR ² del ventilador: 2097 Lbs.Pie ² (88.6 Kg.m2)	Marca: SKF 2.3/4" Tipo de Carcasa: BIPARTIDA Duración: 20000 Hrs. CHUMACERAS LUBRICADAS POR GRASA	Huacal de madera: NO Sand Blasting: Comercial SSPC-SP6 NO Casa Blanco SSPC-SP10 NO Metal Blanco SSPC-SP5 NO Pintura anticorrosiva: SI Pintura de acabado tipo esmalte: SI Pintura para Alta Temperatura: NO Placa de identificación: SI Instrucciones de operación y mantenimiento: SI	
MATERIALES PARA CONSTRUCCIÓN DEL VENTILADOR	PESO (Kg)	FACTORES DE CONVERSIÓN	
Carcasa: ASTM A-36 Rotor: CORTEN, CORTEN, ASTM A-36 Eje: SAE-1045 Manzana: HIERRO FUNDIDO	Ventilador: 4200 Damp(er)s Succión(es): 309 Damp(er) descarga: 290 Motor: 0 4799 Kg	1" H ₂ O = 25.4 mm H ₂ O 1 Psi = 27.7" H ₂ O 1 CFM = 1.7 m ³ /h °F = 9/5 °C+32	
NOTAS TÉCNICAS: 1- Referencia de Chumaceras: 22216 EK SNL 516-613 HE 316 TSN 516G FRB 12.5/140 2- NO SE INCLUYE NINGUN TIPO DE ACOPLE EN EL MOTOR NI TURBINA, ESTOS ACOPLES SERAN POR CUENTA DEL COMPRADOR. 3- 4- 5-			
ROTACIÓN Y DESCARGA DEL VENTILADOR VISTO DESDE EL LADO DEL MOTOR			
			

Fuente: Chicago Blower Corporation. Manual de Instalación y operación ventilador VTF.

ANEXO N° 11

HOJA DE DATOS DE DISEÑO Y OPERACIÓN DEL MOTOR MARCA US MOTORS MODELO TITAN JCE 5809ML

VISTA LATERAL

VISTA FRONTAL

DIAGRAMA DE CONEXIONES

RESISTENCIAS CALEFACTORAS

RTD'S DE BALEROS Y EMBOBINADO

RTD'S DE PLATINO 100 Ω @ 0°C

CLIENTE: EMERSON ELECTRIC DE COLOMBIA
 ORDEN DEL CLIENTE: U-3297
 ORDEN U.S.: COU-3297
 PARTIDA: 01
 CANTIDAD: 1

CARACTERISTICAS ESPECIALES

- CAJA DE CONEXIONES PRINCIPAL (POSICION F.).
- CAJA ADICIONAL PARA SALIDA DE CABLES DE RESISTENCIAS CALEFACTORAS Y RTD'S DE EMBOBINADO.
- CORRO DUTY.
- TERMINAL DE TIERRA EN CAJA DE CONEXIONES Y CUERPO.
- GIRO BIDIRECCIONAL.
- RTD'S DE BALERO (2PFA).

DIMENSIONES EN PULGADAS

INFORMACION TECNICA

A- ENCLASIFICACION I.C.C.V.
 B- POSICION DE TRABAJO HORIZONTAL
 C- TIPO DE BALERO DE SOLAS EN AMBOS LADOS

D- RESISTENCIAS CALEFACTORAS
 TIPO: WATTS
 CONEXION PARA OPERAR A: VOLTS
 P- DETECTORES DE TEMPERATURA EN EMBOBINADO
 TIPO: RTD'S DE PLATINO
 100 Ω @ 0°C (2FASE)

Q- DETECTORES DE TEMPERATURA EN BALEROS
 TIPO: RTD'S DE PLATINO
 100 Ω @ 0°C (2 BALEROS)

R- BASE O PLACA BASE
 S- CAJA DE CONEXIONES POSICION D
 LA- PROVISIONES PARA ALIMENTAR LA CAJA PRINCIPAL
 M- ROTACION MTO DEL LADO DE CARGA C/W/CW
 N- LUBRICACION GRASA
 M- CICLO DE LUBRICACION 2000 HORAS (2 RTD'S)
 N- SUPLENTE BALEROS ANEXO EN OPERACION

O- PESO TOTAL: 2920 LBS. PESO ROTOR: 800 LBS.
 PESO DE LA CARGA: 180 LBS.
 PESO DEL MOTOR: 1840 LBS.

P- TIEMPO A PROHIBIDO QUE PUEDE SOPORTAR A ROTOR EMBOBINADO
 Q- ARRANQUE A TEMPERATURA AMBIENTE
 R- TIPO DE CARGA
 S- PAR DE ARRANQUE DE LA CARGA

PRECAUCION

LA INSTALACION IMPROPIA DE ESTE MOTOR PUEDE CAUSAR DAÑOS AL PERSONAL O FALLA DEL MOTOR. LEER LAS INSTRUCCIONES DE OPERACION DEL MOTOR QUE DEBERA SER INSTALADO Y ARRANQUEADO DE ACUERDO AL CODIGO ELECTRICO LOCAL PARA PREVENIR UNA DESCARGA ELECTRICA, DESCONECTE TODAS LAS FUENTES DE ENERGIA ANTES DE EMPEZAR CUALQUIER MANTENIMIENTO O REPARACION.

MANTENIE LOS OJOS Y OREJAS ESTANDO FUERA DE LAS ABERTURAS DE VENTILACION Y ESTAS DEBEN DE ESTAR LIMPIAS PARA UN BUEN ENFRIAMIENTO. USE LAS OJERAS PARA EVITAR EL MOTOR LINEALMENTE Y/O SOBRESEREN USADAS PARA LEVANTAR UN PESO ADICIONAL. EL MOTOR HA SIDO BALANCEADO DYNAMICAMENTE USANDO UNA MESA CURVA DE LA MESA LONGITUD QUE LA CURVA COMPLETA EMBARCADA CON EL MOTOR. SI EL ANCHO DEL COPLI ES MENOR QUE ESTA LONGITUD REMANECER LA CURVA QUITANDO LA MITAD DEL EXCESO DE LONGITUD ENTRE EL COPLI Y CURVA PARA MANTENER EL BALANCE.

NOTAS

- DIMENSIONES Y LETRAS POR AGU 1.02
- TODAS LAS SUPERFICIES NO MAQUINADAS PUEDEN VARIAR 0.250" DEBIDO A LA FINICION O VARIACIONES DE FABRICACION.
- LA ROTACION DE LA FLECHA DEBERA SER CON UNA PLACA PERMANENTE ADHESIVA SOBRE EL FINAL DE LOS SOPORTES.
- LA DIMENSION UNICA DEBEN SER EXACTAS, PERO PODRA SER MENOR QUE LOS VALORES MANDADOS, CUANDO SE REQUIERAN DIMENSIONES EXACTAS PUEDE SER REQUERIDAS ANTES HASTA DE 0.004"
- SE REQUIERE UN CLARO MINIMO DE 3.250" ENTRE LA CARA DEL MOTOR Y LAS PROTECCIONES DEL ACOPLAMIENTO PARA PERMITIR EL FLUJO DE AIRE.

CERTIFICO QUE LAS DIMENSIONES SON LAS CORRECTAS PARA EL MOTOR ESPECIFICADO ARRIBA, Y LOS DEMAS DATOS SON TIPICOS.

POR: JOSE L. MEDINA FECHA: NOV-27-08

DATOS DE PLACA

CP / FACTOR DE SERVICIO: 400 / 1.15
 FRECUENCIA DE ROTACION A P.C. (RPM): 1790
 FASES / CICLOS / TENSION (V): 3 / 60 / 2300 / 4000
 CORRIENTE A PLENA CARGA (AMPS): 89 / 51
 CLAVE: C
 ARMAZON: 5809ML
 TIPO: JCE
 DISEÑO NEMA: B
 CLASE DE ABLEAMIENTO: B
 BALERO LADO DE CARGA: 2322-003
 BALERO LADO OPUERTO: 2322-001

REVISION

No.	DESCRIPCION	FECHA

MOTORES U.S. DE MEXICO
 DIVISION OF EMERSON ELECTRIC CO.
 ST. LOUIS, MO. APODACA, NL

DIBUJO DE DIMENSIONES LINEA TITAN

DIBUJADO POR: JAH
 FECHA: NOV-27-08
 APROBADO POR: JLM
 DP/ COU-3297-01 B

Fuente: Emerson Motor Company. Manual de Instalación y operación del motor.

ANEXO N° 12

DATOS USADOS PARA LA REALIZACIÓN DEL GRID EN EL PROGRAMA DE ANÁLISIS DE FUNDACIONE SAFE 2016.

Coordinate System

Edit

Coordinate System Name: GLOBAL

Display Grid Data as: Ordinates Spacing

X Grid Data

Grid ID	X Ordinate (cm)	Visibility	Bubble Loc
A	0	Show	End
B	44,9	Show	End
C	194,4	Show	End
D	224,9	Show	End
E	358,3	Show	End
F	491,7	Show	End

Y Grid Data

Grid ID	Y Ordinate (cm)	Visibility	Bubble Loc
1	0	Show	Start
2	46	Show	Start
3	86,8	Show	Start
4	140	Show	Start
5	193,2	Show	Start
6	234	Show	Start

General Grid Data

Grid ID	X1 (cm)	Y1 (cm)	X2 (cm)	Y2 (cm)	Visibility	Bubble Loc
*						

Options:

Hide All Grid Lines

Bubble Size: 50 cm

Grid Color: [Color Selection]

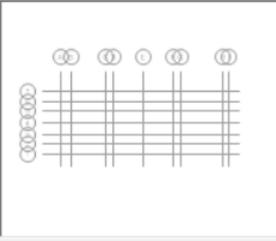
Reorder Ordinates

Model Datum: 0 cm

Story Height Above: 0 cm

Story Height Below: 300 cm

OK Cancel



Fuente: Realización propia.

ANEXO N° 13

DATOS USADOS PARA LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO EN EL PROGRAMA DE ANÁLISIS DE FUNDACIONE SAFE 2016.

Material Property Data

General Data

Material Name: CONC250

Material Type: Concrete

Material Display Color: Change...

Material Notes: Modify/Show Notes...

Material Weight

Weight per Unit Volume: 2,5E-02 kgf/cm3

Isotropic Property Data

Modulus of Elasticity, E: 238752 kgf/cm2

Poisson's Ratio, U: 0,25

Coefficient of Thermal Expansion, A: 9,9E-06 1/C

Shear Modulus, G: 95500,8 kgf/cm2

Other Properties for Concrete Materials

Specified Concrete Compressive Strength, f'c: 250 kgf/cm2

Lightweight Concrete

Shear Strength Reduction Factor:

Modulus of Rupture for Cracked Deflections

Program Default (Based on Concrete Slab Design Code)

User Specified

OK Cancel

Fuente: Realización propia.

ANEXO N° 14

DATOS USADOS PARA LAS PROPIEDADES DEL SUELO EN EL PROGRAMA DE ANÁLISIS DE FUNDACIONE SAFE 2016.

Soil Subgrade Property Data

General Data

Property Name: SUELO

Display Color: Change...

Property Notes: Modify/Show Notes...

Property

Subgrade Modulus (Compression Only): 3,19E+02 kgf/cm3

Nonlinear Option (Nonlinear Cases Only)

None (Linear)

Tension Only

Compression Only

Elasto-Plastic

Compression Stiffness:

Compression Strength:

Tension Stiffness:

Tension Strength:

OK Cancel

Fuente: Realización propia.

ANEXO N° 15

DATOS USADOS PARA LAS PROPIEDADES DEL ACERO EN EL PROGRAMA DE ANÁLISIS DE FUNDACIONE SAFE 2016.

Material Property Data

General Data

Material Name: FY4200

Material Type: Rebar

Material Display Color: Change...

Material Notes: Modify/Show Notes...

Material Weight

Weight per Unit Volume: 7,849E-03 kgf/cm³

Uniaxial Property Data

Modulus of Elasticity, E: 2100000 kgf/cm²

Other Properties for Rebar Materials

Minimum Yield Stress, F_y: 4200 kgf/cm²

Minimum Tensile Stress, F_u: 5098,58 kgf/cm²

OK Cancel

Fuente: Realización propia.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO

TÍTULO	Evaluación de la fundación del soplador de caldera 32-U-601C en la planta de fertilizantes nitrogenados Pequiven; ubicada en el complejo petroquímico José Antonio Anzoátegui, estado Anzoátegui, Venezuela. Año 2024
SUBTÍTULO	

AUTOR (ES):

APELLIDOS Y NOMBRES	CÓDIGO CVLAC / E MAIL
Álvarez C., Jorge L.	CVLAC: 21.389.796 E MAIL: ja37470@gmail.com
Ramírez P., Gerónimo M.	CVLAC: 20.764.039 E MAIL: geronimorusty@gmail.com

PALÁBRAS O FRASES CLAVES:

fundación
maquinaria rotativa
vibraciones
suelos
rediseños

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO

ÀREA	SUBÀREA
Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas	Ingeniería Civil

RESUMEN (ABSTRACT):

El presente trabajo de grado tiene como objetivo evaluar la fundación del soplador de caldera 32-U-601C en la planta de Fertilizantes Nitrogenados PEQUIVEN, ubicada en el Complejo Petroquímico José Antonio Anzoátegui, Venezuela. La investigación surge de la problemática detectada en las bases del soplador, el cual ha presentado un problema recurrente y agravado de vibraciones excesivas, a pesar de mantenimientos y balanceos, los picos de vibración superaron consistentemente los límites de alarma, culminando en fracturas de soldaduras en soportes de chumaceras. El objetivo general de esta investigación fue evaluar la cimentación del soplador para determinar si las fallas se originan por errores en su diseño o construcción. Los objetivos específicos incluyeron: especificar el estado original de la cimentación, caracterizar el suelo, identificar las máquinas rotativas, diseñar una nueva cimentación según el Manual de Diseño de PDVSA, y comparar este diseño con el original. La metodología empleó una investigación mixta, combinando el análisis documental con investigación de campo. Se identificaron la turbina, el ventilador y el motor como los equipos que operaban sobre la cimentación a frecuencias similares. El estudio geotécnico reveló arcillas consolidadas, con su modulo de corte dinámico y presión admisible calculados. Los resultados del diseño propuesto, bajo el método del semiespacio elástico y modelado en el programa SAFE, mostraron la necesidad de una losa más robusta y mayores cuantías de refuerzo que el diseño original. El análisis FODA comparativo reveló un mayor Factor de Riesgo en el diseño original frente a un mayor Factor de Optimización en el rediseño propuesto. En conclusión, las fallas del soplador se atribuyen a deficiencias en el diseño y la rigidez de la cimentación original. Se recomienda la implementación del rediseño propuesto o la exploración de alternativas, siempre respaldadas por un análisis costo-beneficio que garantice la estabilidad y confiabilidad operativa a largo plazo.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

CONTRIBUIDORES:

APELLIDOS Y NOMBRES	ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL				
	ROL	CA	AS X	TU	JU
Guzmán, Carlos	ORCID				
	E_MAIL	carlosguzmang@gmail.com			
	E_MAIL				
	ROL	CA	AS	TU	JU X
Carreño, Narciso	ORCID				
	E_MAIL	narfrag@gmail.com			
	E_MAIL				
	ROL	CA	AS	TU	JU X
Moreno, Jesús	ORCID:				
	E_MAIL	Jmoreno80.anz@gmail.com			
	E_MAIL				
	ROL	CA	AS	TU	JU X

FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:

2025	06	11
AÑO	MES	DÍA

LENGUAJE. SPA

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ARCHIVO (S):

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
NAZTTG_ACJL2025	Word1997-2003

CARACTERES EN LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS:

ALCANCE

ESPACIAL: inespacial

(OPCIONAL)

TEMPORAL: intemporal

(OPCIONAL)

TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Ingeniero Civil

NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Pregrado

ÁREA DE ESTUDIO:

Departamento de Ingeniería Civil

INSTITUCIÓN:

Universidad de Oriente/Núcleo de Anzoátegui

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:



UNIVERSIDAD DE ORIENTE
CONSEJO UNIVERSITARIO
RECTORADO

CUN°0975

Cumaná, 04 AGO 2009

Ciudadano
Prof. JESÚS MARTÍNEZ YÉPEZ
Vicerrector Académico
Universidad de Oriente
Su Despacho

Estimado Profesor Martínez:

Cumplo en notificarle que el Consejo Universitario, en Reunión Ordinaria celebrada en Centro de Convenciones de Cantaura, los días 28 y 29 de julio de 2009, conoció el punto de agenda "SOLICITUD DE AUTORIZACIÓN PARA PUBLICAR TODA LA PRODUCCIÓN INTELLECTUAL DE LA UNIVERSIDAD DE ORIENTE EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL DE LA UDO, SEGÚN VRAC N° 696/2009".

Leído el oficio SIBI - 139/2009 de fecha 09-07-2009, suscrita por el Dr. Abul K. Bashirullah, Director de Bibliotecas, este Cuerpo Colegiado decidió, por unanimidad, autorizar la publicación de toda la producción intelectual de la Universidad de Oriente en el Repositorio en cuestión.

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
SISTEMA DE BIBLIOTECA
RECIDIDO POR *[Firma]*
FECHA *5/8/09* HORA *5:30*

Comunicación que hago a usted a los fines consiguientes.

Cordialmente,
[Firma]
JUAN A. BOLANOS CUNTELE
Secretario



C.C: Rectora, Vicerectora Administrativa, Decanos de los Núcleos, Coordinador General de Administración, Director de Personal, Dirección de Finanzas, Dirección de Presupuesto, Contraloría Interna, Consultoría Jurídica, Director de Bibliotecas, Dirección de Publicaciones, Dirección de Computación, Coordinación de Telemática, Coordinación General de Postgrado.

JABC/YOC/maruja

Apartado Correos 694 / Teléf: 4008042 - 4008044 / 8008045 Telefax: 4008043 / Cumaná - Venezuela

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO

DERECHOS

De acuerdo al artículo 41 del reglamento de trabajos de grado (Vigente a partir del II Semestre 2009, según comunicación CU-034-2009)

“Los Trabajos de grado son de la exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente y sólo podrán ser utilizadas para otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien deberá participarlo previamente al Consejo Universitario para su autorización”

ALVAREZ C, JORGE L

AUTOR

RAMIREZ P, GERONIMO M

AUTOR

GUZMAN, CARLOS

TUTOR

CARREÑO, NARCISO

JURADO

MORENO, JESUS

JURADO

ÁLVAREZ, ANNA

POR LA COMISIÓN DE TRABAJO DE GRADO