

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

"Diseño de Eje de Caja Reductora y Sistema de Tuberías de Acero
Utilizadas en una Empresa de Alimentos"

TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN

Materia Integradora

Previo la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Presentado por:

Javier Steven Guevara Guerrero

Esther Abigail Ochoa Reinoso

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2017

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos primeramente a Dios por haber estado con nosotros en cada paso y a nuestros padres por su apoyo incondicional. Damos las gracias también a nuestros tutores técnicos y profesor coordinador por los conocimientos compartidos.

DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad del contenido desarrollado en la presente propuesta de la materia integradora corresponde exclusivamente al equipo conformado por:

Javier Guevara Guerrero

Esther Ochoa Reinoso

Dra. Ana Rivas

Ing. Omar Serrano

y el patrimonio intelectual del mismo a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP) de la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL".



(Javier Guevara)
Autor 1



(Esther Ochoa)
Autor 2



(Dra. Ana Rivas)
Director 1



(MSc. Omar Serrano)
Director 2

RESUMEN

Los materiales expuestos a servicio son susceptibles de sufrir fallas, las cuales pueden ser favorecidas por condiciones de operación que exceden las especificaciones técnicas de diseño. Esto ocurre debido a que los elementos son sometidos a cargas excesivas, que provocan deformaciones o rupturas de piezas; y ambientes agresivos que causan diferentes tipos de corrosión. El presente trabajo tiene como objetivo principal diseñar un eje de caja reductora y sistema de tubería de acero utilizado en una empresa de alimentos y analizar las causas de sus fallas recurrentes a través de ensayos destructivos y no destructivos para obtener una solución al problema.

Ya que el sistema de tuberías se encuentra expuesto a un fluido ácido con un pH de 3 y el eje trabaja en un ambiente de 0°C bajo efectos de cargas cíclicas, que se incrementan debido a concentradores de esfuerzos, se tiene como hipótesis que las fallas continuas en los sistemas se deben a un inapropiado proceso de diseño de los elementos y selección de los materiales.

El análisis de falla se hizo siguiendo la metodología establecidas en las normas ASM y ASTM de ensayos destructivos y no destructivos que aplican al análisis de falla por fatiga y corrosión, seguido del uso de manuales que resumen la experiencia de diseñadores en aplicaciones similares para la selección de los materiales, y finalmente las normas ASME B106.1 y ASME B31.3 para el dimensionamiento de eje y tubería respectivamente.

La evaluación del material permitió verificar que la causa de falla para el sistema de tuberías fue corrosión por picaduras y que el material usado no era el apropiado para la aplicación. En caso del eje de caja reductora a pesar de que el material era el correcto no poseía una geometría adecuada ya que se generaban concentradores de esfuerzos en los cambios de sección. De esta manera se procedió a seleccionar los materiales y dimensiones que satisficieran los requerimientos de servicio, siendo la necesidad principal que el material de tubería sea resistente a la corrosión en medios agresivos y que el diseño del eje extienda la vida útil del sistema. Los materiales seleccionados para los elementos se encuentran disponibles en el mercado nacional

tales como AISI 1045 para el eje de caja reductora y AISI 316 para sistemas de tuberías. Para asegurar que los materiales seleccionados sean los apropiados deberán cumplir con las normas ASTM 269 y DIN de fabricación. Las dimensiones de la tubería DN2-10S seleccionada para el sistema de tuberías toman en cuenta la resistencia a la presión interna, pérdidas de energía y los efectos de corrosión obteniendo una deformación radial de 0.915×10^{-3} mm, un flujo laminar con perfil parabólico de velocidad de 0,2 m/s y una pérdida de espesor de tubería máxima de 0,1 mm/año. Las dimensiones seleccionadas para el eje de caja reductora respetan las restricciones de longitud de la caja de reducción y los radios de curvatura de 4 mm y 2 mm en los cambios de sección, estos disminuyen los esfuerzos generados por concentradores siendo 137 MPa.

Las validaciones de los diseños se elaboraron a través del software ANSYS, para análisis de esfuerzos en el eje y deformación en el sistema de tuberías; y FLUENT, para el análisis de la longitud de entrada del fluido dentro de la tubería. De las simulaciones se obtuvieron valores acordes a los resultados expuestos y se comprobó que los diseños eran correctos y soportarán los ambientes a los cuales serán expuestos.

Palabras claves: análisis de falla, corrosión por picadura, fatiga.

ABSTRACT

Materials exposed to service are susceptible to failures, which may be favored by operating conditions that exceed the technical specifications of the design. This occurs because the elements are subjected to excessive loads, cause deformations or ruptures of the parts; and aggressive environments cause different types of corrosion. This paper is aimed to design a shaft of gearbox and piping system of steel used in a food company and analyze the causes of their recurrent failures through destructive and non-destructive tests to obtain a solution to the problem.

The piping system is already exposed to a fluid acid with a pH of 3 and shaft works in an atmosphere of 0° C under the effects of cyclic loading, increase due to stress concentrators, as hypothesis continuous systems failures are due to improper design of elements and materials selection process.

The failure analysis was made following methodology established in the ASM and ASTM standards of destructive and non-destructive tests applied to the analysis of failure by fatigue and corrosion, followed using manuals that summarized the experience of designers in similar applications for the selection of materials, and finally the standards ASME B106.1 and ASME B31.3 for shaft and pipe sizing respectively.

The evaluation of the material allowed to verify the cause of failure for the piping system was pitting and the material used was not appropriate for the application. In case of the reduction gear shaft although the material was correct it did not have a suitable geometry since stress concentrators were generated in the section changes. Thus, we proceeded to select the materials and dimensions that satisfied the service requirements, being the need to main pipe material is resistant to corrosion in aggressive media and design of shaft extend the useful life of the system. The materials selected for the elements are available in the domestic market such as AISI 1045 AISI 1045 for the reduction gear shaft and AISI 316 for piping systems. To ensure that the selected materials are appropriate, they must comply with ASTM 269 and DIN manufacturing standards. The dimensions of tubing DN2-10S selected for the piping

system consider the resistance to internal pressure, loss of power and the effects of corrosion with a radial deformation of 0.915×10^{-3} mm, a flow laminar with parabolic profile by speed of 0,2 m/s and a maximum of 0.1 mm/year pipe thickness loss. The dimensions selected for gearbox shaft followed restrictions on length reduction box and radius of curvature of 4 mm and 2 mm in section changes, they diminish the efforts generated by concentrators being 137 MPa.

The validations of designs were developed through the ANSYS software for analysis of efforts on the axis and deformation in the piping system; and FLUENT, to the analysis of the length of the fluid inside the pipe entrance. Values in accordance with the results presented were obtained from simulations and found designs were correct and will withstand the environments to which they will be exposed.

Keywords: analysis of failure, pitting, fatigue.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
ABSTRACT	III
ÍNDICE GENERAL	V
ABREVIATURAS.....	VIII
SIMBOLOGÍA.....	IX
ÍNDICE DE FIGURAS	XII
ÍNDICE DE TABLAS.....	XVI
ÍNDICE DE PLANOS	XVIII
CAPÍTULO 1	1
1. Introducción	1
1.1 Descripción del Problema.....	2
1.2 Objetivos	8
1.2.1 Objetivo General	8
1.2.2 Objetivos Específicos.....	9
1.3 Marco Teórico.....	9
1.3.1 Análisis de Falla	9
1.3.2 Corrosión	10
1.3.3 Reductores de Velocidad	11
1.3.4 Ejes de Transmisión de Potencia	12
1.3.5 Transporte de Fluidos	13
1.4 Descripción de Alternativas de Solución	14
1.4.1 Matriz de Solución.....	23
CAPÍTULO 2	27
2. Metodología del Diseño	27

2.1	Metodología para Diseño de Sistema de Transporte de Fluidos	27
2.1.1	Bases y Consideraciones.....	29
2.1.2	Diseño Conceptual del Sistema de Transporte de Fluido.....	30
2.1.3	Análisis de Falla del Material.....	32
2.1.4	Diseño del Sistema de Tubería	44
2.1.5	Modelado y Simulación	67
2.2	Metodología de Diseño para Eje de Caja Reductora	72
2.2.1	Bases y Consideraciones.....	74
2.2.2	Diseño Conceptual del Sistema de Transmisión de Potencia.....	75
2.2.3	Análisis de Falla de Eje de Caja Reductora.....	76
2.2.4	Diseño de Eje.....	85
2.2.5	Modelado y Simulación	95
CAPÍTULO 3		99
3.	Análisis de Resultados.....	99
3.1	Sistema de Tuberías	99
3.1.1	Análisis de Falla del Material.....	99
3.1.2	Análisis de Diseño del Sistema de Tuberías	106
3.1.3	Análisis de Simulación	113
3.2	Eje de Transmisión de Potencia	114
3.2.1	Análisis de Falla de Eje.....	114
3.2.2	Análisis de Diseño del Eje.....	124
3.2.3	Análisis de Simulación	126
3.3	Análisis de Costo.....	127
CAPÍTULO 4		132
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	132
4.1	Conclusiones.....	132

4.2	Recomendaciones.....	133
	BIBLIOGRAFÍA	135
	APÉNDICES	
	PLANOS ILUSTRATIVOS	

ABREVIATURAS

BSSA	Asociación Británica de Acero Inoxidable
NACE	Asociación de Ingenieros de Corrosión
DN	Diámetro Nominal
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
UNC	Estándar Unificado del Hilo de Rosca
ANSI	Instituto Americano de Estándares Nacionales
DIN	Instituto Alemán de Normalización
AISI	Instituto Americano de Hierros y Aceros
PREN	Número Equivalente de Resistencia a la Picadura
ISO	Organización Internacional para Estandarización
BSSP	Rosca Estándar británica
AWS	Sociedad Americana de Soldadura
ASME	Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos
ASM	Sociedad Americana para Metales
ASTM	Sociedad Americana para Pruebas y Materiales
UNE	Una Norma Española
DNV	Veritas de Noruega

SIMBOLOGÍA

Z2	Altura de descarga del fluido
Z1	Altura de succión del fluido
At	Área circular interna de tubería formada por el diámetro interno
Ap	Área de picadura en sección interna de tubería
Av	Área de tensión de varilla
A	Área transversal
atm	Atmósferas
S	Azufre
hf	Cabezal de pérdida de la tubería
hm	Cabezal de pérdida provocada por accesorios
hvp	Cabezal de presión de vapor
hsp	Cabezal de presión estática
NSPH	Cabezal neto positivo
Hbomba	Cabezal requerido
C	Carbono
W	Carga que soporta el eje
Q	Caudal del fluido
cm	Centímetros
C _{carga}	Coefficiente de carga
C _{conf}	Coefficiente de confiabilidad
C _{sup}	Coefficiente de superficie
C _{tamaño}	Coefficiente de tamaño
C _{temp}	Coefficiente de temperatura
Fa	Componente axial
R	Componente de reacción en rodamiento
Fr	Componente radial
Ft	Componente tangencial
Cr	Cromo
p	Densidad del fluido
Dd	Diámetro del engranaje
De	Diámetro del engranaje helicoidal
dp	Diámetro externo de la rosca
D	Diámetro externo de la tubería
dr	Diámetro interno de la rosca
HRB	Dureza Rockwell b
HRC	Dureza Rockwell c
Ej	Eficiencia por temperatura
τ	Esfuerzo cortante
Sy	Esfuerzo de fluencia del material

σ'	Esfuerzo de Von Mises
S	Esfuerzo máximo admisible en el material
σ	Esfuerzo normal.
tm	Espesor inicial
ti	Espesor mínimo corregido
F	Factor de flexibilidad
f	Factor de fricción de tubería AISI 316
K	Factor de fricción por accesorio
n	Factor de seguridad
nf	Factor de seguridad a la fatiga
m'	Flujo másico de fluido en la tubería
F1	Fuerza transmitida a la rueda dentada
°C	Grados Celsius
h	Hora
Kg	Kilogramo
Kg/ms	Kilogramos por metros-segundos
KPa	Kilopascal
Se	Límite de resistencia a la fatiga corregido
L	Longitud de sistema de tuberías
U	Longitud recta de unión entre cara de tubería
Ao	Margen de roscado
MPa	Mega pascales
m	Metros
m ³ /s	Metros cúbicos por segundo
m/s	Metros por segundo
um	Micrómetros
mm	Milímetros
mm/año	Milímetros por año
M	Momento
J	Momento polar
Ya	Movimientos admisibles
Ni	Níquel
Re	Número de Reynolds
Gt	Peso de la tubería en kilogramo
Wt	Peso de tubería en newton
Wf	Peso del fluido
%Cr	Porcentaje de cromo
%Mo	Porcentaje de molibdeno
%Ni	Porcentaje de nitrógeno
Pot	Potencia nominal del motor
pH	Potencial de hidrógeno
P2	Presión con la que llega el fluido

P1	Presión de salida del fluido
Pv	Presión de vaporización
P	Presión interna en tubería
ep	Profundidad de picadura
Ra	Promedio aritmético del perfil de rugosidad
E	Radio de curvatura de codo
Rp	Radio de picadura
PREN	Resistencia a la picadura
rpm	Revoluciones por minuto
c	Sobreespesor de corrosión
T	Temperatura
ty	Tiempo de actuación de picadura
Y	Tolerancia de junta
To	Torque
N	Velocidad angular del motor
Vpc	Velocidad de crecimiento de picadura
V	Velocidad del fluido
v	Viscosidad cinemática del fluido transportado

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Tubería con Picadura de Mayor Tamaño	3
Figura 1.2 Causas y Efectos de la Corrosión en Tuberías del Sistema de Transporte de Fluido.....	4
Figura 1.3 Vista Frontal de la Fractura del Eje de la Caja Reductora.....	6
Figura 1.4 Causas y Efectos de Fractura del Eje de Caja Reductora en Sistema de Transmisión de Potencia	7
Figura 1.5 División de Análisis No Destructivos	10
Figura 1.6 Clasificación del Crecimiento de la Picadura	11
Figura 1.7 Diagrama de Sistema Motor Reductor	12
Figura 1.8 Rediseño de Sistema de Tuberías.....	15
Figura 1.9 Protección Catódica en Tramos de Sistema de Tuberías.	16
Figura 1.10 Comportamiento de Metales.....	17
Figura 1.11 Mecanismo de Actuación de los Ánodos de Sacrificio	17
Figura 1.12 Recubrimiento Interno de Sistema de Tuberías	18
Figura 1.13 Rediseño del Eje.....	20
Figura 1.14 Sustitución por Sistema de Bandas y Poleas.....	21
Figura 1.15 Sustitución por Modelo Alternativo de Reductor de Velocidad.	22
Figura 2.1 Diagrama de Metodología para Diseño de Sistema de Transporte de Fluido	27
Figura 2.2 Vista Superior de Sistema de Tuberías.....	31
Figura 2.3 Vista Lateral de Sistema de Tuberías	31
Figura 2.4 Crecimiento de Picadura	33
Figura 2.5 Tipos de Acabado Superficial	34
Figura 2.6 Gráficos para Clasificación Estándar para Picaduras	36
Figura 2.7 Esquema de la Sección Transversal de Picadura.....	36
Figura 2.8 Resultado para Caracterización de Picadura.....	37
Figura 2.9 Resultado de Ensayo Metalográfico de la Tubería con Picadura, Picral - 100X.....	41
Figura 2.10 Precipitaciones de Cromo en Aceros Inoxidables	42

Figura 2.11 Vista Aumentada del Borde de Picadura, Vilella – 200X.....	43
Figura 2.12 Procedimiento de Selección de Aceros.....	44
Figura 2.13 Boling Point Curve	45
Figura 2.14 Resistencia de Tuberías sin Costura Respecto a su Espesor.....	46
Figura 2.15 Influencia de Parámetros del Fluido Sobre la Corrosión	47
Figura 2.16 Perfil de Velocidad del Fluido Requerido	48
Figura 2.17 Codo de 90°	51
Figura 2.18 Representación Gráfica de Válvula de Bola.....	53
Figura 2.19 Trabajo de una Válvula de Bola	54
Figura 2.20 Representación Gráfica de Válvula de Retención	54
Figura 2.21 Esquema del Sistema de Tubería.....	57
Figura 2.22 Curva de Rendimiento de Bomba.	59
Figura 2.23 Soporte Tipo Horquilla	62
Figura 2.24 Esparrago y sus Dimensiones	65
Figura 2.25 Tuerca Autobloqueante DIN 975.....	66
Figura 2.26 Esquema de Unión Roscada BSPP	66
Figura 2.27 Tubería DN2.....	68
Figura 2.28 Mallado de Fluido	68
Figura 2.29 Resultados de Simulación	69
Figura 2.30 Mallado de Tubería.....	70
Figura 2.31 Deformación de la Tubería	71
Figura 2.32 Diagrama de Metodología de Diseño para Eje de Caja Reductora.	72
Figura 2.33 Diseño Conceptual para Sistema de Transmisión de Potencia	75
Figura 2.34 Vista del Eje de Caja Reductora	76
Figura 2.35 Esquema de Falla por Torsión	77
Figura 2.36 Vista Frontal de la Fractura del Eje	77
Figura 2.37 Falla por Fatiga de un Eje Sometido a Torsión	78
Figura 2.38 Ensayo de Partículas Magnéticas en el Eje Antes de Fallar.	79
Figura 2.39 Ensayo de Partículas Magnéticas en la Sección Transversal de la Falla del Eje.....	80
Figura 2.40 Metalografía de Acero AISI 1045, Nital – 500X.....	82
Figura 2.41 Metalografía del Eje de Caja Reductora, Nital – 500X	83

Figura 2.42 Diagrama de Cuerpo Libre de Eje de Transmisión de Potencia	86
Figura 2.43 Diagrama de Cuerpo Libre en los Planos xy y xz.....	89
Figura 2.44 Diagramas de Fuerza Cortante, Momento Flector y Carga Axial	90
Figura 2.45 Esquema del Sistema	95
Figura 2.46 Acercamiento del Mallado en los Cambios de Sección	96
Figura 2.47 Cargas en el Eje	97
Figura 2.48 Simulación Static Structural, $\sigma_{\max} = 141,36$ MPa	98
Figura 2.49 Simulación Stactic Structural, $N_{\min}=3,77$	98
Figura 3.1 Análisis Probabilístico de Picadura Según su Profundidad.	100
Figura 3.2 Pérdida de Espesor vs PH.....	101
Figura 3.3 Valores de PREN de la BSSA para Aceros Inoxidables.....	103
Figura 3.4 Microestructura Regular de un Acero Inoxidable AISI 316, Picral – 500X	104
Figura 3.5 Dureza Debido a Elementos Aleantes	106
Figura 3.6 Rugosidad Respecto a Dimensiones de Codos	109
Figura 3.7 Perfil de velocidad en tubería	114
Figura 3.8 Fractura de eje	115
Figura 3.9 Efecto del Radio de Filete en los Concentradores de esfuerzos para los Cambios de Sección.....	115
Figura 3.10 Área transversal de la fractura comparada con una fractura por fatiga	116
Figura 3.11 Marcas de fatiga producidas en un eje	117
Figura 3.12 Vista frontal de falla	118
Figura 3.13 Comparación de Eje Nuevo y Eje Sin Fisuras.....	119
Figura 3.14 Acero AISI 1045 Sin Deformar, Nital – 200X	123
Figura 3.15 Acero AISI 1045 Trabajado en Frío, Nital – 200X	124
Figura 3.16 Cambios Realizados en el Eje	125
Figura 3.17 Cambio de Sección del Eje.....	126
Figura 4.1 Tubería Horizontal con Picadura Tramo 1	144
Figura 4.2 Tubería Horizontal con Picadura Tramo 2	144
Figura 4.3 Tubería Horizontal con Picadura Tramo 3	144
Figura 4.4 Tamaño de Grano Austenítico	146
Figura 4.5 Crecimiento de Grano según Tiempo y Temperatura	148

Figura 4.6 Diagrama Hierro – Carbono	150
Figura 4.7 Propiedades de los Aceros Inoxidables según sus Elementos Aleantes	153
Figura 4.8 Medidas Estándar de Tuberías AISI 316	156
Figura 4.9 Medidas Estándar para Codos AISI 316 de Radio Largo	157
Figura 4.10 Medidas Estándar para Roscas BSPP	158
Figura 4.11 Variación de la Ductilidad y Resistencia Última en Función de la Temperatura de Operación.....	160
Figura 4.12 Variación de las Propiedades Mecánicas en Función del Trabajo en Frío	160
Figura 4.13 Valores de Resistencia a la Fluencia y Porcentaje de Elongación de Aceros con Medio Contenido de Carbono	161
Figura 4.14 Modo de Falla Relacionado con la Propiedad Mecánica del elemento	162
Figura 4.15 Despiece Interno de Caja reductora	164
Figura 4.16 Componentes Externos de Caja Reductora	165
Figura 4.17 Parámetros de Operación de Sistema de Reductor de Velocidad.....	166
Figura 4.18 Placas Desechables de Corte.....	168
Figura 4.19 Parámetros de Trabajo para Placas de Corte	168
Figura 4.20 Dimensiones de Placas y Portaherramientas Cuadrado	169

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Cuadro de Ventajas y Desventajas para Sistema de Transporte de Fluidos	19
Tabla 1.2 Cuadro de Ventajas y Desventajas para Sistema Transmisión de Potencia.	23
Tabla 1.3 Calificación de la Matriz	24
Tabla 1.4 Matriz de Decisión para Sistema de Transporte de Fluidos	24
Tabla 1.5 Matriz de Decisión para Sistema de Transmisión de Potencia	25
Tabla 2.1 Simbología para Sistema de Tuberías	32
Tabla 2.2 Resultados de Inspección Visual	34
Tabla 2.3 Profundidad y Tiempo de Actuación de Picadura.....	38
Tabla 2.4 Porcentaje de Elementos del Acero AISI 316	39
Tabla 2.5 Porcentaje de Elementos de la Tubería con Picadura	39
Tabla 2.6 Resultados para Resistencia a la Picadura	40
Tabla 2.7 Resultados de Ensayo de Dureza	43
Tabla 2.8 Aplicación de los Aceros Inoxidables en la Industria	44
Tabla 2.9 Tabla de Colores de Boling Point Curve	46
Tabla 2.10 Resultados para Velocidad y Reynolds	49
Tabla 2.11 Variables para Espesor de Tubería.....	49
Tabla 2.12 Resultados de Espesor de Tubería.....	50
Tabla 2.13 Resultado de Dimensiones de Radio de Curvatura para Codos de 90 ° .	52
Tabla 2.14 Tabla de Válvulas Seleccionadas para el Sistema de Tuberías	53
Tabla 2.15 Resultados de Perdida por Longitud de Tubería	55
Tabla 2.16 Resultados para Cabezal Neto Positivo Disponible	58
Tabla 2.17 Factores Utilizados en Tuberías de 2 pulgadas	60
Tabla 2.18 Criterios de Flexibilidad.....	60
Tabla 2.19 Soportes para Sistemas de Tubería	61
Tabla 2.20 Dimensiones de Soporte Tipo Horquilla	62
Tabla 2.21 Resultados de Diseño de Espárrago.....	65
Tabla 2.22 Elementos de Sistema de Tubería	67
Tabla 2.23 Composición Química del Eje de caja reductora	80

Tabla 2.24 Composición Química de Aceros de Medio Contenido de Carbono	81
Tabla 2.25 Datos Conocidos del Sistema	87
Tabla 2.26 Fuerzas Producidas por Elementos de Transmisión	88
Tabla 2.27 Fuerzas Producidos por Rodamientos y Momento Producido por el Engranaje Helicoidal.....	89
Tabla 2.28 Cargas Máximas del Eje, Producidas en la Sección C.....	90
Tabla 2.29 Esfuerzos Producidos en la Sección C	92
Tabla 2.30 Esfuerzos Medios y Alternativos Corregidos por el Concentrador de Esfuerzos	93
Tabla 2.31 Factores de Seguridad para Diferentes Materiales de Acero Usados para Transmisión de Potencia	95
Tabla 3.1 Valores Resultado de Caracterización de Picaduras Corrosivas.....	100
Tabla 3.2 Resumen de Resultados de Análisis Químico.....	102
Tabla 3.3 Características de Materiales de Tubería y AISI 316	104
Tabla 3.4 Dimensiones para Tubería.....	107
Tabla 3.5 Parámetros Máximos de Exposición para Tuberías DN2-10S.....	108
Tabla 3.6 Parámetros de Exposición para Sistema de Tubería	108
Tabla 3.7 Aplicación de Válvulas según Diseñadores.....	110
Tabla 3.8 Resultados del Análisis Químico del Eje de Transmisión de Potencia	120
Tabla 3.9 Incremento y Reducción de Propiedades Mecánicas en Comparación de Porcentaje de Elementos Aleantes	122
Tabla 3.10 Resistencia a la Fluencia, Resistencia Última y Porcentaje de Elongación	125
Tabla 3.11 Esfuerzos Medios y Alternativos para el Cálculo de Fatiga	126
Tabla 3.12 Tabla de Costos para Sistema de Tuberías	127
Tabla 3.13 Costos Asumidos por Reinstalación del Sistema de Tuberías	128
Tabla 3.14 Costos para Implementación de Rediseño del Eje	130
Tabla 3.15 Costos Generados por la Implementación de los Nuevos Sistemas	131
Tabla 4.1 Pérdidas Mensuales del Sistema de Tuberías Actual	142
Tabla 4.2 Costo de Producción de Eje Original	142
Tabla 4.3 Tamaño de Grano Austenítico	146
Tabla 4.4 Factores que Afectan el Tamaño de Grano	148

ÍNDICE DE PLANOS

PLANO 1 Eje de Caja Reductora

PLANO 2 Sistema de Tuberías

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

Dentro de la industria, regularmente se presentan problema con los equipos de producción debido a fallas de piezas que los componen. Cuando se originan estos desperfectos, la identificación de las condiciones de trabajo y la caracterización de los materiales de las piezas afectadas son los pilares fundamentales en el proceso de análisis de falla y rediseño de los mismo. En este documento se busca encontrar la causa de falla en un sistema de tuberías y eje de caja reductora usados en una empresa alimenticia, seleccionar los materiales adecuados y rediseñarlos.

El capítulo 1 describe las fallas en los sistemas que componen los procesos de producción en una empresa alimenticia, causas y efectos de los mismos, se mencionan los objetivos generales y específicos y adicionalmente se presenta el marco teórico con información referente al proyecto. Se muestra también el análisis de alternativas sugeridas para cada caso y se detalla el proceso de selección de la solución más viable a través de la matriz de decisión que considera como criterios de selección los costos, manufactura, tiempo de implementación y flexibilidad.

El capítulo 2 muestra la metodología de diseño de la solución seleccionada para el sistema de tuberías, las bases y consideraciones generales; se presentan los ensayos utilizados para el análisis de los materiales, que abarcan ensayos no destructivos y destructivo entre los que cuentan análisis químico, ensayo metalográfico y prueba de dureza. Posteriormente se exponen los cálculos detallados para el diseño de tuberías, análisis del fluido, diseño de uniones y soportes, además de las simulaciones que se creyeron necesarias para sustentar los cálculos como longitud de entrada del fluido y deformación de la tubería debido a la presión interna. En la segunda parte se describe la metodología de diseño para la solución del eje de caja reductora, de igual forma se muestran las bases y consideración adicionales de diseño. En este caso los ensayos no destructivos son de inspección visual y partículas magnéticas, de manera seguida se realizan los ensayos destructivos previamente referidos. Finalmente se expone el diseño

detallado del eje, donde se enfatiza sobre la selección del material, sus dimensiones y las simulaciones pertinentes.

El capítulo 3 evidencia el análisis de resultados para el sistema de tuberías, en este se comparan valores obtenidos a través de ecuaciones con resultados experimentales referidos en la literatura especializada y se ratifica los elementos que requirieron de selección con manuales que recopilan información técnica de expertos diseñadores. La segunda parte detalla el análisis de los resultados obtenidos para el rediseño de eje de caja reductora, aquí se comparan los resultados obtenidos de normas y manuales para obtener información del seguimiento y las características de la falla. Finalmente se presenta un análisis de los costos de la implementación de ambos sistemas en la empresa.

El capítulo 4 expone las conclusiones generales del proyecto evaluado y las recomendaciones identificadas para futuros trabajos.

1.1 Descripción del Problema.

Los aceros tienen numerosas aplicaciones en la industria debido a sus excelentes propiedades mecánicas, además de la facilidad de obtención y precio competitivo. Sin embargo, debido a las cargas y ambientes agresivos a los que son sometidos, las piezas fabricadas con este material requieren de mantenimiento o sustitución recurrentemente (ASM, 2002).

Se analizarán dos fallas reportadas por una empresa alimenticia, ambas en elementos de acero que componen los equipos para procesos de transporte de líquidos y transmisión de potencia.

El proceso de transporte de fluidos conformado por una bomba neumática de diafragma y un sistema de tuberías de acero inoxidable AISI 316 en serie fue instalado dentro de la planta de producción en el año 2012 para enviar un fluido de 0.045 Kg/ms y pH 2.9 a 40 metros de altura. A finales del año 2015

se encontraron agujeros pasantes con características de picaduras corrosivas a lo largo de los tramos horizontales de tubería, ver figura 1.1



Figura 1.1 Tubería con Picadura de Mayor Tamaño

Fuente: Propia

Las causas principales que pudieron originar el problema estarían asociadas a un ambiente corrosivo severo bajo los cuales operaría el sistema de tubería y al uso de un material no adecuado para operar en esos ambientes. Los aceros inoxidable si bien es cierto son conocidos por ser resistentes a la corrosión en la mayoría de ambientes, pero también presentan debilidades bajo determinados factores (BSSA, 2016). Fontana y Greene, (1978), citan 6 mecanismos de corrosión para este material: corrosión general, por picadura, grietas de corrosión, corrosión por esfuerzos, intergranular y galvánica; siendo las causas principales de estos problemas, defectos en: composición química del material, fabricación, acabado superficial, sustancias químicas a los cuales son expuestos, temperatura, soldadura y esfuerzos aplicados.

Para la identificación de problemas relacionas con corrosión la Sociedad Americana para Ensayos y Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés) propone una serie de ensayos destructivos y no destructivos que permiten realizar con bases suficiente el análisis de fallas por corrosión en elementos de acero inoxidable.

Un análisis de causa y efectos se presenta en la figura 1.2, donde se muestran las causas del problema relacionado con corrosión en el sistema de tuberías.

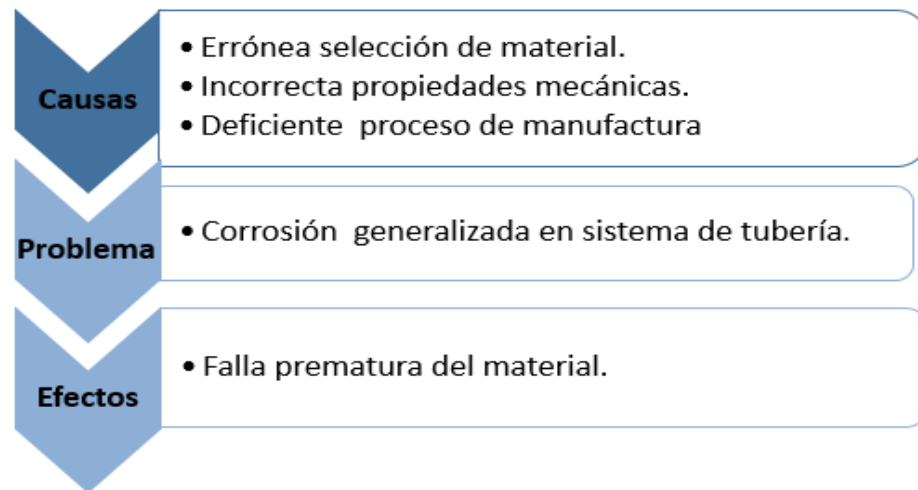


Figura 1.2 Causas y Efectos de la Corrosión en Tuberías del Sistema de Transporte de Fluido.

Fuente: Propia

La selección del material es uno de los pasos de mayor relevancia en el proceso de diseño de sistemas de tuberías, donde se realiza el estudio de sus condiciones de trabajo y principalmente del fluido transportado. Los fluidos con pH menor a 3 provocan la destrucción acelerada de la capa pasiva en el acero inoxidable (ASM, 2002) exponiendo al material a posibles procesos de Corrosion que se puede manifestar en forma de picaduras conduciendo a un deterioro prematuro de las tuberías. Por lo antes expuesto se puede inferir que para el caso de estudio el material seleccionado no fue el más apropiado para resistir el ambiente corrosivo expuesto (Henriquez Miranda & Aguirre Lopez, 2011). A continuación, se presenta de manera detallada la combinación de factores de influencia en el diseño de sistemas de tuberías y la forma en la que afectan a los materiales:

- Ambiente corrosivo – El entorno de trabajo y exposición a productos químicos inadecuados afecta significativamente el tiempo de vida útil del material (Henriquez Miranda & Aguirre Lopez, 2011).

- Temperatura de operación - Las altas temperaturas por lo general aceleran la velocidad de corrosión de las tuberías en los procesos de transporte de fluidos (Henriquez Miranda & Aguirre Lopez, 2011).
- Soldadura - Los aceros austeníticos son generalmente más soldable que los ferríticos o martensíticos. Los defectos de soldaduras generan en los materiales zonas con cambios de propiedades propensas a falla (Henriquez Miranda & Aguirre Lopez, 2011).
- Forma - No todos los grados de acero están disponibles en todas las formas y tamaños. (Henriquez Miranda & Aguirre Lopez, 2011).
- Tiempo de vida útil - Esta es una consideración importante a menudo en el proceso de selección. Debido a que la vida útil del diseño a veces se especifica, pero es muy difícil de garantizar (Henriquez Miranda & Aguirre Lopez, 2011).

Se sabe que los aceros inoxidable son aleaciones de hierro con un mínimo de 10,5% de cromo, donde se añaden otros elementos de aleación como: níquel, molibdeno, titanio y cobre para mejorar su estructura y propiedades tales como: conformabilidad, propiedades mecánicas, crecimiento del grano, tipos de agrietamientos, mecanismo de formación de carburos, tenacidad, etc. La incorrecta composición química afecta específicamente la resistencia a la corrosión por picaduras en aceros inoxidable, reflejada cuantitativamente por el Número de Resistencia por Picaduras. (PREN, por sus siglas en inglés). Por lo cual, la aparición de picaduras producto de fenómenos corrosivos hace necesario un estudio más profundo de las propiedades químicas del material de la tubería (NACE, 2003).

El aspecto externo de la tubería reflejado a través de su color y textura muestra inconformidades comparada con las cualidades de los aceros inoxidable. Este tipo de irregularidades normalmente se generan en el proceso de fabricación de las misma, el primer defecto de manufactura se origina durante el proceso de laminación, en el cual las tuberías son reducidas radialmente en su espesor con la aplicación de cargas ejercidas por rodillos,

permitiendo así el paso de un cilindro peregrino que forma la sección interna de la tubería. En este procedimiento el control de la temperatura es riguroso y se conoce que las fallas resultantes en esta causan variaciones en la microestructura y propiedades mecánicas del material; el segundo defecto se genera durante el acabado de las superficies de las tuberías a partir de procesos de esmerilado y pulido, donde las medidas típicas de rugosidad superficial deben ser la adecuada (menor a 0.2 micrómetros) para evitar la retención de líquidos durante el proceso de trabajo. (Groover, 2007)

En el caso del proceso de transmisión de potencia, el eje de estudio forma parte del sistema motriz interno de un reductor tipo coaxial con tres trenes de engranajes. Según lo indicado por el fabricante el material del block de la caja reductora es fundición gris y el mecanismo motriz interno es de acero de medio contenido de carbono, tipo AISI 1045.

El área de mantenimiento de la empresa reportó a mediados del año 2015 tres fallas del reductor de velocidades en un periodo de 6 meses. El eje presenta características indiscutibles de falla por fatiga en elementos mecánicos, donde se pueden visualizar las marcas de playa (beach marks) y su trayectoria a lo largo del área de la sección fracturada como se muestra en la figura 1.3 (Norton, 2009).



Figura 1.3 Vista Frontal de la Fractura del Eje de la Caja Reductora.

Fuente: Propia

Esta falla actualmente produce paradas de producción por periodos largos de tiempo y perdidas adicionales por daño de los mecanismos en contacto con el eje. Para el análisis de la misma considera lo establecido por la norma española UNE, la cual especifica que los equipos que realizan este tipo de procesos cumplen correctamente con su función y vida útil cuando trabajan bajo los parámetros para los cuales fueron construidos, por esta razón se tomará en cuenta como factores de influencia aquellos introducidos durante el proceso de diseño, montaje y funcionamiento.

Una mejor apreciación de las posibles causas y efectos de la falla se puede observar en la figura 1.4.

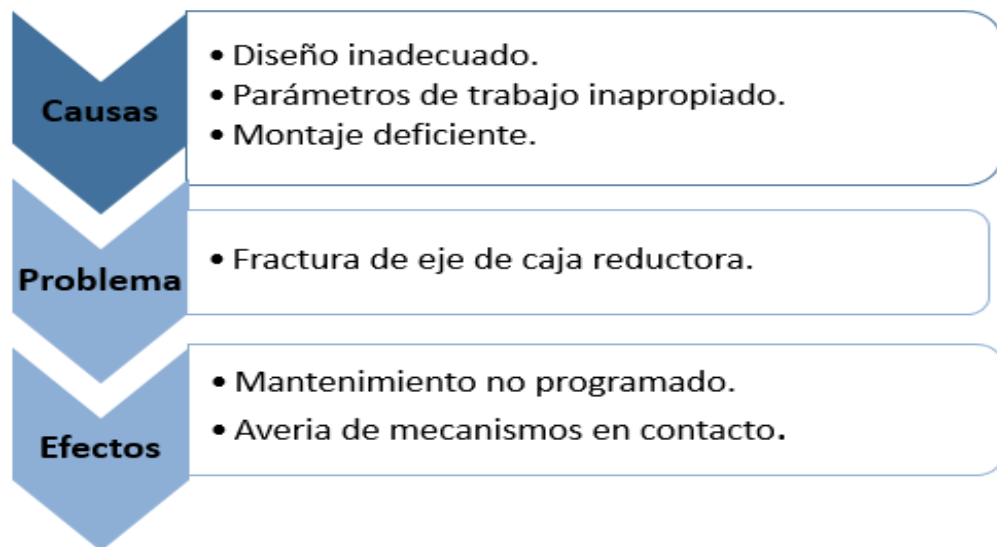


Figura 1.4 Causas y Efectos de Fractura del Eje de Caja Reductora en Sistema de Transmisión de Potencia

Fuente: Propia

El diseño inadecuado del eje comprende: análisis incorrecto de cargas, se debe sumar los esfuerzos con el teorema de Von Mises y aplicar la teoría de fatiga de Goodman; selección de material no adecuado, se debe escoger un sistema que pueda soportar las cargas aplicadas; mal dimensionamiento, al haber cambios de secciones es recomendable seguir la norma ASME B106.1

para evitar concentradores de esfuerzos; y se debe considerar las condiciones de operación como: temperatura, rugosidad, tipo de maquinado, alineamiento del eje, etc.

Los parámetros de trabajo deben ser los que están establecidos en el manual del fabricante acorde al modelo del reductor de velocidad. En el caso específico del motor-reductor embridado, este debe operar con cargas o condiciones establecidas en el manual, el mismo que hace referencia a la norma alemana DIN 50347. El no cumplir con estos parámetros ira produciendo una avería en el eje hasta que se fracture.

El mantenimiento del equipo permite que este perdure y trabaje de manera eficiente, al no cumplir con los criterios de mantenimiento establecidos en el manual (Nord, 2016) podría acortar su vida útil e incluso fracturar sus componentes.

Como conclusión, las fallas producidas en los elementos mecánicos industriales se deben a un diseño erróneo, incorrecta selección del material, problemas en fabricación, maquinado, ensamblaje y finalmente condiciones de servicio.

Este trabajo propone la identificación de los factores involucrados para un correcto análisis de falla de elementos mecánicos y tiene como objetivo final efectuar recomendaciones generales para disminuir los problemas económicos a los cuales incurre actualmente la industria por la falla prematura de los elementos.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

- Diseñar un eje de caja reductora y sistema de tubería de acero utilizado en una empresa de alimentos y analizar las fallas a través de ensayos destructivos y no destructivos.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Determinar las fallas de los elementos a través de ensayos no destructivos y destructivos.
- Rediseñar los componentes deteriorados para su posterior implementación.
- Elaborar análisis de costos para sustitución de los elementos diseñados.
- Elaborar planos ilustrativos a través de software de diseño.
- Construir los elementos diseñados por medio de procesos de mecanización.

1.3 Marco Teórico

1.3.1 Análisis de Falla

Es un proceso que consiste en la determinación de las causas físicas de problemas de un elemento. Utiliza una variedad de técnicas de observación, inspección, pruebas y ensayos. Su propósito es corregir y prevenir fallas para lograr niveles más altos de fiabilidad y calidad, para la satisfacción del cliente (ASM, 2002). Los procesos para realizar un análisis de falla se dividen en: Ensayos destructivos y no destructivos.

Ensayos Destructivos

Los ensayos destructivos como prueba de tracción, análisis químico, metalográfico, prueba de dureza y espectrometría por barrido electrónico, determinan la resistencia mecánica, tenacidad, resistencia al impacto, elasticidad, así como también el punto de fractura y torsión.

Se entiende por ensayos destructivos aquellos que alteran el estado físico del elemento con el objetivo de obtener información de las características mecánicas de los mismos. Para los ensayos destructivos suelen usarse probetas construidas con el material que se desea estudiar con forma y

dimensiones normalizadas por la ASTM, en estos ensayos las probetas sufren cambios irreversibles. (Cortes Carrión, 2011)

Ensayos No – Destructivos

Los Ensayos No Destructivos (END) son exámenes o pruebas que no alteran el estado físico del elemento en estudio, utilizados para determinar propiedades en materiales, soldaduras, partes y componentes, así como también para detectar discontinuidades internas o superficiales. La figura 1.5 muestra un esquema de la clasificación de los END y las pruebas normalizadas por la ASTM que se realizan en cada una.

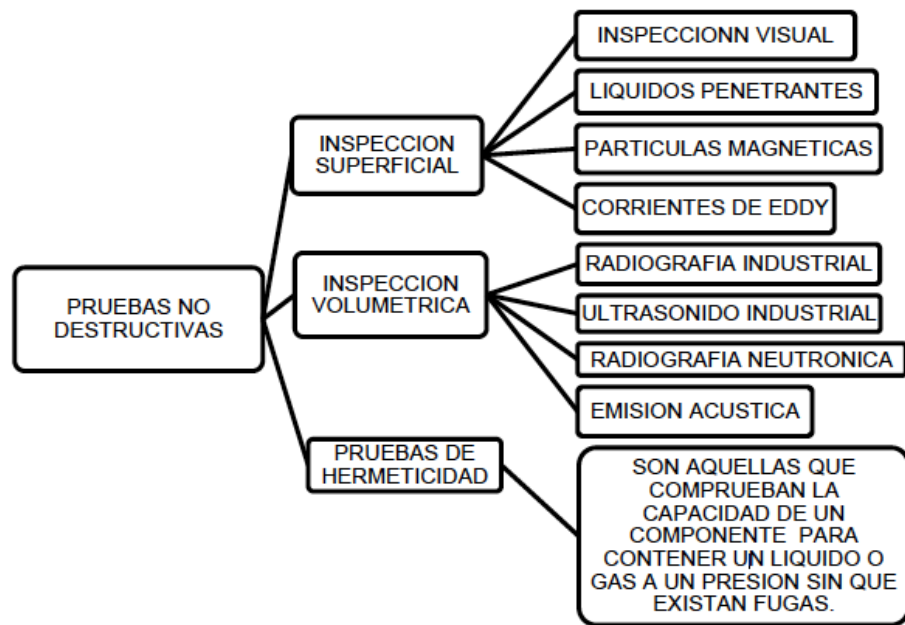


Figura 1.5 División de Análisis No Destructivos

Fuente: (Vito & Heiser, 1974)

1.3.2 Corrosión

La corrosión es el producto de una reacción química entre un material y su medio, provocando la destrucción parcial o total del metal. Esta regresa el metal a su estado mineral original o a uno similar, por lo que también se conoce a la corrosión como extracción metalúrgica en reversa (Jones, 1996).

Este concepto es de gran relevancia en este estudio y será utilizado para el análisis de falla en el sistema de transporte de fluidos.

Corrosión por Picadura

El ataque localizado de una superficie en forma de agujeros de profundidad creciente como las mostradas en la figura 1.6, es también conocido como corrosión por picaduras. Los agujeros pueden ser superficiales externos o internos. El acero inoxidable depende de una película pasiva para la resistencia a la corrosión y son especialmente susceptibles a la corrosión por picadura (Wika, 2012).

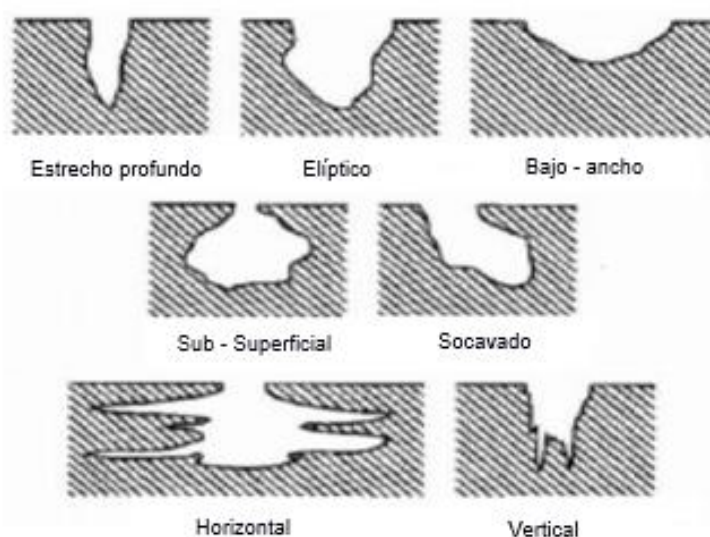


Figura 1.6 Clasificación del Crecimiento de la Picadura

Fuente: (Jones, 1996)

1.3.3 Reductores de Velocidad

Los reductores son diseñados a base de sistemas de trenes de engranajes, además de poseer ejes y cojinetes que permiten la transmisión de movimiento, estos pueden ser: sin fin y corona donde la reducción se da a partir del movimiento de un engranaje que hace rotar un husillo de acero en forma de tornillo sin-fin; de engranajes para los cuales se utiliza acoplamiento de engranajes de diferentes características; planetarios

utilizan sistemas planetarios de engranajes y pueden ser interiores o anulares (Valencia Alfaro, 2016)

Los motores son considerados el corazón de la industria, pero estos trabajan a determinada velocidad y potencia, dependiendo de la aplicación que se le quiera dar. Por ello es indispensable el uso de reductores de velocidad, que como su nombre lo dice cambia los parámetros de velocidad y potencia de un motor (Acosta Sanchez, 2010). En la mayoría de las aplicaciones el sistema consta de un motor eléctrico, un sistema de transmisión y el reductor de velocidad, como se muestra en la figura 1.7.

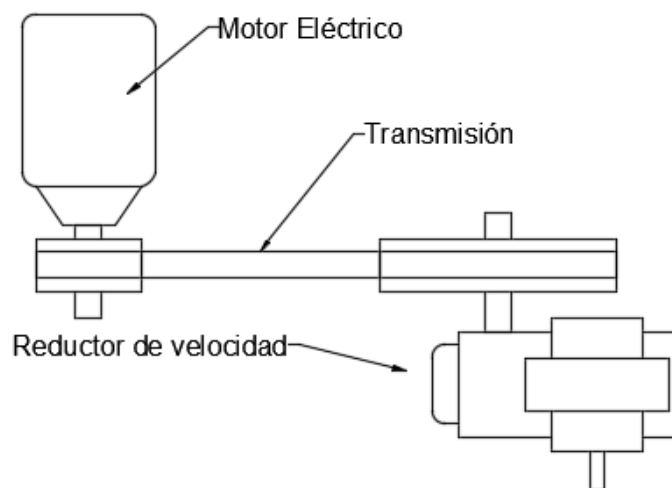


Figura 1.7 Diagrama de Sistema Motor Reductor

Elaboración: Propia

1.3.4 Ejes de Transmisión de Potencia

Es una pieza mecánica alargada, usualmente cilíndrica, usado para transmitir potencia o movimiento. Debido a que los ejes trabajan en un amplio rango de aplicaciones pueden estar sometidos a cargas de flexión, tensión, compresión o torsión, los cuales suelen actuar de forma combinada, pero usualmente solo están sometidos a la torsión debido al torque transmitido o a la flexión por una carga transversal sobre los

engranes y ruedas dentadas; así mismo estos podrían estar operando en ambientes corrosivos o con altas temperatura (Coronado Marín, Cerón, & Charry, 2006).

El material usado para la fabricación de ejes varía según la aplicación a la que opera. En la mayoría de los casos se utiliza acero, debido a su alto módulo de elasticidad, que puede ser endurecido en el caso de soportes donde la dureza es un factor importante; en otros casos se los fabrica de bronce o acero inoxidable para que trabaje en ambientes corrosivos; también pueden ser de hierro colado o acero nodular cuando posee accesorios que se fundieron integralmente al eje (Norton, 2009).

Entre las aplicaciones de los ejes de transmisión abarcan: impulsores de cadena o banda, reductores de velocidad tipo engrane, bombas, ventiladores y otros tipos de equipo de automatización. También se le puede integrar otros usos como ejes de soporte y los husillos (Mora Parrazales, 2011). En este informe se lo estudiará como un eje de una caja reductora.

1.3.5 Transporte de Fluidos

Generalmente en los procesos industriales la mayor parte de las sustancias se encuentran en forma líquida (fluidos), los mismos que para ser utilizados deben ser transportados de un sitio a otro, ya sea por gravedad o mediante la ayuda de un dispositivo mecánico (bomba), para esto es necesario conocer sus propiedades y los principios que gobiernan al flujo de fluidos (Henriquez Miranda & Aguirre Lopez, 2011).

A continuación, se presentan los conceptos de mayor relevancia en el diseño de un sistema de tuberías.

Densidad Relativa [ρ_r] – Representa cuantitativamente la diferencia entre la densidad de una sustancia con la densidad del agua.

Gravedad Específica [γ] - Es un valor adimensional y numéricamente coincide con la densidad. Está definida como el peso unitario del material dividido por el peso unitario del agua destilada a 4 °C.

Viscosidad Dinámica o Absoluta [μ] - Es la resistencia interna al flujo de un fluido, originado por el roce de las moléculas que se deslizan unas sobre otras. La viscosidad dinámica se toma del tiempo que tarda en fluir un líquido a través de un tubo capilar a una determinada temperatura.

Viscosidad Cinemática [ν] - Representa la característica propia del líquido desechando las fuerzas que genera su movimiento. (Borja Mayorga, 2012)

1.4 Descripción de Alternativas de Solución

Sistema de transporte de fluidos

Previo a la descripción de las alternativas, es necesario explicar el proceso y condiciones de trabajo para el sistema de transporte de fluidos dentro de la empresa. El sistema de transporte de fluidos es requerido para transportar un fluido de viscosidad 0.045 Kg/ms y pH 2.9 desde los tanques de almacenamiento hasta los de dotación diaria a 40 m de altura con un caudal de 2.4 m³/h. Se tiene disponible para este proceso una bomba neumática de diafragma de 700 KPa y la estructura metálica para instalación de tuberías de proceso.

En el caso del sistema de transporte de fluido se proponen las siguientes alternativas de solución:

1. Rediseño del sistema de tuberías. (ver figura 1.8)
2. Protección catódica de segmentos de tuberías. (ver figura 1.9)
3. Protección interna del sistema de tuberías. (ver figura 1.12)

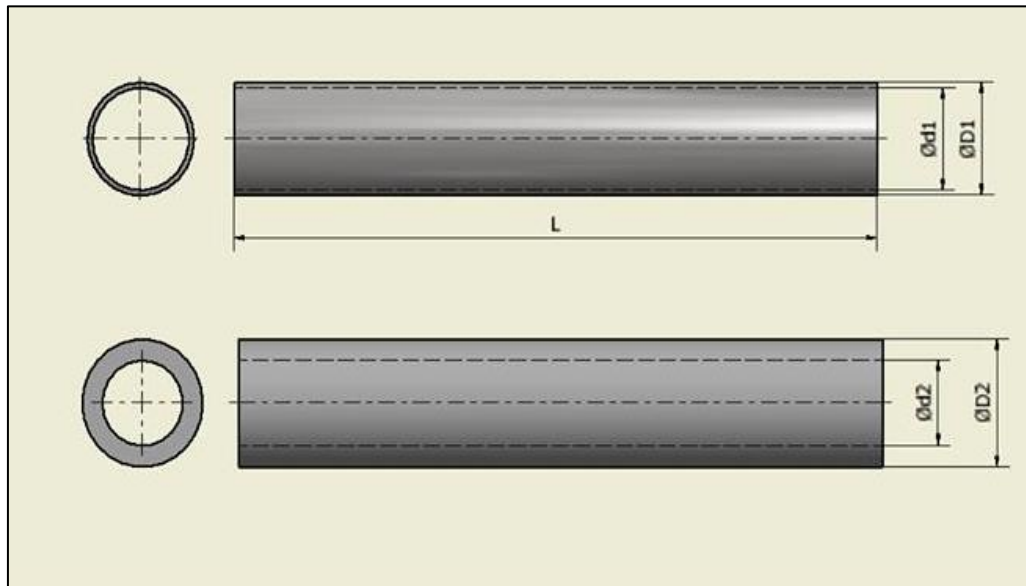


Figura 1.8 Rediseño de Sistema de Tuberías

Elaboración: Propia

Para esta opción se deberá realizar el rediseño del sistema de tubería completo.

Previo al proceso de rediseño del sistema de tuberías con el fin de obtener las características mecánicas del material y su falla, se deben realizar para esta opción los respectivos ensayos destructivos y no destructivos. Durante el proceso de selección de material y se tendrán en cuenta como la característica principal la resistencia a la corrosión por picadura del material, la cual está basada en el número característico PREN, descrito por la BSSA

Posteriormente en el proceso de diseño con guía de la norma ASME B31.3, se establecen los criterios de diseño de acuerdo al proceso de trabajo, control mecánico, eléctrico e instrumentación, incluyendo:

- A. Normas de materiales y componentes.
- B. Designaciones dimensionales para elementos de sistema de tuberías
- C. Requisitos para el diseño de componentes, incluidos soportes.

- D. Requisitos para la evaluación y limitación de tensiones, reacciones y movimientos asociados con presión, temperaturas y fuerzas externas.
- E. Requisitos para la fabricación, montaje y desmontaje.

Adicionalmente se consideran algunas restricciones como: características de salida, caudales máxicos, cabezal de presión, temperatura y propiedades químicas del fluido de transporte.

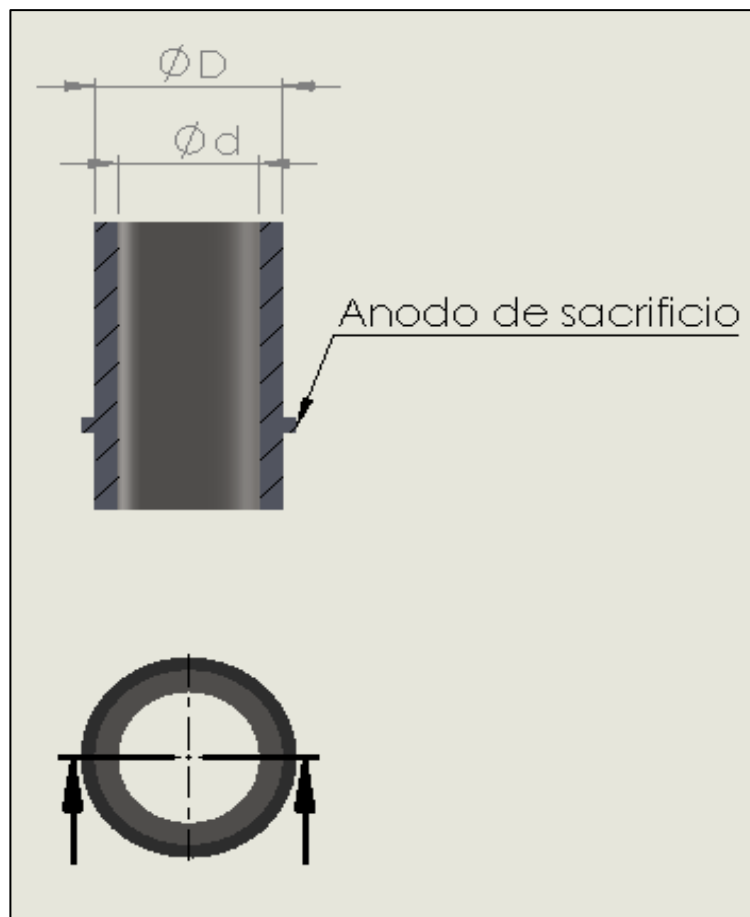


Figura 1.9 Protección Catódica en Tramos de Sistema de Tuberías.

Elaboración Propia

Una tubería de acero vista al microscopio presenta una configuración policristalina descrita en la figura 1.10. Cada uno de los granos que lo

conforman se comportan como un electrodo con una tendencia anódica o catódica.

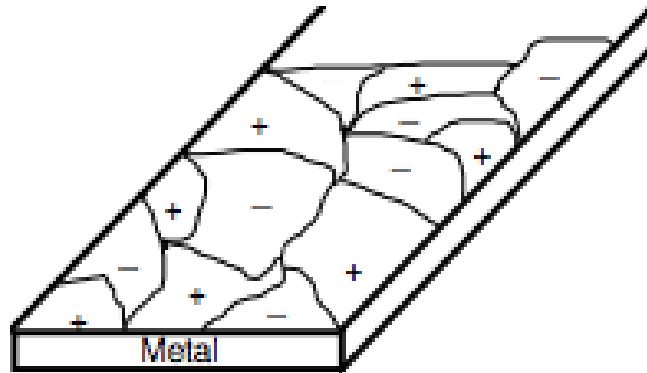


Figura 1.10 Comportamiento de Metales

Fuente: (Jones, 1996)

Los accesorios de protección catódica o ánodos de sacrificio son elementos metálicos que se unen al exterior de los tubos de conducción y su función es reducir el efecto de corrosión sobre el metal base cediendo electrones ver figura 1.11.

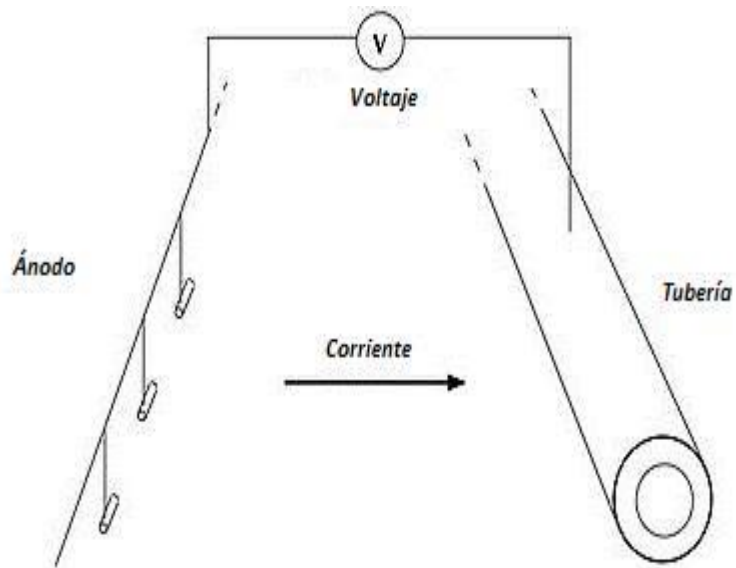


Figura 1.11 Mecanismo de Actuación de los Ánodos de Sacrificio

Fuente: (Jones, 1996)

La implementación de las misma en el sistema de tuberías requiere adicionalmente preparación de superficie a través de las normas NACE y AWS.

Para esta opción se realiza el reacondicionamiento de las secciones de tuberías corroídas y el diseño de protección catódica con ánodos de sacrificio según la Veritas de Noruega (DNV por sus siglas en noruego) en su manual “Diseño de Protección Catódica” donde se toman en cuenta la compatibilidad de los materiales, potencial corrosivo, cantidad de masa y ubicación de ánodos, tiempo de vida útil, entre otras (DNV, 2010).

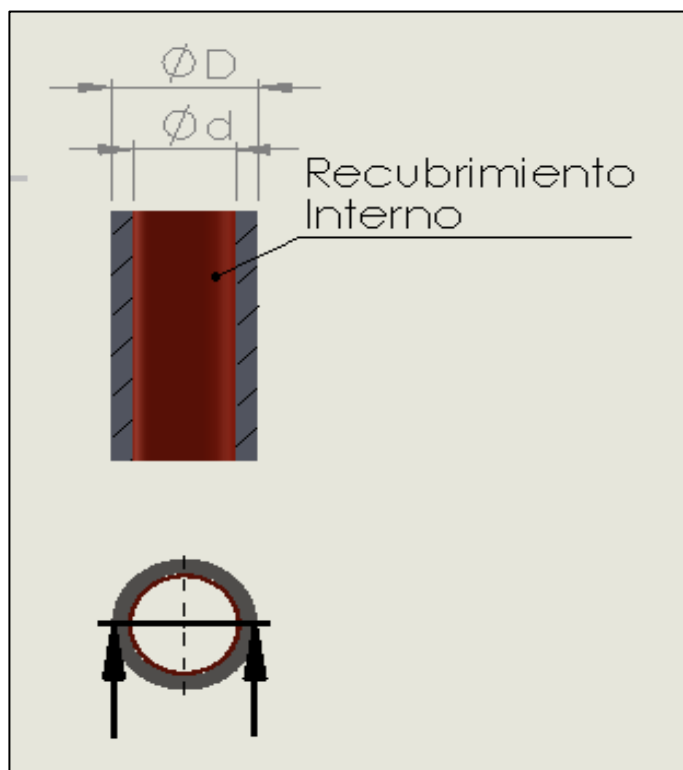


Figura 1.12 Recubrimiento Interno de Sistema de Tuberías

Elaboración Propia

Para la implementación de recubrimientos anticorrosivos se debe inicialmente realizar la evaluación del ambiente de trabajo siguiendo la norma ISO 12944 donde se consideran temperatura, ambiente de trabajo, sustancia química transportada, grado de corrosión, estado del material. La

limpieza de la superficie de anclaje se efectúa a través de procesos abrasivos y químicos teniendo como guía la norma ISO 8504 para secciones de tubería e ISO 8501 para soldaduras. Posteriormente la adhesión de película de recubrimiento debe ser realizada conforme la norma ASTM y con herramientas de evaluación de superficie calificados y aprobados bajo la norma ISO.

Para esta opción se deberá realizar el reacondicionamiento de las secciones de tubería en mal estado y el diseño del sistema de protección por recubrimiento interno.

A continuación, la tabla 1.1 presenta las ventajas y desventajas de cada opción para el sistema de transporte de fluidos.

Tabla 1.1 Cuadro de Ventajas y Desventajas para Sistema de Transporte de Fluidos

OPCIÓN	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Rediseño de sistema de tuberías	<ul style="list-style-type: none"> • Fácil manufactura • Más flexible • Menor tiempo de instalación 	<ul style="list-style-type: none"> • Costo elevado
Implementación de protección catódica	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo costo • Fácil manufactura 	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor tiempo de instalación • Menos flexible
Implementación de recubrimiento interno de sistema de tuberías	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo costo • Fácil manufactura • Menor tiempo de instalación 	<ul style="list-style-type: none"> • Menos flexible

Elaboración Propia

Sistema de reducción de velocidad

El sistema de reducción consta de tres trenes de engranajes, dos ejes y sus respectivos cojinetes. Este sistema reduce la velocidad de un motor eléctrico desde 1440 rpm a 18 rpm, con un momento de salida de 802 Nm.

El reductor de velocidad se encuentra transportando aves por medio de un sistema de cadenas, en posición vertical con el eje de salida apuntando hacia abajo.

En el caso del sistema de transmisión de potencia se proponen las siguientes alternativas de solución:

1. Rediseño de eje de caja reductora (ver figura 1.13)
2. Sustitución por sistema de bandas y poleas (ver figura 1.14)
3. Sustitución por modelo alternativo de reductor de velocidad. (ver figura 1.15)

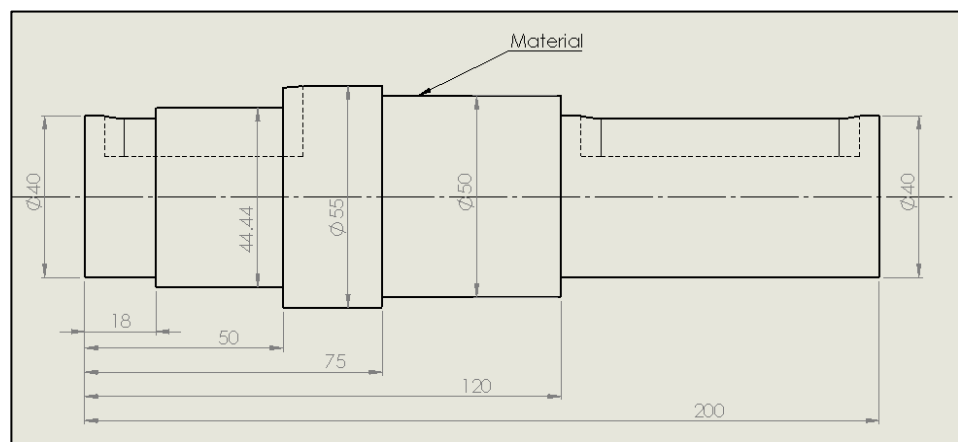


Figura 1.13 Rediseño del Eje.

Elaboración Propia

El análisis del diseño del eje conlleva realizar un estudio en tres partes: el material con el que se fabricó debe ser el mismo que esta descrito en el manual de la caja reductora (Nord, 2016) y se debe determinar si este soporta las cargas al que se está operando; los cambios de sección del eje no debe tener concentrador de tensión tomando en cuenta la condiciones del eje y del ambiente de trabajo (Norton, 2009); y el eje debe estar correctamente alineado, cumpliendo los parámetros descritos en la norma DIN 578. En la figura 1.13 se puede observar el diseño de forma del eje con sus dimensiones.

Previo al rediseño del eje se debe realizar una investigación de las condiciones de trabajo de su sistema. Recopilar información como: cargas ejercidas, características del material, tipo de acoplamiento, rodamientos usados, potencia y velocidad de trabajo.

Ya obtenido los parámetros de trabajo del eje se procede a determinar los esfuerzos y las secciones en los que son mayores. Se utiliza la fórmula de esfuerzo efectivos de Von Mises para calcular los esfuerzos principales del sistema. Además de esto se utiliza la Teoría de Goodman para escoger el material adecuado para un determinado número de ciclos y el correcto cambio de sección para evitar concentradores de esfuerzos elevados (Norton, 2009; ASME, 1985).

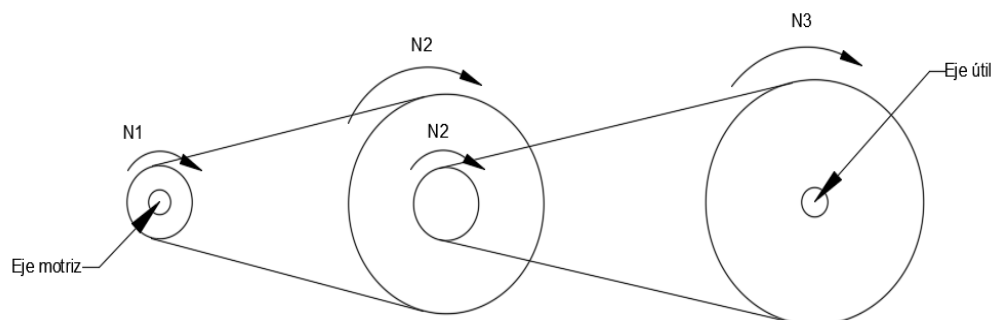


Figura 1.14 Sustitución por Sistema de Bandas y Poleas.

Elaboración propia

Este sistema consta de varias cintas colocadas por tensión en poleas con el fin de transmitir fuerzas y velocidades angulares entre arboles paralelos. La transmisión se da a partir del rozamiento que ejerce la correa sobre la polea. En el caso de nuestro proyecto se requiere un sistema de doble poleas, como el que se observa en la figura 1.14, que permite la reducción de grandes velocidades con menor espacio que usando los sistemas convencionales. Los parámetros de operación y diseño deben estar acorde del manual de operación (Martin, 2016) y de la norma OSHA 1910.219.

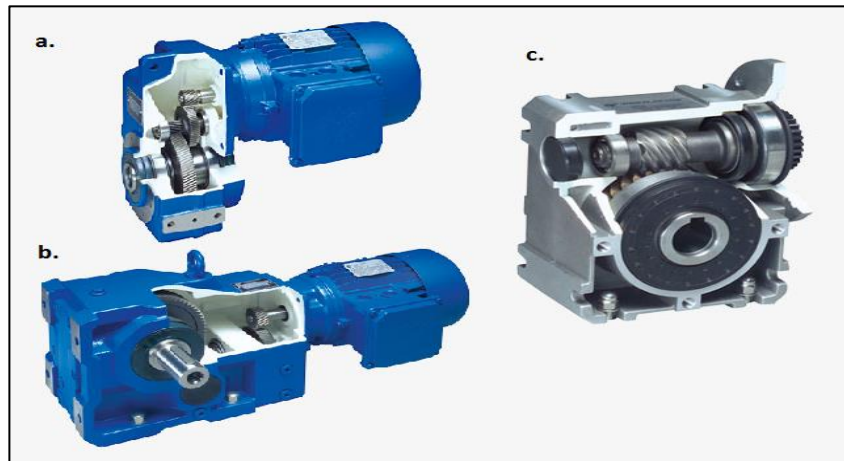


Figura 1.15 Sustitución por Modelo Alternativo de Reductor de Velocidad.

Nota: a. Motorreductor de ejes paralelos, b. Motorreductor de engranaje cónico, c. Motorreductor de sinfín.

Fuente: (Nord, 2016)

El funcionamiento del sistema debe estar acorde a los parámetros de trabajo establecidos en el manual del fabricante (Nord, 2016). Los parámetros con los que se diseñaron los motores reductores están basados en la norma UNE-EN 954-1 que establece las consideraciones que se debe tomar al diseñar una máquina. Una carga con la que no fue diseñado el eje lo va averiando hasta que este llegue al límite y se fracture. Así mismo, el mecanismo solo está diseñado para determinada aplicación, lo cual al no cumplirse puede producir oscilaciones en sus partes. También se debe considerar la temperatura con la que se opera incluso durante el transporte o el almacenamiento antes de la puesta en marcha.

La sustitución del reductor de velocidad implica escoger un sistema que trabaje con los mismos parámetros o similares. Para ello el manual Nord presenta una gran variedad de sistemas (figura 1.15), entre ellos están: motorreductores de ejes paralelo, engranaje cónico y motorreductores de sinfín.

A continuación, la tabla 1.2 presenta las ventajas y desventajas de cada opción para el sistema de transmisión de potencia.

Tabla 1.2 Cuadro de Ventajas y Desventajas para Sistema Transmisión de Potencia.

OPCIÓN	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Rediseño de sistema de tuberías	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo costo. • Fácil manufactura. • Más flexible 	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor tiempo de implementación
Sustitución por sistema de bandas y poleas	<ul style="list-style-type: none"> • Menor costo • Fácil manufactura 	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor tiempo de instalación • Menos flexible
Sustitución por modelo alternativo de reductor de velocidad	<ul style="list-style-type: none"> • Fácil manufactura 	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor tiempo de instalación • Mayor costo • Menor flexibilidad

Elaboración Propia

1.4.1 Matriz de Solución.

Para el análisis de las alternativas de solución se tomarán en cuenta 4 criterios: costo, fácil manufactura, tiempo de implementación y flexibilidad.

A continuación, se detalla las características evaluadas con cada criterio:

- Costo (15%). - Este criterio toma en cuenta el costo de fabricación y manufactura de la opción y el incurrido por la empresa para la implementación de la misma.
- Fácil manufactura (15%). - Entiéndase este criterio como la accesibilidad para los procesos de fabricación dentro de la ciudad de Guayaquil.
- Tiempo de implementación (30%). – En este criterio se evalúa el tiempo de instalación y puesta en marcha requerido, así como también la intervención de este procedimiento en los procesos de producción de la empresa.
- Flexibilidad (40%). – Este criterio considera la capacidad del sistema para futuros aumentos de producción y sus costos, el aumento de producción continuo de la empresa convierte a este criterio en el de mayor relevancia.

Dependiendo el criterio usado, a cada alternativa se le daba un valor de entre el 0 al 5. A continuación se presenta la tabla 1.3 con el rango de calificación y la condiciones que debe tener la solución para tener el puntaje:

Tabla 1.3 Calificación de la Matriz

CONDICIÓN	CALIFICACIÓN
Malo	0 – 2
Bueno	3 – 4
Excelente	5

Elaboración Propia

A continuación, se muestra la tabla 1.4 y la tabla 1.5 para la selección de la mejor solución para ambos casos de estudio. En la primera columna se muestra los criterios de selección y su porcentaje de valoración. En la primera fila están escritas las alternativas, se le asignó un puntaje por cada criterio, según el cumplimiento de estos y se lo multiplica por el porcentaje de valoración para obtener el valor que se le dará a cada alternativa de solución.

Tabla 1.4 Matriz de Decisión para Sistema de Transporte de Fluidos

Alternativa Criterios	Rediseño de sistema de tuberías	Protección catódica de segmentos de tubería.	Protección interna de sistema de tuberías.
Costo 15%	0.3 (2)	0.6 (4)	0.3 (2)
Fácil Manufactura 15%	0.6 (4)	0.45 (3)	0.3 (2)
Tiempo de implementación 30%	0.6 (2)	0.9 (3)	0.6 (2)
Flexibilidad 40%	1.6 (4)	1.2 (3)	0.8 (2)
PUNTAJE TOTAL	3.4	3.15	2

Elaboración Propia

La opción 1 es la que mejor se ajusta a los criterios definidos por el diseñador ya que obtuvo un puntaje de 3.4 entre las demás opciones por su capacidad de flexibilidad en comparación a las demás alternativas.

El tiempo de implementación es menor, debido a que el sistema anterior puede seguir en funcionamiento durante el proceso de rediseño y manufactura.

Tabla 1.5 Matriz de Decisión para Sistema de Transmisión de Potencia

Alternativa Criterios	Rediseño de eje	Sustitución por sistema de bandas y poleas	Sustitución por modelo alternativo de reductor de velocidad
Costo 15%	0.6 (4)	0.45 (3)	0.15 (1)
Fácil manufactura 15%	0.45 (3)	0.6 (4)	0.6 (4)
Tiempo de implementación 30%	1.2 (4)	0.6 (2)	0.9 (3)
Flexibilidad 40%	1.6 (4)	1.2 (3)	0.8 (2)
PUNTAJE TOTAL	3.85	2.85	2.45

Elaboración Propia

La matriz de decisión perfila el rediseño del eje como mejor opción para la solución del problema. Este obtuvo mayor puntaje en costo debido a que su fabricación es más económica en comparación a las demás alternativas que implican la compra de un sistema nuevo.

El tiempo de implementación es menor, por el hecho que el proceso de compra de un reductor de velocidad comprende el tiempo que es adquirir el equipo y trasladarlo a la fábrica, además de lo que se demora ensamblar el equipo de manera que cumpla con los parámetros de trabajo del anterior equipo.

La solución que conlleve realizar menos cambios al sistema de producción tiene un mayor puntaje al analizar la flexibilidad. El rediseño del eje solo requiere cambiar una sola pieza que se adapte al sistema actual, por lo que posee un mayor puntaje en comparación a las otras alternativas.

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA DEL DISEÑO

2.1 Metodología para Diseño de Sistema de Transporte de Fluidos

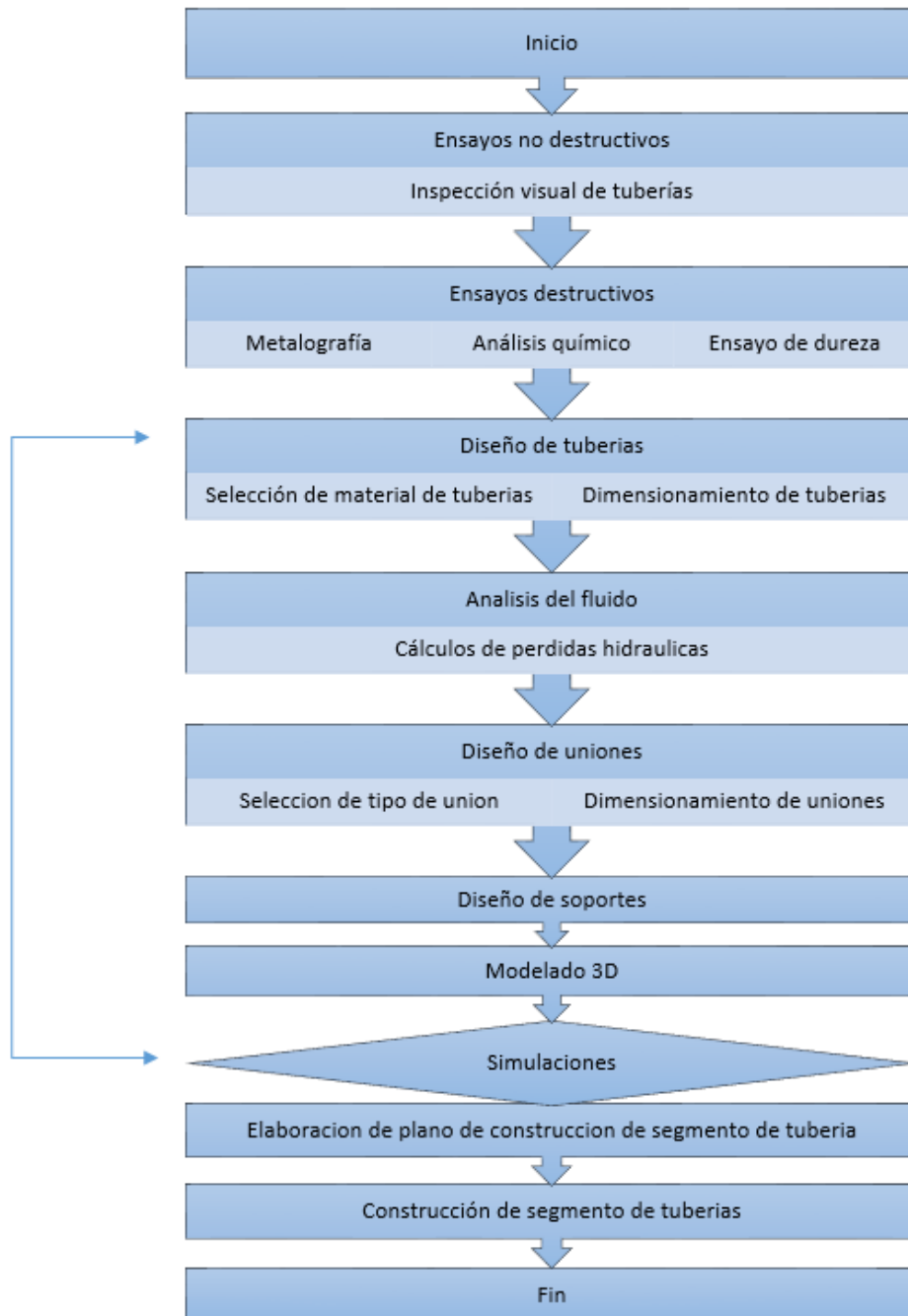


Figura 2.1 Diagrama de Metodología para Diseño de Sistema de Transporte de Fluido

Elaboración Propia

El proceso de análisis de falla del sistema de transporte de fluidos se inicia realizando ensayos no destructivos, la inspección visual de la sección de tubería que poseía la picadura con mayor tamaño determinara la calidad de su superficie, este procedimiento debe seguir los pasos establecidos por la norma ASME sección V, artículo 9, posteriormente se realiza la caracterización de la picadura con los procedimientos de la norma ASTM G46 para conocer el nivel de daño causado por la corrosión. Los ensayos destructivos se utilizan para conocer las características del material que no se pueden determinar a simple vista; el análisis químico se realiza con la norma ASTM E353-93 y proporcionará los porcentajes de elementos químicos del material; el ensayo metalográfico realizado a través de la norma ASTM E3-1 mostrará la microestructura del material y subsecuentemente sus defectos; y finalmente la prueba de dureza normada por la norma ASTM 370-E18 valorará el grado de resistencia del material.

Para los cálculos de velocidad y Reynolds del fluido viscoso se considerarán las leyes fundamentales para fluidos incompresibles y los efectos corrosivos producidos por el pH ácido del fluido. Durante este proceso se buscará adquirir un flujo laminar y un perfil de velocidad parabólico con una longitud de entrada corta. Análogamente para obtener el diámetro interno de la tubería se respetará el caudal establecido de 0,0007 m³/h.

Posteriormente, La selección del espesor de tubería seguirá los pasos constituidos en la norma ASME B31.1 para sistemas de tuberías de proceso. Durante el diseño de esta medida se tomará en cuenta las condiciones de presión, temperatura y acidez a las cuales se encuentra sometido el sistema de tuberías, con el fin de evitar que este falle por deformaciones, ruptura o se repita el fenómeno de corrosión.

El diseño de codos y selección de válvulas seguirá los pasos y consideraciones del manual de accesorios Crane y las normas de fabricación respectivas para cada elemento, se pretenderá que los elementos

seleccionados no alteren el flujo del fluido a lo largo de su recorrido; y el número de accesorios del sistema de tuberías se considerarán a partir de la ruta de la misma y procesos de mantenimiento.

Los soportes de tubería serán seleccionados con la norma ANSI SP-58, en este procedimiento se respetarán las cargas generadas por el peso del material de tubería y del fluido a lo largo de su trayectoria.

Luego, la selección del mecanismo de unión de las tuberías se realizará tomando en cuenta futuras expansiones o reubicación del equipo. También se considerará la aplicación sanitaria que tendrá el equipo y el fluido transportado.

Finalmente, se verificará que los resultados obtenidos sean los correctos. En este proceso se usará el software ANSYS Fluent para generar un volumen de control con las características de la tubería, donde se hará circular el fluido y se comprobará la similitud teórica y experimental de la longitud para la cual se consigue un flujo laminar y una velocidad constante con perfil parabólico; con ayuda del programa ANSYS se modelará una sección de la tubería con sus propiedades mecánicas, esta será sometida a las cargas producidas por la presión interna de 700KPa y se obtendrá las deformaciones generadas en el material, las cuales deberán asegurar la integridad de la tubería.

2.1.1 Bases y Consideraciones.

Propiedades del fluido

Se considera una densidad promedio de 900 kg/m^3 y un pH de 2.9, a condiciones estándar de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ y 1 atm , según los indicado por la ficha técnica del producto.

Flujo másico

Para la determinación del flujo másico se considerará el caudal requerido de trabajo para el sistema.

Presión de diseño

La presión de diseño debe ser establecida de tal forma que cubra todas las condiciones de operación previsible, para este caso se diseñara con la presión máxima ejercida por la bomba usada en el proceso de 700 KPa.

Temperatura de diseño

Para sistemas de tuberías y componentes del sistema de transporte de fluido sin aislante térmico externo y sin recubrimiento interno que trabajen en temperatura ambiente, se considera la temperatura de diseño como la máxima temperatura que alcanzará el fluido, 25°C.

Espesor de tubería y accesorios

Debido a que los elementos del sistema de tuberías estarán sometidos a presión interna, se determinan sus espesores usando los procedimientos sugeridos por la norma ASME B31.3, las cuales consideran la corrosión y los procesos de mecanizado.

Sistema de sujeción

Los elementos que conforman el sistema de sujeción se diseñan con las cargas máximas ejercidas por el sistema de tuberías (peso de tuberías y peso de fluido), estas deben acoplarse a las estructuras metálicas ya dispuestas por la empresa para las tuberías de servicio.

2.1.2 Diseño Conceptual del Sistema de Transporte de Fluido

La figura 2.2 muestra la vista superior del diseño conceptual para el sistema de tuberías a ejecutarse. En esta puede apreciarse el recorrido horizontal que la tubería tendrá a través de la empresa, donde se realizan 6 cambios de dirección del fluido.

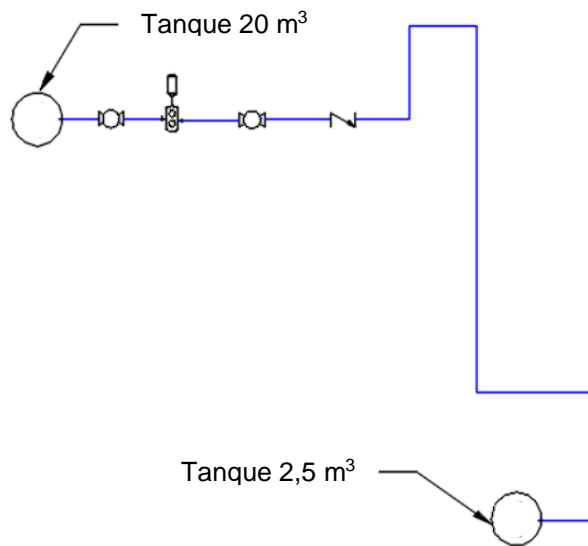


Figura 2.2 Vista Superior de Sistema de Tuberías

Elaboración: Propia

La figura 2.3 muestra la vista lateral del diseño conceptual para el sistema de tuberías a ejecutarse. En esta puede apreciarse la distancia vertical entre los tanques de almacenamiento (10 m^3) y de dotación diaria (2.4 m^3), donde se realizan 3 cambios de dirección del fluido para alcanzar los 40 m de altura establecidos.

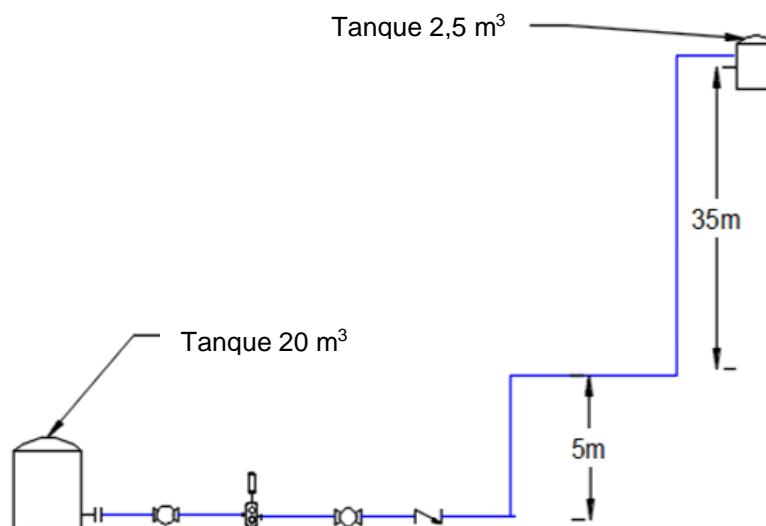

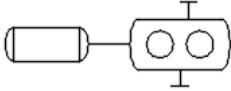

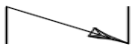


Figura 2.3 Vista Lateral de Sistema de Tuberías

Elaboración: Propia

La tabla 2.1 detalla la representación gráfica de los elementos del sistema de tuberías, donde se pueden apreciar: la línea principal de tuberías de diámetro nominal 2 pulgadas y cedula 10, las válvulas para control del fluido y bomba de proceso.

Tabla 2.1 Simbología para Sistema de Tuberías

ELEMENTO DE SISTEMA DE TUBERÍA	SÍMBOLO
Tubería de DN2-10S	
Bomba de proceso	
Válvula de bola	
Válvula de retención	

Elaboración Propia

2.1.3 Análisis de Falla del Material

Se considera que un estudio correcto de corrosión por picaduras en aceros inoxidables austeníticos inicia por la evaluación del estado del material a través de inspección visual, seguido de la caracterización de la falla y el estudio de la misma (Greene, 1978).

Inspección Visual

La corrosión por picadura es un tipo de corrosión que se distingue del resto debido a su forma y mecanismo de crecimiento. Esta puede ser descrita como una cavidad circular que crece estrechamente en dirección a la gravedad (ver figura 2.4) y normalmente se inicia en secciones del material que no poseen un buen acabado superficial, por lo que no se genera de forma correcta la capa de óxido de cromo que sirve de protección (Honest, 2006).

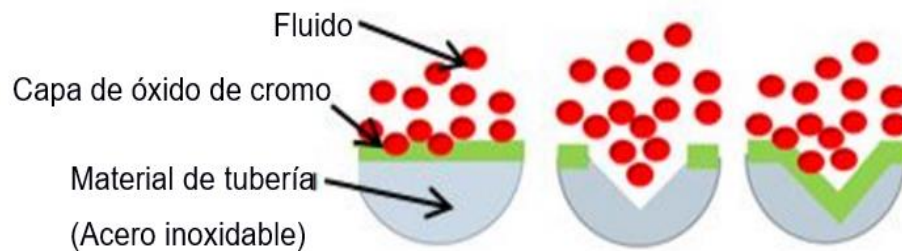


Figura 2.4 Crecimiento de Picadura

Fuente: (Hones, 2006)

A través de la inspección visual se busca analizar las condiciones superficiales de la tubería y defectos como fisuras o corrosión, este procedimiento se realiza bajo luz ordinaria y sin necesidad de equipos de ampliación de imagen siguiendo los procesos e instrucciones de la ASME sección V artículo 9.

Para este análisis se usarán las figuras mostradas en el Apéndice B que evidencian las secciones de tubería horizontal, en estas se pueden observar que los defectos de picaduras corrosivas tienen forma circular con crecimiento profundo y han penetrado todo el espesor de la tubería, también se puede apreciar que la tubería posee una superficie opaca y áspera.

La figura 2.5 muestra una inmersión a nivel microscópico realizado por los principales fabricantes de acero inoxidable, que revela los diferentes niveles de acabados superficial en acero inoxidable y se pueden apreciar cómo se reducen los surcos y crestas en proporción a la disminución del promedio aritmético del perfil de rugosidad, lográndose una superficie visualmente más lisa y brillante. Comparando las secciones de tubería bajo estudio (ver figura 1.1) con los tipos de acabado superficial de tubería mostrado en la figura 2.5 se puede apreciar el mal acabado superficial de la tubería semejante a un $Ra > 1\mu m$.

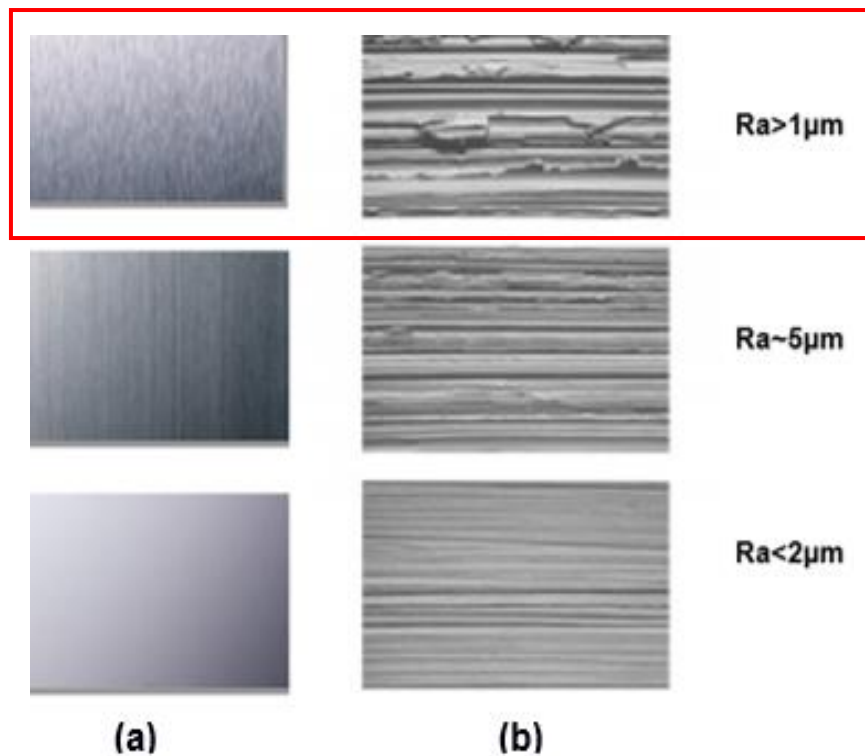


Figura 2.5 Tipos de Acabado Superficial

Fuente: (Cochrane, 2002).

Un resumen de los resultados obtenidos para el material del sistema de tuberías se muestra en la tabla 2.2

Tabla 2.2 Resultados de Inspección Visual

CARACTERÍSTICAS SUPERFICIALES	DEFECTOS
<ul style="list-style-type: none"> Superficie opaca y áspera Acabado superficial, $Ra > 1\mu m$ 	<ul style="list-style-type: none"> Picadura con forma circular de crecimiento profundo que penetran el espesor completo del material de la tubería

Elaboración propia

Estos resultados se los atribuyen a un erróneo proceso de fabricación debido a que se sabe que el proceso de acabado superficial para aceros inoxidables dentro de la industria alimenticia debe cumplir con un promedio aritmético del perfil de rugosidad superficial 2K ($Ra < 0,2 \mu m$) tras un

proceso de pulido mecánico y abrillantado con algodón que proporciona un aspecto reflectivo y una superficie lisa que evita el estancamiento de fluido (EN10088-2, 1995), se piensa que esto afectaba al material de tubería debido a que las rugosidades generaban acumulaciones de fluido y en consecuencia un proceso autocatalítico con creación de picaduras. En consecuencia, se realizará un estudio más profundo del defecto por picaduras corrosivas encontrado.

Caracterización de picaduras

El diagnóstico de la falla de corrosión por picadura para sistemas de tuberías se debe realizar para evaluar el tipo de crecimiento, tamaño y densidad de la picadura (Hoeppner, 2012) . Este procedimiento inicia con la selección de las características de la picadura de entre las opciones de la figura 1.6 y figura 2.4 proporcionadas por la guía estándar para el examen y evaluación de corrosión por picaduras, donde se toma en cuenta la masa perdida del material por la corrosión a través de:

- Densidad, identifica el número de picaduras existentes por metro cuadrado de tubería (ASTM G46, 1994).
- Tamaño, con este valor se encuentra el área de la cavidad formada por la picadura de mayor tamaño (ASTM G46, 1994).
- Profundidad, a través de esta información se conoce el crecimiento de la picadura en dirección a la gravedad (ASTM G46, 1994).

Para este proceso se examinará el recorrido del sistema de tuberías y la figura 1.1 que muestra la sección de tubería con picadura de mayor tamaño.

Al examinar el recorrido del sistema de tuberías, se pudo apreciar que las picaduras se encuentran a 100 cm de separación en las secciones horizontales de tubería, obteniendo una densidad A1 con 2.5×10^3 picaduras/m² (ver figura 2.6).

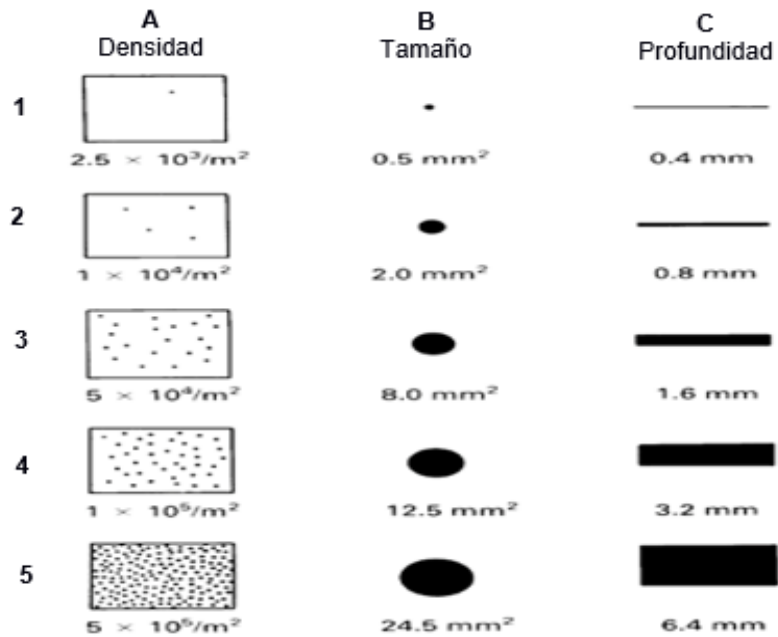


Figura 2.6 Gráficos para Clasificación Estándar para Picaduras

Fuente: (ASTM G46, 1994)

El área de picadura de mayor tamaño se obtiene empleando la ecuación 1.

$$A_p = \pi r_p^2 \quad \text{ec (1)}$$

Dónde: A_p : Área de picadura en sección interna de tubería [mm^2]
 r_p : Radio de picadura [mm]

La figura 2.7 muestra un modelo de la picadura con mayor tamaño si se realizará un corte transversal en la región de falla de la tubería, donde el radio de la picadura r_p registrado es de 2 mm.

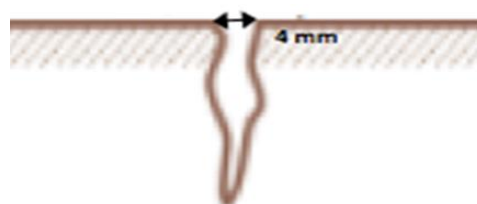


Figura 2.7 Esquema de la Sección Transversal de Picadura

Fuente: (ASTM G46, 1994)

Al reemplazar el valor de $r_p = 2 \text{ mm}$ en la ecuación 1, el área de la picadura es de $12,566 \text{ mm}^2$ que indica un área de tamaño B4 (ver figura 2.6).

Debido a que todas las picaduras encontradas inician en la superficie interior y terminan en la superficie exterior de la tubería se considera una profundidad de picadura de $3,9 \text{ mm}$ y se obtiene una profundidad tipo C5.



Figura 2.8 Resultado para Caracterización de Picadura

Elaboración Propia

La figura 2.8 muestra un diagrama resumen de la caracterización de la picadura donde finalmente el código obtenido es A1B4C5 y representa un tipo de corrosión por picadura agresivo, este tipo de corrosión es irregular en acero inoxidable austeníticos y se atribuye a inconformidades en el material.

Este resultado produce la necesidad de realizar un estudio del efecto de la corrosión por picadura sobre el material de tuberías.

Velocidad de crecimiento de picadura

La velocidad de crecimiento de la picadura puede estimarse a partir de la ecuación 2, este valor nos indica la rapidez con la que la picadura destruye el material de la tubería y está relacionado directamente con las propiedades del material y el pH del fluido.

$$V_{pc} = \frac{e_p}{t_y} \quad \text{ec (2)}$$

Dónde: V_{pc} : Velocidad de crecimiento de picadura [mm/año]

ep: profundidad de picadura [mm]

ty: Tiempo de actuación de picadura [años]

Se considera el valor de profundidad de la picadura igual al obtenido en la caracterización de corrosión por picadura y el tiempo de actuación será el registrado por la empresa (ver tabla 2.3).

Tabla 2.3 Profundidad y Tiempo de Actuación de Picadura

Variable	Valor
Profundidad de picadura	3,9 mm
Tiempo de actuación de picadura	3 años

Reemplazando los valores de la tabla 2.3 se determinó una velocidad de corrosión de 1,3 mm/año.

Análisis Químico

El análisis químico para acero inoxidable sigue los procedimientos establecido en la norma ASTM E353-93 donde a través de diferentes métodos se obtiene el porcentaje de elementos aleantes (Cromo, Molibdeno, Azufre, Fosforo, Carbono, Manganeso y Nitrógeno) del material de tubería, estos valores permitirán comprobar si el material de tubería se encuentra dentro del rango aceptado para acero inoxidable AISI 316.

Posteriormente se realizará el cálculo de la resistencia a la corrosión por picadura a través de la ecuación 3 (Jones, 1996), el valor de PREN se considera únicamente para comparar los diferentes tipos de acero y no predice si un grado en particular será adecuado para una aplicación donde la corrosión por picadura puede ser un peligro.

$$PREN = \%Cr + 3.3\%Mo + 30\%N \quad \text{ec (3)}$$

Dónde: PREN: Resistencia a la picadura

% Cr: Porcentaje de cromo

% Mo: Porcentaje de molibdeno

% N: Porcentaje de nitrógeno

Para efectos de análisis de los resultados se brindarán también los valores de porcentajes de elementos aleantes para un acero inoxidable AISI 316 que cumple con los estándares ASTM.

Los porcentajes mínimos de elementos aleantes del acero inoxidable AISI 316 se presenta a continuación en la tabla 2.4.

Tabla 2.4 Porcentaje de Elementos del Acero AISI 316

Elemento	C _{max}	Cr	Mn _{max}	Ni	S _{max}	P _{max}	Mo
Porcentaje (%)	0.06	16 – 18	2	10 – 14	0.03	0.045	2 – 3

Fuente: (ASM, 2000)

De la misma forma los porcentajes de elementos aleantes obtenidos del material utilizado en el sistema de tuberías se presentan en la tabla 2.5.

Tabla 2.5 Porcentaje de Elementos de la Tubería con Picadura

Elemento	C	Cr	Mn	Ni	S	P	Mo
Porcentaje (%)	0.06	15	0,910	8.10	0.004	0.04	0.00

Elaboración propia

Al observar la composición química del material de tubería, esta ingresa en la subcategoría de acero inoxidable austenítico Cr-Mn, En este tipo de materiales el porcentaje de Molibdeno puede ser bajo o nulo e incurre en una disminución de la capacidad anticorrosiva del mismo.

Reemplazando los valores de la tabla 2.4 y tabla 2.5 en la ecuación 3 se obtienen los valores mostrados en la tabla 2.6.

Tabla 2.6 Resultados para Resistencia a la Picadura

PREN, Acero AISI 316	PREN, Material de tubería
26	15

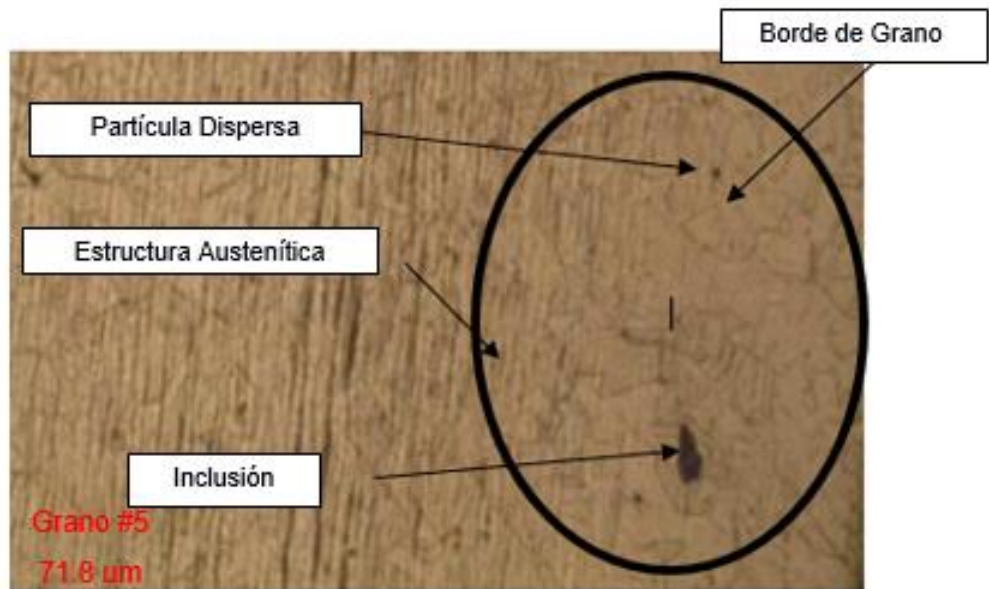
Elaboración propia

De acuerdo a lo calculado, se considera que la resistencia a la picadura del material de estudio se encuentra muy por debajo de lo especificado para un acero AISI 316.

Metalografía

El análisis metalográfico del material de tubería se usará para analizar de manera más profunda las características microestructurales del material y de la picadura, tales como tamaño de grano, grado de homogeneidad del material, presencia de inclusiones y defectos superficiales.

Los aceros inoxidables debido a sus características anticorrosivas son considerados materiales donde resulta difícil revelar su estructura metalográfica. Para preparar la superficie de este material se siguieron los pasos establecidos por la norma ASTM E3-1 (guía estándar para la preparación de especímenes metalográficos), donde se realizó la selección de los especímenes de tubería con medidas de 10x10x2 mm, seguido de su clasificación como material suave, montaje de probetas con resina y una serie de desbastes con lijas y pulido fino con pasta de aluminio de 0.3 μm . Para el ataque químico se sumergió la probeta del material de estudio en Picral durante un minuto, esta solución ácida ataca la superficie del metal en distintas orientaciones disolviendo cristales y produciendo un efecto de altilano donde quedan marcados los bordes de granos por una red de escarpaduras poco profundas. Estas superficies no reflejan luz en las lentes de un microscopio uniformemente y como resultado se observará la posición de los límites de los cristales (B. L. Bramfitt, 2002).



**Figura 2.9 Resultado de Ensayo Metalográfico de la Tubería con Picadura,
Picral - 100X**
Elaboración propia

La figura 2.9 muestra la microestructura del material de tubería donde se pueden apreciar:

- Granos alargados de austenita, producto de su proceso propio de fabricación. Un gráfico de formación Hierro vs Carbono se presenta en el apéndice E, en esta se puede apreciar el rango de temperaturas establecidas para obtener una estructura austenítica con un porcentaje de 0,08 % de carbono.
- Partículas dispersas de cromo pueden estar establecidas en aceros austeníticos distribuidos principalmente a lo largo de los límites de granos por la reacción de cromo y el carbono a temperaturas entre 500-800°C, estos dejan regiones vecinas empobrecidas en cromo propensas a sufrir corrosión (ver figura 2.10) (Callister, 2007).

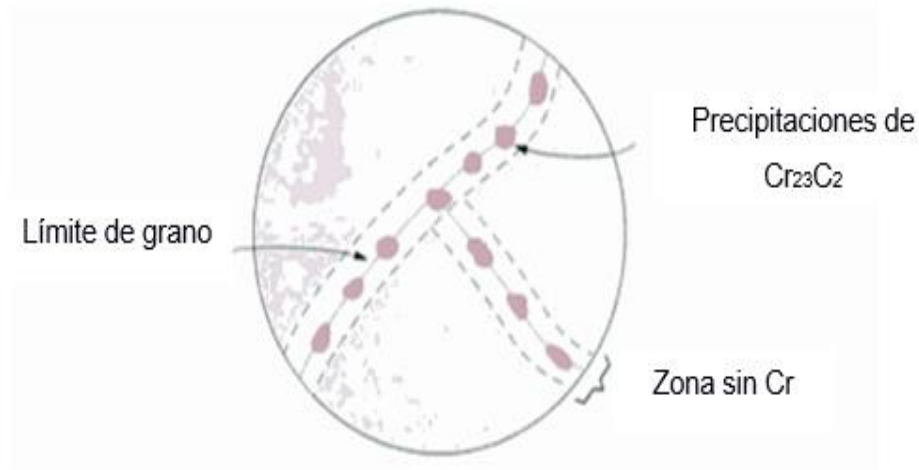


Figura 2.10 Precipitaciones de Cromo en Aceros Inoxidables

- Las inclusiones de sulfuros presentes en el material de tubería son defectos formados debido a la reacción del azufre con el Manganeseo (SMn), este defecto genera zonas alrededor del mismo donde se absorben fácilmente iones negativos de las sustancias ácidas en contacto y provocan anisotropía en el material (Kopeliovich, 2012).

A través de la figura 2.9, según lo especificado en la norma ASTM E112 – 13 en su sección “Austenitic Standard Grain-Size” se considera un tamaño de grano N5 (ver Apéndice) y se obtiene un diámetro de grano esférico equivalente de 71,8 μm (grano grueso). Es bien conocido que las propiedades mecánicas de un material dependen de su estructura de grano, se puede inferir que el material de tubería posee baja dureza, resistencia mecánica y tenacidad (Martínez, 2012).

La figura 2.11 muestra una vista aumentada del borde de picadura, en esta se puede observar la forma agresiva de corrosión del material como consecuencia de sus irregularidades y defectos.

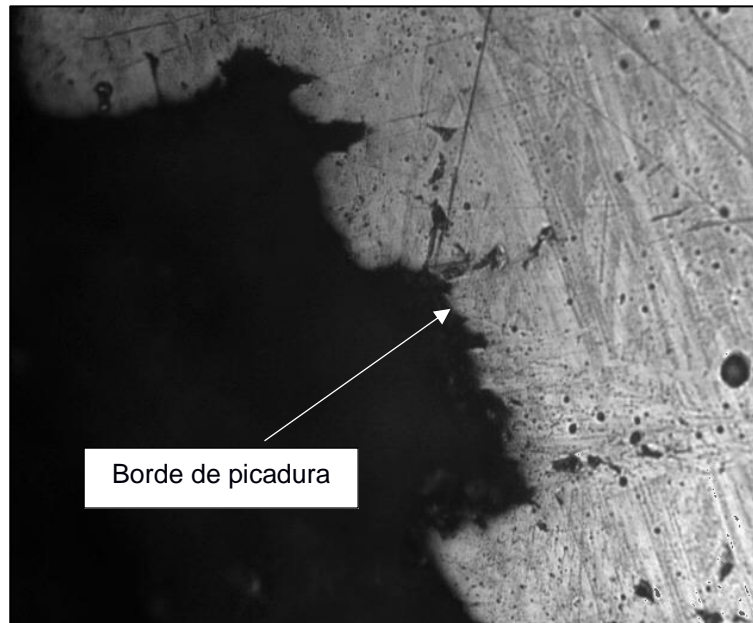


Figura 2.11 Vista Aumentada del Borde de Picadura, Vilella – 200X

Elaboración propia

Ensayo de Dureza

El ensayo de dureza Rockwell C para aceros inoxidable permite determinar la propiedad del material para resistir esfuerzos sin deformarse permanentemente. Este fue realizado con penetrador punta diamante de 120° de ángulo de vértice redondeado en la punta, precarga de 10 Kgf, carga de 150 Kgf y siguió lo establecido por la norma ASTM 370- E18: Métodos de prueba estándar y definiciones para pruebas mecánicas de productos de acero (ASTM, 1994).

Los valores de dureza del material del sistema de tuberías se muestran en la tabla 2.7 y se puede apreciar que el valor de dureza se encuentra dentro del rango mínimo establecido para el acero inoxidable AISI 316.

Tabla 2.7 Resultados de Ensayo de Dureza

Material de tubería (HRC)	AISI 316 (HRC)
10	9-25

Elaboración Propia

2.1.4 Diseño del Sistema de Tubería

Selección del material y proceso de fabricación de la tubería

La optima selección del material para construcción es crítica en términos de seguridad, rendimiento y economía. Según lo indicado por el estándar Norsok para criterios de selección de material y fabricación de tuberías para procesos, se debe tomar en cuenta principalmente la resistencia del material en ambientes corrosivos y la resistencia a la presión interna en temperatura de operación, un esquema para este procedimiento de muestra en la figura 2.12.

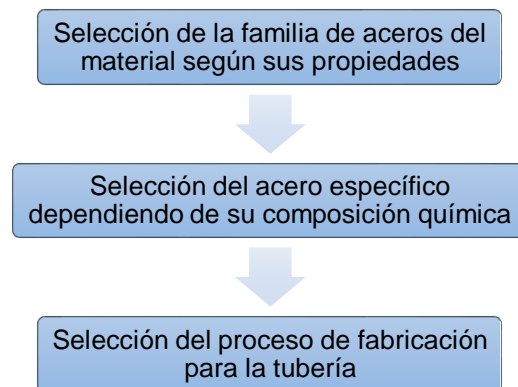


Figura 2.12 Procedimiento de Selección de Aceros

Selección de la familia de aceros del material según sus propiedades

La selección de la familia de aceros austeníticos serie AISI 300 se realizó a través de la tabla 2.8, que resume la aplicación histórica de los aceros inoxidables en la industria según expertos.

Tabla 2.8 Aplicación de los Aceros Inoxidables en la Industria

SERIE AISI	APLICACIONES
200	Industria alimenticia con resistencia mínima a la corrosión, elementos estructurales.
300	Industria alimenticia, industria química, tuberías de proceso, aplicaciones con elevada resistencia a la corrosión requerida.
Dúplex	Aplicaciones marinas fuera de puerto.

Fuente: (Akid, 2004)

Selección del acero específico dependiendo de su composición química

La selección del material AISI 316 se realizó a través del diagrama de propiedades de los materiales pertenecientes a la familia 300 según sus elementos aleantes (APENDICE F). Se confirmará a través del estudio de su "boiling point curve" (curva de punto de ebullición, figura 2.13), que muestra la pérdida de material en un acero AISI 316 expuesto ante las sustancias químicas más comunes en la industria alimenticia a diversas temperaturas (ASM, 2000).

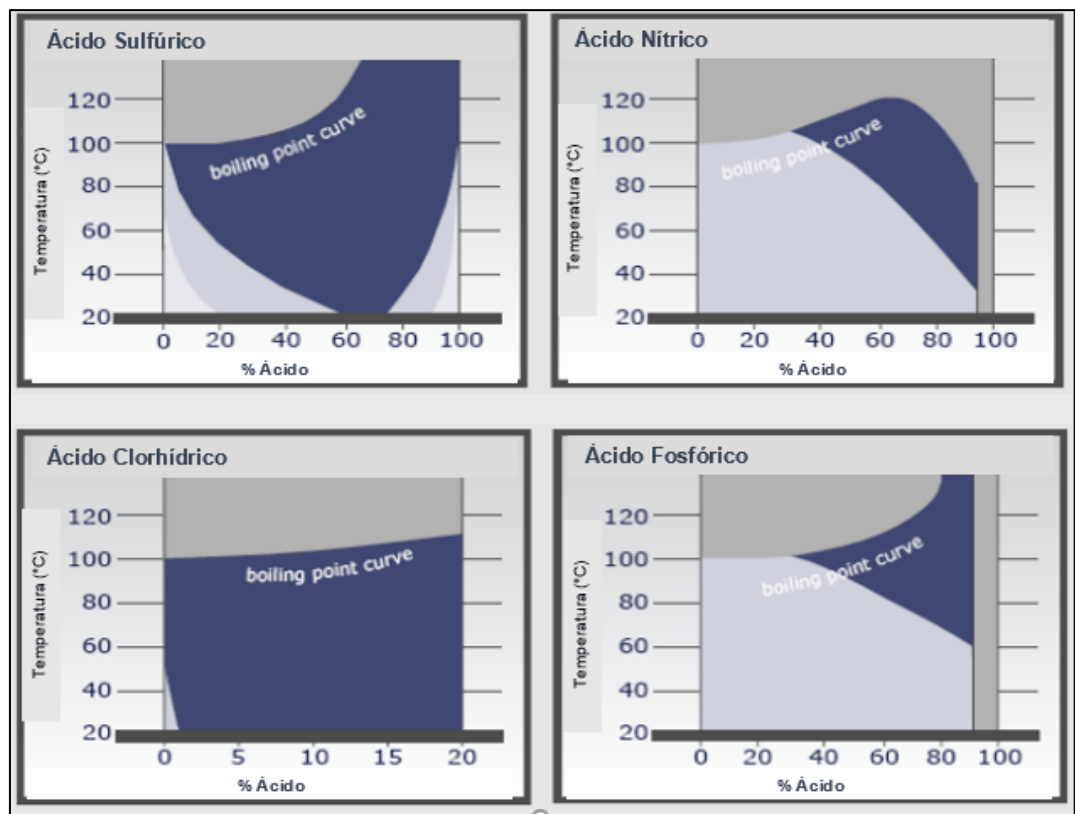
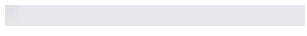




Figura 2.13 Boling Point Curve

Fuente: (NAS, 2010)

La tabla 2.9 presenta el valor de pérdida de material de la tubería en un rango de colores.

Tabla 2.9 Tabla de Colores de Boling Point Curve

Color	Perdida de material (mm/h)
	<0,1
	0,1-1
	>1

Fuente: (NAS, 2010)

Considerando una concentración estándar de ácido al 50% en el fluido, este material presenta pérdidas de 0,1 a 1 mm/año para la mayoría de los casos, donde la resistencia a los ácidos fosfóricos y sulfúricos principalmente lo convierte en el acero inoxidable idóneo para aplicaciones con un margen elevado de corrosión y su baja resistencia ante ácido clorhídrico lo excluye de aplicaciones químicas industriales.

Selección del proceso de fabricación para la tubería

Se seleccionará el proceso de fabricación de tuberías de acero inoxidable sin costura (ASTM 269) con el objetivo de obtener un material de tubería uniforme. La figura 2.14 muestra el incremento de la resistencia a la presión interna en KPa según el aumento del espesor de pared en mm para tuberías de acero inoxidable AISI 316 sin costura.

Tubería de acero Inoxidable AISI 316 sin costura															
DN	Espesor de pared (mm)														
	.010	.012	.014	.016	.020	.028	.035	.049	.065	.083	.095	.109	.120	.134	.156
1/16	5600	6900	8200	9500	12100	16800									
1/8						8600	10900								
3/16						5500	7000	10300							
1/4						4000	5100	7500	10300						
5/16							4100	5900	8100						
3/8							3300	4800	6600						
1/2							2600	3700	5100	6700					
5/8								3000	4000	5200	6100				
3/4								2400	3300	4300	5000	5800			
7/8								2100	2800	3600	4200	4900			
1									2400	3200	3700	4200	4700		
1-1/4										2500	2900	3300	3700	4100	4900
1-1/2										2400	2700	3000	3400	4000	
2											2000	2200	2500	2900	

Figura 2.14 Resistencia de Tuberías sin Costura Respecto a su Espesor.

Fuente: (Akid, 2004)

En la figura 2.14 se puede apreciar que para los diferentes diámetros nominales (DN) existe un incremento de la resistencia a la presión interna $\gg 700$ KPa con respecto al aumento del espesor de pared y se asegura la integridad del sistema (KUMPU, 2006).

Velocidad y diámetro interno de tubería

Para el cálculo de velocidad en el interior de la tubería se deberán considerar los efectos corrosivos del fluido transportado. El gráfico de barras en tres dimensiones expuesto a continuación en la figura 2.15, muestra que para un pH $2.9 \approx 3$, la tasa de corrosión incrementa rápidamente con respecto a la de velocidad del fluido.

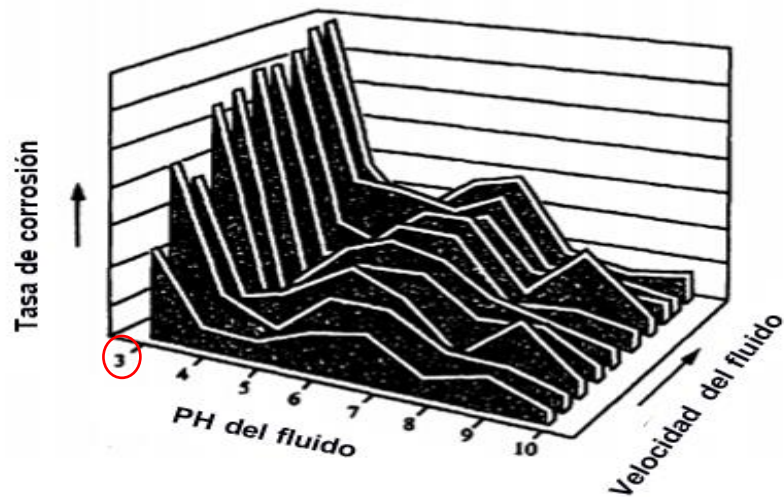


Figura 2.15 Influencia de Parámetros del Fluido Sobre la Corrosión

Fuente: (ASM, 2000)

Se sabe también que en el interior de tuberías el comportamiento de un fluido se describe por su número de Reynolds, el cual depende como lo muestra la ecuación 4 de la geometría de la tubería y propiedades de fluido. Se desea conseguir para esta aplicación un flujo laminar y un perfil de velocidad parabólico (ver figura 2.16).

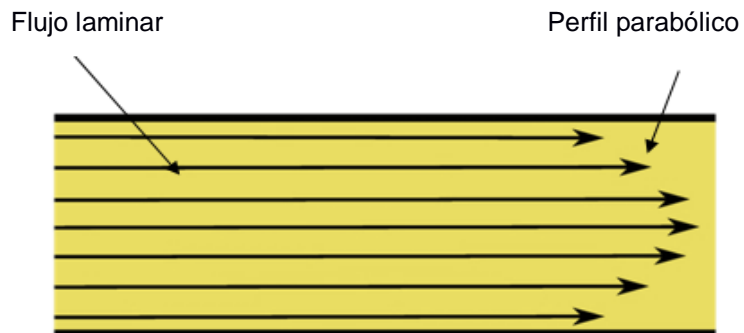


Figura 2.16 Perfil de Velocidad del Fluido Requerido

Elaboración Propia

$$Re = \frac{V \cdot d}{\nu} \quad \text{ec (4)}$$

Dónde: V = Velocidad del fluido, [m/s]
 d = diámetro interno de tubería [m]
 ν = viscosidad cinemática del fluido transportado, [0,00005 m²/s]

Para el caudal interno de un fluido incompresible, el teorema de conservación de masa representado por la ecuación 5 establece una relación de flujo volumétrico dependiente de la velocidad del producto transportado y el área circular interna de la tubería.

$$Q = V \cdot A_t \quad \text{ec (5)}$$

Dónde: A_t : Área circular interna hueca de tubería formada por el diámetro interno [m²]
 Q : Caudal de fluido [0,0007 m³/s]
 V : Velocidad del fluido, [m/s]

Los resultados obtenidos del proceso iterativo entre las ecuaciones 4 y 5 al reemplazar los valores propiedades del fluido se presentan en la tabla 2.10.

Tabla 2.10 Resultados para Velocidad y Reynolds

V	0,20 m/s
Re	400
d	0,55 m

Elaboración propia

Espesor de pared de la tubería

La selección del espesor de tubería se realizará siguiendo los pasos establecidos por la norma ASME B31.3, en este proceso se usará el diámetro interno de tubería mostrado en la tabla 2.10 y la presión suministrada por la bomba de 700 KPa. El espesor inicial se obtendrá con la ecuación 7, producto de un análisis de esfuerzos radiales y tangenciales en cilindros de paredes delgadas.

$$t_m = \frac{P \cdot d}{2(St \cdot E_j + P \cdot Y)} + A_o \quad \text{ec (7)}$$

- Dónde:
- tm: Espesor inicial [mm]
 - P: Presión interna en tubería, [700 KPa]
 - St: Esfuerzo máximo de admisible en el material [MPa]
 - Ej: Eficiencia por temperatura [-]
 - Y: Tolerancia de junta [-]
 - Ao: Margen de roscado [-]

Las variables St, Y, Ej y Ao están tabuladas en la norma ASME B31.3 y estos valores se muestran en la tabla 2.11 para tuberías con diámetro nominal de 0,55 mm y material AISI 316.

Tabla 2.11 Variables para Espesor de Tubería

Variable	Valor
St	129,3MPa
Y	0,4
E	1
A	1,651

Adicionalmente la ecuación 8 considerará un sobreespesor por factor de corrosión debido al alto margen corrosivo del producto; manuales de diseño especifican valores de sobreespesor entre 0.5 y 1 mm (Chan, 2011). En caso de que el espesor diseñado no coincida con los valores estándar, se considerará el espesor inmediato superior.

$$t_i = t_m + c \quad \text{ec (8)}$$

Dónde: t_i : espesor mínimo corregido [mm]
 t_m : espesor inicial [1,8 mm]
 c : sobreespesor de corrosión [0,8mm]

Al realizar un proceso iterativo con diferentes diámetros internos, finalmente se obtiene una tubería con las dimensiones mostradas en la tabla 2.12

Tabla 2.12 Resultados de Espesor de Tubería

Variable	Valor
t_m	1,8 mm
t_i	2,3 mm

Finalmente, las dimensiones obtenidas hacen referencia a un diámetro nominal de 2 pulg, cédula 10 con espesor de 2,77 mm (DN2-10S, notación comercial). Las tablas de medidas estándar de tuberías y accesorios se encuentran tabuladas en la norma ANSI B36.10M y se presentan en el APENDICE G.

Selección y ubicación de accesorios

Los accesorios en un sistema de tuberías deben cumplir con lo establecido en la norma para tuberías y accesorios (ASME B16), en la cual se consideran los aspectos de resistencia de accesorios bajo efectos de

presión interior y el diámetro nominal de la tubería a la cual serán conectados.

Dimensionamiento de codos

Dado que todos los líquidos tienen peso e impulso, en cualquier momento durante un cambio de dirección del flujo de líquido existirá resistencia. Cuando el líquido fluye a través de un codo, la fuerza sobre la superficie interior del codo es proporcional a la densidad del líquido y el cuadrado de su velocidad. Las dimensiones del radio de curvatura que consideran estos factores para codos DN2 de 90° de radio largo con rosca hembra (figura 2.17) se presentan en APENDICES.

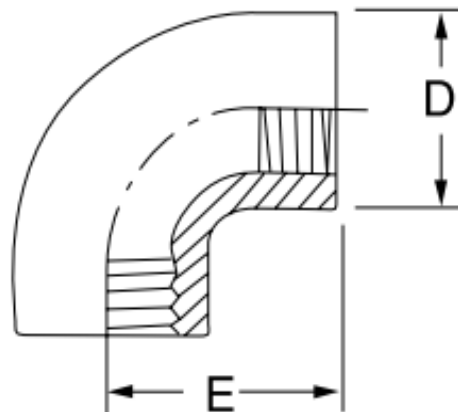


Figura 2.17 Codo de 90°

Elaboración propia

El valor E se diseña considerando la suma de 1.5% del diámetro de la tubería representado por la ecuación 9 y se muestra en la tabla 2.13 , dado el valor obtenido de este cálculo se deberá tomar la dimensión inmediata inferior normada.

$$E = D * 0,15$$

ec (9)

Tabla 2.13 Resultado de Dimensiones de Radio de Curvatura para Codos de 90 °

D, Diámetro externo [mm]	E, Radio de curvatura de codo [mm]
69	72

Fuente: (ASME, 1998)

Elaboración propia

Debido a que dentro del recorrido se tienen 9 cambios de dirección, se tendrán 9 codos en el sistema de tubería.

Selección de válvulas

Las válvulas para sistemas de tuberías con longitudes $L < 1000$ m serán las mínimas posibles y de uso exclusivo para retención de fluido y acciones de mantenimiento (Hydraulic Institute, 1954).

Debido a la diversidad de tipos de sistemas, fluidos y ambientes en los que las válvulas funcionan se ha desarrollado una amplia gama de tipos de válvulas. Los tipos comunes son la válvula de globo, válvula de compuerta, válvula de bola, válvula de tapón, válvula de mariposa, válvula de diafragma, válvula de retención, válvula de presión y válvula de seguridad. Cada tipo de válvula ha sido diseñada para satisfacer necesidades específicas y algunas son capaces de estrangular el flujo, otros tipos de válvulas sólo pueden detener el flujo, otros funcionan en sistemas corrosivos, y otros manejan líquidos de alta presión. Cada tipo de válvula tiene ventajas y desventajas inherentes. Comprender estas diferencias y cómo afectan la aplicación u operación de la válvula es necesaria para lograr el funcionamiento exitoso de una instalación. (DOE, 1993)

Todos los accesorios serán ubicados a una distancia mínima de 152 mm entre los mismos o la bomba de proceso (ANSI B16.1) y deberán cumplir con la norma de construcción ISO 5208. La tabla 2.14 muestra un resumen de los tipos de válvulas del sistema.

Tabla 2.14 Tabla de Válvulas Seleccionadas para el Sistema de Tuberías

ELEMENTOS	ESPECIFICACIONES
Válvula de bola	ANSI DN2
Válvula de retención	ANSI DN2

Fuente: (ASME, 1998)

Elaboración propia

Dentro del sistema se tendrán dos válvulas de bola (ver figura 2.18) ubicadas antes y después de la bomba de proceso; y una válvula de retención (ver figura 2.20), para evitar el retorno del fluido a la bomba después de la bomba.

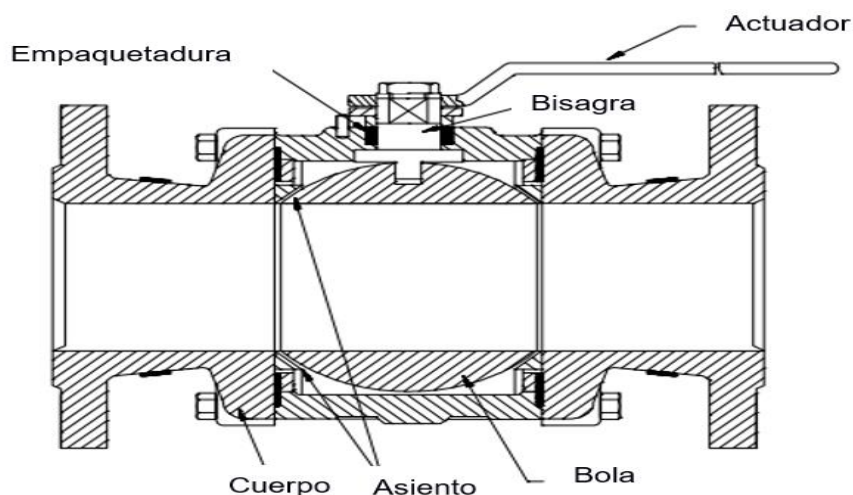


Figura 2.18 Representación Gráfica de Válvula de Bola

Fuente: (DOE, 1993)

La válvula de bola es una válvula de movimiento rotacional que utiliza un disco en forma de bola para detener o iniciar el flujo del fluido (ver figura 2.19). El mango de la válvula se gira 90° hasta un punto en el que el agujero a través de la bola queda alineado con la entrada y la salida del cuerpo de la válvula.

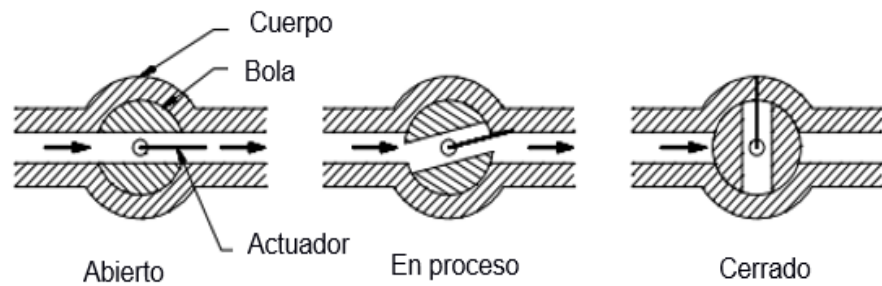


Figura 2.19 Trabajo de una Válvula de Bola

Fuente: (DOE, 1993)

Las válvulas de retención (figura 2.20) están diseñadas para evitar la inversión del flujo dentro del sistema de tuberías y son activadas por el material que fluye en la tubería. La presión del fluido que pasa a través del sistema abre la válvula, mientras que cualquier inversión del flujo la cerrará.

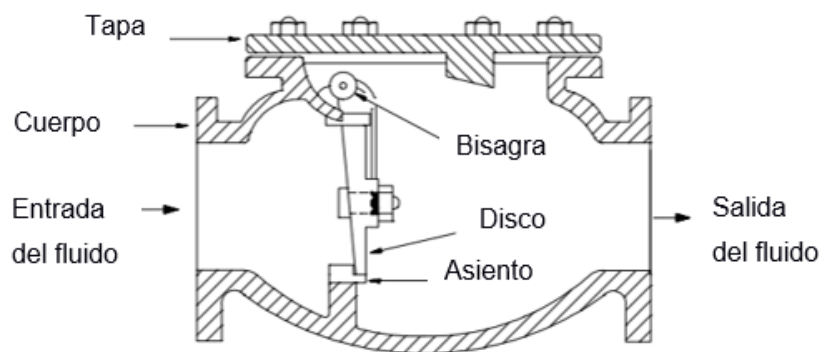


Figura 2.20 Representación Gráfica de Válvula de Retención

Fuente: (DOE, 1993)

Pérdidas en sistema de tuberías

Las pérdidas de carga que ocurren en sistemas de tuberías se presentan a continuación por separado para la tubería y accesorios:

Pérdidas por longitud de tubería

Inicialmente para este procedimiento el perfil laminar obtenido nos permite determinar la resistencia de la tubería independiente de la rugosidad del material a través de la ecuación 10.

$$f = \frac{69}{Re} \quad \text{ec (10)}$$

Dónde: f: Factor de fricción de tubería AISI 316
 Re: Numero de Reynolds [400]

Con el valor de rugosidad se podrán calcular las pérdidas de cabezal ocasionadas por el contacto que se produce entre el fluido y las paredes de la tubería por medio de la ecuación 11 de Hagen Pouseuilli.

$$h_f = \frac{fLV^2}{2dg} \quad \text{ec (11)}$$

Dónde: hf: Cabezal de perdida por tubería [m]
 L: Longitud de sistema de tuberías [100 m]
 g: Gravedad [9,8 m/s²]

Los resultados obtenidos al reemplazar los valores establecidos se presentan en la tabla 2.15.

Tabla 2.15 Resultados de Perdida por Longitud de Tubería

Variable	Valor
f	0,17
hf	0,7 m

Pérdidas por accesorios

Como ya se ha mencionado cualquier obstáculo en el recorrido de un sistema de tuberías cambia la dirección de la corriente, altera las características del flujo y genera turbulencia. Los estudios y experimentos realizados por la ingeniería de Crane en “Pruebas y Análisis del

Comportamiento Fluidos en Codos y Válvulas”, evidencia que existen pérdidas de energía generada y el coeficiente de resistencia.

La Sociedad de Estandarización de Válvulas y Codos considera el diseño de estos elementos bajo régimen turbulento debido al efecto que tienen sobre el comportamiento del fluido. Se seguirá para el cálculo de pérdidas por accesorios las tablas presentadas en el “Manual Técnico de Flujo de Fluidos” de Crane en su sección de apéndices.

Las pérdidas de accesorios son proporcionales a la superficie interna de la tubería, por ello se asignan valores K para codos de 90°, válvulas de bola y válvulas de retención que dependen del valor de Reynolds establecido en estado turbulento.

Obtenidos los factores de fricción de accesorios, se procede a multiplicarlos, sumarlos algebraicamente y utilizarlos en la ecuación 12 para determinar el cabezal de pérdida por accesorios.

$$h_m = \frac{v^2}{2g} (\sum k_{\text{accesorios}}) \quad \text{ec (12)}$$

Dónde: h_m : Cabezal de pérdida por accesorios [m]
 $\sum k_{\text{accesorios}}$: Factor de fricción por accesorios

Los factores de fricción y las pérdidas por accesorios son 10,5 y 19,8 para codos y válvulas respectivamente; reemplazando estos valores en la ecuación 12 se obtiene un cabezal de 0,5 m.

Selección de punto de funcionamiento para bomba neumática de diafragma
En la figura 2.21 se presenta un esquema en dos dimensiones del sistema de tubería, donde se pueden apreciar sus componentes de operación y sus accesorios.

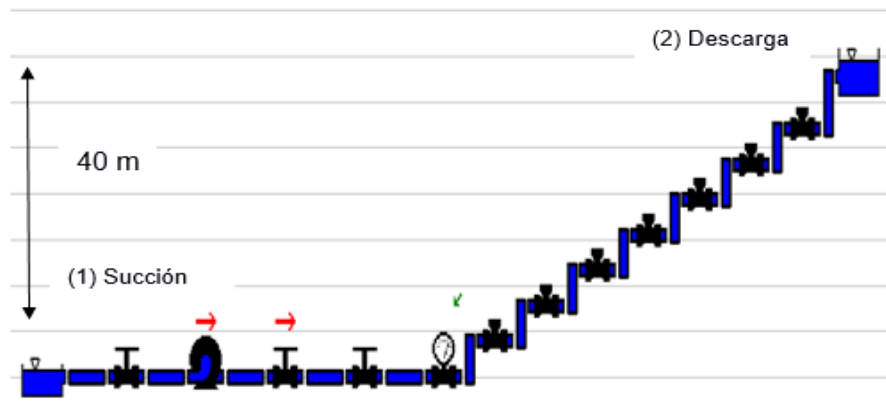


Figura 2.21 Esquema del Sistema de Tubería

Elaboración propia

Aplicando la ley de Bernoulli representada por la ecuación 12 entre el punto 1 de succión y 2 de descarga se determina el cabezal necesario entregado por la bomba para desplazar el fluido.

$$H_{\text{bomba}} = z_2 - z_1 + \frac{P_2 - P_1}{\rho g} + h_m + h_f \quad \text{ec (13)}$$

- Donde:
- H_{bomba} : Cabezal requerido [m]
 - Z_2 : Altura de descarga del fluido [40 m]
 - Z_1 : Altura de succión del fluido [0 m]
 - P_2 : Presión con la que llega el fluido [KPa]
 - P_1 : Presión de salida del fluido [KPa]
 - ρ : Densidad del fluido [900 kg/m³]
 - h_m : Cabezal de pérdida de las tuberías [m]
 - h_f : Cabezal de pérdida en accesorios [m]

Reemplazando los valores de las variables involucradas en la ecuación 13 se obtuvo el valor de cabezal requerido de 45 m.

A continuación, el conjunto de ecuaciones presentadas será utilizadas para el cálculo del cabezal neto positivo disponible entregado por el sistema de tuberías.

$$\text{NPSH}_{\text{disponible}} = h_{\text{sp}} + z_2 - z_1 - h_f - h_m - h_{\text{vp}} \quad \text{ec (14)}$$

Cabezal de presión estática aplicada al fluido

$$h_{\text{sp}} = \frac{P_{\text{abs}}}{\rho * g} \quad \text{ec (15)}$$

Cabezal de presión de vapor del líquido a la temperatura de bombeo

$$h_{\text{vp}} = \frac{P_{\text{vfluido}}}{\rho * g} \quad \text{ec (16)}$$

Donde: P_{vfluido} : Presión de vaporización del fluido [KPa]
 P_{abs} : Presión absoluta atmosférica [KPa]

La tabla 2.16 muestra el conjunto de resultados obtenidos de las ecuaciones 12,13 y 14.

Tabla 2.16 Resultados para Cabezal Neto Positivo Disponible

Variable	Valor
h_{vp}	0,03 m
h_{sp}	11,45 m
$\text{NPSH}_{\text{disponible}}$	9,75 m

La figura 2.22 muestra la curva de rendimiento y operación de la bomba donde para un caudal de 40 L/min (2.4 m³/h) a 700 KPa se obtuvo un cabezal neto positivo requerido por la bomba de 7 m.

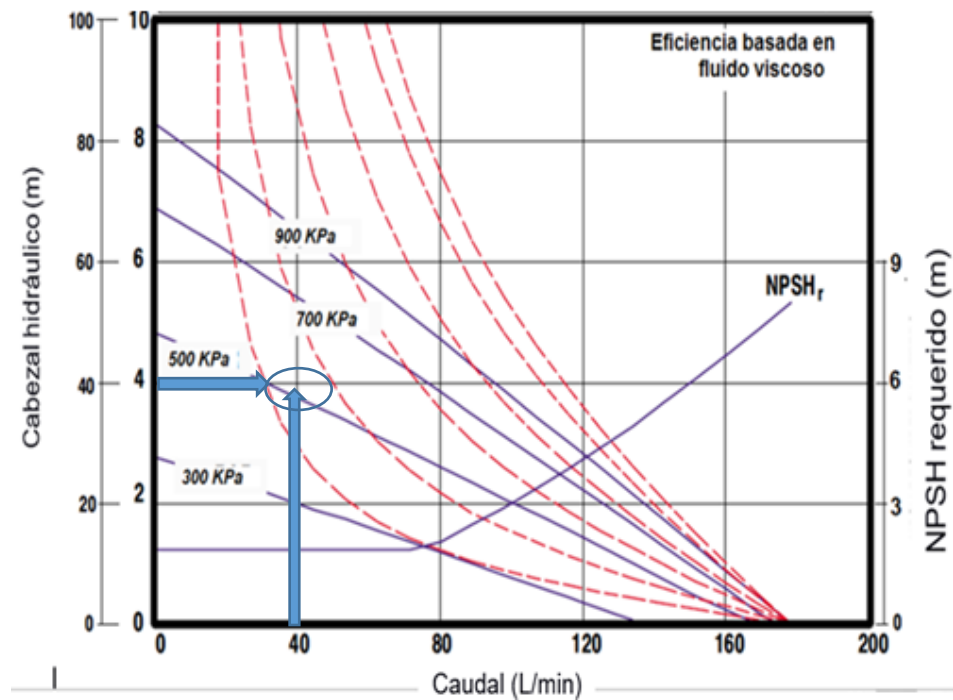


Figura 2.22 Curva de Rendimiento de Bomba.

Fuente: Empresa

Debido a que $NPSH_{disponible} > NPSH_{requerido}$ se asegura que no se suscitará cavitación en el sistema.

Análisis de flexibilidad

Los sistemas de tuberías deben proyectarse de modo que no fallen de forma imprevista. Aun cuando no se han establecido reglas para condiciones de análisis de flexibilidad en tuberías, el código norteamericano para tuberías a presión interna manifiesta la necesidad de un análisis de flexibilidad si no se cumple con las condiciones representadas por la tabla 2.18; caso contrario si se cumple con todos lo establecido se considera que los principios seguidos y dimensiones escogidas durante el diseño serán suficiente para asegurar la integridad del sistema.

La ecuación 17 representa la relación de flexibilidad en sistemas de tuberías dependiendo de sus dimensiones y movimientos admisibles.

$$F = \frac{D*Y}{(L-U)^2} < 0,03 \quad \text{ec (17)}$$

Donde: D: Diámetro externo de tubería [pulg]
 Y: Movimientos admisibles [pulg]
 U: Longitud recta de unión entre cara de tubería [pulg]
 L: Longitud de sistema de tubería [3937 pulg]

Los factores establecidos para tuberías de 2 pulgadas se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 2.17 Factores Utilizados en Tuberías de 2 pulgadas

Dimensión [pulg]	Longitud recta de unión entre cara de tubería [pulg]	Movimientos admisibles [pulg]
1	11/2	1/16
2	11	¼
3	31/2	9/16

Elaboración propia

Este cálculo debe ser realizado necesariamente en unidades de sistema inglés para conservar sus tolerancias, teniendo en cuenta que 1 pulg =25,4 mm.

Tabla 2.18 Criterios de Flexibilidad

CRITERIO	(SI/NO)
El sistema tiene diámetro y largo de tuberías uniforme	SI
El sistema puede ser comparado con uno similar, y este no ha sufrido fallas importantes de deformaciones durante su funcionamiento.	SI
El sistema cumple con la relación: $F = \frac{D*Y}{(L-U)^2} < 0,03$	SI

Elaboración Propia

Debido a que se cumple con todo lo establecido, no se considera necesario realizar un análisis de flexibilidad para el sistema de tubería diseñado,

siendo suficientes para asegurar rigidez los criterios establecidos para diseño.

Selección de soportes

La selección de soporte se realizará a través de la norma ANSI SP-58: Manual para Soportes de Tuberías - Materiales, Diseño, Fabricación, Selección, Aplicación e Instalación, en la cual se determinan los siguientes pasos:

- a) Selección de soporte más económico de entre los disponibles para la aplicación.
- b) Análisis estático de elementos de unión del soporte seleccionado.

Para el sistema de tuberías se usarán soportes rígidos debido al resultado obtenido de flexibilidad. A continuación, la tabla 2.19 muestra la clasificación de soportes según su temperatura de operación.

Tabla 2.19 Soportes para Sistemas de Tubería

TIPO DE TUBERÍAS	TIPO DE SOPORTE SP-58
Sistemas calientes $T > 49^{\circ}\text{C}$	1 y 3-12
Sistemas con temperaturas en el rango de $21^{\circ}\text{C} < T < 49^{\circ}\text{C}$	1,3-12,35-38
Sistemas fríos $T < 21^{\circ}\text{C}$	1,4,6,7,9,10,11,40

Fuente: Norma ANSI SP-58

Elaboración Propia

Por criterio del diseñador para la instalación se utilizarán soportes tipo horquilla (ver figura 2.23) para la sujeción de la tubería a lo largo de su recorrido desde el tanque de almacenamiento hasta el tanque de dotación diario, este soporte será anclado por medio de pernos tipo esparrago a estructuras fijas instaladas en la empresa exclusivas para tuberías de servicio a una altura mínima de 5 m desde el nivel del piso según lo especificado por la norma. La distancia horizontal recomendada entre

centros de soportes para tuberías de DN2 es de 4,5 m (Petróleos de Venezuela, S. A., 1993)

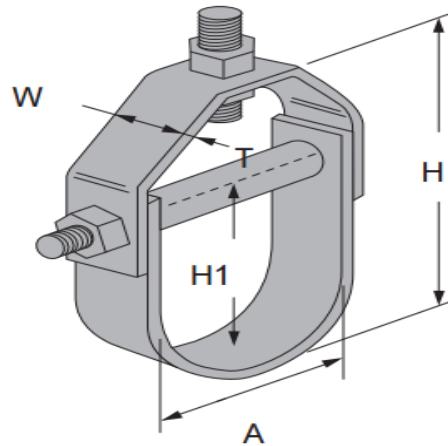


Figura 2.23 Soporte Tipo Horquilla

Las dimensiones estándar del soporte seleccionado para DN2 se muestran a continuación en la tabla 2.20.

Tabla 2.20 Dimensiones de Soporte Tipo Horquilla

Variable	Medida (mm)
A	51
H	89
T	3
W	38
H1	60

Fuente: (AIKINTRUST, 2012)

Elaboración propia

Diseño de perno de sujeción

Un esparrago (ver figura 2.24) es un sujetador sin cabeza, con cuerda en toda su longitud, cuya finalidad es estar atornillado semipermanentemente. Para sistemas de sujeción se realizará el diseño según las medidas de 975UNC (Estándar de Rosca Unificado) con acero inoxidable austenítico, Las fuerzas soportadas por este elemento serán el peso de tubería obtenido

a través de la ecuación 18 y el peso del fluido obtenido a través de la ecuación 15.

$$W_t = G_t * L * g \quad \text{ec (18)}$$

Dónde: W_t : Peso de tubería [N]
 G_t : Peso de tubería [Kg/m]
 g : gravedad [9,81m/s²]

Se tendrán en cuenta para la obtención del peso de la tubería el valor de masa establecido por la ASTM para tubería DN2.

$$W_f = \frac{m' * L_m * g}{v} \quad \text{ec (19)}$$

Donde W_f : Peso del fluido [N]
 m' : Flujo másico de fluido en la tubería [Kg/m]

La ecuación 20 permite obtener la suma total de la carga ejercida en los soportes.

$$W_T = W_t + W_f = 2,44 * 10^3 \text{ N} \quad \text{ec (20)}$$

El conjunto de ecuaciones presentadas a continuación forma parte del proceso iterativo, con el cual se busca obtener medidas indicadas por la ISO en su división de roscas unificadas.

El esfuerzo normal representado por la ecuación 21 dependerá de la carga encontrada y el área de tensión de la varilla.

$$\sigma = \frac{W_T}{A_v} \quad \text{ec (21)}$$

Dónde: σ : esfuerzo normal. [KPa]

A_v : Área de tensión de varilla [m^2]

El área de tensión de la varilla obtenida con la ecuación 18 es considerada un área teórica debido a que esta depende del promedio entre el diámetro exterior y de raíz de la rosca

$$A_v = \frac{\pi}{4} * \left(\frac{d_p + d_r}{2} \right)^2 \quad \text{ec (22)}$$

Dónde: d_p : Diámetro externo de la rosca [m]
 d_r : Diámetro interno de la rosca [m]

El esfuerzo cortante considerado en este cálculo depende del torque generado por la carga aplicada como lo muestra la ecuación 23.

$$\tau = \frac{T * 16}{\pi * d_r^3} \quad \text{ec (23)}$$

Donde τ : Esfuerzo cortante [KPa]
 T : Torque [KPa]
 d_r : diámetro de raíz [m]

La ecuación 24 representa el valor de esfuerzo de Von Mises y es utilizado para el diseño de elementos mecánicos de material dúctil.

$$\sigma' = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \quad \text{ec (24)}$$

Para considerar que se ha obtenido un diseño eficiente es necesario que el valor obtenido de la ecuación 25 sea mayor a 4.

$$n = \frac{S_y}{\sigma'} \quad \text{ec (25)}$$

Donde: σ' : Esfuerzo de Von Misses [KPa]

n: Factor de seguridad

Sy: Esfuerzo de fluencia del material

Reemplazando los valores de la tabla presentada en el APENDICE G se obtiene un valor de $n > 4$ y se asegura que el esparrago M3 x 3 mm es el adecuado para este sistema (ver figura 2.24).

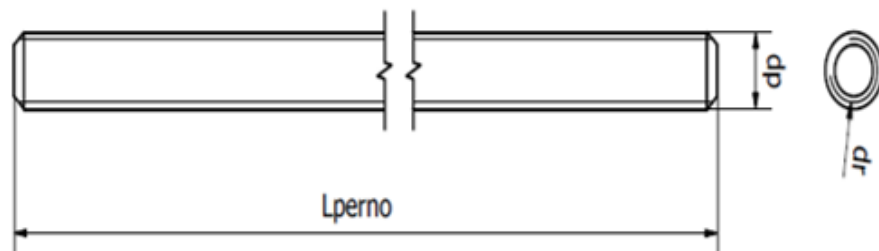


Figura 2.24 Esparrago y sus Dimensiones

La tabla 2.21 presenta a continuación muestra los resultados obtenidos en el diseño de esparrago.

Tabla 2.21 Resultados de Diseño de Espárrago

Variable	Valor
Gt [Kg/m]	0,365
Lm1[m]	25
V[m/s]	0,20
m' [kg/s]	0,6
g [m/s ²]	9,8
Wt [N]	357,70
Wf [N]	2,08*10 ³
n	4

Elaboración propia

Se seleccionará para esta aplicación tuercas autobloqueantes metálicas (ver figura 2.25), las cuales tienen insertado un freno de nailon que hacen que no se muevan ni se aflojen con vibraciones o movimientos.

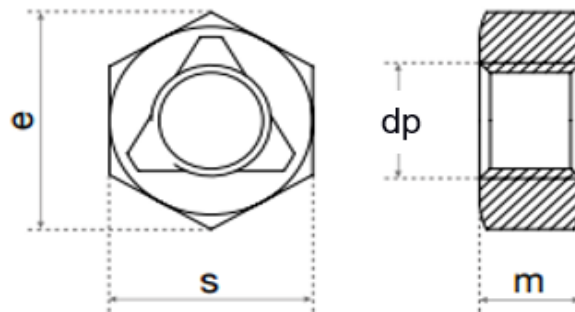


Figura 2.25 Tuerca Autobloqueante DIN 975

Elaboración propia

Las medidas estándar de estos elementos se encuentran detalladas en la ISO 4026 y son presentadas en el APENDICE G.

Uniones roscadas

Los sistemas a presión en la industria alimenticia utilizan diferentes formas de sellado dependiendo de la aplicación y las condiciones de presión y entorno. Para tuberías que transporten fluidos alimenticios se recomienda el uso del estándar británico de rosca paralela (BSPP, por sus siglas en inglés), el cual posee un extremo macho y otro hembra con crestas redondeadas (ver figura 2.26), este tipo de roscas requieren de un anillo plástico apoyado en las superficies de unión para realizar un sellado hermético. Las dimensiones de este tipo de uniones para tubería DN2 se encuentran en la ISO 229/1.

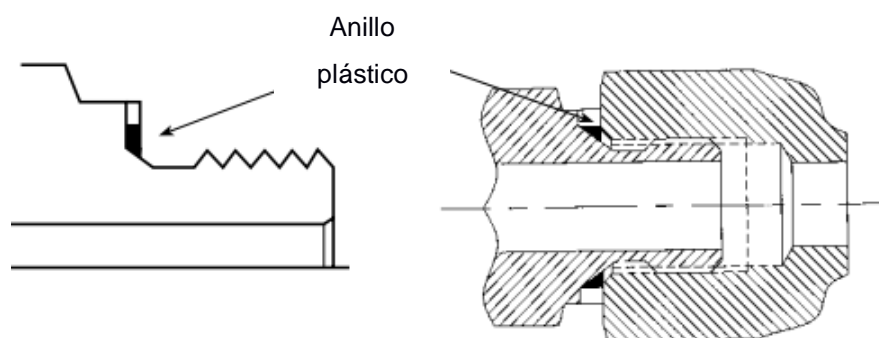


Figura 2.26 Esquema de Unión Roscada BSPP

Finalmente se presentan a continuación los elementos del sistema de tuberías en la tabla 2.22.

Tabla 2.22 Elementos de Sistema de Tubería

ELEMENTO	CANTIDAD	ESPECIFICACIÓN	NORMA
Tubería	18	DN2-10 S	ASTM 269
Codos	7	DN 2 - 10 S	ASME B 16
Válvulas de bola	2	DN 2	ASME B 16
Válvula de retención	1	DN 2	ASME B 16
Soportes	17	Tipo horquilla	ANSI SP-58
Espárrago de sujeción	17	M3 x 3 mm	ISO 4026
Tuerca	34	Autoasegurante M3 x 3 mm	ISO 4026
Roscado BSPP	56	Anillo de hermeticidad plástico.	ISO 229/1

Elaboración propia

2.1.5 Modelado y Simulación

Fluido

La simulación para esta sección se realizará en el programa FLUENT, tendrá como objetivo comparar la longitud de entrada en la cual el fluido adquiere un perfil parabólico y deberá cumplir con el valor teórico obtenido de 1 m.

La necesidad de esta simulación es debido a que durante el recorrido de la tubería existen cambios de dirección en tramos menores o iguales a 1.5 m y se requiere que el fluido se encuentre completamente ordenado antes de completar esta distancia para evitar pérdidas de cabezal innecesarias debido a turbulencias.

Planteamiento

El sistema a simular será un tramo de tubería AISI 316 de 1.2 m con sección circular igual de diámetro interno de la tubería de 2 pulgadas (ver figura 2.27).

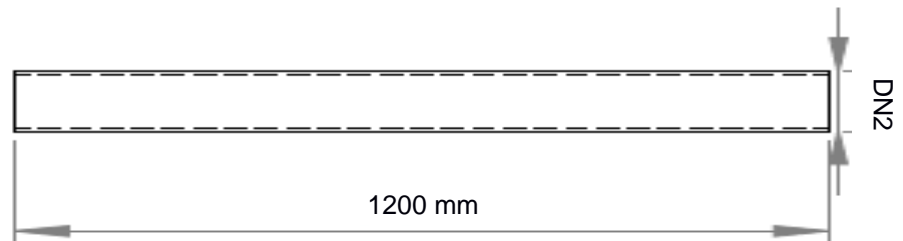


Figura 2.27 Tubería DN2

Elaboración propia

El fluido interno incompresible fue modelado como agua cambiando sus propiedades como viscosidad dinámica 0,045 Kg/ms, temperatura de 20 °C y densidad 900 kg/m-s.

Pre-Procesamiento

El mallado para la tubería se elaboró en Ansys meshing con una estructura de elementos hexaédricos de 8 nodos (ver figura 2.28) para la facilidad de acoplamiento y recorrido del fluido, en este proceso se variaron los valores de paso del mallado hasta obtener una calidad de elemento adecuada de 0,94.

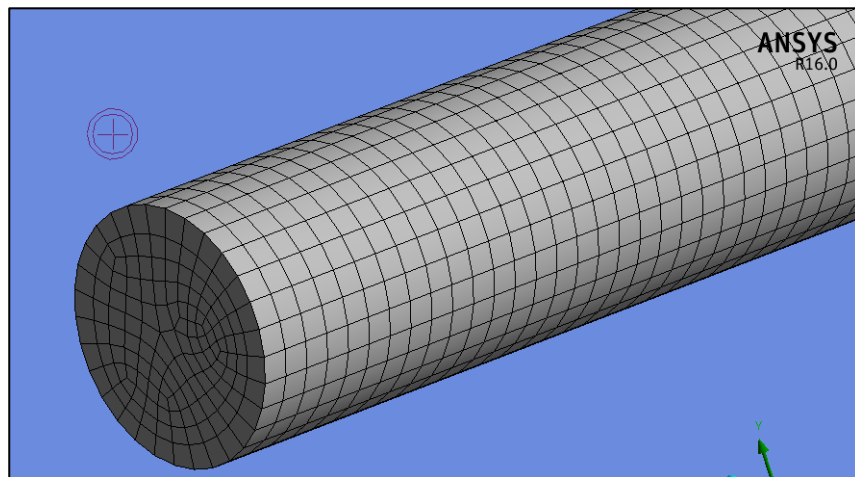


Figura 2.28 Mallado de Fluido

Elaboración Propia

Luego se indicaron las fronteras considerando como volumen de control la geometría ya establecida para posteriormente iniciar el recorrido del fluido estableciendo la velocidad de 0,2828 m/s y las presiones de ingreso (700KPa) y salida (101.1 KPa).

Procesamiento

El resultado expuesto por una escala de colores en la parte superior izquierda de la figura 2.29 representa la velocidad del fluido dentro de la tubería en m/s. Lo conseguido a través de la simulación muestra el desarrollo del perfil de velocidad dentro de la tubería, donde en una distancia de 0,98 m el fluido consigue formar un perfil parabólico de velocidad con 0,531 m/s y posteriormente se consigue la velocidad de 0,28 m/s para el resto de su recorrido, con lo cual se confirman los cálculos realizados y se comprueba que se conseguirá un perfil laminar del fluido dentro de la tubería.

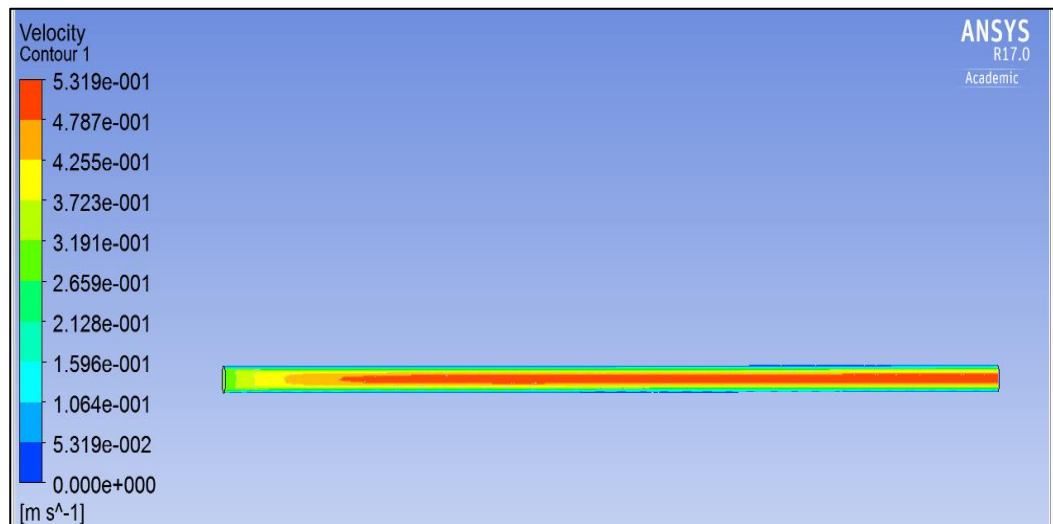


Figura 2.29 Resultados de Simulación

Tubería

La simulación para esta sección se realizará en el programa ANSYS, tendrá como objetivo comprobar el correcto dimensionamiento de la pared de

tubería, en esta se verificará que el desplazamiento generado por la fuerza de presión (700KPa) en la superficie sea uniforme y menor o igual a un 10% de su espesor (0,275 mm).

Planteamiento

Es sistema a simular será un tramo de tubería AISI 316 de 1.5 m de longitud (segmento de menor longitud) con las propiedades mecánicas ya establecidas para este material ($S_y = 129,2$ KPa).

Pre-Procesamiento

El mallado de la tubería se elaboró con una estructura de elementos hexaédricos (ver figura 2.30) para conseguir un mallado uniforme en el espesor de tubería (2,75 mm), discretizando el mallado hasta conseguir una calidad de elementos de 0,90.

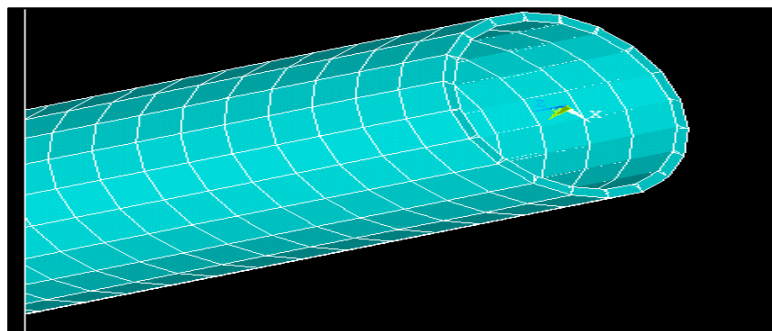


Figura 2.30 Mallado de Tubería

Elaboración Propia

Luego se indicaron los puntos fijos de la tubería en sus dos extremos restringiéndola así de realizar movimientos de rotación y posteriormente se introdujo la presión a la cual sería sometida la tubería en su interior (700KPa).

Procesamiento

El resultado expuesto en escala de colores representa la deformación en los elementos que componen la tubería en mm. Según el resultado

obtenido (ver figura 2.31) la deformación es uniforme a lo largo de la tubería y con un valor de 0.915×10^{-3} mm.



Figura 2.31 Deformación de la Tubería

2.2 Metodología de Diseño para Eje de Caja Reductora

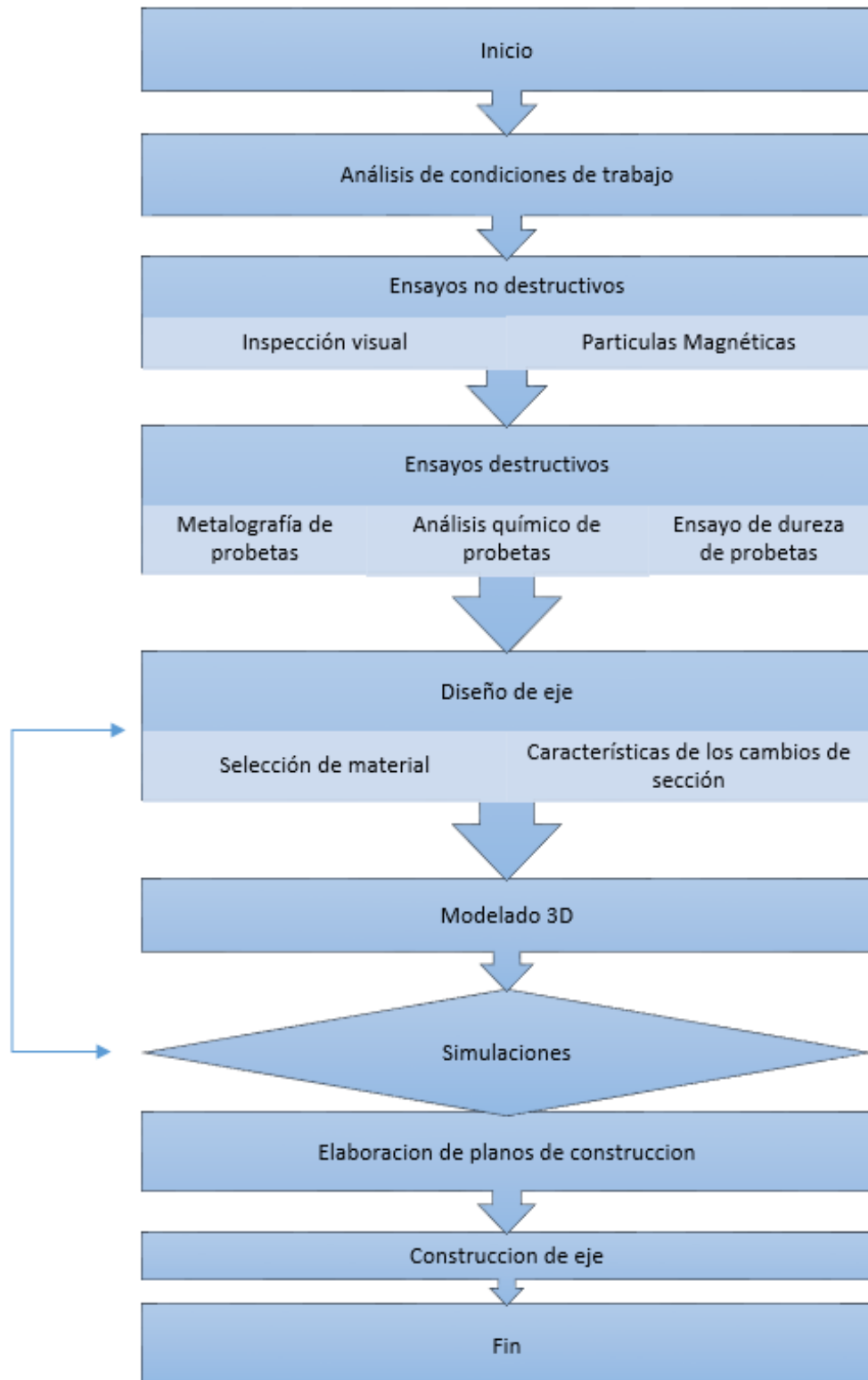


Figura 2.32 Diagrama de Metodología de Diseño para Eje de Caja Reductora.

Elaboración Propia

Un estudio de las condiciones de trabajo del sistema permite una mejor interpretación de los resultados obtenidos del análisis de falla. Se localiza el objeto de estudio y se toma datos como: cargas a las que se somete, velocidad de operación, potencia de entrada del motor, condiciones y características de los rodamientos, lubricación de los componentes, tiempo de operación. Se analiza los parámetros de operación y se compara con los suministrados por el manual del proveedor para determinar posibles falencias.

Se realiza los correspondientes análisis de falla. Se comienza realizando ensayos no destructivos para determinar discontinuidades superficiales y subsuperficiales en el eje. Este análisis provee una idea de cómo fallo el material y las posibles causas del mismo. Entre los análisis que se realizará son: inspección visual, con este análisis se pueden reconocer las fisuras en el área externa del eje y el seguimiento de las marcas de playa en la sección de fractura; ensayo de partículas magnéticas, se puede determinar de forma profunda las fisuras que no se pueden observar a simple vista en el eje sin fracturar.

Habiendo recopilado la mayor cantidad de información con los ensayos no destructivos, se procede a realizar los ensayos destructivos. Estos determinan las características del material y cómo éstas han cambiado con la falla del sistema. Los ensayos que se realizan son: análisis químico, provee la composición química del acero; análisis metalográficos, se estudia la forma granular del material y permite determinar las propiedades físicas y mecánicas del mismo; ensayo de dureza, que provee el valor de dureza rockwell B que se compara con un patrón y sirve para determinar si la resistencia del material es correcta.

El dimensionamiento del eje está limitado por el reductor de velocidad. Al no poder alterar la geometría del eje, se procede a escoger el material adecuado que resista las cargas a las que se encuentra sometido. Se comienza calculando los esfuerzos que afectan al eje y se los suma por medio del

teorema de Von Mises para materiales dúctiles, donde se determinan los esfuerzos principales. Habiendo calculado los esfuerzos máximos, se utiliza la teoría de Goodman para análisis por fatiga, con el cual se realiza una iteración para obtener material y las características de los cambios de sección para evitar concentradores de esfuerzos.

A continuación, se realiza una simulación de elementos finitos del modelo 3D en el programa ANSYS. Este paso asegurará que el diseño se adapte correctamente a los requerimientos del sistema. Como variables de entrada a la simulación están: carga de torsión del motor, peso del material a transportar, cargas ejercidas por rodamientos y engranajes, material y geometría del eje. Lo que se obtiene del programa es: vida útil del material y esfuerzos máximos.

Concluido esto se procede a realizar el prototipo del cuerpo en una máquina de control numérico.

2.2.1 Bases y Consideraciones.

Las bases y condiciones que se establecen para este procedimiento son las siguientes:

- Sistema motor reductor coaxial embridado de 3 trenes de engranaje, motor trifásico de 4 polos.
- Potencia nominal de motor 1.5 KW.
- Velocidad angular de eje 18 rpm.
- Par de salida 802 Nm.
- Temperatura de operación: 0°C
- Carga de 1080 N
- Los ensayos no destructivos como inspección visual y partículas magnéticas deberán estar acorde a las normas ASME sección V artículo 9 y 7 respectivamente.
- Los ensayos destructivos como prueba de dureza y metalografía seguirán el proceso descrito en la norma ASTM 370.

- El material con el que se va a diseñar debe encontrarse en el mercado nacional.
- El dimensionamiento del eje estará limitado por las dimensiones del reductor de velocidad usado en el sistema de producción (figura 1.13).
- Los cambios de sección estarán acorde a la norma ASME B106.1m.

2.2.2 Diseño Conceptual del Sistema de Transmisión de Potencia

La figura 2.33 muestra el diseño conceptual del sistema. El eje se encuentra ubicado al en la sección final del reductor de velocidad, el mismo que esta acoplado a dos rodamientos y a un engranaje helicoidal. Las dimensiones del eje se mantendrán a su diseño original (figura 1.13) pero se le cambiará el material con una resistencia a la fluencia adecuada a su aplicación. Además, se escogerá un radio para los filetes en los cambios de sección para reducir los concentradores de esfuerzos.

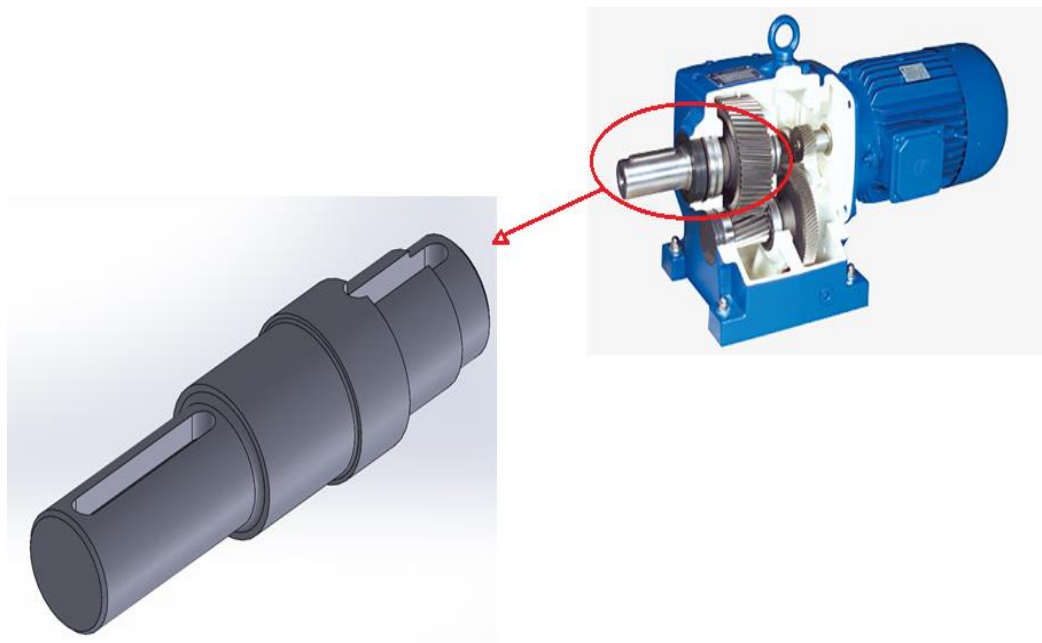


Figura 2.33 Diseño Conceptual para Sistema de Transmisión de Potencia

Elaboración Propia

2.2.3 Análisis de Falla de Eje de Caja Reductora

Inspección Visual

La norma ASME Sección V Capítulo 9: Inspección Visual, establece que para una correcta inspección en elementos con forma cilíndrica se debe conservar un ángulo de 30 grados y a una distancia mínima de 24 pulgadas respecto al punto de análisis (ASME, 1998).

Por medio de la inspección visual se pudo apreciar que: Existe cambios bruscos de sección a lo largo del eje como se observa en la figura 2.34, debido a forma estos se consideran concentradores de esfuerzos.



Figura 2.34 Vista del Eje de Caja Reductora

Elaboración propia

Los chaveteros no presentan microfisuras o daños por sobrecarga de esfuerzos.

El eje presenta una capa de óxido en la superficie propia del material expuestos por largos periodos de tiempo a un ambiente agresivo que causa una corrosión generalizada.

La figura 2.35 suministrada por el manual ASM, volumen 11: Análisis de Falla y prevención (ASM, 2002) será usada como guía para identificar el tipo de falla posee el eje.

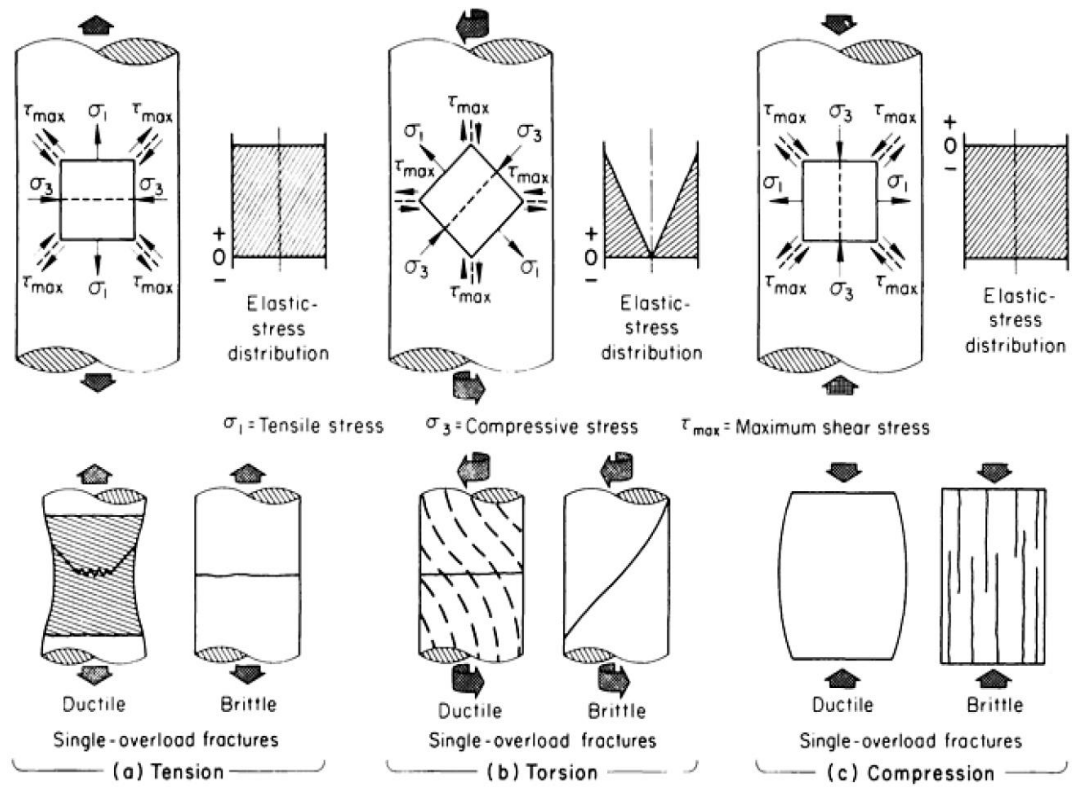


Figura 2.35 Esquema de Falla por Torsión

Fuente (ASM, 2002)

Como se puede observar en la figura 2.36, la falla corresponde a una fractura dúctil por esfuerzo de torsión (ver figura 2.35b). Esta información se utilizará posteriormente para el diseño del eje.



Figura 2.36 Vista Frontal de la Fractura del Eje

Elaboración propia

La figura 1.13 muestra las marcas de playa de la fractura dúctil por esfuerzo de torsión en el eje, similares a las presentadas en la figura 2.37 para un eje que falló por fatiga, proporcionada por el Volumen 10 de análisis de falla y prevención de la ASM (ASM, 2000).

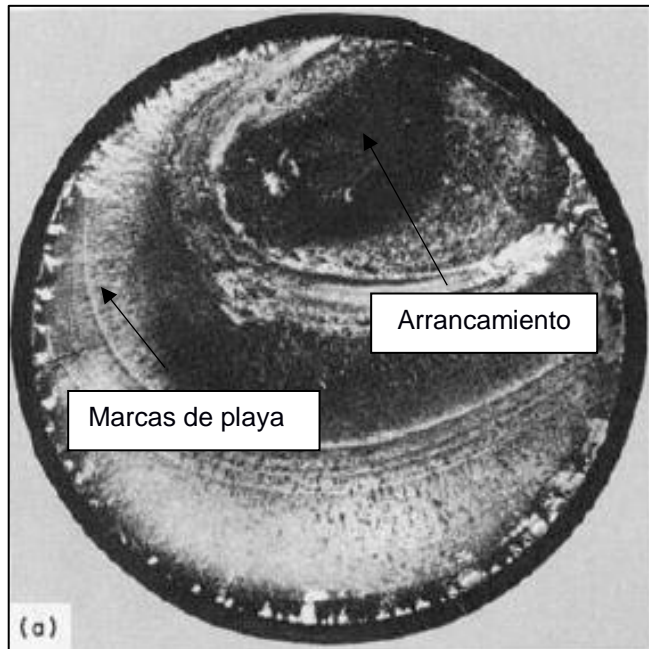


Figura 2.37 Falla por Fatiga de un Eje Sometido a Torsión

Fuente (ASM, 2002)

Recopilada toda la información por medio de la inspección visual, se procede a realizar un análisis subsuperficial para apreciar las discontinuidades que no se observan a simple vista.

Ensayo por Partículas Magnéticas

Previo a ejecutar el ensayo por partículas magnéticas se comprobó que el material poseía características ferromagnéticas mediante el contacto de un imán. El procedimiento seguido para el ensayo de partículas magnéticas es el especificado por la norma ASME sección V, Artículo 7: Examen por partículas magnéticas. En este procedimiento se indujo un campo electromagnético a la pieza por medio de un yugo magnético para que se magnetice la pieza mientras se esparcen las partículas fluorescentes por medio de un pulverizador, donde las discontinuidades del eje causarán una

fuga de campo y la acumulación de partículas en el borde de las fallas. Posteriormente con la aplicación de luz ultravioleta producida por una linterna se pudieron apreciar las fallas con un color verde intenso (ASME, 1998).

El análisis del eje sin fractura revela la presencia de fisuras en el último cambio de sección, lugar donde se registraron las fallas de los ejes con problemas (ver figura 2.38).



Figura 2.38 Ensayo de Partículas Magnéticas en el Eje Antes de Fallar.

Elaboración Propia

El análisis de la sección transversal de la falla del eje en la muestra fracturada, figura 2.39, revela grietas producidas por sobrecarga al momento de la fractura. También se pueden apreciar las marcas de playa que comprueban el tipo de falla es producido por fatiga.

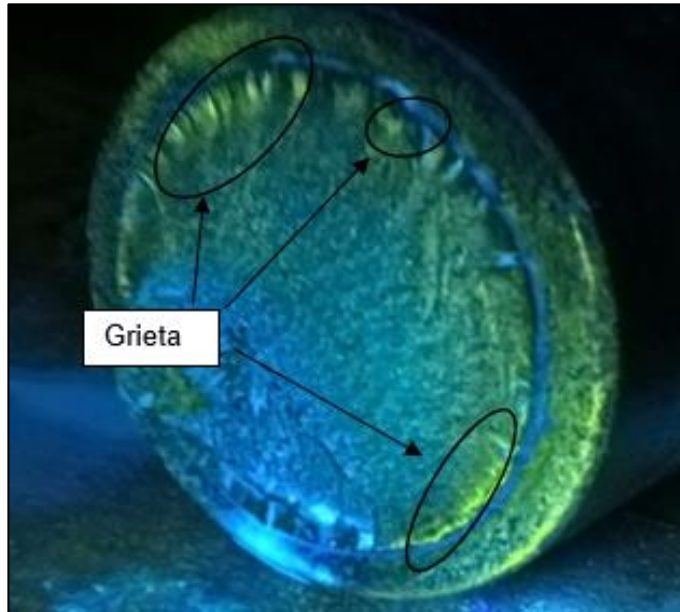


Figura 2.39 Ensayo de Partículas Magnéticas en la Sección Transversal de la Falla del Eje

Elaboración Propia

Análisis Químico

Por medio del análisis químico se obtiene el porcentaje de elementos aleantes en el material que identifican el tipo de acero al compararlo con las especificaciones del manual de la ASM, Metals Handbook Volumen 1.

La tabla 2.23 muestra los porcentajes de elementos obtenidos del análisis químico del eje fracturado.

Tabla 2.23 Composición Química del Eje de caja reductora

ELEMENTO	C	Mn	P	S
PORCENTAJE (%)	0,492	0,701	0,016	0,02

Elaboración Propia

La lista de materiales presentes en la tabla 2.24 son aquellos que cumplen con los datos obtenidos del análisis químico.

Tabla 2.24 Composición Química de Aceros de Medio Contenido de Carbono

MATERIAL SAE - AISI	PORCENTAJE DE ELEMENTOS ALEANTES			
	C	Mn	P _{max}	S _{max}
1045	0,43 – 0,50	0,60 – 0,90	0,040	0,050
1046	0,43 – 0,50	0,70 – 1,00	0,040	0,050
1050	0,48 – 0,55	0,60 – 0,90	0,040	0,050
1053	0,48 – 0,55	0,70 – 1,00	0,040	0,050

Elaboración Propia

Fuente: (ASM, 2000)

Se concluye que el material utilizado es un acero con medio contenido de carbono, el mismo que es recomendado por el manual del fabricante de la caja reductora. Por medio de un análisis metalográfico se obtendrá más información acerca de cómo se fabricó el material para determinar el material específico que se utilizó.

Ensayo metalográfico:

Se comienza realizando un corte de la muestra a analizar, en este caso se desea obtener la microestructura del eje sin fallar. Al ser un acero de medio contenido de carbono, se preparó la muestra para este ensayo mediante un corte transversal con un disco abrasivo. Durante el seccionamiento la metalografía es más susceptible a ser alterada debido a deformaciones y exceso de temperatura. Se desbasta la probeta por medio de un esmeril de manera que se consiga una superficie plana para analizar, es importante que la muestra se mantenga a una temperatura regulada durante este proceso (ASM, 2000).

Se rectifica la superficie con papeles de carburo de silicio. Debido a que se realizó un corte en la superficie, se requiere un papel de lija de 100 seguido por 250, 400, 600, 800 y 1200. La muestra debe sujetarse con los dedos lo más cerca posible del papel para utilizar una presión moderadamente pesada y moverla hacia adelante y hacia atrás. La superficie de la muestra debe ser analizada periódicamente para determinar cuándo se han quitado

las rayas de la lija anterior. Una vez eliminada las rayas del lijado anterior, se debe girar la muestra 90°. En el caso de que se presenten más de una cara en la superficie, se debe cambiar el punto de presión. Se pule la superficie con pasta de aluminio de 0.3 μ , con este paso se desea eliminar las zonas que fueron alteradas durante el seccionamiento de la probeta. Durante el pulido, la superficie debe permanecer húmeda y debe limpiarse con algodón y agua.

Las muestras fueron atacadas químicamente con HNO₃ al 3% (ASTM, 1994). El uso del nital permite un mayor contraste entre las redes de perlita y cementita, permitiendo ver los bordes de grano (ASM, 2000). La superficie del material se observa con un microscopio óptico y se le compara con un patrón mostrado en la figura 2.40 el cual es proporcionado por la norma ASM. La figura 2.40 corresponde a una barra de acero AISI 1045 normalizado por austenización a 843°C y enfriado con aire a 482 °C durante dos horas. Presenta granos con perlita laminar (zonas oscuras) y ferrita (zonas blancas).

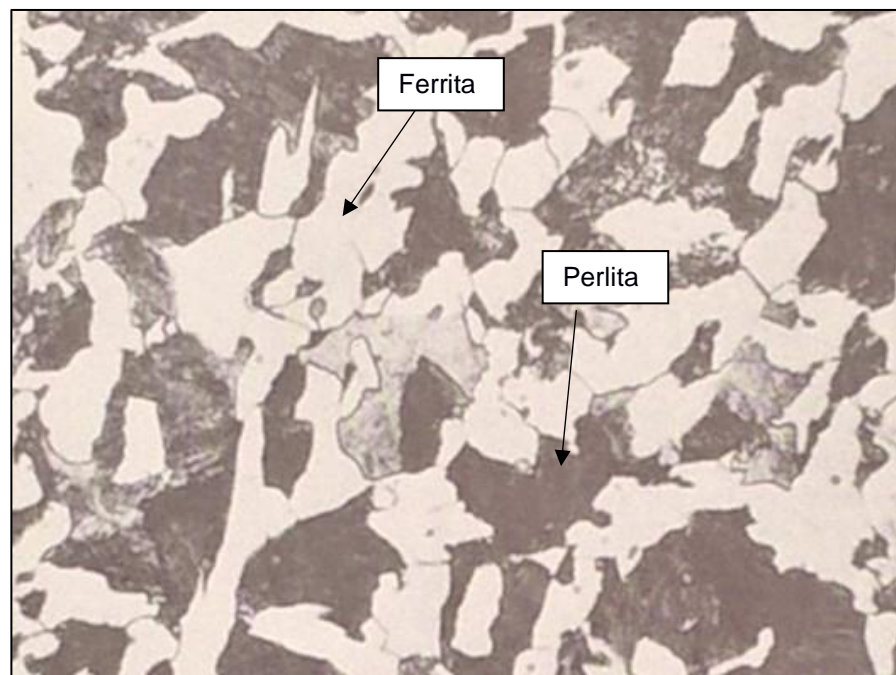


Figura 2.40 Metalografía de Acero AISI 1045, Nital – 500X

Fuente: (ASM, 1972)

El ensayo metalográfico, presentado en la figura 2.41, revela la presencia de perlita laminar fina y de ferrita grande, un acero hipoeutectoide. La presencia de granos ligeramente grandes indica un trabajado mecánico en caliente sin tratamiento térmico posterior.

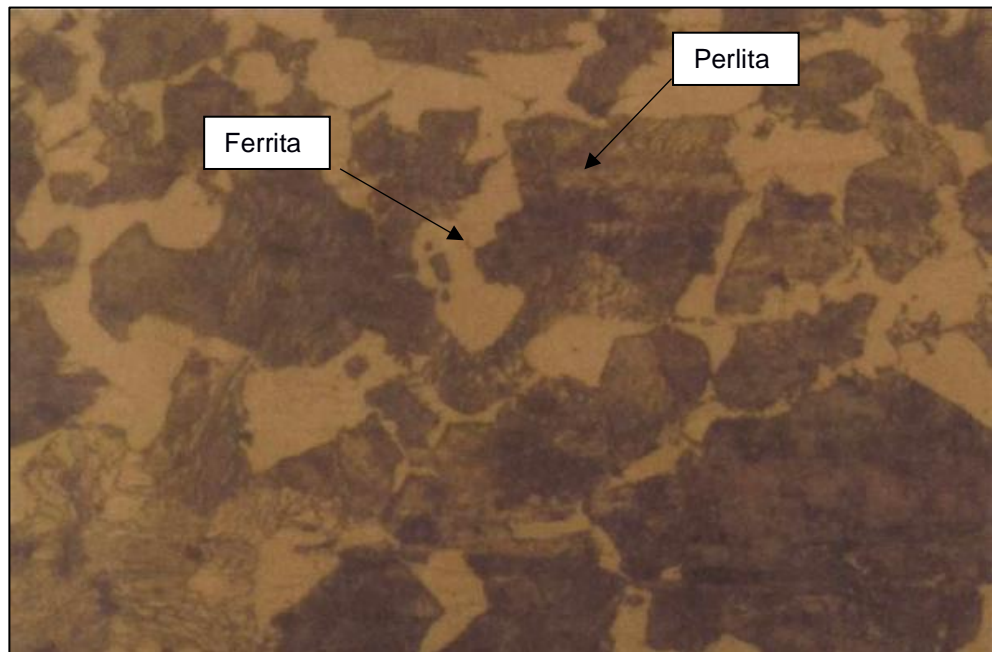


Figura 2.41 Metalografía del Eje de Caja Reductora, Nital – 500X

Elaboración Propia

Conociendo el tipo de microestructura del material, se procede a estimar el porcentaje de perlita y ferrita del acero mediante la regla de los segmentos inversos, utilizando la cantidad de carbono obtenido del análisis químico, asumiendo enfriamiento lento.

Para el cálculo de porcentaje de perlita:

$$\%Perlita = \frac{\%C - 0,0218}{0,77 - 0,0218} * 100 \quad \text{ec (26)}$$

Para el cálculo de porcentaje de ferrita:

$$\%Ferrita = \frac{0,77-\%C}{0,77-0,0218} * 100 \quad \text{ec (27)}$$

Reemplazando el %C con el obtenido de la tabla 2.23 se obtiene un %Perlita de 62,84 % y un %Ferrita de 37,15%. Además, se puede calcular un valor aproximado de la carga de rotura (R) por medio de la ecuación:

$$R = \%Ferrita * 300 + \%Perlita * 800 \quad \text{ec (28)}$$

Obteniendo un valor de 609 MPa. Se puede concluir por medio de la metalografía que el material con el que se fabricó el eje es un AISI 1045 trabajado a altas temperaturas sin recibir algún tratamiento térmico.

Ensayo de Dureza

Por medio de este ensayo se obtendrá la dureza del material, esta propiedad permitirá estimar el tipo de fabricación del acero y se podrá determinar sus propiedades mecánicas por medio del manual de la ASM, Metals Handbook Volumen 1.

Antes de realizar el ensayo rockwell se debe determinar qué tipo de penetrador se usará, mediante el análisis químico se determinó los posibles materiales del eje cuyas durezas son menores de 200 por lo que se utilizará un asentador de bola de acero de diámetro 1.5875 mm y la dureza a determinar será de tipo rockwell B.

El ensayo se realiza acorde a la norma ASTM 370 – E18. Se comienza realizando una precarga de 10 kgf para luego realizar una carga de 150 kgf, considerando la distancia que penetra el indentador en el material se determina la dureza del eje. Las condiciones del ensayo son 21°C y 65 % de humedad relativa. Se realiza el ensayo tres veces en tres zonas del material y se calcula el promedio de los resultados, obteniendo una dureza de 82 HRB.

Se puede establecer que el material del eje es un acero AISI 1045 rolado en caliente cuya dureza es de 84 HRB (ASM, 2000).

2.2.4 Diseño de Eje.

El diseño del eje consiste en la selección del material adecuado y la verificación de un correcto radio de redondeo para los cambios de sección. La selección del material es un proceso complejo e iterativo, donde se comenzará evaluando el material con el que fallo el eje y se calificará el mismo tipo de material, pero con un proceso mecánico adicional.

El material seleccionado debe soportar riesgos de: esfuerzos excesivos, fatiga, concentradores de esfuerzos, cargas inesperadas, pandeo y deformaciones. Además, el material debe tener un buen acabado superficial, su materia prima sea de una calidad adecuada, utilizado para la transmisión de potencia y compatible con el resto del sistema.

Los cambios de sección deben estar acorde a la norma ASME B106.1, estos consideran la longitud y el diámetro del eje para determinar el redondeo mínimo que debe tener la pieza para que no haya acumulación excesiva de líneas de esfuerzos.

Para el diseño de eje, se comienza dibujando el diagrama de cuerpo libre. En este se reemplaza los componentes que posee el eje por las fuerzas que produce. En este caso, el eje se puede dividir en 4 secciones según el tipo de elemento con el que interactúa: A, un rodamiento de bola; B, engranaje de dientes helicoidales; C, rodamiento de bola; y D un engranaje de transmisión (ver APENDICE I).

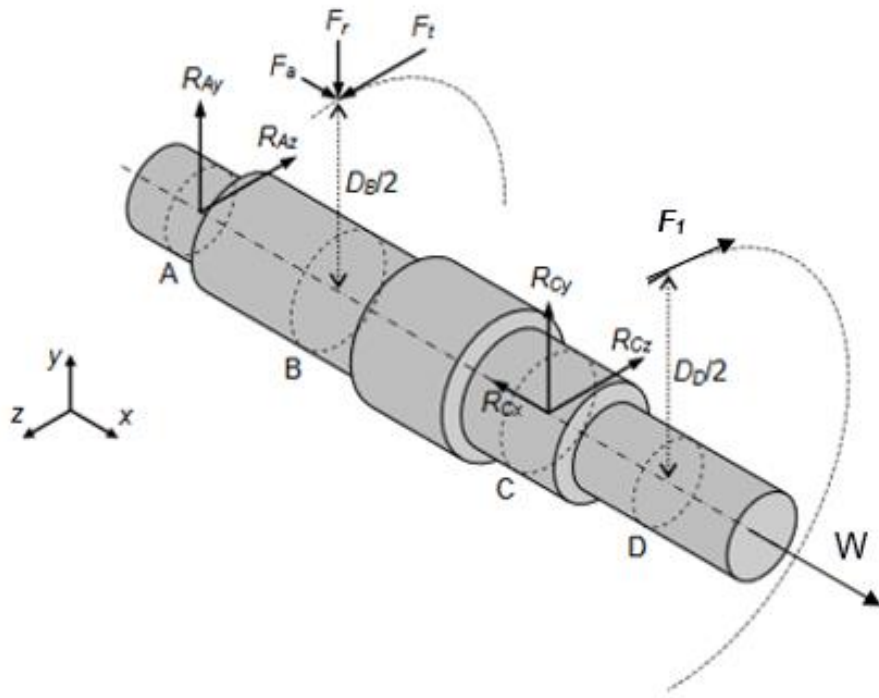


Figura 2.42 Diagrama de Cuerpo Libre de Eje de Transmisión de Potencia

Elaboración Propia

En la figura 2.42 se ilustra las fuerzas de los componentes con su respectiva dirección.

- Donde:
- W: Carga que soporta el eje [1080N]
 - F_t : Componente tangencial de la fuerza producida por el engranaje helicoidal [N]
 - F_a : Componente axial de la fuerza producida por el engranaje helicoidal [N]
 - F_r : Componente radial de la fuerza producida por el engranaje helicoidal [N]
 - F_1 : Fuerza transmitida a la rueda dentada en D [N]
 - R_{Ay} : Componente Y de la reacción del rodamiento en A [N]
 - R_{Az} : Componente Z de la reacción del rodamiento en A [N]
 - R_{Cx} : Componente X de la reacción del rodamiento en C [N]
 - R_{Cy} : Componente Y de la reacción del rodamiento en C [N]
 - R_{Cz} : Componente Z de la reacción del rodamiento en C [N]

Los datos iniciales para resolver el problema se encuentran tabulados en la tabla 2.25.

Tabla 2.25 Datos Conocidos del Sistema

Pot, Potencia nominal del motor [W]	N, Velocidad angular del eje [rpm]	W, Carga [N]	D _B , Diámetro del engranaje helicoidal [mm]	D _D , Diámetro de engranaje de transmisión [mm]
1500	18	1080	133	205

Elaboración propia

Fuente: (Nord, 2016)

Cálculo de par de torsión

Debido a que el sistema tiene una sola entrada (B) y una sola salida (D) de potencia, se calcula un solo par de torsión, T, el cual depende de la potencia y de la frecuencia de giro:

$$T = \frac{60Pot}{2\pi N} \quad \text{ec (29)}$$

Dónde: Pot: Potencia nominal del motor [W]

N: Velocidad angular del motor [rpm]

Usando los valores de la tabla 2.25 en la ecuación 29 se obtiene un par torsor de 802 Nm

Cálculo de fuerzas externas

En la sección B, rueda dentada, la única componente que produce torsión en el árbol es la fuerza tangencial F_t , por lo que la fuerza se puede determinar:

$$F_t = \frac{2T}{D_B} \quad \text{ec (30)}$$

Dónde: T: Par de torsión [Nm]

D_B : Diámetro del engranaje helicoidal [m]

Se sabe que para engranajes helicoidales de estas características que la componente axial y radial se calculan por medio de las siguientes relaciones:

Para la fuerza axial:

$$F_a = 0.20F_t \quad \text{ec (31)}$$

Para la fuerza radial:

$$F_r = 0.27F_t \quad \text{ec (32)}$$

En el engranaje de transmisión, sección D, el par de torsión es producido por las fuerzas F_1 por lo que se calcula su magnitud de la misma forma que en el engranaje helicoidal:

$$F_1 = \frac{2T}{D_D} \quad \text{ec (33)}$$

Donde: D_D : Diámetro del engranaje [m]

Las cargas externas calculadas están tabuladas en la tabla 2.26:

Tabla 2.26 Fuerzas Producidas por Elementos de Transmisión

T [Nm]	F_t [N]	F_r [N]	F_a [N]	F_1 [N]
795,77	11966,54	3230,97	2393,31	7763,66

Elaboración propia

Cálculo de las reacciones

Para determinar las reacciones producida por los cojinetes, se procede a realizar los diagramas de cuerpo libre para las fuerzas axiales, transversales y momentos flectores en planos de interés:

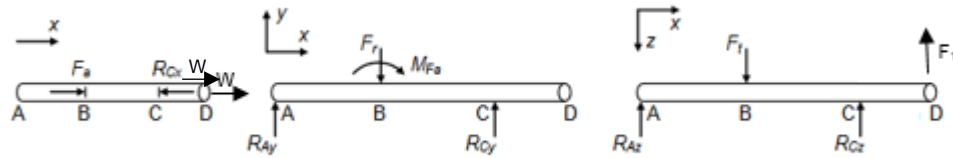


Figura 2.43 Diagrama de Cuerpo Libre en los Planos xy y xz

Elaboración Propia

Nótese que al desplazar la fuerza F_a del engranaje al centro del eje, se produce un momento flector M_{Fa} en el plano xy .

Se plantea las ecuaciones de equilibrio dinámico, las cuales consisten en sumatoria de fuerzas en las direcciones x , y y z , y la sumatoria de momentos en los planos xy y xz y se obtiene los datos tabulados en la tabla 2.27:

Tabla 2.27 Fuerzas Producidos por Rodamientos y Momento Producido por el Engranaje Helicoidal

M_{Fa} [Nm]	R_{Ay} [N]	R_{Az} [N]	R_{Cx} [N]	R_{Cy} [N]	R_{Cz} [N]
159,15	656,99	2123,19	3473,31	2573,98	17607,01

Elaboración Propia

Diagrama de fuerza cortante, momento flector y carga axial

Con los resultados obtenidos anteriormente se procede a construir los diagramas de fuerza cortante, momento flector y de carga axial, con el fin de obtener la sección donde se concentran la mayor cantidad de esfuerzos. Se diseñará solo en la sección crítica debido a que es mas concervativa, es decir si el material resiste en estas secciones podra soportar las demas cargas en las otras.

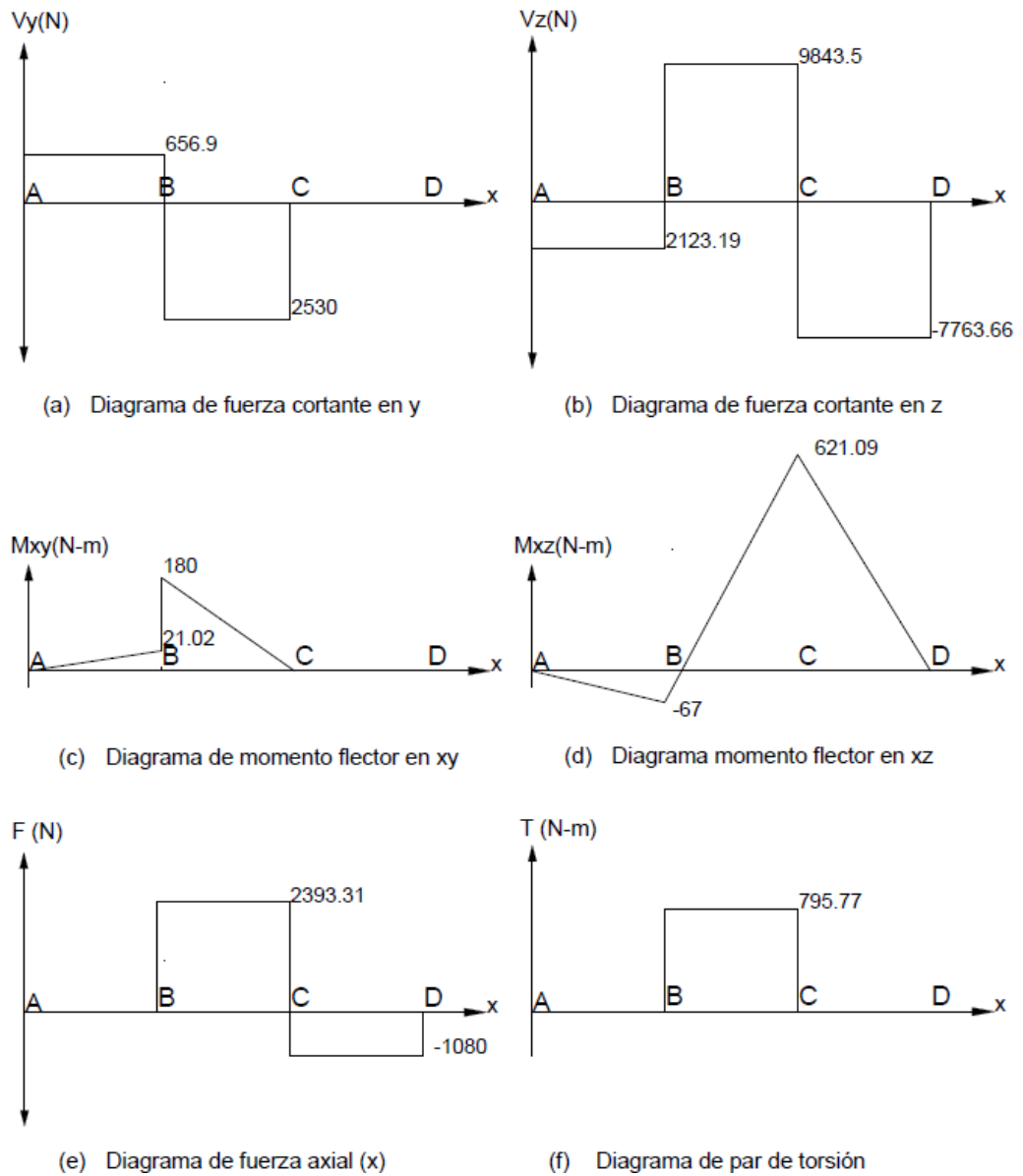


Figura 2.44 Diagramas de Fuerza Cortante, Momento Flector y Carga Axial

Elaboración Propia

Se conoce por medio de la figura 2.44 que el punto crítico que se analizará es el C, donde se obtuvieron los siguientes datos:

Tabla 2.28 Cargas Máximas del Eje, Producidas en la Sección C

M_c , Momento Flector en C [Nm]	T_c , Par torsor en C [Nm]	F_c , Fuerza axial en C [Nm]	c, radio en C [mm]
689	795.77	2393.31	20

Elaboración Propia

Reemplazando los valores de la tabla 2.28 se obtienen los diferentes esfuerzos de flexión, torsión y axial, que se producen en el eje, donde:

Esfuerzo de flexión:

$$\sigma_{\text{flexion}} = \frac{Mc}{I} \quad \text{ec (34)}$$

Esfuerzo por torsión:

$$\tau_{\text{torsion}} = \frac{Tc}{J} \quad \text{ec (35)}$$

Esfuerzo axial:

$$\sigma_{\text{Axial}} = \frac{F}{A} \quad \text{ec (36)}$$

Donde: σ_{flexion} : Esfuerzo producido por flexión en C [N/m²]

τ_{torsion} : Esfuerzo de torsión en C [N/m²]

σ_{Axial} : Esfuerzo de tensión en C [N/m²]

M: Momento flector en C [Nm]

T: Par torsor en C [Nm]

F: Fuerza axial en C [N]

c: Radio del eje donde se estudia los esfuerzos [m]

I: Momento de inercia de la sección transversal en C [m⁴]

J: Momento polar de la sección transversal en C [m⁴]

A: Área transversal en C [m²]

A través de la teoría de Von Mises se calculan los esfuerzos principales en C, los resultados obtenidos se presentan en la tabla 2.29.

Tabla 2.29 Esfuerzos Producidos en la Sección C

$\sigma_{flexion}$, Esfuerzo de flexión en C [MPa] (10^6)	$\tau_{torsion}$, Esfuerzo de torsión en C [MPa] (10^6)	σ_{Axial} , esfuerzo de tensión en C [MPa]	σ_{max} , esfuerzo máximo en C [MPa]
109,65	63,32	1,904	156

Elaboración Propia

Considerando el sistema como ciclo repetido, debido a que las fuerzas máximas ocurren al momento de operación, los esfuerzos mínimos serán 0 MPa en el caso esfuerzo cortante; pero para el caso de esfuerzos de tensión el valor máximo es la suma del esfuerzo de flexión y el esfuerzo de tensión, y el valor mínimo es similar al máximo, sin considerar la carga. Se calcula las componentes de los esfuerzos alternativos y medios usando las ecuaciones:

Esfuerzo alternativo de tensión:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad \text{ec (37)}$$

Esfuerzo medio de tensión:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad \text{ec (38)}$$

Esfuerzo alternativo cortante:

$$\tau_a = \frac{\tau_{max} - \tau_{min}}{2} \quad \text{ec (39)}$$

Esfuerzo medio cortante:

$$\tau_m = \frac{\tau_{max} + \tau_{min}}{2} \quad \text{ec (40)}$$

Donde: σ_{max} : Esfuerzo máximo sobre eje [111,56 MPa]

σ_{min} : Esfuerzo mínimo sobre eje [109,65 MPa]

- τ_{\max} : Esfuerzo máximo sobre eje [63.32 MPa]
- τ_{\min} : Esfuerzo mínimo sobre eje [0 MPa]
- σ_a : Esfuerzo de tensión alternativo sobre eje [MPa]
- σ_m : Esfuerzo de tensión medio sobre eje [MPa]
- τ_a : Esfuerzo cortante alternativo sobre eje [MPa]
- τ_m : Esfuerzo cortante medio sobre eje [MPa]

Debido al cambio de sección de la pieza los valores de esfuerzos alternativos y medios deben ser multiplicados por un factor de corrección, usando un radio de 4 mm de filete para la reducción de área se obtiene los valores presentados en la tabla 2.30

Tabla 2.30 Esfuerzos Medios y Alternativos Corregidos por el Concentrador de Esfuerzos

σ_m [Pa]	σ_a [Pa]	τ_m [Pa]	τ_a [Pa]
161397846	1389512,14	40955485,24	40955485,2

Elaboración Propia

De acuerdo al principio de Von Mises para esfuerzos principales se procede a determinar los máximos esfuerzos medios y alternativos usando los datos de la tabla 2.30

Esfuerzo alternativo principal:

$$\sigma'_a = \sqrt{\sigma_a^2 + 3\tau_a^2} \quad \text{ec (41)}$$

Esfuerzo medio principal:

$$\sigma'_m = \sqrt{\sigma_m^2 + 3\tau_m^2} \quad \text{ec (42)}$$

Dónde: σ'_a : Esfuerzo máximo alternativo sobre eje [MPa]

σ'_m : Esfuerzo máximo medio sobre eje [MPa]

Antes de determinar el correspondiente factor de seguridad del eje se procede a calcular el límite de resistencia a la fatiga, S_e por medio de la ecuación 43. Este se calcula multiplicando el límite a la resistencia a la fatiga por los coeficientes de corrección de confiabilidad, temperatura, superficie, carga y tamaño (Norton, 2009).

$$S_e = C_{\text{conf}} \cdot C_{\text{temp}} \cdot C_{\text{sup}} \cdot C_{\text{carga}} \cdot C_{\text{tam}} \cdot S_e \quad \text{ec (43)}$$

Dónde: S_e : Límite de resistencia a la fatiga corregido [MPa]

C_{conf} : Coeficiente de confiabilidad [0,814]

C_{temp} : Coeficiente de temperatura [1]

C_{sup} : Coeficiente de superficie [0,78]

C_{carga} : Coeficiente de carga [0,7]

$C_{\text{tamaño}}$: Coeficiente de tamaño [0,83134]

S_e' : Límite de resistencia a la fatiga. [MPa]

Con la obtención del esfuerzo alternativo, medio y el límite de resistencia a la fatiga corregido, se procede a determinar el material óptimo del eje que tenga un factor de seguridad apropiado, mayor a uno. Para ello se usa la norma ASM Volumen 1 Propiedades y selección: Hierros, aceros, y aleaciones de alto rendimiento (ASM, 2000).

$$\eta_f = \frac{1}{\frac{\sigma'_a + \sigma'_m}{S_e + S_{ut}}} \quad \text{ec (44)}$$

Donde: η_f : Factor de seguridad a la fatiga

La tabla 2.31 muestra los materiales que se podrían utilizar con su resistencia mecánica y su factor de seguridad a la fatiga respectivamente. Se analiza el material con el que fallo el sistema, acero AISI 1045 laminado en caliente; y el mismo material, pero con un trabajado en frío.

Tabla 2.31 Factores de Seguridad para Diferentes Materiales de Acero Usados para Transmisión de Potencia

Material	Sy, resistencia a la fluencia por tensión [MPa]	Sut, resistencia ultima a la tensión [MPa]	η , factor de seguridad estático	η_f , factor de seguridad a la fatiga
AISI 1045 laminado en caliente	310	565	2,02	0,87
AISI 1045 estirado en frío	550	585	3,66	1,31

Elaboración Propia

2.2.5 Modelado y Simulación

La metodología para el análisis con elementos finitos se divide en cuatro pasos: Planteamiento, se interpreta lo que ocurre en la realidad para poder idealizarlo en el programa; Pre procesamiento, se realiza un modelo geométrico en base a lo idealizado y se discretiza para posteriormente colocar las cargas en el sistema y las condiciones de frontera; procesamiento, se ejecuta la simulación para determina la solución del sistema; y el post-procesamiento, donde se analiza y verifica los resultados de manera que se pueda determinar su validación.

Planteamiento

El sistema a simular es un eje con 4 pasos y 2 orificios, la cual tiene su sección crítica en el punto C como se muestra en la figura 2.45. El material del elemento es AISI 1045 estirado en frío, cuyos valores de resistencia mecánica están tabulados en la tabla 2.31. El sistema se lo considera como un modelo isotrópico que opera a una temperatura de 0°C.

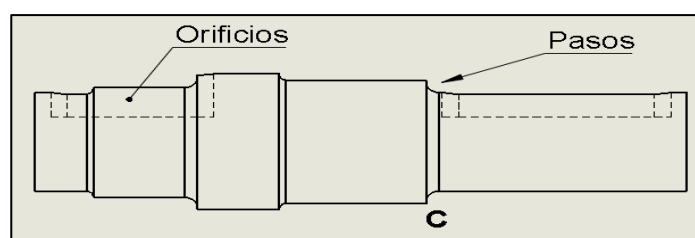


Figura 2.45 Esquema del Sistema

Elaboración Propia

Pre-Procesamiento

Se realiza un modelo geométrico en base al esquema del sistema. Se fue variando el tipo de estructura para mallado entre: hexaédricos y tetraédricos; se obtiene una mejor calidad con poca cantidad de elementos una estructura tetraédrica de diez nodos y se utiliza elementos más pequeños en los pasos, esto permite que los elementos se acoplen suavemente en las curvas de los pasos, figura 2.46.

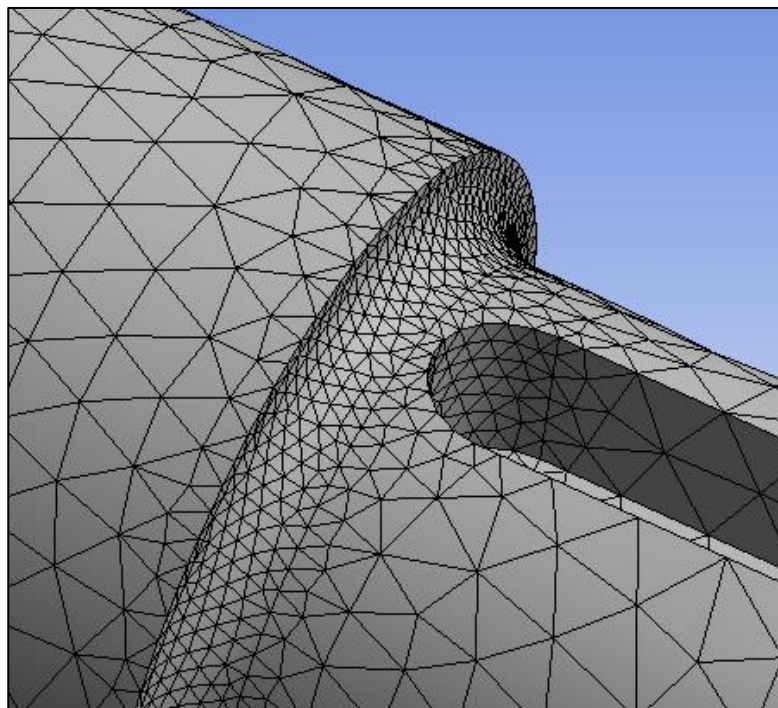


Figura 2.46 Acercamiento del Mallado en los Cambios de Sección

Elaboración Propia

Después de realizar el mallado se procede a colocar las cargas externas y los soportes como se ilustra en la figura 2.42 y sus magnitudes están tabuladas en la tabla 2.26 y tabla 2.27. Este sistema cuenta fuerzas radiales, tangenciales y axiales producidos por el engranaje helicoidal, las cuales se colocan con fuerza remota como componentes en donde estaría ubicado la periferia del engrane; la fuerza transmitida, se la ubica con fuerza remota usando el diámetro de la rueda de transmisión; la carga que soporta el eje, colocado en el área transversal al final del eje; y dos soportes en A

y C, los cuales tienen restricciones de movimiento en la dirección radial y el soporte en C tiene restricción axial.

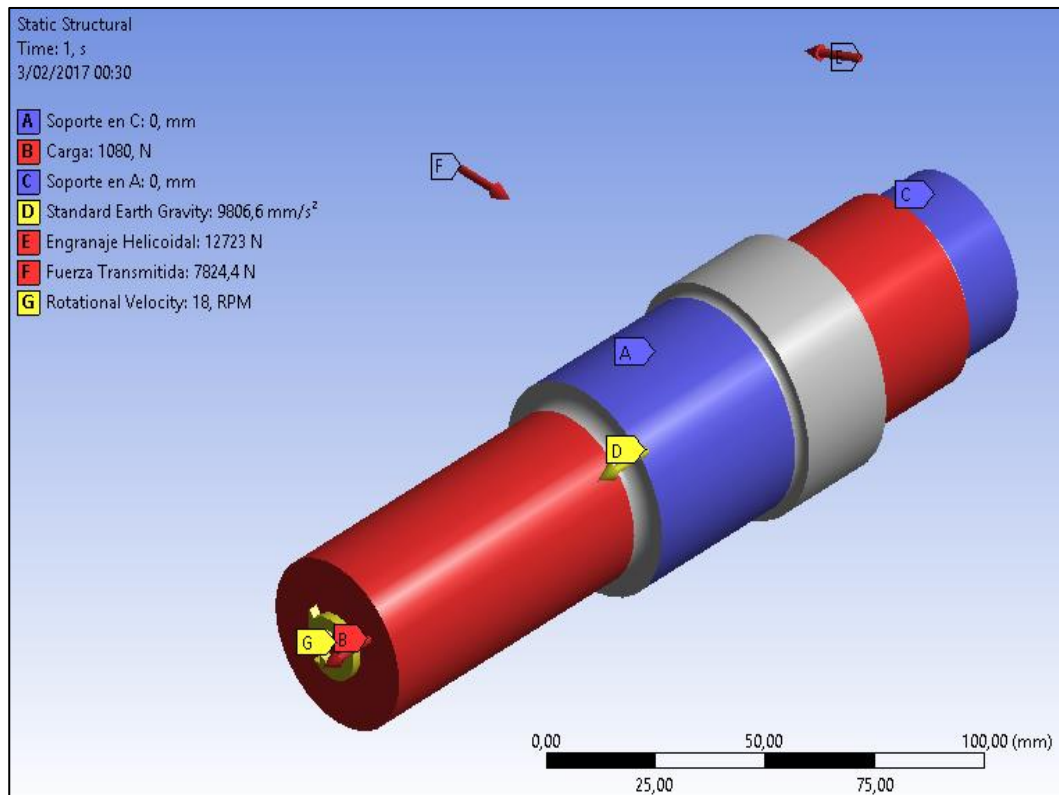


Figura 2.47 Cargas en el Eje

Elaboración Propia

Procesamiento

Los resultados presentados por el programa fueron: esfuerzos principales de Von Mises y factor de seguridad estático.

En la figura 2.48 se presenta la simulación de los esfuerzos principales del eje, los cuales presentan máximos valores en el paso de la sección C, con un valor de 141,36 MPa, el cual es muy cercano al valor obtenido analíticamente, tabulado en la tabla 2.29.

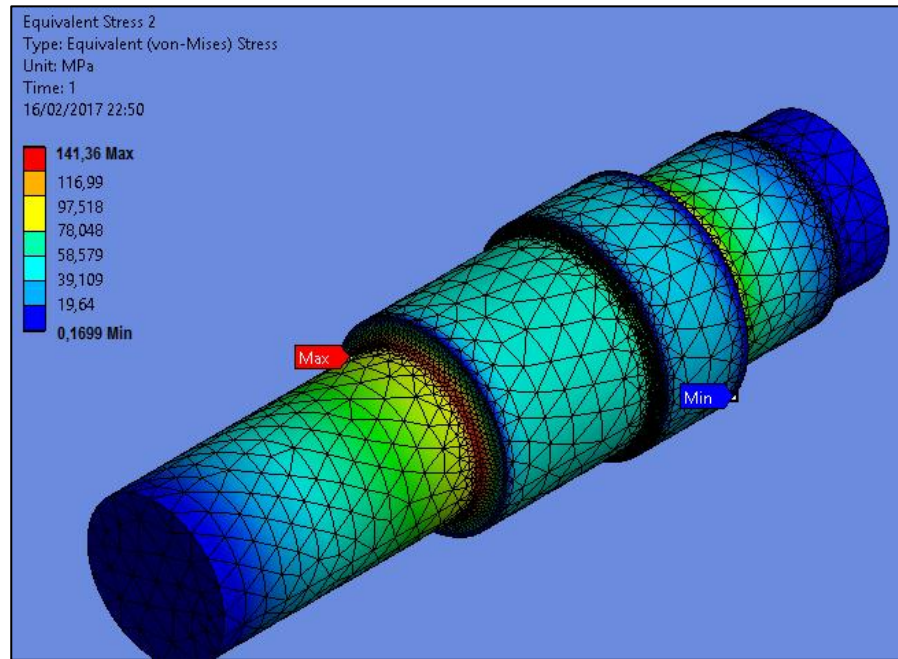


Figura 2.48 Simulación Static Structural, $\sigma_{\max} = 141,36$ MPa

Fuente: ANSYS
Elaboración propia

Finalmente se simula el factor de seguridad del sistema (figura 2.49) para compararlo con los resultados analíticos.

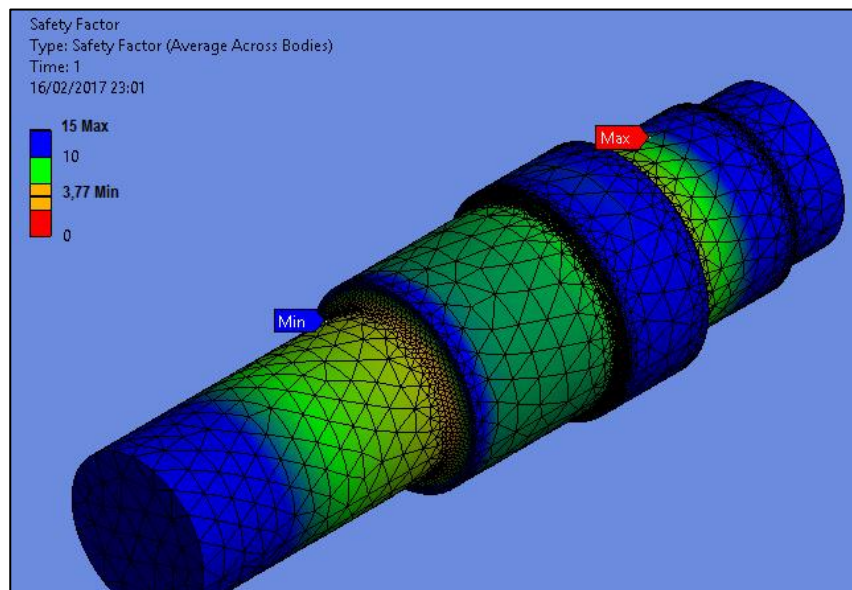


Figura 2.49 Simulación Stactic Structural, $N_{\min}=3,77$

Fuente: ANSYS
Elaboración propia

CAPÍTULO 3

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 Sistema de Tuberías

3.1.1 Análisis de Falla del Material

Inspección Visual

La inspección visual realizada reveló la superficie opaca y rugosa del material de tubería, así como también un promedio aritmético de perfil de rugosidad $Ra > 1\mu\text{m}$ (figura 2.5), este resultado fue atribuido al erróneo proceso de fabricación y dio paso a la selección del acabado superficial como la causa inicial de la corrosión por picadura ya que las crestas y surcos superficiales originaban un proceso autocatalítico en el material de tubería debido a la acumulación de fluido y en consecuencia un crecimiento acelerado de las picaduras dado por continua interrupción de la formación de capa pasivante de óxido de cromo.

También se pudo apreciar la forma circular de las picaduras y su mecanismo de penetración por todo el espesor de la tubería (figura 1.1), este resultado condujo a un estudio más profundo de corrosión por picadura debido a que no se consideran regulares en acero inoxidable.

Caracterización de picadura

La caracterización de las picaduras realizada a través de la norma ASTM G46, se encuentra basada directamente en estudios de probabilidades que relacionan los valores encontrados de densidad, tamaño y profundidad para estimar la masa de material perdida debido a la corrosión. La relación entre las características de la picadura (profundidad y área) y la probabilidad de obtener una serie de picaduras del mismo tamaño (densidad), se muestran en la figura 3.1.

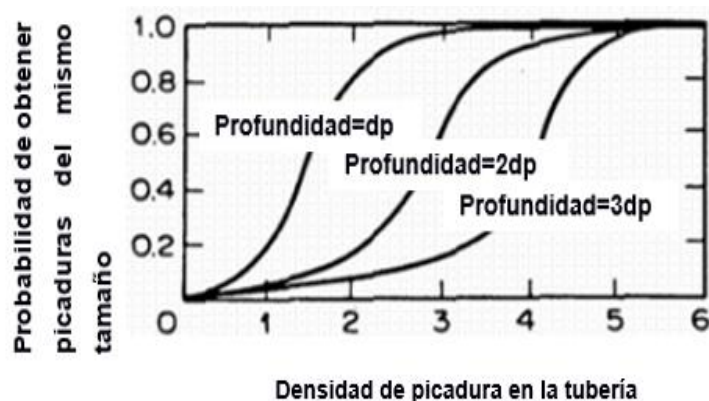


Figura 3.1 Análisis Probabilístico de Picadura Según su Profundidad.

A continuación, la tabla 3.1 presenta el resumen de los resultados obtenidos de la caracterización de las picaduras en el sistema de tuberías.

Tabla 3.1 Valores Resultado de Caracterización de Picaduras Corrosivas

VARIABLE	VALOR
Densidad de picadura	2.5×10^3 picaduras/m ²
Área de picadura (Ap)	12,566 mm ²
Profundidad	3,9 mm
Diámetro de picadura (dp)	4 mm

Elaboración Propia

Introduciendo los valores de la tabla 3.1 en la relación de la figura 3.1 se obtiene una probabilidad de 0,9 y se asegura que estos resultados obtenidos se aproximan a los reales con un margen de aceptación de un 90%, demostrando a veracidad que la picadura es de carácter agresivo.

Velocidad de picadura

La velocidad de corrosión de 1,3 mm/año para la tubería se encuentra 30 veces por encima de lo sugerido teóricamente por la ASM (0,045 mm/año) y es considerado como un valor exagerado en acero inoxidable. Para efecto de análisis se muestra a continuación una gráfica de los datos experimentales encontrados por la International Journal of Basic and

Applied Science en su publicación “The Effect of pH and Temperature on Corrosion Rate in Stainless Steel 316”, sobre los efectos de la acidez de los fluidos en aceros inoxidables y revela una relación del porcentaje de pérdida de espesor del material con respecto a pH ácidos (ver figura 3.2).

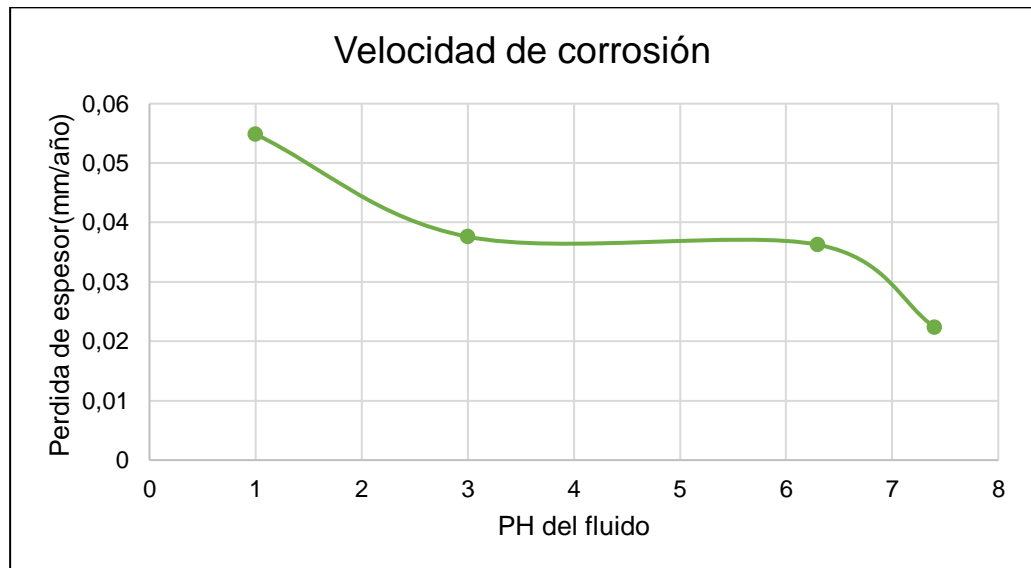


Figura 3.2 Pérdida de Espesor vs PH

Elaboración Propia

A partir de este gráfico se puede apreciar que para un pH de 3 se obtiene un porcentaje de pérdida menor al 0,04 mm/año y se corrobora lo sugerido por ASM. La coincidencia de estos resultados lleva a pensar que el material de tubería no posee las propiedades anticorrosivas propias de un AISI 316 debido ya que no cumple con lo expuesto por dos fuentes de alto nivel de credulidad.

Análisis químico

Para el análisis de los resultados se comparará inicialmente de forma numérica los resultados de análisis químico y PREN obtenidos para el material de tubería con los de un acero AISI 316 (ver tabla 3.2). Posteriormente se comparan los resultados de elementos aleantes del material de tubería con los valores que brindan las características

anticorrosivas a los aceros inoxidable y el valor de PREN establecidos por la BSSA.

El análisis químico realizado mostró porcentajes de elementos aleantes distintos para el material de tubería y AISI 316, estos valores fueron los esperados debido a los daños registrados en el material de tubería; de la misma forma los valores de PREN mostrados para el material de tubería y AISI 316 revelan que el valor de resistencia a la corrosión por picadura del material de tubería se encuentra muy por debajo de lo obtenido para el acero AISI 316.

Tabla 3.2 Resumen de Resultados de Análisis Químico

Valor	AISI 316	MATERIAL DE TUBERÍA
%C	0.07	0.066
%Cr	17	15
%Mn	2.0	0.81
%Ni	11	8.1
%S	0.03	0.004
%P	0.045	0.038
%Mo	2.5	1
PREN	26	15,6

Elaboración propia

Análogamente, la figura 3.3 muestra los rangos máximos y mínimos de los elementos que otorgan las propiedades anticorrosivas al acero tipo AISI 316 y los valores PREN respectivos. Este valor sirve como medida de comparación para determinar qué tan eficiente es su protección contra la picadura con respecto a otros materiales. A medida que los elementos aleantes mostrados en la tabla 2.4 son menores, el PREN será un valor menor; por lo que es importante mantener estas proporciones de elementos aleantes al fabricar un acero inoxidable.

Grade	Type	Cr	Mo	N	PREN
Ferritics					
1.4003	-	10.5-12.5	NS	0.030 max	10.5-12.5
1.4016	430	16.0-18.0	NS	NS	16.0-18.0
1.4113	434	16.0-18.0	0.9-1.4	NS	19.0-22.6
1.4509	441	17.5-18.5	NS	NS	17.5-18.5
1.4521	444	17.0-20.0	1.8-2.5	0.030max	23.0-28.7
Austenitics					
1.4301	304	17.5-19.5	NS	0.11max	17.5-20.8
1.4311	304LN	17.5-19.5	NS	0.12-0.22	19.4-23.0
1.4401/4	316/316L	16.5-18.5	2.0-2.5	0.11max	23.1-28.5
1.4435	316L (2.5% min Mo)	17.0-19.0	2.5-3.0	0.11max	25.3-30.7
1.4406	316LN	16.5-18.5	2.0-2.5	0.12-0.22	25.0-30.3
1.4539	904L	19.0-21.0	4.0-5.0	0.15max	32.2-39.9
1.4563	Sanicro 28	24.0-26.0	3.0-4.0	0.11max	35.9-43.0
1.4547	254SMO	19.5-20.5	6.0-7.0	0.18-0.25	42.2-47.6
1.4529	1925hMo	19.0-21.0	6.0-7.0	0.15-0.25	41.2-48.1
1.4565	4565S	24.0-26.0	4.0-5.0	0.30-0.60	42.0-52.1
Duplex					
1.4062 ¹	2202	22.0	0.4	0.20	26.5
1.4162	2101LDX	21.0-22.0	0.1-0.8	0.20-0.25	24.5-28.6
1.4362	SAF 2304	22.0-24.0	0.1-0.6	0.05-0.20	23.1-29.2
1.4462	SAF 2205	21.0-23.0	2.5-3.5	0.10-0.22	30.8-38.1
1.4410 ²	SAF 2507 ²	24.0-26.0	3.0-4.0	0.24-0.35	> 40 ²
1.4501 ²	Zeron 100 ²	24.0-26.0	3.0-4.0	0.20-0.30	> 40 ²
1.4507 ²	Ferrinox 255 ²	24.0-26.0	3.0-4.0	0.20-0.30	> 40 ²

Figura 3.3 Valores de PREN de la BSSA para Aceros Inoxidables

Al analizar las características del material de tubería, estas no coinciden con los rangos establecidos. La notable deficiencia de los elementos Cr y Mo, así como también su valor de PREN sugieren como ya se lo esperaba que este material no es apto para aplicaciones que requieran una significativa resistencia a la corrosión.

Metalografía

Para efectos de interpretación los resultados, se realizará la comparación de la microestructura obtenida para el material de tubería con la microestructura de un acero AISI 316.

La figura 2.9 muestra microestructura obtenida para el acero de tubería atacada con solución de Picral con un aumento de 100X, en esta se puede apreciar granos de austenita alargados, inclusiones elongadas de carburos y partículas dispersas de cromo.

Asimismo, la figura 3.4 presenta la microestructura regular de un acero inoxidable AISI 316 atacada con solución Picral con un aumento de 500X, en esta se puede apreciar el grano austenítico uniformemente distribuido con granos equiaxiados y partículas dispersas de carburos.

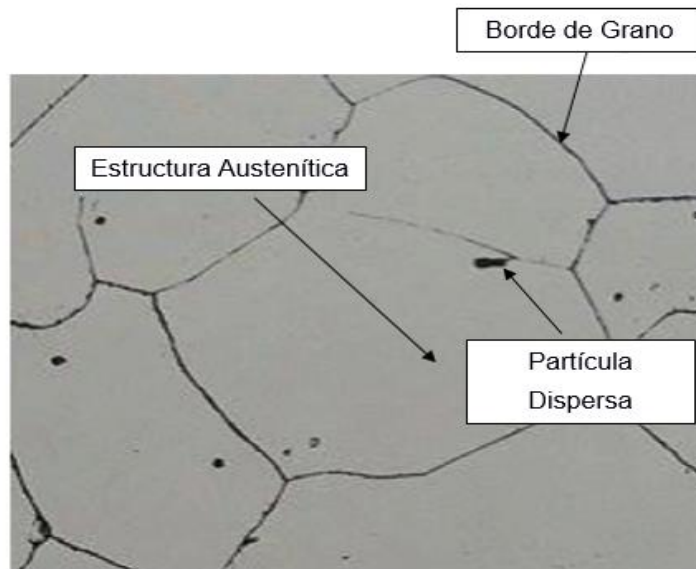


Figura 3.4 Microestructura Regular de un Acero Inoxidable AISI 316, Picral – 500X

Fuente: (ASM, 1972)

Un resumen de las características del material de tubería y el acero AISI 316 se presenta en la tabla 3.3, con la cual se pretende realizar un análisis comparativo entre ambos materiales.

Tabla 3.3 Características de Materiales de Tubería y AISI 316

CARACTERÍSTICA	AISI 316	MATERIAL DE TUBERÍA
Grano austenítico	Equiaxiados	Disparejos
Inclusiones	No presentes	Precipitaciones de carburos
Partículas dispersas	Partículas dispersas de cromo	Partículas dispersas de cromo
Tamaño de grano	72 um	287 um

Fuente: Propia

Como se ha expuesto anteriormente los defectos de partículas dispersas de cromo e inclusiones de azufre son consecuencia de las reacciones de los elementos aleantes de los materiales, independiente de su estructura cristalina.

En lo que respecta a la comparación de granos entre ambos materiales se tomará en cuenta su forma y tamaño. Al examinar las microestructuras se puede visualizar la diferencia entre los granos de los materiales donde, para el acero AISI 316 se aprecian granos austeníticos equiaxiados y para el material de tubería se observan granos alargados, de la misma forma se encuentra diferencias de tamaños de grano en una proporción de 4:1. Estos resultados son atribuidos a diferentes formas de procesamiento (ver APENDICE D) (Rosenberg, 1942).

Con todo lo expuesto se puede asegurar que el material de tubería contiene una alta concentración de defectos que pueden hacer al material susceptibles a fallas por corrosión.

Dureza

Como se sabe el porcentaje de carbono en la mayoría de los materiales juega un papel importante con respecto a su valor de dureza. Para los aceros inoxidable el porcentaje de carbono no influye tanto en esta propiedad porque se encuentra en proporciones bajas de 0,06%

El valor de dureza obtenido a través del ensayo de dureza Rockwell C muestra que el valor de dureza del material de tubería se encuentra dentro del rango mínimo considerado para aceros inoxidable (ver tabla 2.7). La figura 3.5 muestra como los elementos aleantes favorecen el aumento de dureza en aceros.

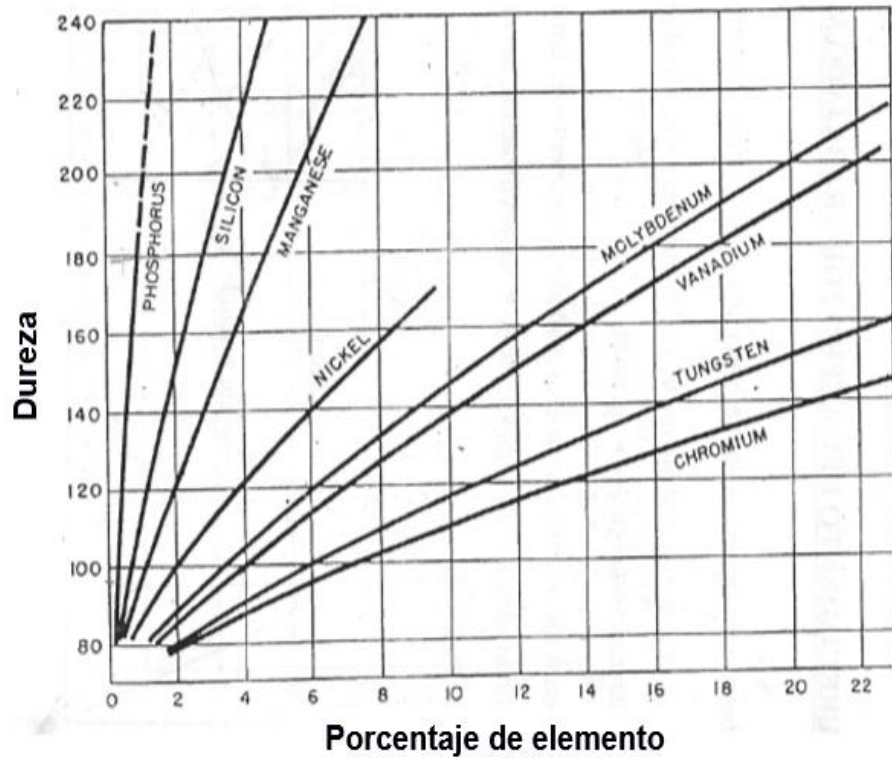


Figura 3.5 Dureza Debido a Elementos Aleantes

3.1.2 Análisis de Diseño del Sistema de Tuberías

Velocidad del fluido

Para el diseño del sistema de tuberías se consideraron inicialmente las características corrosivas del material y las reglas básicas de los fluidos, posteriormente se realizaron una serie de operaciones matemáticas hasta conseguir que el fluido en el interior de la tubería cumpla con una velocidad $< 0,25$ m/s.

La tabla 2.10 muestra los resultados obtenidos de velocidad del fluido dentro de la tubería. Se considera que los resultados obtenidos cumplen con lo requerido ya que la velocidad del fluido está por debajo del límite establecido y el número de Reynolds conseguido a través de esta le otorga al fluido un flujo laminar con perfil de velocidad parabólico.

Adicionalmente, se requería que el fluido tenga un recorrido lento para mantener un funcionamiento permanente del sistema, es decir que la bomba de proceso trabaje de manera continua y no se generen sobreconsumo eléctrico debido al encendido y apagado del sistema de potencia.

Dimensiones de tubería

Los valores obtenidos en el proceso de dimensionamiento de tubería se presentan en la tabla 3.4.

Tabla 3.4 Dimensiones para Tubería

D	60,3 mm
d	54,8 mm
ti	2,77 mm

Fuente: Propia

El valor del diámetro interior se encuentra directamente relacionado con el valor de caudal establecido ($0,0007 \text{ m}^3/\text{s}$) y las medidas estándar disponibles en el mercado para tuberías de acero inoxidable AISI 316 sin costura, donde tras un proceso iterativo se obtuvo el valor del diámetro interno aceptable para la tubería.

Posteriormente el valor de espesor de tubería fue encontrado con el procedimiento dictado por la norma ASME B31.3, considerando la presión interna que ésta soportaría y los efectos corrosivos a los que estaría expuesto. Consecuentemente el valor del diámetro exterior se lo encontró a través de catálogos de venta nacional de tuberías.

Dentro de la industria, el diseño de sistemas de tuberías para transporte de fluidos es un proceso que sigue normas y códigos, debido a que éstos ofrecen una gama de opciones es normal que no se pueda estar completamente seguro de lo que se selecciona, para este diseño se corroborarán las dimensiones obtenidas a través del Manual Estándar de Sistemas de Tuberías Hidráulicas, este documento recopila décadas de

experiencia en sistemas de tuberías con uniones roscadas para diversas aplicaciones (GS-Hydro, 2012). La tabla 3.5 presenta las condiciones máximas a las que podrá ser expuesta una tubería de acero inoxidable AISI 316, DN2-10S.

Tabla 3.5 Parámetros Máximos de Exposición para Tuberías DN2-10S

PARÁMETRO	VALOR
Presión máxima	750 KPa
Deformación máxima	35%
Velocidad máxima de fluido	5 m/s
Rango de temperatura	(-20) -(60) °C

Fuente: (GS-Hydro, 2012)

De la misma forma la tabla 3.6 presenta las condiciones máximas a las cuales será expuesto el sistema de tuberías diseñado.

Tabla 3.6 Parámetros de Exposición para Sistema de Tubería

PARÁMETRO	VALOR
Presión máxima	700 KPa
Deformación máxima	10%
Velocidad máxima de fluido	0,20 m/s
Rango de temperatura	(25) -(30) °C

Fuente: (GS-Hydro, 2012)

Al comparar los valores de la tabla 3.5 y la tabla 3.6, se puede apreciar que los parámetros de diseño para el sistema de tubería se encuentran dentro del rango establecido y se comprueba que las dimensiones seleccionadas para la tubería resistirán a las condiciones internas del fluido y al ambiente externo al cual será expuesto.

Dimensionamiento de codo

En este proceso se seleccionaron codos con cambios de dirección suave, y para el dimensionamiento de los mismos se consideró el procedimiento establecido por la norma ASME B16.11 para codos de 90° roscados, radio largo y sin costura, esta norma cubre capacidades de presión y de temperatura, dimensiones, tolerancias y requisitos de material para acero y aleaciones.

La tabla 2.13 muestra las dimensiones normadas para codos de radio largo a través de la norma ASME B16.11

Para comprobar los valores para codos de 90°, la figura 3.6 muestra la naturaleza del comportamiento del factor de pérdidas en secciones curvas de 90° deducido por varios autores, se puede apreciar que este parámetro no está completamente definido, pero, las curvas indican que K_b tiene un valor mínimo cuando E/d se encuentra entre 3 y 5 (K.H.Benji, 1938).

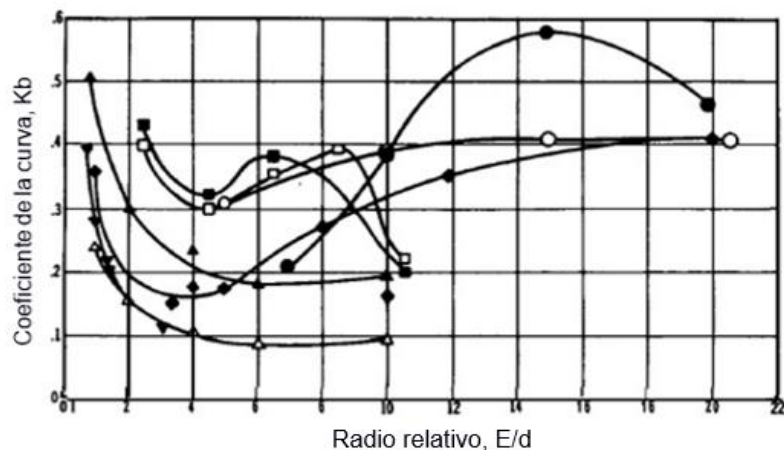


Figura 3.6 Rugosidad Respecto a Dimensiones de Codos

El valor de $E/d=1,6$ para el sistema de tuberías no podría discutirse sobre la mejora o cambio de este elemento, debido a que no se encuentran a disposición dimensiones diferentes para tuberías de DN2.

Selección de válvulas

Las válvulas seleccionadas para el sistema de tuberías se presentan a descritas en la tabla 2.14

La válvula de bola usada en este proceso se encontrará abierta con paso completo y será utilizada únicamente en caso de que se necesiten realizar mantenimiento a la bomba de proceso o paradas de emergencia (Marks, 1951). La selección de esta válvula se realizó con respecto a lo requerido por el sistema y se confirma su fiabilidad a través de la tabla 3.7, que resume el historial de aplicaciones de válvulas en sistemas de tuberías según expertos.

Tabla 3.7 Aplicación de Válvulas según Diseñadores

Aplicación	Descripción de servicio	Válvula recomendada
Contaminación	Control de fluidos contaminantes o peligrosos	Bola, compuerta, globo
Alta presión	Control de fluidos con altas presiones particularmente con sistemas neumáticos	Bola, globo
Alta temperatura	Control de fluidos a elevadas temperaturas	Bola, globo
Encendido/apagado	Aplicaciones de encendido y apagado	Tipo plug
Vapor	Control de líneas de vapor	Válvula para control de vibraciones, bola o globo

Fuente: (Lyons, 1982)

Con respecto a la válvula de retención de accionamiento mecánico, se suscitó una deficiencia de la velocidad que provoca que el obturador no se levante completamente, debido a que la velocidad recomendada por ensayos es una mínima de 1,7 m/s considerando la densidad de 900 Kg/m³, este problema será resuelto a través de la implementación de un sistema actuación en la válvula de retención para el caudal y la velocidad requerida.

La ubicación de los accesorios se realizará a una distancia horizontal de separación de 1200 mm, considerando la longitud necesaria del fluido para conseguir un perfil de velocidad uniforme.

Pérdidas en el sistema de tuberías

La pérdida de cabezal dentro de los sistemas de tubería se calculó tomando en cuenta las pérdidas debido al rozamiento a lo largo de la tubería y las pérdidas causadas por los accesorios.

Para el proceso de cálculos de pérdidas por tubería se tomaron en cuenta las ecuaciones conseguidas experimentalmente por los científicos Hagen y Poiseuille, para fluidos viscosos dentro de tuberías. Estas ecuaciones representan con exactitud la relación del factor de fricción con respecto al número de Reynolds.

Posteriormente para el cálculo de pérdidas por accesorios se consideró: pérdidas de carga a la entrada y salida, por válvulas y por codos. Como se ha expuesto esas pérdidas guardan relación directa con los cambios de dirección que ocasionan al fluido.

Este valor obtenido de pérdidas representa aproximadamente un 10% de la altura requerida por el proceso (40 m), con criterio se puede afirmar que los cálculos representan pérdidas pequeñas de cabezal.

Selección de punto de funcionamiento para bomba neumática de diafragma

La altura de bomba encontrada representa la cantidad de energía para mover el volumen requerido del líquido a través del sistema de tuberías hasta una altura específica. Este valor se encontró aplicando la ley de Bernoulli, la cual considera pérdidas potenciales, cinéticas y de fricción para el sistema de tuberías.

Para este cálculo se obtuvo una altura requerida por la bomba de 42 m. Este valor contribuyó a la selección de la curva de funcionamiento de la bomba y se verificó que el equipo trabaja de forma correcta ya que cumple con la relación de valores de cabezales netos positivos, es decir: NPSH disponible (9,45 m) > NPSH requerido (7 m), adicionalmente este valor indica que no ocurrirán fenómenos de cavitación para este sistema.

Este estudio resultó de gran importancia debido a que una mala elección del punto de operación podría disminuir drásticamente la vida útil de la bomba.

Diseño de Soporte

El diseño de soportes para el sistema de tuberías se realizó a través de la norma ANSI SP-58, donde se seleccionó el soporte rígido tipo horquilla (ver tabla 2.20) debido a que las tuberías no sufrirán movimiento o deformaciones significativas (ver tabla 2.18). la distancia horizontal recomendada entre centros de soportes para tuberías de DN2 según expertos es de 4,5 m y considera la distribución uniforme del peso de la tubería sobre cada uno (Petróleos de Venezuela, S. A., 1993).

El diseño del esparrago para sujeción de soportes consideró las cargas ejercidas por el peso de la tubería y fluido. En este cálculo se buscó conseguir un factor de seguridad (n) >4 para asegurar que los pernos no fallen por esfuerzos. Tras un proceso de iteración se demostró que el conjunto de esparrago y perno con rosca M3 X 3 son lo suficientemente resistente para esta aplicación (Norton, 2009). Para asegurar las medidas correctas de estos elementos se deberá cumplir con el estándar de fabricación 975UNC.

Adicionalmente se seleccionaron tuercas autobloqueantes que resistan a movimientos bruscos suscitados por la naturaleza.

Unión roscada BSPP

La rosca cónica BSPP seleccionada es el sistema de unión de tuberías recomendado ampliamente en la industria alimenticia de Estados Unidos, Europa, Asia y Australia, se considera idónea para el transporte de productos alimenticios debido a que esta toma medidas preventivas de instalación que evitan la estanqueidad del fluido dentro de las uniones. Una de sus más grandes cualidades es la implementación de anillos metálico ubicado en el centro entre tuberías, que generan ambientes completamente herméticos y sanitarios (Cate, 2015).

Las dimensiones de este tipo de uniones para tubería DN2 se encuentran en la ISO 229/1.

3.1.3 Análisis de Simulación

Simulación del fluido

la figura 3.7 muestra el perfil desarrollado por el fluido dentro de la tubería, donde se puede apreciar el flujo ordenado y suave conseguido. Esta característica fue buscada dentro del diseño debido al potencial del fluido para generar turbulencia con cambios de dirección debido a su peso. El valor de longitud de entrada de 0,98 m difiere de los cálculos teóricos en un 2%, se atribuye la introducción de esta diferencia de valores a las tensiones paralelas generadas en el borde del volumen de control con respecto a la pared de la tubería (esfuerzo cortante) dentro de la simulación.

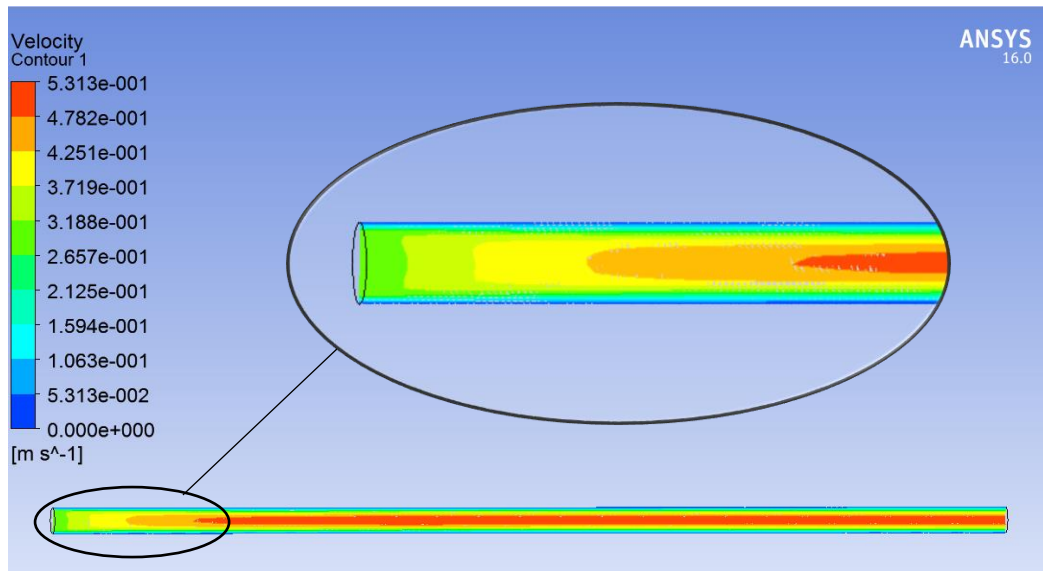


Figura 3.7 Perfil de velocidad en tubería

Elaboración: Propia

Simulación de la tubería

La deformación generada por la presión interna en los elementos de la tubería se presenta a continuación en la figura 2.31. La respuesta uniforme del material concuerda con lo esperado y los valores de deformación obtenidos de 0.915×10^{-3} mm a lo largo de la tubería son menores al rango límite de falla para el acero inoxidable AISI 316 (0, 277 mm). Con esto se establece el correcto dimensionamiento de la tubería con un factor de seguridad de 10.

3.2 Eje de Transmisión de Potencia

3.2.1 Análisis de Falla de Eje

Se analizaron las causas de falla de un eje en una empresa alimenticia. En la figura 3.8 se muestra el eje de salida de un sistema de reducción de velocidad. Este fallo en un cambio de sección de un diámetro de 50 mm a un diámetro de 40 mm. Los chaveteros no presentan evidencia de sufrir esfuerzo alguno. No se detectó presencia de material extraño que pudiera afectar negativamente ni la presencia de corrosión, surcos u otro síntoma de que el ambiente haya dañado la pieza.



Figura 3.8 Fractura de eje

Fuente: Propia

En la figura 3.9 se puede apreciar como las líneas de esfuerzos se van acumulando en las zonas donde se producen cambios de secciones bruscos, y a medida que se le realiza un redondeo suave los esfuerzos se van esparciendo alrededor del eje. El caso de estudio muestra un comportamiento como en el caso (a), el cual es el más crítico y los esfuerzos son extremadamente elevados.

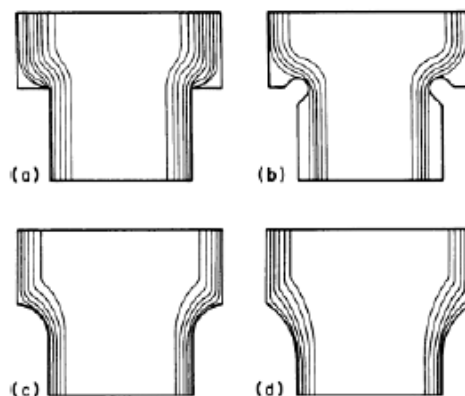


Figura 3.9 Efecto del Radio de Filete en los Concentradores de esfuerzos para los Cambios de Sección

Fuente: (ASM, 2002)

A través de los operadores, se sabe que el eje falla en un periodo de seis meses de ser cambiado y que se manda a maquinar uno nuevo con las mismas características y dimensiones. La temperatura de operación del

sistema es de alrededor de -2°C , lo cual no afecta significativamente a las propiedades del metal (APÉNDICE H).

Al realizar un análisis de la forma de la falla, se encuentran marcas de trinquete alrededor de la superficie exterior de la fractura, marcas de playa que siguen una trayectoria circular en sentido contrario a las manecillas del reloj alrededor de la superficie transversal y presenta un arrancamiento brusco (figura 3.10).

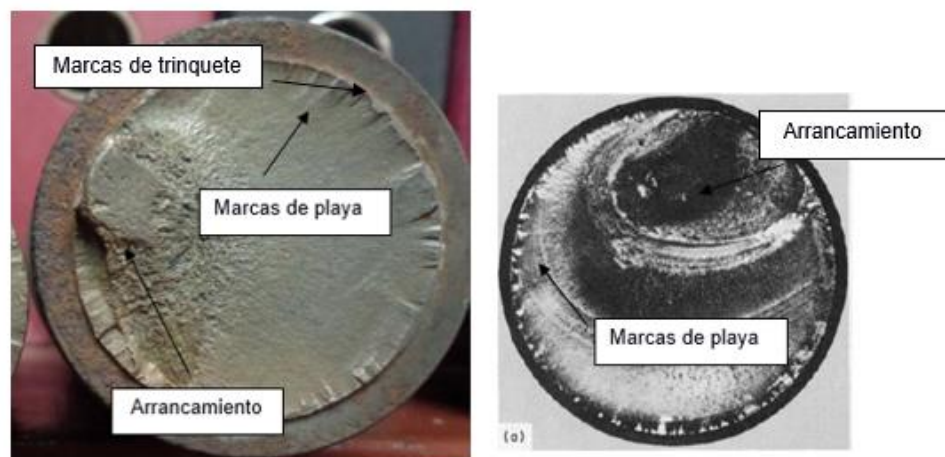


Figura 3.10 Área transversal de la fractura comparada con una fractura por fatiga

Fuente: Propia

Las marcas de trinquete presentan un color oscuro debido a la oxidación que se provoca al iniciar la falla. Este rastro marca el inicio de la falla donde se presenta una región de sobrecarga. Las marcas de trinquete se encuentran en varias zonas, de las cuales se observan tres en la figura 3.10, lo que indica múltiples puntos de inicio evidenciando sobrecargas cíclicas.

Las marcas de playa son típicas de falla por fatiga y son resultado de la propagación de esfuerzos al haber una concentración de los mismos en el cambio de sección. Las marcas de playa difieren en forma y tamaño pero

avanzan en ángulos de 45 grados dentro de la pieza, esto se da a menudo en fallas producidas por esfuerzos de torsión (ASM, 2002). También se pueden usar los patrones de las marcas de playa para identificar el inicio de la fractura, generalmente tienen menos espacimientos entre ellas en donde comienza la fractura y son más fáciles de apreciar cuando están más lejos de la falla.

Una indicación de la severidad de la carga aplicada es el tamaño de la fractura final, el arrancamiento. Cuando existen cargas altas, la fractura final es mucho más grande que cuando ocurren cargas bajas. Por lo tanto, se puede concluir que la fractura se dio por esfuerzos grandes debido al tamaño del arrancamiento en comparación a el tamaño del eje.

Habiendo identificado las regiones de la fractura, se puede establecer el origen de la falla por medio de la figura 3.11. Evidentemente el caso de estudio se asemeja al ejemplo (j), donde se visualizan las múltiples marcas de trinquetes y como el seguimiento de las marcas de playa terminan en el arrancamiento del material al otro extremo de las marcas de trinquete.

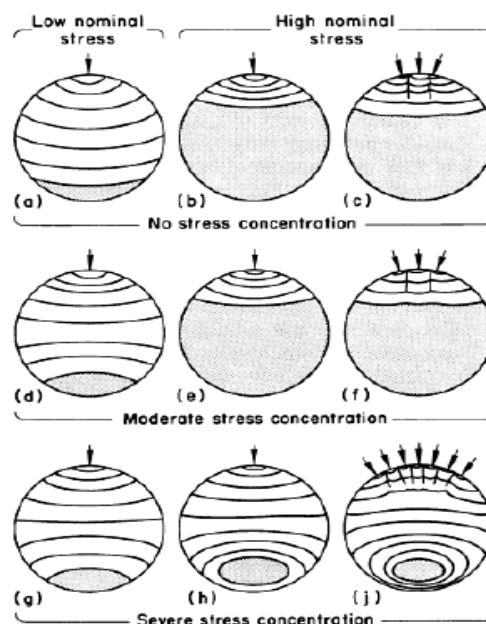


Figura 3.11 Marcas de fatiga producidas en un eje

Fuente: (ASM, 2002)

La textura de la superficie de la fractura es áspera y las marcas de playa están esparcidas por la periferia mostrando un color gris oscuro. Estas características se presentan en grietas que crecen rápidamente, por lo que se puede concluir que a la fatiga le tomo pocos ciclos en producir la fractura final.

Analizando la fractura del eje en vista frontal, se puede determinar el tipo de falla comparada con un esquema establecido de la ASTM donde se muestran la forma de la falla según el tipo de carga a la que estaba sometido. En la figura 3.12 se puede observar que el elemento tiene un corte transversal al área en el paso, lo cual es muy similar al esquema de la derecha por lo que se puede suponer que la falla se produjo por torsión, además el arrancamiento del material está localizado en un lado del exterior del área transversal, lo cual es típico en cargas de tipo flexión.

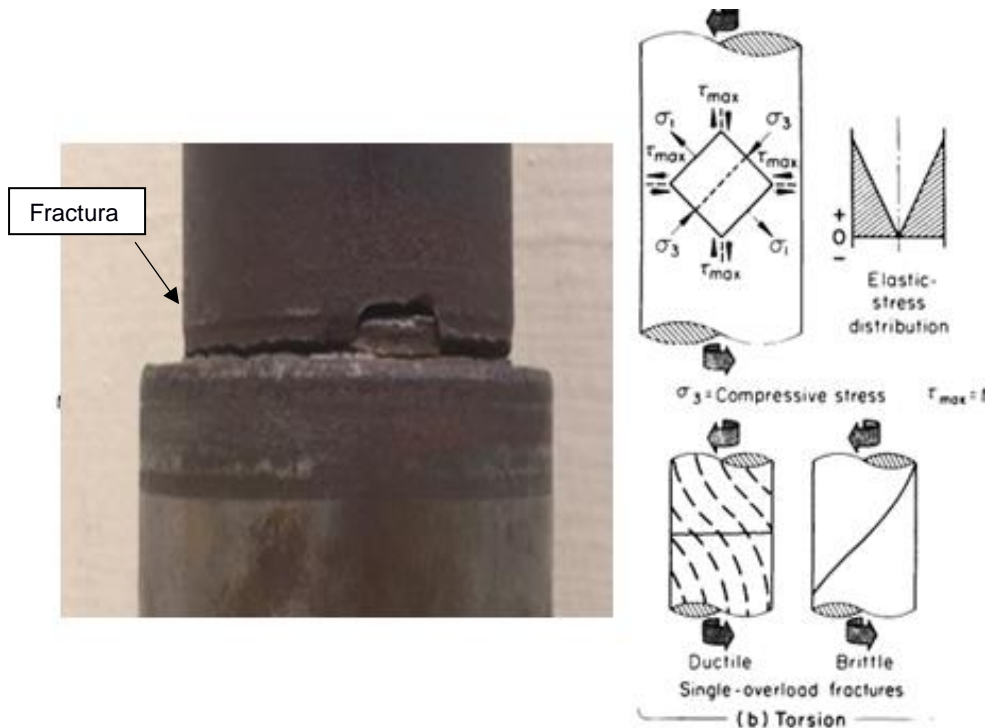


Figura 3.12 Vista frontal de falla

Fuente: Propia

Partículas magnéticas

El ensayo de partículas magnéticas revela grietas ocultas en el eje antes de fallar, demostrando que no cumplió con el tiempo de vida útil con el que fue diseñado. Se puede apreciar en la figura 3.13 que las fisuras se localizan solamente alrededor del cambio de sección, lugar donde se encuentra la mayor cantidad de concentrador de esfuerzo, y que están en sentido transversal, lo cual es interpretado como la forma de la fractura.

Posteriormente se analizó el eje con falla para visualizar con mejor precisión las marcas de playa y como estas contienen grietas en ellas provocando que un tiempo antes de la falla, los esfuerzos se eleven considerablemente.

Para una mejor apreciación de las fallas se realiza una comparación con el eje sin fallas y el eje con fisuras en el cambio de sección. Se puede notar el verde intenso de las partículas fluorescentes en el eje con grietas mientras que en el eje antes de operar no posee ninguna marca; por lo que se puede descartar la creación de fisuras durante el proceso de mecanización del eje.



Figura 3.13 Comparación de Eje Nuevo y Eje Sin Fisuras

Análisis químico

Realizando el ensayo químico, se reveló la composición química del material. Se sabe mediante el manual de fabricación que los elementos

internos de la caja reductora son de medio contenido de carbono, por lo que los resultados descritos en la tabla 3.8 están acorde a lo establecido. Pero no se puede determinar con exactitud el material con el que falló al eje debido a la variedad de aceros que cumplen con los resultados obtenidos (tabla 2.24).

Tabla 3.8 Resultados del Análisis Químico del Eje de Transmisión de Potencia

ELEMENTO	VALOR (%)	INCERTIDUMBRE (±)
Carbono	0,492	0,017
Manganeso	0,701	0,082
Silicio	0,218	0,047
Cobre	0,216	0,031
Cromo	0,165	0,032
Fosforo	0,016	0,008
Azufre	0,020	0,006
Níquel	0,078	0,082

Fuente: Propia

Los diferentes elementos aleantes confieren diferentes propiedades mecánicas al acero. Como principal elemento aleantes, por ejemplo, el Carbono proporciona resistencia mecánica y dureza, pero la ductilidad, forjabilidad y soldabilidad.

El Manganeso es un elemento que evita los inconvenientes provocados por el azufre y el oxígeno. Es un elemento desoxidante que evita el desprendimiento de gases, la formación de poros y el rechupe en la fabricación del acero. El aumento de Manganeso afecta a la relación final de perlita y al tamaño de grano de la ferrita debido a que disminuye la temperatura de transformación de la austenita en ferrita, originando un efecto similar al de aumentar la velocidad de enfriamiento

El Silicio, al igual que el manganeso, es un elemento desoxidante. Este componente se encuentra en pequeña proporción en todos los aceros debido a que están presente en los minerales utilizados para obtener la materia prima. El Silicio aumenta el punto de cedencia en 10kg/mm^2 por cada punto porcentual agregado, promoviendo la elasticidad del material. Agregar silicio al acero, le permite resistir el trabajo a temperaturas altas.

El Cobre aumenta la resistencia y el punto de cedencia del acero, pero reduce sus propiedades elásticas. En pequeñas proporciones en el acero, mejora las propiedades de resistencia a la corrosión.

Fabricar aceros con Cromo incrementa la dureza y la resistencia, entre 8 a 10 kg/mm^2 , pero reduce ligeramente la elasticidad. Además, mejora la resistencia a la oxidación a temperaturas altas. Se forman carburos de alta resistencia al desgaste conforme aumenta el contenido de carbono, con la inconveniencia de que reduce las propiedades de soldabilidad.

Se procura que los niveles de Fósforos sean inferiores al 0,03% dado a que es perjudicial en el acero, se encuentra disuelto en la ferrita por lo que disminuye la ductilidad y la resistencia al impacto.

Generalmente el Azufre es perjudicial para el acero debido a que produce fragilidad a cantidades mayores a 0,04%. Pero se lo suele aceptar en cantidades hasta de 0,03% porque las pequeñas inclusiones de sulfuro alteran la cohesión metálica, por lo que contribuye a la formación de virutas cortas en el mecanizado.

A continuación, se presenta la tabla 3.9 donde se muestran como la presencia de los elementos aleantes del eje afecta a sus propiedades mecánicas.

Tabla 3.9 Incremento y Reducción de Propiedades Mecánicas en Comparación de Porcentaje de Elementos Aleantes

PROPIEDAD MECÁNICA ELEMENTO ALEANTE	DUREZA	RESISTENCIA MECÁNICA	CEDENCIA	ALARGAMIENTO	RESISTENCIA AL IMPACTO	ELASTICIDAD	RESISTENCIA A ALTAS TEMPERATURAS	FORMACIÓN DE CARBUROS	RESISTENCIA AL DESGASTE	FORJABILIDAD	MAQUINABILIDAD	RESISTENCIA A LA CORROSIÓN
Carbono	++	+				-				-		
Manganeso	+	+	+			+			--	+	-	
Silicio	+	+	++	-	-	+++	+	-	--	-	-	
Cobre	+	+	++				+			---		+
Cromo	++	++	++	-	-	+	+	++	+	-		+++
Fosforo	+	+	+	-	--					-	++	
Azufre				-	-					---	+++	-
Níquel	+	+	+				+		--	-	-	
	Incremento = +					Reducción = -						

Metalografía

La metalografía revela granos de perlita laminar y granos de ferrita, esto es debido al proceso de fabricación. El porcentaje de Carbono obtenido del ensayo químico es de 0.49%, lo que implica que el material al enfriarse desde la temperatura de austenización formó granos ferríticos en los límites de grano de la austenita, mientras que la austenita remanente se transformó en granos perlíticos a través de una reacción eutectoide

La perlita es una mezcla de ferrita y cementita formados a partir de la austenita. Aceros totalmente perlíticos contienen un porcentaje de carbono cercano al 0,8%. La resistencia a la rotura de esta estructura es de 800 MPa, por lo que aceros con mayor cantidad de perlita son más resistentes.

La cantidad de ferrita formada en el acero es proporcional a la cantidad de carbono en el material. Debido al porcentaje de Carbono, la ferrita en el material está presente como parches equiaxiados aislados. Al observar un tamaño de grano de ferrita fino, el material posee buena ductilidad y

confomabilidad. Debido a su estructura cristalina BCC (cubica centrada en la cara), exhibe un proceso de transición de dúctil a frágil a medida que la temperatura disminuye o su grado de deformación aumenta.

En la figura 3.14 se puede apreciar la microestructura de un acero medio contenido de carbono, similar al acero AISI 1045 de la muestra (figura 2.40). Este acero presenta granos gruesos debido a que la transformación de austenita a perlita fue lento. Aceros de este tipo son comúnmente usados como eje de transmisión, a pesar de que su maquinabilidad no es buena, esta puede mejorar después de un trabajo en frío (APENDICE H).

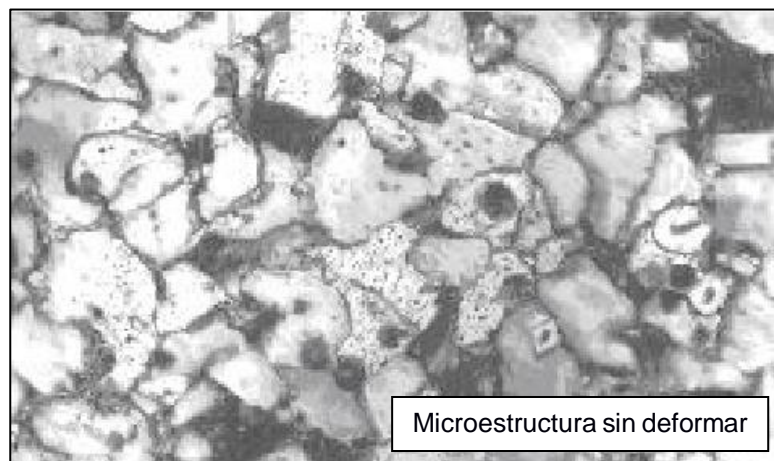


Figura 3.14 Acero AISI 1045 Sin Deformar, Nital – 200X

Fuente: (Fernández Columbié, Fernández Guilarte, Rodríguez González, Acántara Borges, & Castillo Matos, 2013)

El material con el que se reemplazará el eje es un acero AISI 1045 laminado en frío, cuyas propiedades mecánicas como resistencia y dureza son más altos debido a la deformación de los granos perlíticos. Además, este acero es templable, por lo que su resistencia puede seguir aumentando, y puede soportar cargas mayores a 600 MPa (APENDICE H).

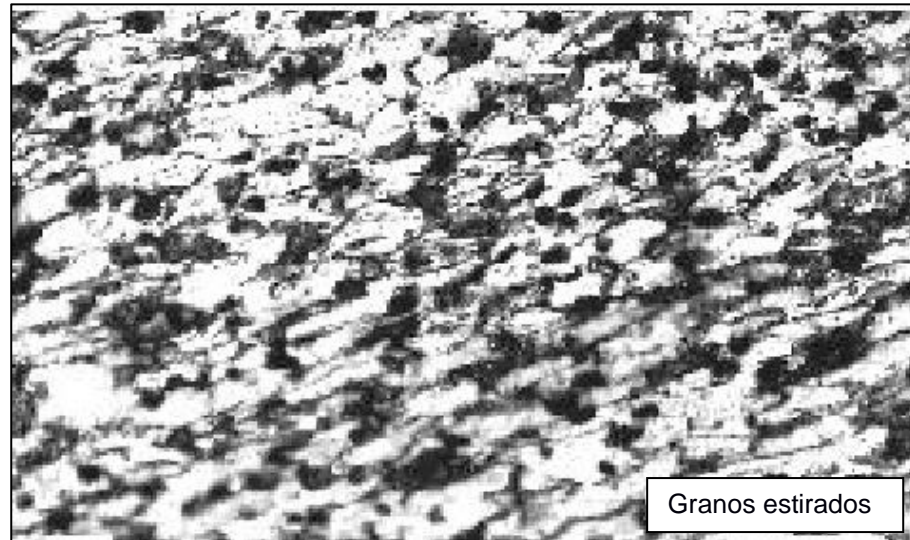


Figura 3.15 Acero AISI 1045 Trabajado en Frío, Nital – 200X

Fuente: (Fernández Columbié, Fernández Guilarte, Rodríguez González, Acántara Borges, & Castillo Matos, 2013)

Ensayo de dureza

Como se mostró anterior los elementos aleantes afectan directamente a las propiedades mecánicas del material, en especial la dureza. La dureza del material irá incrementando debido al porcentaje de carbono presente en la microestructura perlítica. Al incrementar el porcentaje de perlita su dureza irá aumentando hasta un valor de 400 HV y tendrá un valor mínimo de 70 HV cuando el material posee únicamente ferrita. El valor obtenido por el ensayo de dureza es de 82 HRB (163HV), este valor es comparado con el de un acero AISI 1045 rolado en caliente cuyo valor es de 84 HRB (170 HV). El nuevo material con el sustituirá el eje; acero AISI 1045 trabajado en frío, tiene una dureza de 86 HRB (178 HV) por lo que tendrá una menor probabilidad de que falle mecánicamente.

3.2.2 Análisis de Diseño del Eje

El diseño del eje consistió principalmente en reducir los esfuerzos producidos por los pasos de los cambios de sección, adicionalmente se escogió un material con mayor resistencia mecánica para reducir su probabilidad de falla y aumentar la vida útil del sistema. En la figura 3.16 se

muestra los cambios que se realizaron en el eje, que son el material y los redondeos en los cambios de sección

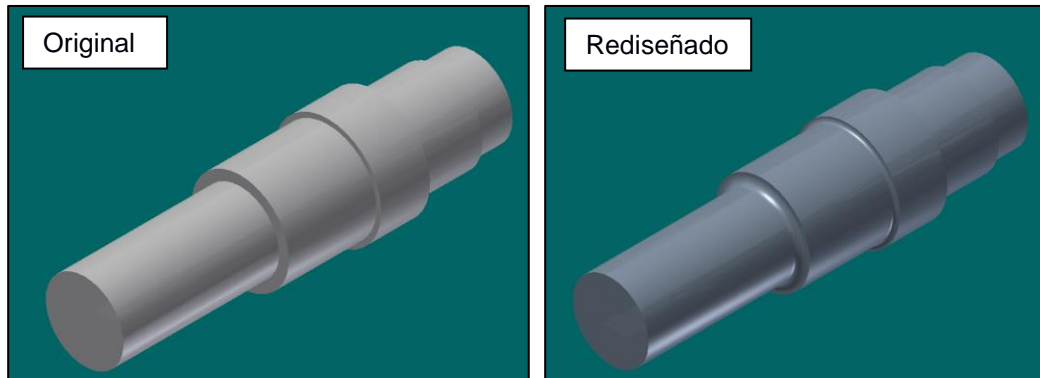


Figura 3.16 Cambios Realizados en el Eje

Elaboración Propia

Originalmente el eje fue elaborado con un acero AISI 1045 laminado en caliente. Este acero es muy utilizado en la industria debido a su alta resistencia mecánica, maquinabilidad y precio competitivo. A pesar de ser un acero muy recomendado, se decidió cambiarlo por un acero AISI 1045 laminado en frío, el cual posee el mismo procedimiento que el anterior y un proceso adicional que es el trabajado en frío. Al estirarlo en frío al acero AISI 1045, este aumenta significativamente su resistencia mecánica, pero disminuye su ductilidad; es por ello que se realiza un tratamiento térmico para recuperar parte de esa ductilidad perdida. En la tabla 3.10 se puede comparar la diferencia entre resistencia a la fluencia, resistencia última y elongación del modelo original y del rediseñado.

Tabla 3.10 Resistencia a la Fluencia, Resistencia Última y Porcentaje de Elongación

	EJE CON FALLA	EJE REDISEÑADO
Sy, Resistencia a la fluencia [MPa]	310	515
Sut, Resistencia última [MPa]	505	585
% de elongación	12%	16%

Elaboración Propia

Fuente: (ASM, 2000)

Además de cambiar el material por uno con mejores propiedades mecánicas, se escogió un redondeo adecuado para los pasos. En la figura 3.17 se puede observar el radio para el redondeo en la sección crítica del sistema, donde los esfuerzos son mayores.



Figura 3.17 Cambio de Sección del Eje

Elaboración Propia

Los cambios de sección aumentan significativamente los esfuerzos si no se determina un redondeo adecuado. En la tabla 3.11 se puede notar como los esfuerzos relacionados al análisis de fatiga son aproximadamente tres veces mayor sin un adecuado cambio de sección en la zona crítica del eje.

Tabla 3.11 Esfuerzos Medios y Alternativos para el Cálculo de Fatiga

	EJE CON FALLA	EJE REDISEÑADO
σ_m , Esfuerzo medio [MPa]	304	144
σ_m , Esfuerzo alternativo [MPa]	264	74
N, Factor de seguridad estático	0.58	3,66
N, Factor de seguridad de fatiga	-	1,23

Elaboración Propia

3.2.3 Análisis de Simulación

La figura 2.48 presenta la simulación de los esfuerzos de fluencia del eje rediseñado, con el nuevo material escogido y los redondeos para los

cambios de sección. Se puede apreciar como los esfuerzos máximos están localizados en los cambios de sección y se van reduciendo a medida que se alejan de estas zonas. Además, se puede apreciar que el esfuerzo máximo del sistema se localiza en el último paso (sección C) como se encontró analíticamente. El valor máximo de la gráfica (141,36 MPa) se lo compara con el calculado (138,94 MPa), obteniendo un error del 2%. Lo que se esperaba demostrar con esta simulación es que las localizaciones de los esfuerzos máximos coinciden con los determinados analíticamente y que sus valores sean muy cercanos para demostrar la veracidad de los cálculos.

Posteriormente, se determinó el porcentaje de error entre el valor del factor de seguridad estático obtenido por el programa (3,77) con la cifra obtenida analíticamente (3,66) lo cual se obtiene un error del 2,01%, demostrando que los cálculos se realizaron de manera correcta.

3.3 Análisis de Costo

Para el análisis de costos del sistema de tuberías, la tabla 3.12, muestra los costos de los materiales para la implementación del nuevo sistema de tuberías. Debido a las limitaciones de adquisición de los elementos dentro de Guayaquil, se consideran los costos de la ciudad de Quito para las tuberías y accesorios del sistema de tuberías con las roscas BSSP ya elaboradas

Tabla 3.12 Tabla de Costos para Sistema de Tuberías

MATERIAL	COSTO
Tubería	\$ 1.440,00
Codo	\$ 126,00
Soporte	\$ 544,00
Válvula de bola	\$ 100,00
Válvula de retención	\$ 42,00
TOTAL	\$ 2.252,00

Elaboración Propia

Considerando el tiempo de la empresa contratista que realizaría la instalación, ésta requerirá una semana de trabajo de 7 hombres para desmontaje y reinstalación del sistema de tuberías. Estos hombres serán remunerados por hora de trabajo considerando un sueldo básico ecuatoriano en conjunto con todos los pagos adicionales estipulados por el IEES. Donde, el sueldo del operador promedio es \$520/mensuales, por afiliación al IEES el empleador debe pagar un porcentaje del 40.55% del sueldo del operador, sumando un total por operario de \$690.31/mensuales. Dando un valor de \$2.95/hora y considerando 8 horas de trabajo al día y 7 días a la semana, se obtiene \$165,20 semanales por trabajador.

Las pérdidas de producción estimadas serán únicamente una referencia de las pérdidas generadas en la empresa por mantener parada la línea de elaboración para este producto. De la misma forma las pérdidas por mano de obra consideran la remuneración por hora para 12 hombres que trabajan en la elaboración de este producto.

Tabla 3.13 Costos Asumidos por Reinstalación del Sistema de Tuberías

INSTALACIÓN	COSTO
Mano de obra contratada	\$ 1.156,40
Pérdidas de producción estimadas	\$ 15.500,00
Pérdidas por mano de obra libre	\$ 7.929,60
TOTAL	\$ 24.586,00

Elaboración Propia

El costo de fabricación del eje se calcula por medio de la ecuación 45. Se considera el costo que requiere el uso de las máquinas para mecanizar, el costo de la materia prima y el costo de la herramienta de corte; se suma estos tres parámetros en función del tiempo que toma fabricar el eje y se obtiene el monto a pagar por la fabricación de los 17 ejes de caja reductora.

$$C_{\text{final}} = C_{\text{hm}} + C_{\text{m}} + C_{\text{h}} \quad \text{ec (45)}$$

Donde: C_{final} : Costo final por mecanizado
 C_{hm} : Costo hombre – hora maquina
 C_m : Costo de materia prima
 C_h : Costo de herramienta de corte.

El costo producido entre el operador y la maquina (C_{hm}), considera el sueldo del operador en función de tiempo que le tomo realizar el mecanizado, el costo del uso de la maquina CNC

$$C_{hm} = W_o + M_t \quad \text{ec (46)}$$

Donde: W_o : salario del operador
 M_t : Gastos por el uso de la maquina

El sueldo del operador promedio es \$520/mensuales, por afiliación al IESS el empleador debe pagar un porcentaje del 40.55% del sueldo del operador, sumando un total por operario de \$690.31/mensuales. Se necesita obtener la cifra del salario del operador por hora, esto se calcula suponiendo que al mes trabaje 22 días (sin fines de semana) y 8 horas por día, dando un valor de \$2.95/hora.

Para calcular el costo de utilización por la máquina de herramienta se necesita conocer el precio total de compra de la máquina (incluyendo transporte e impuestos por importación), las horas de trabajo que tiene en un año, las cuales las calculamos a 2920 horas/año y el período de amortización (depreciación a 10 años en Ecuador) de la misma; para los gastos porcentuales de máquina se considera en general el costo por mantenimiento para el que fijaremos un porcentaje del 25%, obteniendo un valor de \$0,74/hora

Al momento de calcular el costo por utilización de herramientas de corte se debe considerar fundamentalmente el precio y la duración de la

herramienta (APENDICE J). Se determinó que se usará una placa negativa rómbica de 80° (KENANMETAL CNMG120412MN) con una porta herramientas de sujeción de mango cuadrado (KENANMETAL PCLNL1616H12) con una velocidad de corte de 435 m/min y un avance de 0,34 mm/rev, obteniendo un valor de \$177,65, si se asume que las herramientas son nuevas y que deben ser adquiridas. Al ser un acero muy utilizado en las industrias, las herramientas para mecanizarlo no necesitan ser compradas y se utilizara herramientas ya usadas cuyo valor aproximado es de \$40

Se reemplaza los valores obtenidos en la ecuación para un tiempo de 0,93 horas, el tiempo que le toma al operador en mecanizar el eje, obteniendo un valor de \$43,37 por un solo eje; para los 17 ejes se obtiene un valor de \$738,31. Este valor se le suma el costo del acero AISI 1045 estirado en frío, cuyo precio aproximado es de \$34,00, multiplicado por los 17 ejes a reemplazar se obtiene \$578,00. Sumando ambos valores, costo de material y mecanizado, se obtiene un gasto de \$1316,31.

Tabla 3.14 Costos para Implementación de Rediseño del Eje

CARACTERÍSTICA	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	COSTO
Acero AISI 1045 rolado en caliente	17	\$ 34,00	\$ 578,00
Proceso de mecanizado	17	\$ 43,43	\$ 738,31
		TOTAL	\$ 1.316,31

Elaboración propia

La tabla 3.15 presenta el resumen de costos generados por el rediseño del sistema de tuberías y rediseño del eje. El monto a invertir para la implementación de ambos diseños es de \$25902,31. Se considera debido a los márgenes de producción de la empresa que este valor será recuperado luego del primer año de trabajo y que los nuevos sistemas evitaran gastos sustanciales en aspectos tales como: gasto energético y mano de obra para mantenimiento.

Tabla 3.15 Costos Generados por la Implementación de los Nuevos Sistemas

INSTALACIÓN	COSTO
Rediseño de sistema de tubería	\$ 24.586,00
Rediseño de eje de caja reductora	\$ 1.316,31
TOTAL	\$ 25.902,31

Elaboración Propia

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- La falla de corrosión por picadura fue la falla presentada en el sistema de tuberías asociada a problemas del material, el cual no poseía el acabado superficial adecuado para aplicaciones alimenticias, donde se requieren acabados finos con superficies brillantes; también se pudo apreciar un fenómeno de corrosión de carácter agresivo, presentado de forma irregular en aceros tipo inoxidables, donde las picaduras traspasaron el espesor completo de la tubería.
- Los ensayos destructivos en el material de tubería revelaron que no poseía las cualidades básicas de los aceros inoxidable. El porcentaje de los elementos aleantes cromo, molibdeno y níquel se encontraron muy por debajo de lo establecido para acero inoxidable AISI 316 y ocasionaron la pérdida de las propiedades anticorrosivas, requeridas del sistema debido al pH al que es expuesto; El análisis microestructural reveló que el material de tubería poseía fallas de fabricación que aceleraron los efectos corrosivos. Finalmente, el ensayo de dureza confirmó los resultados esperados colocando al material en el rango mínimo aceptable de prueba HRC.
- El material de tubería AISI 316 fue el seleccionado como el más apropiado para cumplir con las condiciones de operación requeridas el cual deberá ser fabricado considerando lo establecido en la norma ASTM 269.
- Existen dos tipos de codos para aplicaciones en sistemas de tuberías, de radio largo y de radio corto. Se seleccionó codos de radio largo para el diseño debido a que estos le otorgan al fluido un recorrido más suave y un cambio de dirección uniforme con respecto a las variaciones de velocidad suscitadas por los efectos de la capa límite.
- La falla del eje de caja reductora se debió principalmente al cambio brusco de sección. Por medio de la inspección visual se determinó que la falla se debió a una sobrecarga de esfuerzo de torsión y de flexión, estas cargas generaron un esfuerzo principal que fue triplicado en las zonas donde

había concentradores de esfuerzos; además, se reveló que el inicio de la falla se dio en la periferia del eje en las reducciones de áreas, y se fue propagando alrededor del eje hasta que falle de manera repentina.

- La pérdida de fluido transportado y los costos energéticos debido a la corrosión de la tubería son de \$1700 mensualmente, estos son evitados con el rediseño del sistema y adicionalmente se generan ganancia debido a la producción continua conseguida. En el caso del sistema de reducción, los costos de rediseño son ligeramente mayores, con una diferencia de \$204.00, esta inversión se recupera el primer año debido a que no tendrá que cambiarse el eje cada seis meses, sino que su vida útil se habrá extendido a 5 años.

4.2 Recomendaciones

- Aun con todas las medidas de prevención tomadas durante el proceso de diseño del sistema de tuberías, debido al pH que posee el fluido transportado se recomienda la implementación de un sistema de limpieza en lugar (CIP, por sus siglas en inglés). Este proceso es seleccionado dependiendo su aplicación, para este caso se requerirá de una secuencia de recorridos de fluidos fríos, calientes y mezclas químicas para mantener las tuberías completamente libres de sustancias que podrían afectar el material por largos periodos de tiempo.
- Se recomienda que se respeten los materiales y medidas proporcionadas en el diseño debido a que estas han sido seleccionadas cuidadosamente para la producción establecida y siguiendo protocolos de seguridad que aseguran la estabilidad del sistema.
- En la medida de lo posible se recomienda la implementación de medidores de caudal y presión en la línea de producción para mantener registro del comportamiento de la misma.
- Si la temperatura de trabajo del sistema es muy baja, cambiar el material de los elementos por alguno que posea alto contenido de níquel, ya que

este provee resistencia mecánica a bajas temperatura sin fragilizar el material.

- Durante la simulación de fluidos en FLUENT se consideró únicamente el perfil de entrada para comprobar que el fluido ingresaría completamente laminar en los accesorios. Se recomienda ampliar esta simulación realizándola en el recorrido completo del sistema de tuberías para apreciar el comportamiento del fluido durante los cambios de dirección.
- Un estudio completo de corrosión debería analizar el potencial de corrosivo del material. Este ensayo no fue realizado debido a que no se encontraba dentro del alcance de este proyecto, pero, se recomienda graficar las curvas requeridas en este procedimiento para los materiales bajo estudio y analizar lo encontrado con respecto a las curvas del material adecuado para dicha aplicación.

BIBLIOGRAFÍA

- Acosta Sanchez, J. M. (2010). *Diseño de un reductor de velocidades de engranajes cilíndricos con dientes helicoidales*. La Habana: Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría.
- Akid, R. (2004). *Handbook of Advantage Materials*. Sheffield: Sheffield Hallam University.
- Asfahl, C. R., & Rieske, D. W. (2010). *Seguridad Industrial y Administración de la Salud*. México: Pearson.
- ASM. (1972). *Metals Handbook Vol 7, Atlas of Microstructures of Industrial Alloys*. Ohio: American Society for Metals.
- ASM. (1972). *Metals Handbook. Vol 7: Atlas of Microstructures of Industrial Alloys*. Ohio: American Society for Metals.
- ASM. (2000). *Metals Handbook Vol 1, Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys*. New York: American Society of Metals.
- ASM. (2000). *Metals Handbook Vol 13, Corrosion*. New York, United States: American Society of Metals.
- ASM. (2000). *Metals Handbook Vol 9, Metallography and Microstruct.* New York: American Society of Metals.
- ASM. (2002). *Metals Handbook Vol 11, Failure Analysis and Prevention*. Ohio: American Society of Metals.
- ASM. (2002). *Metals Handbook Vol 13, Corrosion*. Ohio, United States: American Society of Metals.
- ASM. (2002). *Volumen 11: Failures Analysis and Prevention*. New York: American Society of Metals.
- ASME. (1985). *ASME B106.1M Design of Transmission Shafting*. New York: The American Society of Mechanical Engineers.
- ASME. (1998). *B16 Standards for Pipes and Fittings* . New York: The American Society of Mechanical Engineers.
- ASME. (1998). *Sección V, Capítulo 7: Examen de partículas magnéticas*. New York: The American Society of Mechanical Engineers.
- ASME. (1998). *Sección V, Capítulo 9: Inspección Visual*. New York: The American Society of Mechanical Engineers.

- ASME. (1998). *Standars for Pipes and Fittings*. New York: American Society of Mechanical Engineering.
- ASTM. (1994). *Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*. New York: American Society of Testing Materials.
- ASTM G46. (1994). *G46: Standard Guide for Examination and Evaluation of Pitting Corrosion*. New York: American Society for Testing Materials.
- B. L. Bramfitt, A. B. (2002). *Metallographer's Guide: Practice and Procedures for Irons and Steels*. Estados Unidos: ASM Internacional .
- Borja Mayorga, D. F. (2012). *Diseño y Construcción de Tuberías en Paralelo para Medición de constantes de accesorios*. Riobamba: Escuela Superior Politécnica del Chimborazo.
- Callister, W. D. (2007). *Ciencia e Ingeniería de los Materiales 2*. Barcelona : Reverté.
- Cate, S. (2015). Types of Thread. *Teasing*.
- Chan, S. L. (2011). Code of Practice for the Structural Use of Steel. Hong Kong, Republica Popular de China.
- Cochrane, D. (2002). Guía de acabado del acero inoxidable. *Serie de Construcción Europea*.
- Coronado Marín, J. J., Cerón, A. M., & Charry, G. A. (2006). Análisis de falla del eje de un agitador para tratamiento de agua. *Scientia et Technica*, 185-190.
- Cortes Carrión, C. M. (2011). *Análisis de integridad de ductos*. Veracruz: Universidad Veracruzana.
- DIN. (1995). *Stainless Steels Technical deliver conditions for general purpose*. Berlín: Deutsches Institut für Normung.
- DNV. (2010). *DNV-RP-B401 Cathodic Protection Design*. Noruega: Det Norske Veritas.
- DOE. (1993). *Valves*. Washington D. C.: Department of Energy.
- EN10088-2, D. (1995). *Stainless Steels Technical deliver conditions for general purpose*.
- Fernández Columbié, T., Fernández Guilarte, E., Rodríguez González, I., Acántara Borges, D., & Castillo Matos, R. (2013). Comportamiento Microestructural del Acero Aisi 1045 Endurecido en Frío y Traccionado. *Revista de la Facultad de Ingeniería U. C. V.*

- Gjonnes, A. W. (2012). *Effect of Sulfides Inclusions in Austenitic Stainless Steel on the Initiation of Pitting in Base Metal and Heat Affected Zone After Welding*. Noruega: Norwegian University of Science and Technology.
- Greene, F. a. (1978). *Corrosion Engineering*. New York: McGraw-Hill, Inc.
- Groover, M. P. (2007). *Fundamentos de Manufactura Moderna*. México: McGraw Hill.
- GS-Hydro. (2012). Hydraulic Piping . *Standard Handbook*.
- HAGER.W.H. (2010). Losses in flow. En HAGER.W.H, *Losses in flow* (págs. 18-50). Springer.
- Harriott, M. S. (1991). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*. Mexico: McGraw-Hill.
- Henriquez Miranda, J. L., & Aguirre Lopez, L. A. (2011). Piping Design: The Fundamentals. *Unit Nations University*.
- Hoeppner, D. W. (2012). *PITTING CORROSION: MORPHOLOGY AND CHARACTERIZATION*. USA: Organización del Tratado del Atlántico Norte .
- Honess, D. C. (2006). Importance of Surface Finish in Stainless Steel. *Stainless Steel Advisory Service*.
- Hydraulic Institute. (1954). *Pipe friction manual*. USA: University of Michigan.
- Jones, D. A. (1996). *Principles and Prevention of Corrosion*. New Jersey: Prentice Hall.
- K.H.Benji. (1938). Pressure Losses for Fluid Flow in 90 Degree Pipe Bends. *Journal of Research of the National Bureau of Standards, Volume 21*.
- Kenanmetal. (2013). *Sistemas de Herramientas*. Latrobe.
- Kopeliovich, D. (2012). Non-metallic inclusions in steel. *Substech*.
- KUMPU, O. (2006). *Standar Cr-Ni-Mo for Stainless Steels*. Avesta-Sweden: Centrun Tryck AB.
- Lyons, J. L. (1982). *Lyons' Valve Designer's Handbook*. Toronto: Van Nostrand.
- Marks, L. S. (1951). *Mechanical Engineers Handbook*. New York: McGraw-Hill Book Co.
- Martin. (Febrero de 2016). *Catalogo de Construcción Ingenieril*. New York, Estados Unidos.
- Martínez, M. (2012). Influencia del Tamaño de Grano en las Propiedades Mecánicas de los Aceros Inoxidables Austeníticos. *Revista de Metalurgia* .
- Medina Borja, J. (2014). *Análisis de aceros inoxidables austeníticos*. Zaragoza: Escuela Universitaria Ingeniería Técnica Industrial Zaragoza.

- Mora Parrazales, F. J. (2011). *Análisis y diseño de ejes para la transmisión de potencia*. Xalapa: Universidad Veracruzana.
- Mott, R. L. (2006). *Mecánica de Fluidos*. Mexico: Pearson.
- Murdock, J. W. (1976). *Fluid Mechanics and Its Applications*. New York: Houghton Mifflin Harcourt.
- NACE. (2003). *Metals for Sulfide Stress Cracking and Stress Corrosion Cracking Resistance in Sour Oilfield Environment*. Texas: National Association of Catering Executives.
- NAS. (2010). *Long Product Stainless Steel Grade Sheet*. New York: North American Stainless.
- Nord. (Marzo de 2016). Reductores y motorreductores. Bargteheide, Alemania.
- Norton, R. L. (2009). *Diseño de Maquinarias*. México: McGraw Hill.
- OutoKumpu. (2013). *Handbook of Stainless Steel*. Finlandia: Sandvikens Trykeri AB.
- Petróleos de Venezuela, S. A. (1993). *Criterios de diseño de soportes de tuberías*. Caracas: HG-251.
- Pigott, R. J. (1950). *Pressure Losses in Tubing, Pipe and Fittings*. New York: American Society of Mechanical Engineers.
- R.J.S.Pigott. (1950). *Pressure Losses in Tubing, Pipe and Fittings*. New York: American Society of Mechanical Engineers.
- Reynolds, O. (1883). *An Experimental Investigation of the Circumstances which Determine Whether the Motion of Liquid Shall Be Direct or Sinuous and of the Law of Resistance in Parallel Channels*. New York: Phil. Trans. R. Soc.
- Rosenberg, T. G. (1942). *Metallographic Study Of The Formation Of Austenite From Aggregates Of Ferrite And Cementite In An Iron-Carbon Alloy*. Washington: National Bureau Of Standars.
- Scheers, P. V. (1992). *The Effects of Flow Velocity and pH on the Corrosion Rate of Mild Steel in Synthetic Miner Water*. New York: SAIMM.
- Valencia Alfaro, E. P. (2016). *Diseño de los elementos mecánicos para un reductor de velocidades de engranajes rectos adaptado a una banda transportadora de costales de cemento de 50 kilogramos*. Mexico: Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

- Vergara Calle, L. A. (2005). *Diseño de tubería de impulsión para enlace de la estación de bombeo Chongón con el canal Chongón sube y baja*. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Vito, C. J., & Heiser, F. A. (1974). *Analysis of Metallurgical Failures*. New York: John Wiley & Sons.
- White, F. M. (2008). *Mecánica de Fluidos*. México: McGraw Hill.
- Wika, F. S. (2012). *Pitting and Crevice Corrosion of Stainless Steel under Offshore Conditions*. Trondheim: NTNU.
- Wu, C. Z. (2005). Effects of Inclusion Particles on the Microstructure and Mechanical Properties. *The Japan Institute of Metals*.

APÉNDICES

Apéndice A
Análisis de Pérdidas Económicas Asumidas por la Empresa

Los costos innecesarios a los cuales recurre la empresa se deben al fluido desperdiciado a través de los agujeros de picadura y al sobreconsumo eléctrico del sistema de bombeo generado por las pérdidas de presión. La tabla 4.1 muestra las pérdidas mensuales registradas por la empresa debido al mal funcionamiento del sistema de tuberías y una proyección de anual de los mismos.

Tabla 4.1 Pérdidas Mensuales del Sistema de Tuberías Actual

PERDIDAS	COSTOS MENSUALES	PROYECCIÓN DE COSTOS ANUALES
Consumo eléctrico	\$ 700,00	\$ 8400,00
Fluido	\$ 2000,00	\$ 24000,00
TOTAL	\$ 1700,00	\$ 32.400,00

Elaboración Propia

El cálculo de costos de eje para caja reductora, se inicia determinando el valor monetario perdido incorrecto mantenimiento relacionado con la falla del eje. La principal perdida es ocasionada por la compra de 17 ejes mecanizados de acero AISI 1045 que fallaron antes de cumplir su vida útil, estos fallaron 6 meses después de su adquisición y son reemplazados por ejes con las mismas características. Además, se debe calcular el costo por mecanizar cada pieza y el salario que se le pagará al operador por el uso de la máquina para el tiempo que requerirá mecanizar los 17 ejes, aproximadamente 0,93 horas por eje, para ello se hace uso de la ecuación 41. Se realiza el mismo procedimiento realizado para determinar el costo del rediseño con la diferencia de que el material usado es acero AISI 1045 rolado en caliente, cuyo valor unitario es de \$22,00 aproximadamente por pieza.

Tabla 4.2 Costo de Producción de Eje Original

CARACTERÍSTICA	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	COSTO
Acero AISI 1045 rolado en caliente	17	\$ 22,00	\$ 374,00
Proceso de mecanizado	17	\$ 43,43	\$ 738,31
		TOTAL	\$ 1.112,31

Elaboración propia

Apéndice B
Secciones Horizontales de Tubería Corroída para Inspección
Visual



Figura 4.1 Tubería Horizontal con Picadura Tramo 1

Fuente: Propia

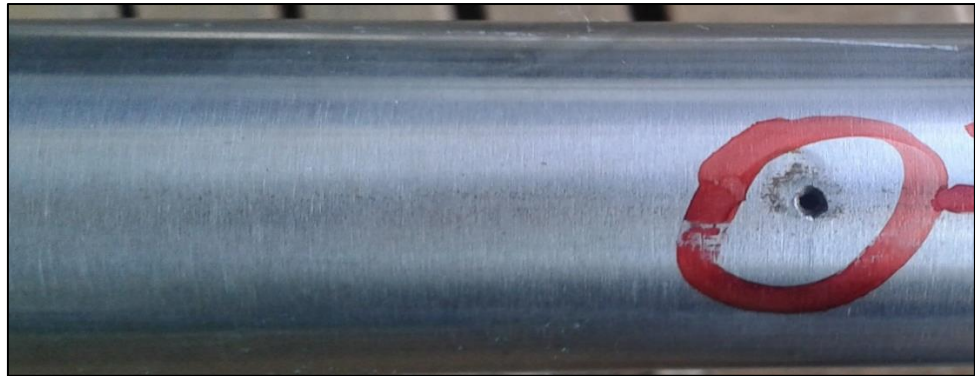


Figura 4.2 Tubería Horizontal con Picadura Tramo 2

Fuente: Propia



Figura 4.3 Tubería Horizontal con Picadura Tramo 3

Fuente: Propia

Apéndice C
Tamaño de Grano Austenítico

La norma ASTM E112 – 13 describe las técnicas de comparación realizadas para determinar el tamaño de grano austenítico de forma manual utilizando una serie de imágenes estándar graduadas para un aumento de 100X (ver figura 4.4).

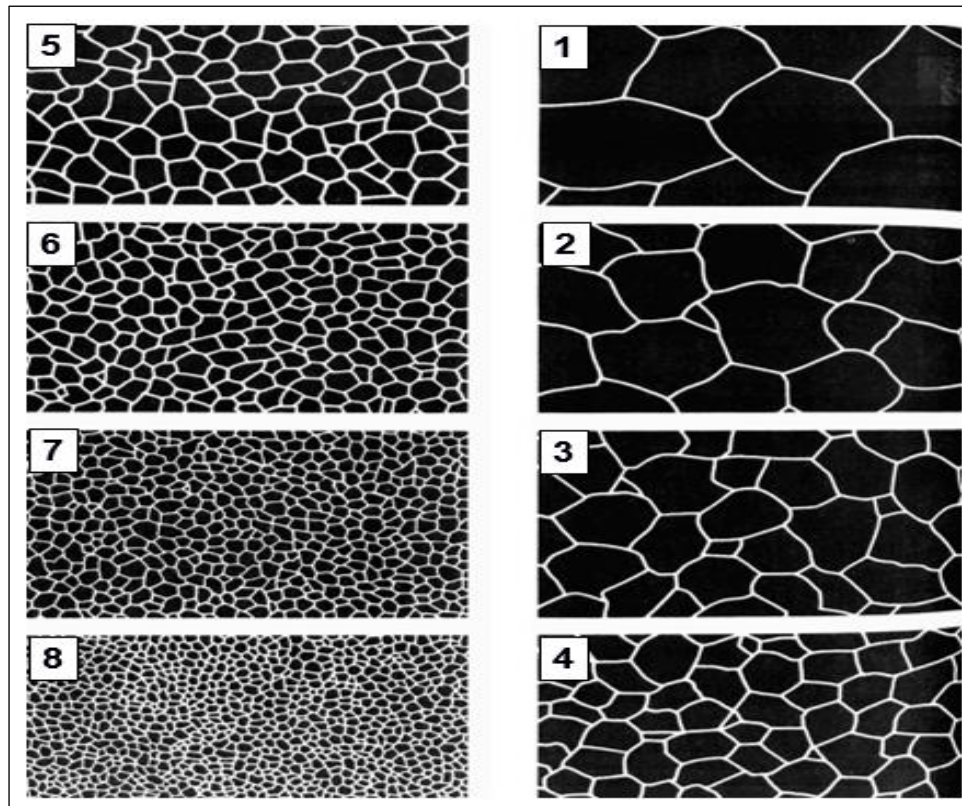


Figura 4.4 Tamaño de Grano Austenítico

Fuente: ASTM 2000

La tabla 4.3 muestra el tamaño de grano equivalente dependiendo del tamaño de grano registrado visualmente.

Tabla 4.3 Tamaño de Grano Austenítico

Numero de grano ASTM	Diámetro esférico equivalente no magnificado (mm)
1	0,2870
2	0,2030
3	0,1440
4	0,1010
5	0,0718
6	0,0507
7	0,0359
8	0,0254

Fuente: ASTM 2000

Apéndice D
Crecimiento de Grano Dependiendo de Tiempo y
Temperatura

La figura 4.5 ejemplifica el tamaño de grano resultado de los procesos de temperatura vs tiempo aplicados durante la fabricación de aceros, se puede apreciar diferentes tamaños y distribución de grano en un aumento de 100X.

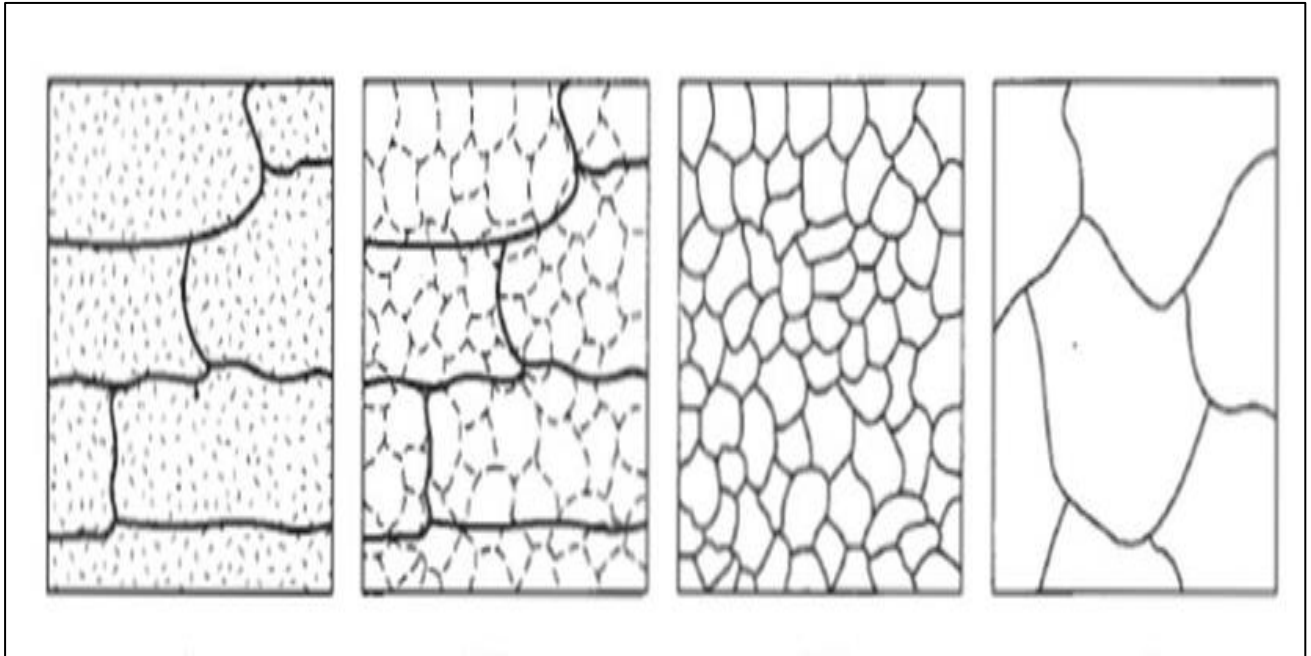


Figura 4.5 Crecimiento de Grano según Tiempo y Temperatura

Fuente: ASM 2000

A continuación la tabla 4.4 resume la influencia de diferentes factores sobre el tamaño del grano.

Tabla 4.4 Factores que Afectan el Tamaño de Grano

Factores	Comportamiento del Factor	Comportamiento del Tamaño de grano
Trabajo en frío	Aumenta	Disminuye
Temperatura de calentamiento sobre la temperatura de recristalización	Disminuye	Disminuye
Temperatura de calentamiento bajo la temperatura de recristalización	Disminuye	Aumenta
Porcentaje de impurezas	Aumenta	Disminuye

Fuente: ASM 2000

Apéndice E
Diagrama Hierro-Carbono

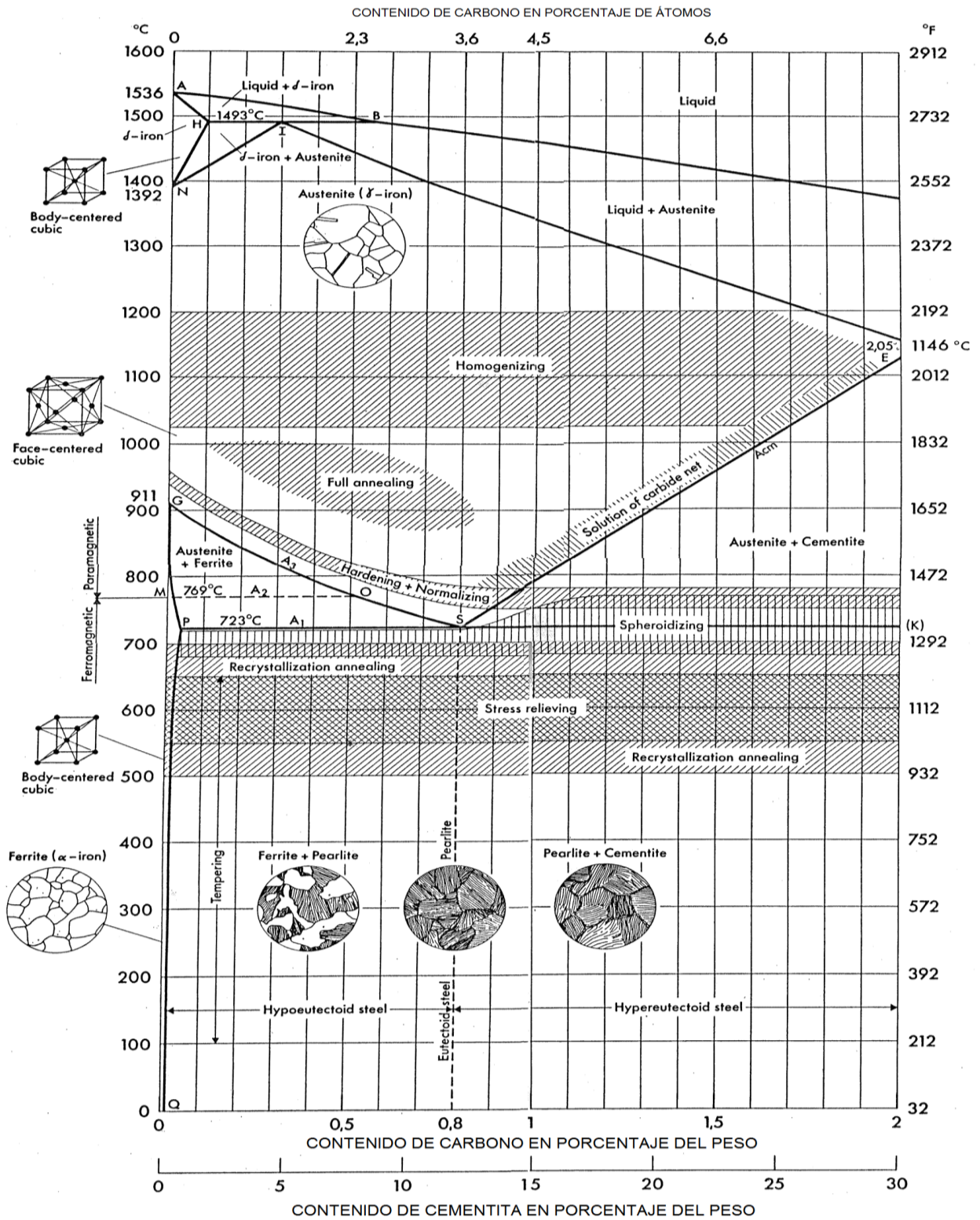


Figura 4.6 Diagrama Hierro - Carbono

El diagrama Hierro-Carbono mostrado en la Figura 4.6 es usado para identificar el tipo de microestructura de materiales metálicos:

- Austenita
- Ferrita
- Ferrita + Perlita
- Perlita
- Perlita + Cementita

También se pueden apreciar los tipos de estructuras cristalina, centrada en el cuerpo o centrada en las caras (BCC, FCC).

A través del porcentaje de carbono de los materiales podemos calificarlos de la siguiente manera:

- Aceros con bajo contenido de carbono ($C < 0,3\%$)
- Aceros de carbono medio ($0.3 < C < 0.6$)
- Aceros con alto contenido de carbono ($C > 0.6\%$)

Los aceros inoxidable son un tipo de acero con un porcentaje de $C = 0,06 > \%$ con una temperatura de fusión de 1450°C , como se puede apreciar este posee una sola fase con microestructura austenítica y estructura cristalina BCC.

Apéndice F
Propiedades de Aceros Inoxidables Según sus Elementos
Aleantes

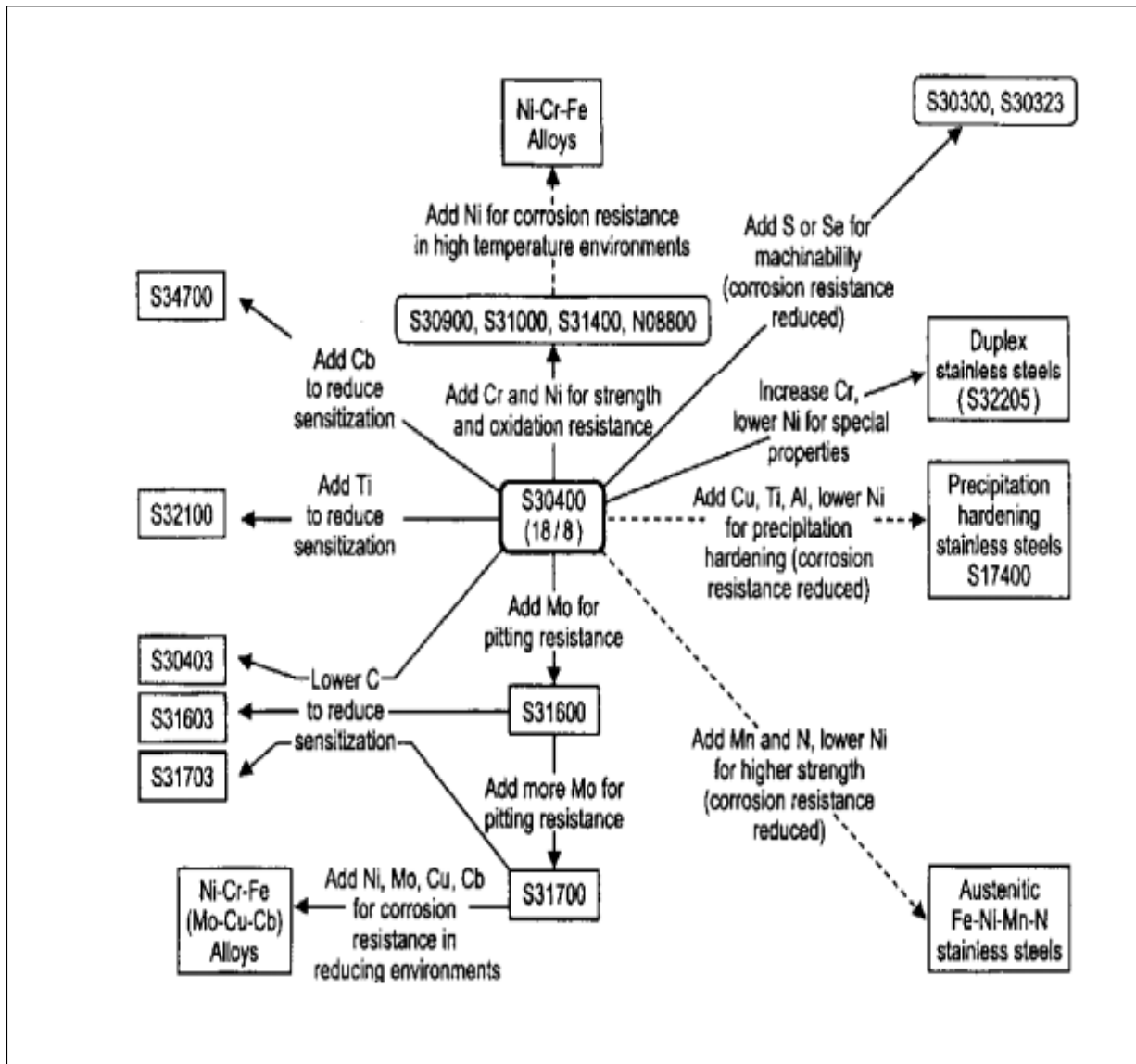


Figura 4.7 Propiedades de los Aceros Inoxidables según sus Elementos Aleantes

Fuente: Akit 2004

Como lo muestra la Figura 4.7, los aceros Inoxidables comprenden un número de elementos de aleación de acuerdo con el grado y la composición específica. A continuación, se enumeran las adiciones de aleación con el motivo de su presencia:

Carbono (C): Tiene el efecto de aumentar la dureza y la fuerza de hierro. En los aceros inoxidables austeníticos y ferríticos un alto contenido de carbono no es deseable debido a la amenaza de la precipitación de carburos.

Manganeso (Mn): El manganeso se añade al para mejorar las propiedades de trabajo en caliente y aumentar la fuerza, dureza y templabilidad.

Cromo (Cr): El cromo se añade para aumentar resistencia a la oxidación. Esta resistencia aumenta a medida que se añade más de cromo. 'Aceros inoxidable tienen un mínimo de 10,5% de cromo (tradicionalmente 11 o 12%). Esto le da un grado muy marcada de la resistencia general a la corrosión en comparación con los aceros con un menor porcentaje de cromo.

Níquel (Ni): Se añade en grandes cantidades por encima del 8%, para formar la clase más importante de los aceros de corrosión y resistente al calor, estos son los aceros inoxidable austeníticos.

Molibdeno (Mo): molibdeno, cuando se añade a los aceros austeníticos al cromo-níquel, mejora la resistencia a la corrosión por picaduras y grietas sobre todo en cloruros y ambientes que contienen azufre.

Fósforo (P): El fósforo se añade por lo general con azufre, para mejorar la maquinabilidad, en los aceros inoxidable austeníticos aumenta la dureza.

Azufre (S): Cuando se añade en pequeñas cantidades de azufre mejora la maquinabilidad. Sin embargo, como el fósforo tiene un efecto perjudicial sobre la resistencia a la corrosión y soldabilidad.

Apéndice G
Tablas de Medidas Estándar

DN	(O.D.) mm	5S	10S	Std. 40S	40	XS 80S	80
1/8"	10,29		1,24	1,73	1,73	2,41	2,41
			0,28	0,37	0,37	0,47	0,47
1/4"	13,72		1,65	2,24	2,24	3,02	3,02
			0,49	0,64	0,64	0,82	0,82
3/8"	17,15		1,65	2,31	2,31	3,20	3,20
			0,63	0,87	0,87	1,12	1,12
1/2"	21,3	1,65	2,11	2,77	2,77	3,73	3,73
		0,81	1,02	1,29	1,29	1,64	1,64
3/4"	26,7	1,65	2,11	2,87	2,87	3,91	3,91
		1,03	1,30	1,71	1,71	2,23	2,23
1"	33,4	1,65	2,77	3,38	3,38	4,55	4,55
		1,31	2,13	2,54	2,54	3,29	3,29
1.1/4"	42,2	1,65	2,77	3,56	3,56	4,85	4,85
		1,67	2,73	3,44	3,44	4,53	4,53
1.1/2"	48,3	1,65	2,77	3,68	3,68	5,08	5,08
		1,93	3,16	4,11	4,11	5,49	5,49
2"	60,3	1,65	2,77	3,91	3,91	5,54	5,54
		2,42	3,99	5,52	5,52	7,60	7,60
2.1/2"	73,0	2,11	3,05	5,16	5,16	7,01	7,01
		3,75	5,34	8,77	8,77	11,59	11,59
3"	88,9	2,11	3,05	5,49	5,49	7,62	7,62
		4,59	6,56	11,47	11,47	15,51	15,51
3.1/2"	101,6	2,11	3,05	5,74	5,74	8,08	8,08
		5,25	7,53	13,78	13,78	18,92	18,92
4"	114,3	2,11	3,05	6,02	6,02	8,56	8,56
		5,93	8,50	16,32	16,32	22,66	22,66
5"	141,3	2,77	3,40	6,55	6,55	9,53	9,53
		9,61	11,74	22,10	22,10	31,44	31,44
6"	168,3	2,77	3,40	7,11	7,11	10,91	10,91
		11,47	14,04	28,69	28,69	43,21	43,21

Figura 4.8 Medidas Estándar de Tuberías AISI 316

Fuente: ANSI 2012

Diámetro nominal [pulg.]	DN [mm]	Diámetro ext. en bisel D	Radio (Centro a fin) A	Espesor STD
½	15	21,3	38	2,77
¾	20	26,7	38	2,87
1	25	33,4	38	3,38
1¼	32	42,2	48	3,56
1½	40	48,3	57	3,68
2	50	60,3	76	3,91
2½	65	73	95	5,16
3	80	88,9	114	5,49
3½	90	101,6	133	5,74
4	100	114,3	152	6,02
5	125	141,3	190	6,55
6	150	168,3	229	7,11
8	200	219,1	305	8,18
10	250	273	381	9,27
12	300	323,8	457	9,53
14	350	355,6	533	9,53
16	400	406,4	610	9,53

Figura 4.9 Medidas Estándar para Codos AISI 316 de Radio Largo

Fuente: ASME 1998

Trade Size	Threads per inch	Pitch		Major Diameter		Minor Diameter		Gage length	
		in.	mm	in.	mm	in.	mm	in.	mm
1/8	28	0.0357	0.907	0.3830	9.728	0.3372	8.566	0.1563	3.970
1/4	19	0.0526	1.337	0.5180	13.157	0.4506	11.445	0.2367	6.012
3/8	19	0.0526	1.337	0.6560	16.662	0.5886	14.950	0.2500	6.350
1/2	14	0.0714	1.814	0.8250	20.955	0.7336	18.633	0.3214	8.164
5/8	14	0.0714	1.814	0.9020	22.911	0.8106	20.589		
3/4	14	0.0714	1.814	1.0410	26.441	0.9496	24.120	0.3750	9.525
7/8	14	0.0714	1.814	1.1819	30.020	1.0976	27.879		
1	11	0.0909	2.309	1.3090	33.249	1.1926	30.292	0.4091	10.391
1 1/4	11	0.0909	2.309	1.6500	41.910	1.5336	38.953	0.5000	12.700
1 1/2	11	0.0909	2.309	1.8820	47.803	1.7656	44.846	0.5000	12.700
2	11	0.0909	2.309	2.3470	59.614	2.2306	56.657	0.6250	15.875
2 1/2	11	0.0909	2.309	2.9600	75.184	2.8436	72.227	0.6875	17.463
3	11	0.0909	2.309	3.4600	87.884	3.3436	84.927	0.8125	20.638
4	11	0.0909	2.309	4.4500	113.030	4.3336	110.073		

Figura 4.10 Medidas Estándar para Roscas BSPP

Fuente: ISO 2011

Apéndice H

Variación de las propiedades mecánicas de los aceros

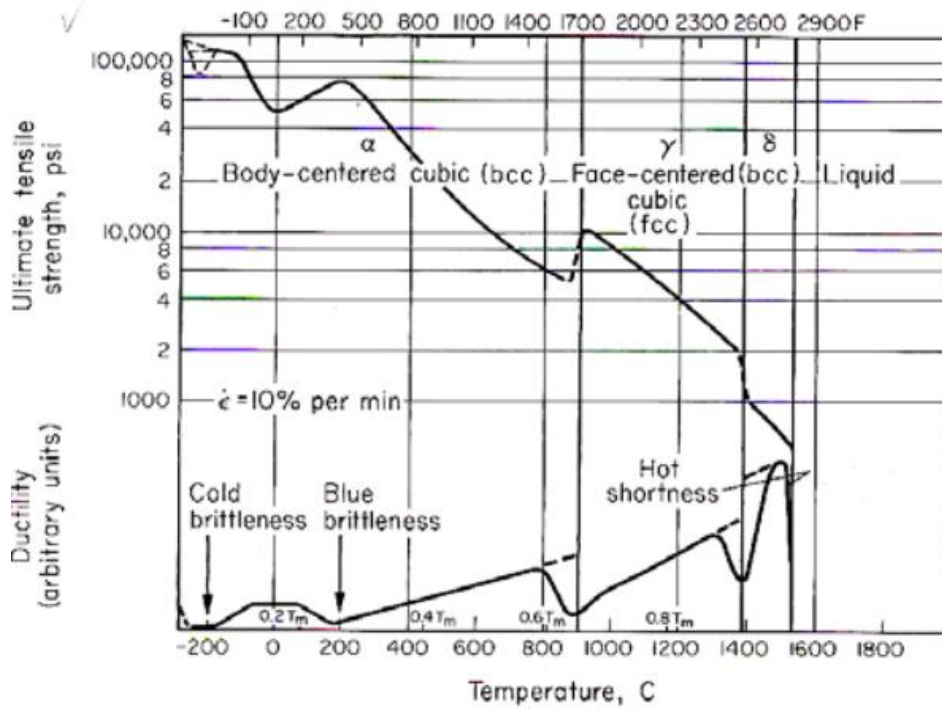


Figura 4.11 Variación de la Ductilidad y Resistencia Última en Función de la Temperatura de Operación

Fuente: ASM 1999

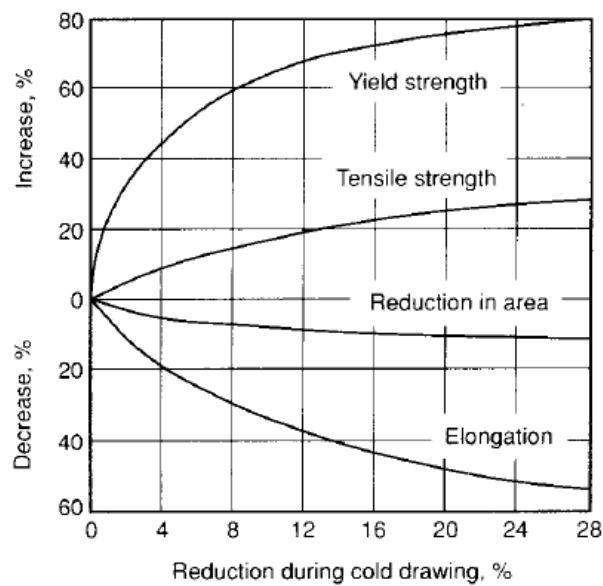


Figura 4.12 Variación de las Propiedades Mecánicas en Función del Trabajo en Frío

Fuente: ASM 1999

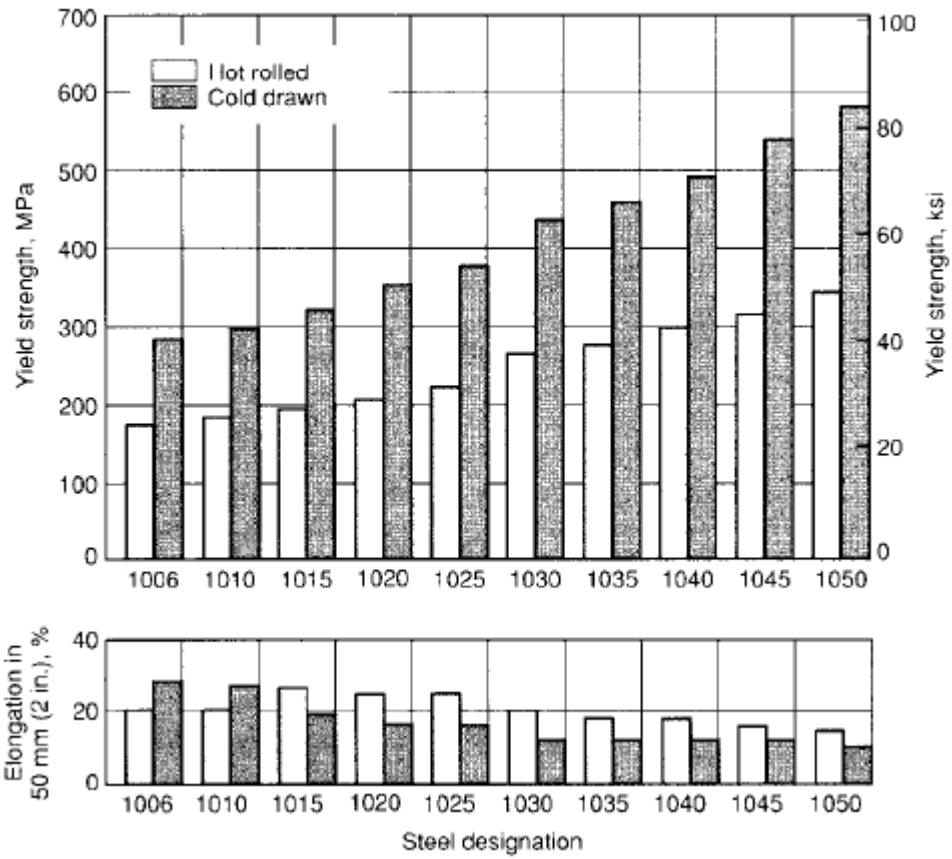


Figura 4.13 Valores de Resistencia a la Fluencia y Porcentaje de Elongación de Aceros con Medio Contenido de Carbono

Fuente: ASM 1999

Failure mode	Ultimate tensile strength	Yield strength	Compressive yield strength	Shear yield strength	Fatigue properties	Ductility	Impact energy	Transition temperature	Modulus of elasticity	Creep rate	K _{IC}	K _{ISCC}	Electro-chemical potential	Hardness	Coefficient of expansion
Gross yielding		Yield strength		Shear yield strength											
Buckling			Compressive yield strength						Modulus of elasticity						
Creep										Creep rate					
Brittle fracture							Impact energy	Transition temperature			K _{IC}				
Fatigue, low cycle					Fatigue properties										
Fatigue, high cycle	Ultimate tensile strength														
Contact fatigue															
Fretting			Compressive yield strength										Electro-chemical potential		
Corrosion													Electro-chemical potential		
Stress-corrosion cracking	Ultimate tensile strength											K _{ISCC}	Electro-chemical potential		
Galvanic corrosion													Electro-chemical potential		
Hydrogen embrittlement															
Wear														Hardness	
Thermal fatigue															
Corrosion fatigue															Coefficient of expansion

Figura 4.14 Modo de Falla Relacionado con la Propiedad Mecánica del elemento

Fuente: ASM 1999

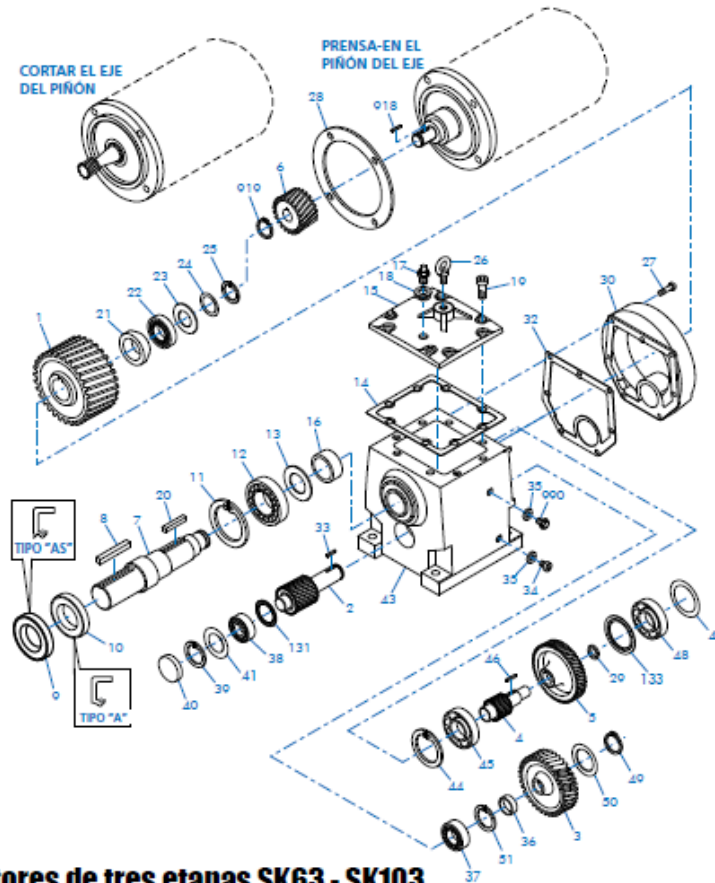
Apéndice I
Parámetros de operación de Sistema de Reducción de
Velocidad



ILUSTRACIONES DE LA LISTA DE PIEZAS DEL REDUCTOR DE PIÑÓN HELICOIDAL EN LÍNEA



DRIVESYSTEMS — CONSERVAR ESTE DOCUMENTO PARA CONSULTARLO EN EL FUTURO — U15100 - 9 of 12



Carcasa de los reductores de tres etapas SK63 - SK103

1	Engranaje	19	Perno	38	Cojinete antifricción
2	Eje de piñón	20	Chaveta	39	Anillo de retención
3	Engranaje	21	Separador	40	Tapón de protección
4	Eje de piñón	22	Cojinete antifricción	41	Arandela de ajuste
5	Engranaje	23	Arandela de empuje	43	Cárter del reductor
6	Piñón	24	Arandela de ajuste	44	Anillo de retención
7	Eje de salida	25	Anillo de retención	45	Cojinete antifricción
8	Chaveta	26	Perno de ojo bridado	46	Chaveta
9	Sello de aceite	27	Perno	47	Arandela de ajuste
10	Sello de aceite	28	Junta	48	Cojinete
11	Anillo de retención	29	Separador	49	Anillo de retención
12	Cojinete antifricción	30	Cubierta de entrada	50	Arandela de empuje
13	Anillo NILOS	32	Junta	51	Anillo de retención
14	Junta	33	Chaveta	131	Anillo NILOS
15	Cubierta de inspección	34	Tapón de vaciado	133	Anillo NILOS
16	Separador	35	Junta	918	Chaveta
17	Tapón de venteo	36	Separador	919	Anillo de retención
18	Sello	37	Cojinete antifricción	990	Tapón de nivel de aceite

NORD Gear Limited
Toll Free in Canada: 800.668.4378
05.30.13

NORD Gear Corporation
Toll Free in the United States: 888.314.6673
www.nord.com/docs

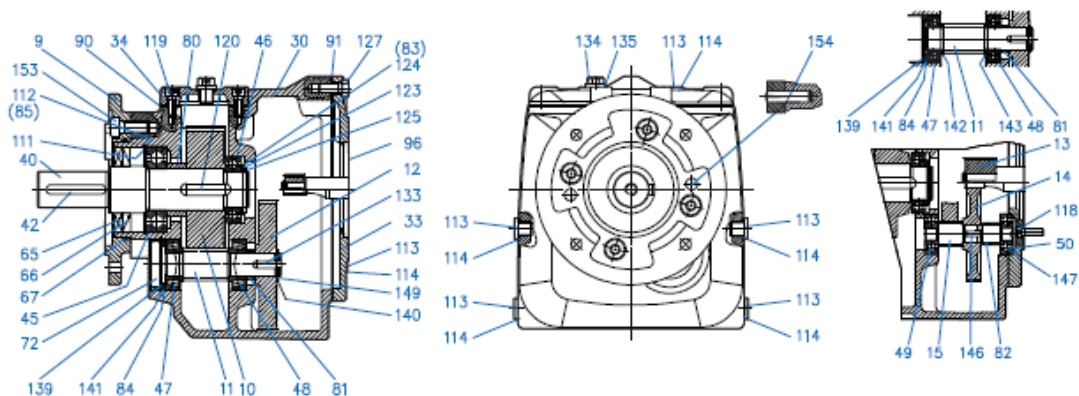
Figura 4.15 Despiece Interno de Caja reductora

Fuente: Nord 2015



ILUSTRACIONES DE LA LISTA DE PIEZAS DE LOS REDUCTORES NORDBLOC®

DRIVESYSTEMS — CONSERVAR ESTE DOCUMENTO PARA CONSULTARLO EN EL FUTURO — U15600 - 3 de 4



SK 273 - SK 973 de montaje sobre bridas

9	Brida	66	Sello del eje	123	Arandela de empuje
10	Engranaje accionado	67	Junta tórica	124	Arandela de ajuste
11	Eje de piñón	72	Tapón de protección	125	Anillo de retención
12	Engranaje de accionamiento	80	Separador	127	Perno
13	Piñón de accionamiento	81	Separador	133	Chaveta
14	Engranaje de accionamiento	82	Separador	134	Tapón de venteo
15	Eje de piñón	83	Arandela de empuje	135	Junta
30	Cárter del reductor	84	Arandela de empuje	139	Anillo de retención
33	Cubierta de entrada	85	Arandela de empuje	140	Arandela de ajuste
34	Cubierta del cárter del reductor	90	Junta	141	Arandela de ajuste
40	Eje de salida	91	Junta	142	Arandela de empuje
42	Chaveta	96	Junta	143	Arandela de empuje
45	Cojinete del eje de salida	111	Anillo de retención	146	Chaveta
46	Cojinete del eje de salida	112	Arandela de ajuste	147	Arandela de ajuste
47	Cojinete del eje de piñón	113	Tapón de nivel de aceite	149	Anillo de retención
48	Cojinete del eje de piñón	114	Junta	153	Perno
49	Cojinete del eje de piñón	118	Perno	154	Pasador guía estriado
50	Cojinete del eje de piñón	119	Perno		
65	Sello del eje	120	Chaveta		

NORD Drivesystems
 Línea gratuita en México: 800.836.9192
 04.13.12

NORD Gear Corporation
 Línea gratuita en Estados Unidos: 888.314.6673
www.nord.com/docs

Figura 4.16 Componentes Externos de Caja Reductora

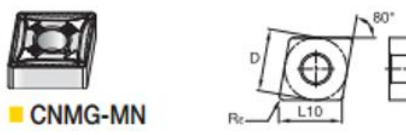
Fuente: Nord 2015

P ₁ [kW]	n ₂ [min ⁻¹]	M ₂ [Nm]	f _B	i _{ges}	F _R [kN]	F _A [kN]	F _{R VL} [kN]	F _{A VL} [kN]	Type		
									IE1	IE2	IE3
1,50	3,4	4198	0,8	414,73	18,5	22,0	28,4	40,0	SK 973.1 - 90L/4	SK 973.1 - 90LH/4	SK 973.1 - 90LP/4
	3,9	3674	0,9	362,89	22,4	22,0	29,3	40,0			
	4,3	3295	1,0	325,47	23,4	22,0	29,8	40,0			
	4,8	2991	1,1	295,50	24,2	22,0	30,2	40,0			
	5,5	2617	1,3	258,57	25,1	22,0	30,7	40,0			
	6,0	2377	1,4	234,77	25,6	22,0	31,0	40,0			
	7,2	1999	1,7	197,50	26,3	22,0	31,4	40,0			
	7,9	1815	1,8	179,32	26,6	22,0	31,5	40,0			
	8,2	1757	1,7	173,58	26,8	22,0	31,6	40,0			
	9,0	1595	1,9	157,60	27,0	22,0	31,7	40,0			
	11	1341	2,5	132,45	27,4	22,0	31,9	40,0			
	12	1217	2,7	120,26	27,6	22,0	32,0	40,0			
	13	1065	3,0	105,23	27,8	22,0	32,1	40,0			
	15	961	3,4	94,96	28,0	22,0	32,2	40,0			
	16	873	3,8	86,22	28,1	22,0	32,3	40,0			
	6,7	2135	0,8	210,95	12,3	18,0	22,6	30,0			
7,4	1932	0,9	190,86	14,0	18,0	23,6	30,0				
8,6	1675	1,0	165,42	15,8	18,0	24,7	30,0				
9,4	1522	1,1	150,31	16,6	18,0	25,0	30,0				
10	1377	1,2	135,99	17,3	18,0	25,0	30,0				
11	1291	1,3	127,52	17,6	18,0	25,0	30,0				
12	1173	1,4	115,88	18,1	18,0	25,0	30,0				
13	1061	1,6	104,84	18,5	18,0	25,0	30,0				
14	1023	1,7	101,02	18,6	18,0	25,0	30,0				
15	926	1,8	91,43	18,9	18,0	25,0	30,0				
17	841	2,0	83,08	19,1	18,0	25,0	30,0				
19	752	2,3	74,29	19,3	18,0	25,0	30,0				
21	683	2,5	67,50	19,4	18,0	25,0	30,0				
23	618	2,7	61,07	19,6	18,0	25,0	30,0				
26	560	3,0	55,35	19,6	18,0	25,0	30,0				
28	509	3,3	50,32	19,1	18,0	25,0	30,0				
31	461	3,7	45,53	18,6	18,0	25,0	30,0				
13	1133	0,8	111,92	8,0	9,0	15,1	23,7	SK 773.1 - 90L/4	SK 773.1 - 90LH/4	SK 773.1 - 90LP/4	
15	978	0,9	96,57	9,9	9,0	16,0	23,6				
17	843	1,0	83,32	11,3	9,0	16,8	23,5				
18	802	1,1	79,23	11,3	9,0	17,0	23,2				
20	728	1,2	71,89	11,1	9,0	17,0	23,2				
21	698	1,2	68,92	11,0	9,0	17,0	23,1				
22	642	1,3	63,42	10,9	9,0	17,0	22,9				
25	584	1,5	57,64	10,7	9,0	17,0	22,6				
28	519	1,6	51,31	10,4	9,0	17,0	22,2				
30	482	1,8	47,61	10,2	9,0	17,0	21,9				
33	440	2,0	43,43	10,0	9,0	17,0	21,6				
36	395	2,1	39,06	9,8	9,0	17,0	21,3				
40	362	2,3	35,77	9,6	9,0	17,0	20,9				
44	322	2,5	31,83	9,3	9,0	16,8	20,4				
48	280	2,8	28,63	9,1	9,0	16,5	20,0				

Figura 4.17 Parámetros de Operación de Sistema de Reductor de Velocidad

Fuente: Nord 2015

Apéndice J
Herramientas usadas para mecanizar



● primera opción
○ opción alternativa

número de catálogo ISO	D mm	L10 mm	Rr mm	Material																						
				KCP05	KCP10	KCP25	KCP30	KCP40	KCK05	KCK15	KCK20	KCM15	KCM25	KCM35	KU10	K313	K68	KCS10	KCU10	KC5010	KC5510	KCU25	KC5025	KC5525	KCS410	KT315
CNMG090304MN	9,53	9,67	0,4	●	●	●	●																			
CNMG090308MN	9,53	9,67	0,8	●	●	●	●																			
CNMG090312MN	9,53	9,67	1,2			●	●																			
CNMG120404MN	12,70	12,90	0,4	●	●	●	●																			
CNMG120408MN	12,70	12,90	0,8	●	●	●	●																			
CNMG120412MN	12,70	12,90	1,2	●	●	●	●																			
CNMG120416MN	12,70	12,90	1,6	●	●	●	●																			
CNMG160608MN	15,88	16,12	0,8	●	●	●	●																			
CNMG160612MN	15,88	16,12	1,2	●	●	●	●																			
CNMG160616MN	15,88	16,12	1,6	●	●	●	●																			
CNMG190608MN	19,05	19,34	0,8	●	●	●	●																			
CNMG190612MN	19,05	19,34	1,2	●	●	●	●																			
CNMG190616MN	19,05	19,34	1,6	●	●	●	●																			

Figura 4.18 Placas Desechables de Corte

Fuente: (Kenanmetal, 2013)

grupo de materiales	calidad	velocidad — m/min (SFM)									condiciones iniciales ◀▶		
		135 (450)	180 (600)	225 (800)	275 (900)	320 (1050)	360 (1200)	410 (1350)	455 (1500)	495 (1650)	m/min	SFM	
P1	KCP05/KTP10											435	1450
	KCP10											395	1320
	KCP25											275	925
	KCP30/KCP40											210	700

Nueva guía de selección del grupo de materiales Beyond™:
Para optimizar las recomendaciones de velocidad, se han agregado a cada uno de los seis grupos de materiales de la pieza de trabajo los subgrupos de materiales Beyond.

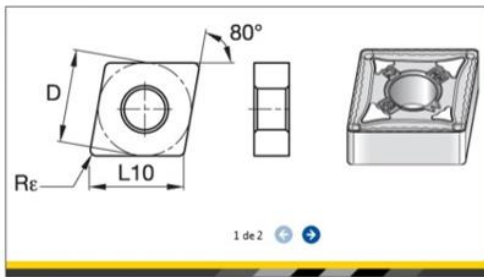
material	código ISO del grupo de materiales	número de subgrupos de materiales
acero	P	1-6
acero inoxidable	M	1-3
fundición	K	1-3
materiales no ferrosos	N	1-8
aleaciones de alta temperatura	S	1-4
materiales endurecidos	H	1

CNMG160616MN	15,88	16,12	1,6	●	●	●	●																			
CNMG190608MN	19,05	19,34	0,8	●	●	●	●																			
CNMG190612MN	19,05	19,34	1,2	●	●	●	●																			
CNMG190616MN	19,05	19,34	1,6	●	●	●	●																			

Figura 4.19 Parámetros de Trabajo para Placas de Corte

Fuente: (Kenanmetal, 2013)

CNMG-MN

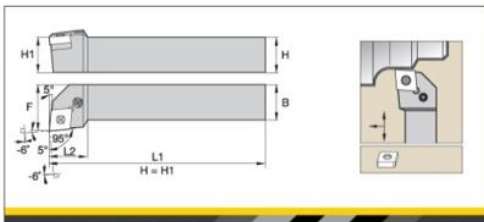


• Beyond™ Drive™ grades included.

KENAMETAL

Número de pedido	Número de catálogo	Grado	D	L10	S	Rε	D1	Customer Part #	Primera opción
3751501	CNMG120412MN	KCP05	12,7	12,896	4,76	1,2	5,16		P M K N S H

PCLN 95°



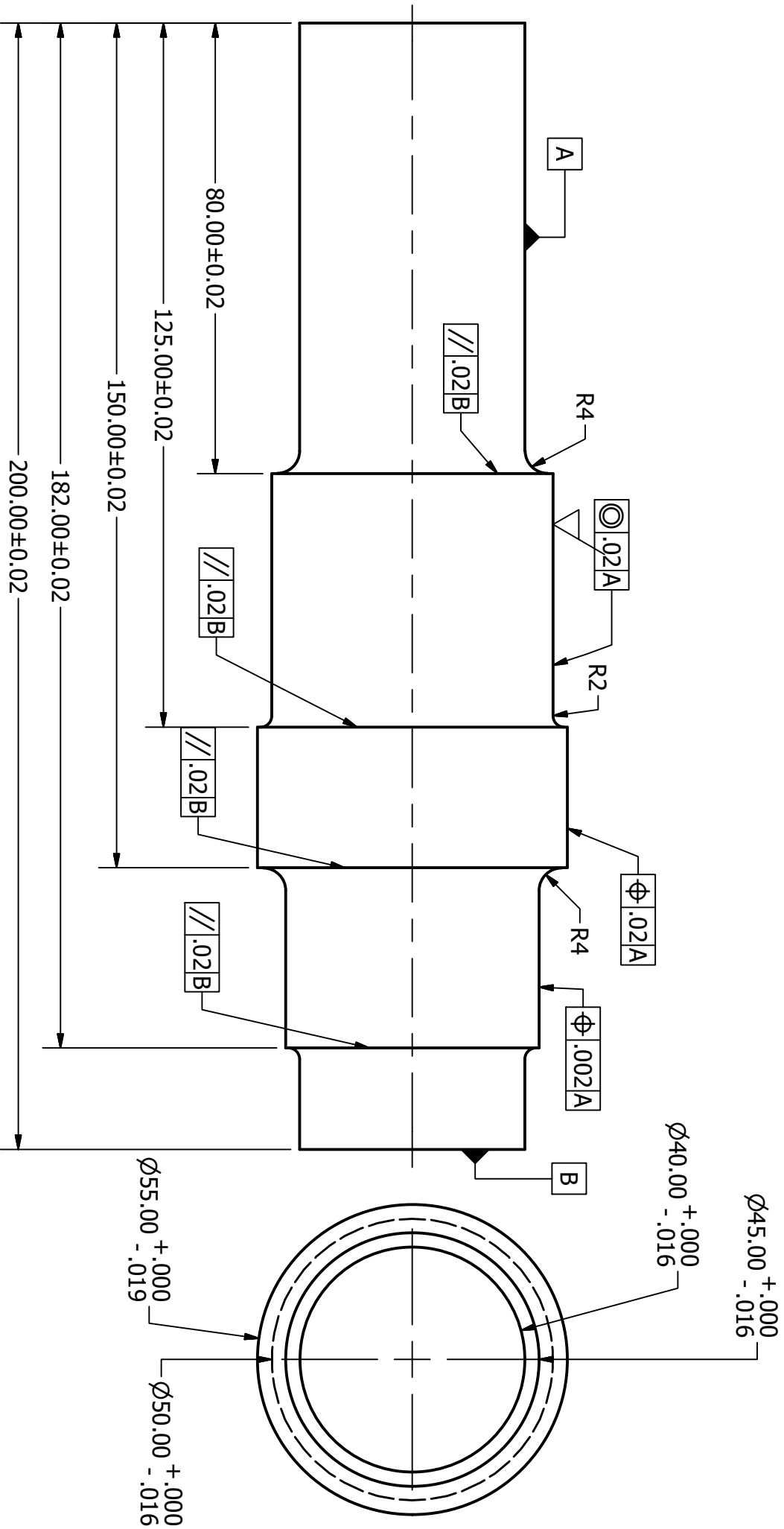
KENAMETAL

Número de catálogo	H	B	F	L1	LH	Calibre plaquita	Torx Plus
PCLNL1616H12	16	16	20	100	26	CN..120408	15 IP

Figura 4.20 Dimensiones de Placas y Portaherramientas Cuadrado

Fuente: (Kenanmetal, 2013)

PLANOS ILUSTRATIVOS



Dibujado por:	Nombre	Fecha
Aprobado por:	Guevara/Ochoa	01/11/2016
	Ing. Serrano	




E S P O L

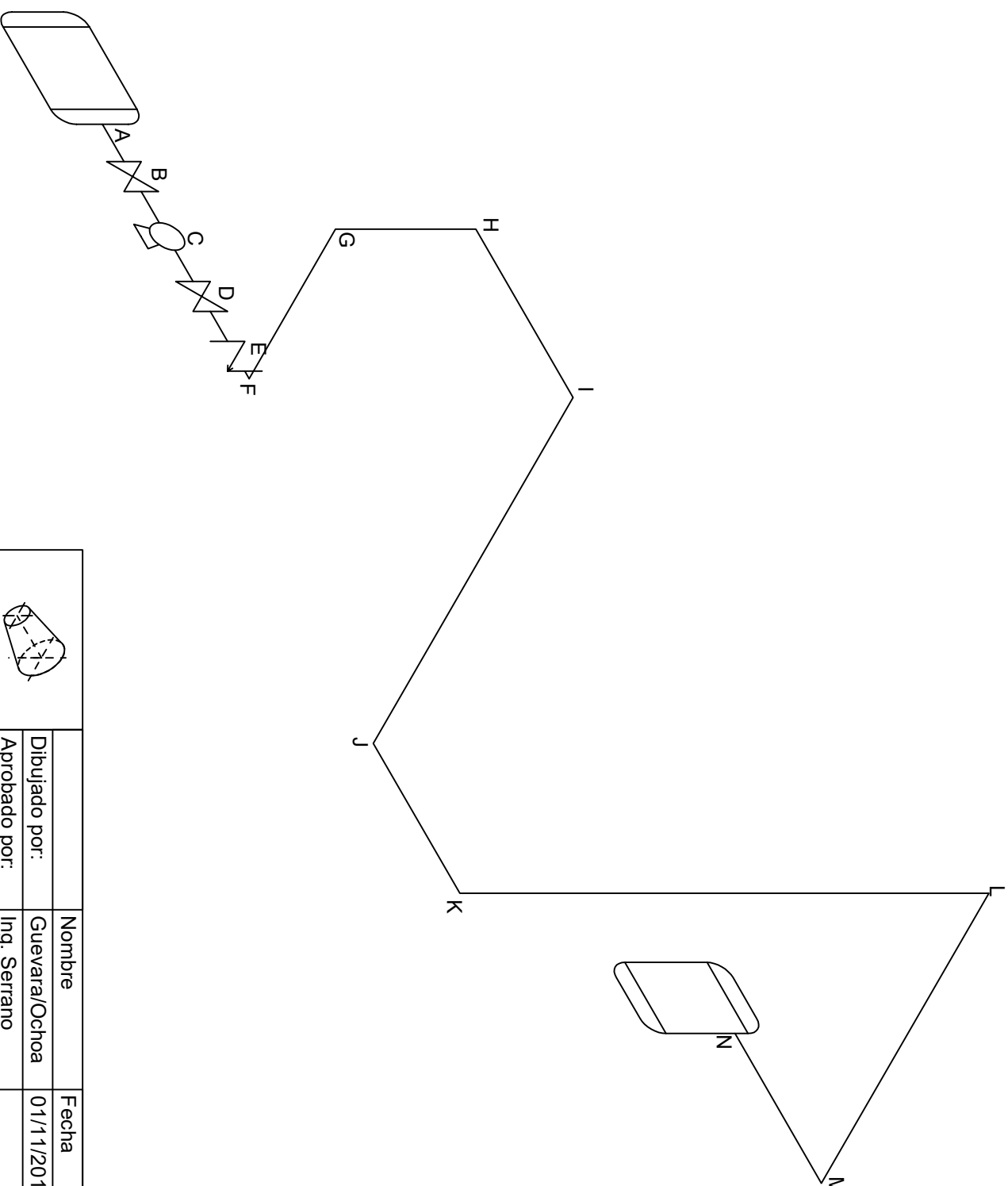
Escala:
1:1


Eje de caja reductora

No. **1**

Características de tubería de acero				
Sección	Diámetro Nominal [pulg]	Diámetro [mm]	Espesor [mm]	Longitud [m]
AB	2	60.3	2.77	1.1
BC	2	60.3	2.77	1.2
CD	2	60.3	2.77	1.1
DE	2	60.3	2.77	1.3
EF	2	60.3	2.77	2
FG	2	60.3	2.77	5
GH	2	60.3	2.77	5
HI	2	60.3	2.77	4
IJ	2	60.3	2.77	35
JK	2	60.3	2.77	4.3
KL	2	60.3	2.77	35
LM	2	60.3	2.77	3
MN	2	60.3	2.77	2
Material	Acero Inoxidable			
Manufactura	Sin Soldadura			

Simbología	
	Bomba
	Válvula de Bola
	Válvula de Retención



 Escala NA	Nombre	Fecha	<h1>ESPOL</h1>
	Dibujado por:	01/11/2016	
	Aprobado por:		
	Ing. Serrano		

Sistema de tuberías

 No. 2