

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**DISEÑO DE UN EQUIPO DE AGLOMERACION POR
RODADURA PARA EL LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN
CARBÓN BIOMASA PUCP**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Mecánico

AUTOR:

SERGIO FERNANDO BALDEON LAM

ASESORA:

MG. ESTELA ASSUREIRA ESPINOZA

Lima, Enero del 2022

Resumen

Los equipos de aglomeración de disco giratorio son muy usados en la industria para la producción de pellets esféricos debido a la uniformidad de los gránulos resultante y su diseño compacto. Los pellets producidos por estos equipos son de gran demanda en diferentes industrias, siendo particularmente los pellets de mineral de hierro de gran importancia en la siderurgia para la producción de acero.

En el presente trabajo se presenta el diseño de un equipo de aglomeración para el Laboratorio de Carbón y Biomasa de la PUCP, que servirá para el desarrollo de pellets de mineral de hierro bajo diversas condiciones empleando biocoque de caña como sustituto del coke o carbón mineral.

El equipo diseñado posee un disco aglomerador de 50 cm de diámetro con el cual se puede alcanzar una producción máxima de pellets de 375 kg/h, con un diámetro máximo de pellet de 20 mm. Para obtener diferentes tamaños de pellets, el equipo permite cambiar el ángulo de inclinación del disco, su velocidad de rotación y la dosificación de la materia prima según el criterio del laboratorista. La variación de la velocidad del disco se consigue por medio de un variador de frecuencia que controla un motor de 0.5 HP, el cual podrá variar su velocidad hasta la velocidad crítica de 48 rpm. Estructuralmente, el equipo cuenta con una estructura superior que sirve de soporte para el disco granulador y el sistema de potencia, y posee con un mecanismo basculante conducido por un sistema corona-cremallera para variar el ángulo de inclinación del disco desde los 40° hasta los 55°. La estructura inferior que sirve de soporte para la estructura superior. Un alimentador de tornillo sin fin de 2" de diámetro se emplea para alimentar de manera continua al disco. Por otra parte, hay dos rascadores para barrer las partículas adheridas a la superficie del disco y un dosificador para humedecer la mezcla al cual una bomba de 5 m de altura de presión y 13.3 L/min de caudal; y una sola tobera para entregar un caudal de 0.184 L/min con un ángulo de cobertura teórica de 60°.

Dedicatoria



A mis padres por el apoyo incondicional,
durante estos años de mi vida universitaria.
A mi abuelita por nunca dejarme decaer
antes la desmotivación y siempre sacar lo
mejor de mí.

Agradecimientos



A mi asesora por brindarme sus conocimientos y sus consejos para lograr mis objetivos. A mis compañeros y amigos por apoyarme en este largo tiempo y al Ing. Olortegui por despejarme las dudas en este proceso.

Índice de contenido

Resumen.....	i
Dedicatoria.....	ii
Agradecimientos.....	iii
Índice de contenido.....	iv
Índice de Tablas.....	vii
Índice de imágenes.....	viii
Lista de Símbolos.....	x
Introducción.....	1
Capítulo 1.....	6
1.1. Granulación.....	6
1.2. Tipos de granulación.....	7
1.2.1. Aglomeración de crecimiento/caída (Growth/tumble).....	7
1.2.2. Aglomeración por presión (Pressure/agglomeration).....	8
1.3. Equipos empleados para la granulación por crecimiento/caída (Growth/tumble).....	8
1.3.1. Granulador de tambor rotativo.....	8
1.3.2. Granulador de disco rotativo.....	9
1.3.3. Roto-granulador.....	10
1.3.4. Granulador de lecho fluidizado.....	11
1.4. Pellets.....	13
Capítulo 2.....	15
2.1. Descripción del producto.....	15
2.1.1. Pellets de mineral de hierro.....	15
2.1.2. Mineral de hierro.....	16
2.1.3. Angulo de reposo de materiales granulados.....	18
2.1.4. Aglutinante:.....	18
2.1.6. Cantidad de humedad.....	23
2.1.7. Escala y operación de granuladores giratorios.....	24

2.1.8.	Velocidad crítica.....	25
2.1.9.	Especificaciones de ingeniería.....	25
2.2.	Lista de exigencias	26
2.3.	Estructura de funciones	27
2.3.1.	Diagrama de caja negra	27
2.3.2.	Descripción de las funciones del equipo.....	28
2.4.	Conceptos de diseño	30
2.5.	Evaluación técnica y económica.....	34
2.6.	Diseño preliminar del equipo de Aglomeración.....	37
2.6.1.	Disco granulador	38
2.6.2.	Dosificador de material fino.....	41
2.6.3.	Dosificador del humectante.....	43
2.6.4.	Rascadores.....	43
2.6.5.	Estructura de soporte.....	44
2.6.6.	Configuración geométrica del disco granulador a diseñar.....	45
Capítulo 3.	49
3.1.	Secuencia de cálculos para el disco y el sistema de alimentación.....	49
3.2.	Determinación de aspectos generales del equipo	51
3.2.1	Cálculos de los flujos máscicos de la materia prima y del humectante	54
3.2.2	Flujo máscico del humectante	55
3.2.3	Diagrama de cuerpo libre del disco granulador	56
3.2.4	Peso del disco granulador	66
3.2.5	Torque del motor	69
3.2.6	Selección del dosificador de material fino	69
3.2.6.1	Potencia requerida para vencer la fricción	71
3.2.6.2	Potencia para transportar el material.....	71
3.2.6.3	Factor de sobrecarga	71
3.2.6.4	Potencia total consumida por el tornillo transportador	71
3.2.7	Selección del dosificador del humectante.....	72

3.2.7.1	Bomba de agua.....	75
Capítulo 4	78
4.1.	Secuencia de los cálculos para la estructura y el sistema de accionamiento	78
4.2.	Diseño del eje	81
4.2.1.	Diagrama de cuerpo libre del eje:.....	81
4.2.2.	Diagrama de fuerza cortante y momento flector.....	83
4.2.3.	Concentradores de esfuerzos	85
4.2.4.	Diseño paramétrico del eje.....	87
4.3.	Diseño de la estructura soporte.....	88
4.4.	Cálculo de soldadura.....	92
4.5.	Selección del motor	95
4.6.	Selección de rodamientos	96
4.7.	Sistema de control	97
4.7.1.	Selección del variador de velocidad	97
4.7.2.	Esquema eléctrico de conexión.....	97
4.8.	Planos de fabricación.....	98
4.9.	Costo del equipo	99
4.9.1.	Costo del material.....	100
4.9.2.	Costo de componentes y accesorios.....	100
4.9.3.	Procesos de fabricación	101
4.9.4.	Mano de obra	102
Conclusiones	103
Bibliografía	105

Índice de Tablas

Tabla 1. Métodos y aplicaciones de ampliación de tamaño.....	8
Tabla 2. Características de los granuladores industriales por vía húmeda	12
Tabla 3. Características de los pellets de Hierro.....	16
Tabla 4. Humedad, densidad y porosidad de minerales de hierro	17
Tabla 5. Porosidad y reducción isotérmica de gránulos en el ensayo de alto horno.....	20
Tabla 6. Procesos de fabricación de hierro y requerimientos de la alimentación.....	21
Tabla 7. Rango de composición química para DRI	21
Tabla 8. Caracterización de los pellets	22
Tabla 9. Dimensiones y reglas de escala para granuladores de disco y tambor	24
Tabla 10. Especificaciones de ingeniería para el diseño del disco granulador	25
Tabla 11. Lista de exigencias para la máquina.	26
Tabla 12. Matriz morfológica para la máquina.....	30
Tabla 13. Valor Técnico (Xi).....	35
Tabla 14. Valor Económico (Yi)	36
Tabla 15. Datos de rendimiento para boquillas con patrón cónico.....	73
Tabla 16. Cobertura teórica de pulverización a varias distancias en pulgadas y cm.....	74
Tabla 17. Puntos de análisis en el eje	84
Tabla 18. Esfuerzo de Von Mises para cada punto de análisis en el eje.....	87
Tabla 19. Especificaciones de diferentes materiales de aporte	94
Tabla 20. Lista de planos para el diseño del disco granulador	99
Tabla 21. Costo de los materiales para la fabricación del equipo.....	100
Tabla 22. Costo de los componentes para la fabricación del equipo	100
Tabla 23. Tiempos de mecanizado para el equipo de aglomeración	101
Tabla 24. Costos de los procesos de mecanizado	102
Tabla 25. Costo de la mano de obra para la fabricación del equipo	102

Índice de imágenes

Figura 1. Granulador de tambor rotativo GL-1240.....	9
Figura 2. Granulador de disco ZL20.....	10
Figura 3. Roto-granulador.....	11
Figura 4. Granulador de lecho fluidizado	12
Figura 5. Pellets de hierro	13
Figura 6. Briquetas de carbón y desechos de hierro	13
Figura 7. Angulo de reposos de diferentes materiales	18
Figura 8. Diagrama de caja negra para el proceso de granulación	28
Figura 9. Estructura de funciones del equipo de aglomeración por rodadura	28
Figura 10. Evaluación Técnica-Económica	36
Figura 11. Esquema del funcionamiento del granulador de disco	38
Figura 12. Movimiento de los gránulos sobre el disco a diferentes velocidades.....	39
Figura 13. Disco granulador	39
Figura 14. Relación entre la inclinación del disco, la altura y el ángulo de reposo.....	40
Figura 15. Sistema de faja transportadora.....	42
Figura 16. Sistema transportador de tornillo sinfín	42
Figura 17. Disco granulador típico	44
Figura 18. Vista posterior de la estructura de un disco granulador	45
Figura 19. Configuración de Granulador de Disco	46
Figura 20. Granulador de Disco.....	47
Figura 21. Diagrama de flujo para el cálculo del disco y el sistema de alimentación.....	50
Figura 22. Dimensiones generales del disco granulador	52
Figura 23. Estructura superior con sus componentes montados	57
Figura 24. Disco granulador montado en el eje	57
Figura 25. DCL del conjunto disco-eje.....	58
Figura 26. Distribución del volumen de la materia prima sobre el borde del disco	59
Figura 27. Gráfica del Software Matlab para determinar la altura del borde del disco.....	60
Figura 28. Sistemas de coordenadas (x,y) y (x',y')	61
Figura 29. Volumen del material dentro del disco granulador	61
Figura 30. Relación entre la altura del borde del disco granulador (H) y (h)	62
Figura 31. Diagrama de cuerpo libre del disco granulador.....	64

Figura 32. Componentes axial, tangencial y radial del peso del material en el granulado	65
Figura 33. Brida de unión entre el disco y el eje	68
Figura 34. Transportadores volumétricos	72
Figura 35. Área de aspersión y ubicación de la boquilla	75
Figura 36. Bomba de agua de 1/2" a 12VDC	76
Figura 37. Diagrama de flujo para el cálculo de la estructura y el sistema de accionamiento	79
Figura 38. Fuerzas sobre la estructura superior con sus componentes montados.....	80
Figura 39. Fuerzas aplicadas en el disco.....	81
Figura 40. Diagrama de cuerpo libre del eje.....	82
Figura 41. Diagramas de fuerza cortante y momento flector.....	84
Figura 42. Diámetro menor y mayor del eje.....	85
Figura 43. Gráficas de factores teóricos de concentración del esfuerzo.....	86
Figura 44. Graficas paramétricas del factor de seguridad vs diámetro.....	88
Figura 45. (a) Estructura superior (b) Diagrama de cuerpo libre de la estructura	89
Figura 46. Cargas aplicadas en la simulación de la estructura superior	90
Figura 47. Factor de seguridad de la estructura superior	91
Figura 48. Factor de seguridad de la estructura inferior	91
Figura 49. Detalle de la distribución de esfuerzos dentro de la estructura superior	92
Figura 50. Valores de los esfuerzos en las zonas críticas.	93
Figura 51. Diagrama de cuerpo libre de la estructura superior.....	93
Figura 52. Motor Trifásico.....	96
Figura 53. Unidad de rodamiento SYWK 1. YTH	96
Figura 54. Variador de Velocidad ATV12H037M2	97
Figura 55. Diagrama de conexión del variador de velocidad	98

Lista de Símbolos

$\%Humedad$	Es el porcentaje de humedad de la muestra
A	Parámetro que define si las partículas son hidrófilas
Acc	Área de la corona circular que forma el borde del disco
Acd	Área disco
B	Angulo de inclinación
C	Capacidad de producción de pellets
D	Diámetro del disco
d_{comb}	Densidad del agua combinada a la temperatura del pellet (gr/cm^3)
d_s	Densidad de la fase sólida (gr/cm^3).
d_w	Densidad del agua libre (gr/cm^3)
e	Espesor de la plancha de acero
e	Eficiencia de la transmisión
F_b	Factor de rodamiento de suspensión - (Rod. de bolas).
F_d	Factor de diámetro del transportador (Diám. = 2 Pulg).
F_f	Factor de vuelo (Tipo de tornillo estándar).
F_m	Factor del material.
F_p	Factor de aleta.
$fraccion_{hierro}$	Porcentaje de hierro en la mezcla
$fraccion_{aglutinante}$	Porcentaje del aglutinante en la mezcla
H	Altura del borde del disco
K	Parámetro que depende de las condiciones de mezcla

k_f	Factor de concentración del esfuerzo por fatiga en flexión
k_{fs}	Factor de concentración del esfuerzo por fatiga en torsión
L	Longitud del transportador
l_0	Espesor combinado de la película de agua (cm)
$M_{aglutinante}$	Flujo del aglomerante en base seca
M_{agua}	Es la masa de agua medida de la muestra
M_m	Masa del material ligero (aire, agua)
M_{pellet}	Flujo másico de pellets
M_s	Flujo del mineral de hierro en base seca
Ms	Masa de la muestra después del secado
n	Exponente de flujo
Nc	Velocidad crítica
\vec{op}	Vector posición del punto p.
\vec{or}	Vector posición del r
P_1	Presión de catálogo de la boquilla, (bar)
P_2	Presión requerida, (bar)
P	Potencia
Po	Porosidad del mineral de hierro
Q_1	Caudal de catálogo de la boquilla, (lpm)
Q_2	Caudal requerido, (lpm)
Q	Capacidad del disco
q	Sensibilidad a la muesca en tensión

$q_{cortante}$	Sensibilidad a la muesca en torsión
R_A y R_B	Reacciones en los rodamientos
rpm	Velocidad del tornillo sinfín
R_y	Es la reacción generada en los rodamientos
S_m	Superficie específica de la mezcla (cm^2/cm^3)
V_{agua}	Volumen de Agua
V_d	Volumen del disco granulador
V_m	Volumen del material ligero
V_p	Volumen de poro en un pellet (cm^3)
V_{pellet}	Volumen de un pellet
V_s	Volumen de la fase sólida en el pellet (cm^3)
W	Es el porcentaje en peso de humedad en un pellet (%)
W_d	Es el peso del disco granulador, (N)
W_{disco}	Es el peso del disco ubicado en su centro de masa
W_{eje}	El peso del eje
W_{es}	Es el peso de la estructura superior, (N)
W_{motor}	Es el peso del motor
W_p	Es el peso del material ubicado en su centro de masa
α	Angulo de reposo dinámico del material
β	Angulo de inclinación del plato
$\rho_{aglutinante}$	Densidad real del aglutinante
ρ_{ap}	Densidad aparente del mineral de hierro

ρ_{real}	Densidad real del mineral de hierro
$\rho_{real,mineral}$	Densidad real del mineral



Introducción

Desde el siglo XIX los altos hornos utilizaban mineral y carbón vegetal para la fabricación comercial de hierro, en aquella época existían alto hornos en Alemania, gran Bretaña y Estados Unidos. En los últimos años la tendencia ha hecho que la cantidad de altos hornos se reduzca, pero aumenten su tamaño. Esto ha hecho más atractivo el requerimiento de una carga para los hornos rica en hierro, el cual se logra con procesos de aumento de tamaño como el sinterizado, los pellets y minerales en trozos, ya que los minerales finos son impermeables a los gases. (Geerdes et al., 2009).

Como uno de los componentes más importantes en el proceso de obtención de hierro es el coque el cual se usa como combustible en los altos hornos. El empleo del coque en los hornos permitió abaratar los costos de producción además de ser mucho más fuerte que otros combustibles se obtenía una producción de metal alta calidad para fabricación de acero, esto al final aceleró la revolución industrial. (Seetharaman, 2013).

Desafortunadamente el efecto contaminante como consecuencia del uso de los altos hornos durante las últimas décadas ha traído grandes problemas medioambientales, como la contaminación de la atmosfera y el efecto invernadero causante del calentamiento global. El principal gas de efecto invernadero es el dióxido de carbono (CO_2) y, según la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio, su actual concentración atmosférica es la mayor registrada en los últimos 800.000 años y, sus niveles siguen en aumento (Earth Science Communications Team, 2020). Una de las industrias que poseen los mayores índices de emisiones de CO_2 es la fabricación de hierro y acero, donde la producción de 1.0 t de bobinas de acero laminado genera alrededor de 1.8 t de emisiones de CO_2 , para lo cual se emplea coque en el rango de 286-320 kg/tHM. (Mousa et al., 2016)

Por tal razón se ha optado por probar nuevos combustibles que se puedan usar como agente reductor en los altos hornos. Entre los reductores de mayor interés se tiene a la biomasa del cual muchos de sus tipos se pueden emplear en los procesos de sinterizado de mineral de hierro, pero para su implementación se debe tomar en cuenta el costo de procesamiento y el nivel de materia volátil (VM). Para el primer caso, a pesar de la accesibilidad con la que se puede tener la biomasa, la suma de los costos de recolección, transporte y procesamiento para algunos tipos puede llegar a ser más altos en comparación a otras opciones, por otra parte, un alto nivel de VM origina que la calidad del producto se deteriore. Las principales ventajas del empleo de la biomasa es la reducción de uso de combustibles fósiles y las emisiones de efecto invernadero, además de que los bajos niveles de azufre (S) reducen las emisiones de (SO_x) (Cavaliere, & Silvello, 2016)

Adicionalmente a que la biomasa presenta varias ventajas como la fácil obtención, bajos niveles de emisión de gases de efecto invernadero y bajo costo de recolección también existen problemas relacionados con la baja densidad de los distintos tipos de biomasa y la dificultad para transportarla y almacenarla. La calidad de la biomasa depende de algunas propiedades tales como el contenido de humedad, el contenido de carbono, el poder calorífico y la densidad, los cuales son de gran importancia pues determinan el uso y la aplicación real para determinado tipo de biomasa. Por tal razón, existe la necesidad de densificar la biomasa para ser utilizada de mejor manera, esto se logra creando dos tipos de productos, las briquetas y los pellets. (Núñez et al.2012)

Investigaciones sobre la aplicación de biomasa en el coque han mostrado que la biomasa se puede agregar al coque en un rango de 2-3 wt.% sin causar efectos negativos en la resistencia y reactividad del coque a la vez que proporciona un efecto favorable y significativo en la reducción de emisiones de CO₂ (Babich & Senk, 2019).

Considerando que los pellets se pueden emplear como combustible y agente reductor en industrias importantes, como es el caso de la fabricación de acero, los pellets autoreductores se producen a partir de biocarbón con un aglomerante, un aditivo y agua, aplicando la técnica de unión en frío de agitación y rodadura en disco giratorio. Los pellets resultantes son luego sometidos a un proceso térmico de endurecimiento a fin de otorgarles la resistencia necesaria para su empleo. Por tal razón el grupo de investigación de Carbón Biomasa de la PUCP ha recogido esta necesidad y por ello requiere de un aglomerador por agitación y rodadura en disco giratorio, mediante el cual se puede investigar la producción de granulados (pellets) a partir de biocarbones bajo diversas condiciones de operación.

La intención del laboratorio es determinar la proporción correcta para la composición de los pellets autoreductores, por lo cual requieren que el equipo sea versátil permitiendo cambiar tanto la velocidad de giro, el ángulo de inclinación y la ubicación de los rascadores, y aunque existen en mercado equipos para laboratorio carecen de versatilidad deseada. Es así, que se propuso como objetivo principal diseñar un equipo de aglomeración para el Laboratorio Carbón Biomasa de tipo por agitación y rodadura en disco giratorio e inclinación variable para la elaboración de pellets autoreductores.

El presente trabajo versa sobre el diseño de un equipo de aglomeración el cual ha comprendido el desarrollo de cuatro capítulos, los cuales se describen en las líneas siguientes:

En el primer capítulo se inicia con la descripción del proceso granulación, los tipos de granulación y los equipos granuladores típicos en la actualidad, además de una descripción del producto que se desea obtener (Pellets).

En el segundo capítulo se detallan los parámetros que interviene en el diseño, entre los cuales se tiene: conocer las necesidades del laboratorio de Carbón Biomasa, determinar las especificaciones de ingeniería, describir los componentes del sistema, establecer conceptos de

solución y de configuración para determinar un diseño óptimo y plantear las ecuaciones para el diseño.

En el tercer capítulo se realiza el diseño mecánico del disco granulador y los componentes relacionados, como son: el dosificador de material y el dosificador del aglutinante.

En el cuarto capítulo se diseña el sistema de accionamiento y la estructura de soporte que abarca al diseño del eje, la selección de los rodamientos y el sistema de control. Posteriormente, se desarrollarán los planos de ensamble y despiece necesarios para su fabricación.

El objetivo principal del trabajo fue realizar el diseño de un equipo de aglomeración por rodadura para el Laboratorio de Investigación Carbón Biomasa PUCP y los objetivos específicos: determinar el proceso de granulación bajo el cual opera el equipo; establecer los criterios para el diseño del granulador; diseñar el disco granulador o plataforma giratoria; diseñar el sistema de accionamiento y estructura de soporte.

El alcance de este trabajo se circunscribe sobre el diseño de un equipo de laboratorio, el cual se ha desarrollado en base a los requerimientos del Laboratorio de Investigación Carbón Biomasa PUCP. En el diseño se incluye el dimensionamiento de los equipos de dosificación y transmisión de potencia, así como también la parte estructural, el cual incluye al mecanismo de basculamiento que permitirá variar la inclinación del disco. Por su parte, para el diseño de los componentes se emplearán métodos analíticos para obtener las dimensiones correctas y cuyos resultados serán contrastados por medio de simulaciones por el método de elementos finitos hasta obtener un valor adecuado de factor de seguridad. Para finalizar el diseño los componentes estándar se seleccionarán en base a los resultados obtenidos en los componentes críticos y posterior a ello se emitirán los planos de fabricación y ensamblaje.



CAPÍTULO 01

PROCESO DE GRANULACIÓN

Capítulo 1

Proceso de granulación

En este capítulo se explica el proceso de granulación, las ventajas, sus campos de aplicación, así como de los tipos de granulación que existen en la industria y las diversas máquinas con las que se cuentan para realizar la granulación.

1.1. Granulación

La granulación es una operación que tiene como finalidad aglomerar partículas finas divididas o pulverizadas mediante presión o adicción de un aglutinante disperso en un líquido. El resultado esperado es la obtención de un granulado que constituya una forma definida o un producto intermedio. La granulación básicamente es un proceso de aumento de tamaño y posee numerosas ventajas sobre el polvo, ya que los productos finales poseen buenas propiedades reológicas (viscosidad, esfuerzos y deformación), además previene la segregación de los componentes en la granulación de polvos y mejora la apariencia del producto, también minimiza la formación de aglomerados y mejora las propiedades del flujo, control de la solubilidad, dispersión y porosidad.

En la actualidad, este proceso se encuentra presente en diversos campos aplicativos, como por ejemplo en la industria alimentaria, farmacéutica, minera, siderúrgica, química, petroquímica, fertilizantes, entre otros.

Este proceso se realiza con la finalidad de proveer una cantidad específica de material como se muestra en las tabletas farmacéuticas, aumentar la densidad para su almacenamiento como en los detergentes en polvo, y se elimina la formación de segregados en los productos farmacéuticos y fertilizantes.

1.2. Tipos de granulación

El proceso de granulación se puede realizar por dos métodos: aglomeración de crecimiento/caída (sin fuerzas externas) y aglomeración por presión (fuerzas externas bajas, medias y altas) (Fayed & Otten, 2013). El tipo de granulación que se escoja depende de la aplicación que se le dará al producto. Entre las limitaciones que pueden influir en la elección del equipo de granulación se incluyen: La forma de alimentación del ingrediente activo (polvo seco, masa fundida, lechada, solución), la necesidad de un proceso seco para materiales sensibles a la humedad, robustez del proceso, necesidad de cerramiento debido a problemas de polvo y humo, escala de operación deseada, integración del equipo de ampliación de tamaño dentro de la planta de proceso existente, experiencia existente dentro de la empresa en tipos específicos de equipos y folclore existente dentro de la empresa sobre tipos específicos de equipos. (Litster & Ennis, 2004)

A continuación, se describirá de forma breve en que consiste cada uno de los siguientes tipos de granulación. Debido a que los parámetros y las propiedades se pueden manipular no existe una "mejor" elección única de equipo para una situación determinada. (Litster & Ennis, 2004)

1.2.1. Aglomeración de crecimiento/caída (Growth/tumble)

Este método de aglomeración es similar al de la aglomeración natural. Debido a que las partículas pueden llegar a ser más grandes, la adhesión entre partículas se mejora con la adición de aglutinantes (principalmente agua y otros líquidos) y con aumento en la colisión entre partículas. Estas condiciones se pueden obtener en discos inclinados, tambores giratorios, cualquier tipo de mezcladores de polvo y lechos fluidizados.

1.2.2. Aglomeración por presión (Pressure/agglomeration)

Este método de aglomeración permite obtener aglomerados de forma y tamaño relativamente uniformes, al trabajar a presión baja a media la mezcla debe estar formada todavía por partículas finas y aglutinantes, esta masa se extruye a través de orificios en pantallas de diferentes formas o troqueles perforados. La aglomeración y la conformación se producen por la presión que empuja el material a través de los orificios y por las fuerzas de fricción durante el paso de la masa.

En la Tabla 1 se muestra las características y la aplicación típica de ambos métodos.

Tabla 1. Métodos y aplicaciones de ampliación de tamaño

Método	Tamaño de Producto (mm)	Densidad de granulo	Escala de operación	Comentarios	Aplicación típica
Volteo Granulador Tambor Disco	0.5 a 20	Moderado	0.5–800 tph	Gránulos muy esféricos	Fertilizantes, minerales, productos químicos agrícolas
Presión compactación Extrusión Prensas de rollo Prensa de tabletas Prensa de moldeo Molino de pellets	0.7 a 2 > 0.5 > 1 10	Moderado Alto a Muy Alto	Hasta 100 tph	Unión más fuerte	Minerales, clínker de cemento, cerámica, inorgánico químicos

Nota. Adaptado de Litster, & Ennis, (2004, p. 175)

1.3. Equipos empleados para la granulación por crecimiento/caída (Growth/tumble)

A continuación, se describirá cada uno de los equipos empleados para el proceso de granulación por crecimiento/caída (Growth/tumble).

1.3.1. Granulador de tambor rotativo

El tambor rotativo es el dispositivo de granulación continuo más simple, y se usa ampliamente en la granulación de fertilizantes y en la fabricación de bolas de mineral de

hierro. En la Figura 1 se muestra un granulador de tambor típico. Este consiste en un cilindro giratorio, que está ligeramente inclinado respecto a la horizontal para facilitar el transporte de material a través del tambor. El tambor generalmente está equipado con un anillo de contención para minimizar el derrame del material de entrada. A la salida del tambor, a menudo hay otro anillo de presa, que permite un aumento en la profundidad de la cama dentro del tambor. Se pueden usar toboganes, tuberías o transportadores para transportar el granulado a la entrada y a la salida del tambor. El material sólido normalmente se humedece cerca de la entrada del tambor, generalmente rociando un fluido/aglutinante sobre el lecho de sólidos que caen. Este tipo de granuladores genera gránulos muy esféricos.



Figura 1. Granulador de tambor rotativo GL-1240

Tomado de EMCC (2020)

1.3.2. Granulador de disco rotativo

El granulador de disco rotativo es un aglomerador por vía húmeda, mediante la técnica de rodamiento. Este equipo es utilizado para realizar partículas redondas. En este equipo el aumento de tamaño se realiza mediante una operación mecánica la cual es la aglomeración por rodadura. El proceso consiste en la alimentación continua, de polvo de hierro (material fino), al disco rotativo. A su vez, una bomba impulsa el líquido

humectante hacia la tobera para posteriormente pulverizarlo sobre el polvo de hierro. Con ello, se forman partículas humedecidas que aumentaran de tamaño por el movimiento rotativo del disco y el movimiento de rodadura. Cabe recalcar, que la posición del disco tiene una inclinación que propicia el movimiento por rodadura. Cuando se alcanza el tamaño deseado, los pellets abandonan el disco rotativo y se acumula en un depósito colector.



Figura 2. Granulador de disco ZL20
Tomado de Zhengzhou Tianci Heavy (2020)

1.3.3. Roto-granulador

El roto-granulador es adecuado para la mezcla de polvos, y para la granulación de polvo y aglutinante para las industrias farmacéuticas, químicas, de alimentos y otras industrias. El proceso completo de trabajo incluye mezcla y granulación.

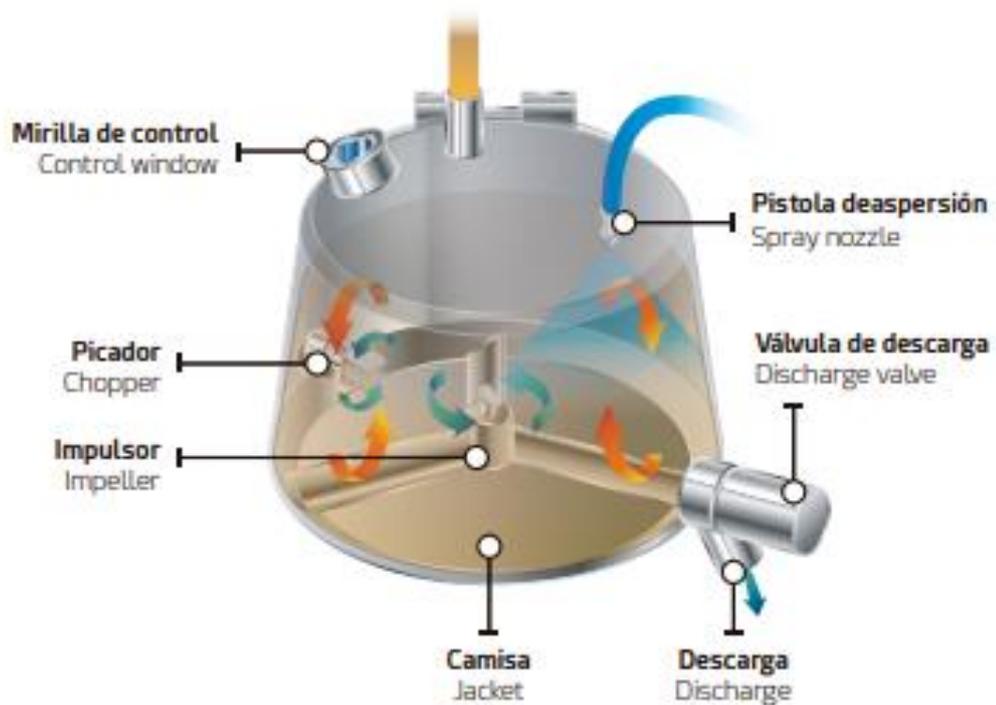


Figura 3. Roto-granulador

Tomado de MIC high Shear Mixer LATAM (2020)

1.3.4. Granulador de lecho fluidizado

La granuladora de lecho fluidizado ciclónico está diseñada con una cuchilla de forma especial circular; de esta manera permitiendo funcionar con el distribuidor de aire. La cuchilla permite el flujo del aire pasar a través de las incisiones de la cuchilla, así formando un ciclismo de alta velocidad del flujo de aire. El flujo de aire permite el ciclismo del material en polvo girando con turborreactores de movimiento. La máquina granuladora tiene una boquilla neumática para rociar el aglutinante o crear un recubrimiento líquido dentro del polvo. De esta forma, el material en polvo está hecho de gránulos.



Figura 4. Granulador de lecho fluidizado

Tomado de Xian Feng (2019)

En el siguiente cuadro comparativo se asemejarán las características de los granuladores por vía húmeda.

Tabla 2. Características de los granuladores industriales por vía húmeda

Granulador	Tamaño de producto (mm)	Densidad del gránulo	Escala de operación	Comentario
Disco rotativo Tambor rotativo	0.5-20	Moderada	0.5-800TPH	Gránulos muy esféricos
Roto-granulador	0.1-2	Baja a alta	50 TPH máx. 500 kg	Pueden manejar materiales muy cohesivos
Lecho fluidizado	0.1-3	-Baja (aglomeración) -Moderada (coating)	Batch:100-900 Kg Continuo: 50-70TPH	Muy bueno para procesos de coating

Nota. Elaboración Propia

1.4. Pellets

El término pellets es una denominación empleada generalmente para referirse a pequeñas porciones de material comprimido o aglomerado de forma esférica o cilíndrica (Ver Figura 5) (Oberberger, & Thek, 2010). El proceso para obtener este resultado se llama peletización. Esto consiste en la aglomeración de materia fina granulada obteniendo productos de mayor densidad con propiedades físicas y químicas variables para el requerimiento de manipuleo. Para la industria siderúrgica existen otras formas de aglomeración como el briquetado el cual es una tecnología de compactación que emplea ruedas giratorias que comprimen la materia prima en unas ranuras especiales con la forma deseada para la briqueta como se ve en la Figura 6. (Battle et al., 2014)



Figura 5. Pellets de hierro

Tomado de Cap. Minería (2019)



Figura 6. Briquetas de carbón y desechos de hierro

Tomado de Diez et al. (2013)

Como se ha visto en este capítulo, por las características que debe poseer el pellet es necesario definir adecuadamente el equipo que se usará para el proceso de granulación.



CAPÍTULO 2

CRITERIOS A CONSIDERAR PARA EL DISEÑO DEL GRANULADOR

Capítulo 2

Criterios a considerar para el diseño del granulador

En este apartado se realizará la descripción de los puntos necesarios para el desarrollo del presente diseño. Estas consideraciones siguen la metodología de diseño presentado por Beitz, W., Pahl, G., & Grote, K. (2007) y la Guía VDI 2221 “Métodos para el desarrollo y diseño de sistemas técnicos y productos”.

2.1. Descripción del producto

Para definir adecuadamente el problema, se inicia con la descripción de las características del producto que se desea obtener con el equipo, en otras palabras, los pellets de mineral de hierro obtenidos mediante un proceso de rodadura, así como también los componentes que la conforman y sus propiedades.

2.1.1. Pellets de mineral de hierro

Los pellets se fabrican mediante la aglomeración de un concentrado de mineral de hierro muy fino y un aglutinante, como la bentonita. El proceso de granulación de mineral de hierro consta de tres pasos principales (Moraes & Ribeiro, 2018):

- a) Preparación y mezcla de material para granulación: La materia prima (concentrado de mineral de hierro, aditivos —antracita, dolomita— y aglutinantes se preparan en términos de tamaño de partícula y especificaciones químicas, se dosifican y mezclan para alimentar el proceso de granulación.
- b) Proceso de formación del pellet: El green pellet es el pellet sin ningún proceso térmico. Se obtiene bajo un estricto control de la humedad y tiene una forma esférica y un diámetro de 8–16 mm.

- c) Proceso de endurecimiento: Los green pellets se endurecen en un procesamiento a alta temperatura a velocidades de calentamiento controladas, y con el objetivo de alcanzar los requisitos físicos y metalúrgicos para el manejo, el transporte y la aplicación final.

En la Figura 5, del capítulo 1, se puede observar el resultado final del proceso de peletización de hierro. Físicamente, el pellet de hierro debe ser uniforme, fuerte y resistente a la abrasión. Algunas de las características más importante que debe tener un pellet de hierro se encuentran en la Tabla 3.

Tabla 3. Características de los pellets de Hierro

PROPIEDADES	UNIDAD	VALOR
Tamaño	mm	∅: 8-16
Contenido de humedad	-	<10%
Densidad a granel	kg/m ³	>430
Fuerza de compresión	kgf	>2.5 (dry) / >150 (fired)
Distribución de tamaño	-	>90% 9-12mm
Choque térmico	°C	>350
Índice de caída y abrasión	-	>90%+6.3mm
Reductibilidad	-	>0.5% min ⁻¹
Porosidad	-	>25%
Desglose a baja temperatura	-	>80% +6.3mm

Nota. Tomado de Halt & Kawatra (2014)

2.1.2. Mineral de hierro

El mineral de hierro se extrae principalmente de depósitos a cielo abierto a través de operaciones mineras y el producto bruto se somete a procesamiento de minerales. Por lo tanto, el material está expuesto a una serie de operaciones de fragmentación, separación por tamaño, concentración, etc., con el objetivo de adecuar las características químicas, físicas y metalúrgicas para satisfacer las demandas de los procesos de fabricación de hierro.

Existen gran dispersión en la proporción en masa de los componentes químicos del mineral de hierro. Formoso, A., et al. (2000) realizó el análisis químico a minerales de hierro de diferentes fuentes, encontrando que el porcentaje de hierro puede estar comprendido entre los 53% a 67% (Formoso et al., 2000).

Otros parámetros importantes en la caracterización del mineral de hierro son la humedad, la densidad y la porosidad. Para las mismas fuentes de minerales de hierro, Formoso et al. (2000) presenta los resultados de la Tabla 4. En esta tabla se listan los valores de Humedad, Densidad real, Densidad Aparente y Porosidad de las diferentes muestras de mineral de hierro de los depósitos de minerales que Formoso et al. (2000) ha analizado, a la vez se muestran los valores para fundentes como la Caliza, Dunita, Olivino y Coque a modo de comparación.

Tabla 4. Humedad, densidad y porosidad de minerales de hierro

	Humedad, %	Densidad real, g/cc	Densidad aparente, g/cc	Porosidad %
Andaluza	14,28	4,0	2,8	29,7
CVRD-Carajas	5,59	4,8	4,0	16,2
CVRD-Tubarao	5,34	4,8	4,6	5,0
San Isidro	7,35	4,6	3,6	22,3
Mount Wright	2,55	5,0	4,5	10,9
SNIM-Tazadit	5,46	4,6	4,4	2,6
SNIM-Normal	5,38	4,7	3,8	19,6
Goa Silicioso	7,28	4,2	3,4	20,0
Nimco	5,61	4,7	3,8	19,1
Hamersley	6,89	4,5	4,1	8,9
MBR Brasil	6,61	5,1	4,8	5,9
Caliza	1,24	2,7	2,2	5,9
Dunita	1,10	2,9	2,7	4,2
Olivino	0,13	3,3	3,0	8,8
Coque	2,12	1,9	1,1	40,1

Nota. Tomado de Formoso et al. (2000).

El valor promedio de los datos de las Tabla 4 se tomará para los cálculos del capítulo 3.

2.1.3. Angulo de reposo de materiales granulados

Una propiedad importante de los materiales en la carga es el ángulo de reposo. Los valores típicos son: 35–38° para coque, 29–33° para sinterización y 25–26° para pellets como se muestra en la Figura 7. Durante el proceso de granulado este parámetro es importante debido a que determina la distribución del apilamiento dentro del disco granulador y junto con el ángulo de inclinación del disco y la altura del borde determinan el momento en el que un pellet abandona el disco.

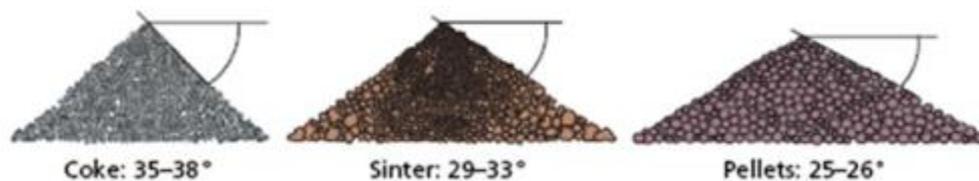


Figura 7. Angulo de reposos de diferentes materiales

Tomado de Yang (2014)

2.1.4. Aglutinante:

Los aglutinantes se utilizan en la granulación de mineral de hierro con el objetivo de mejorar el rendimiento del proceso en los siguientes aspectos:

- a) Promoción y facilitación en la formación de la bola.
- b) Aumento de la resistencia de los gránulos.
- c) Evitar el colapso de los gránulos en las etapas iniciales de calentamiento, cuando un gran volumen de gas generado por la vaporización del agua tiende a agrietar los gránulos.
- d) Mejora de las propiedades de los pellets cocidos.

2.1.4.1. Aglutinante inorgánico:

El aglutinante inorgánico más empleado para la elaboración de pellets de hierro es la bentonita. Este aglomerante es una arcilla de grano muy fino (coloidal), el tamaño

de las partículas es inferior a un 0,03% al del grano medio de la caolinita. Esta arcilla es muy pegajosa con un alto grado de encogimiento (los enlaces entre las capas unitarias permiten la entrada de una cantidad superior de agua que en la caolinita) y tiene tendencia a fracturarse durante la cocción y el enfriado. Por ese motivo no conviene trabajarla sola o como materia predominante de una masa. (Moraes et al., 2018)

La bentonita, ha sido el principal aglutinante utilizado en el proceso de granulación de mineral de hierro desde el comienzo de la producción de granza (carbón mineral lavado) en la década de 1950. A pesar de su bajo costo, los compuestos inorgánicos de la bentonita son contaminantes y aumenta la cantidad de escoria formada en la fabricación de hierro y acero, lo que aumenta las necesidades energéticas de tales procesos (Haas et al., 1989).

2.1.4.2. Aglutinante orgánico:

Los aglutinantes orgánicos se han utilizado como una alternativa atractiva a la bentonita en el proceso de granulación de mineral de hierro, principalmente porque se quema sin dejar ningún residuo en el granulado final. Desde el año 1980 hacia adelante, dos tipos principales de aglutinantes orgánicos han recibido la atención de las investigaciones comerciales. Estos aglutinantes orgánicos son los basados en compuestos de celulosa y los basados en polímeros de poliacrilamida. (Halt & Kawatra, 2014)

Al realizar experimentos con aditivos biológicos, se observó que el consumo de energía disminuyó, se obtuvo mejor calidad de pellets y rendimientos más elevados. Como cuando se utiliza un aglutinante con silicio disminuyó el costo de molienda, se redujo las pérdidas de hierro en relaves y permite que mayor cantidad de material logre la aglomeración. Además, en un comparativo con la bentonita, los aglutinantes

orgánicos forman pellets con mayor porosidad y reductibilidad luego de la cocción (Tabla 5). Sin embargo, emplear estos tipos de aglutinantes presenta una pobre calidad física ante la precocción, lo cual ha sido enfocado por agregar dispersantes a aglutinantes orgánicos para controlar la distribución de las partículas ultrafinas y ajustando las condiciones de cocción de los pellets.

Tabla 5. Porosidad y reducción isotérmica de gránulos en el ensayo de alto horno

	Bentonita	Orgánico
Porosidad (%)	25.4	32.8
Reducción (%) ISO 7215	68.3	79.1

Nota. Tomado de Lyons et al. (1986)

Los pellets elaborados con estos aglutinantes son utilizados para procesos de reducción directa, además no pueden ser coccidos a elevadas temperaturas y así como no pueden emplearse en procesos físicos rigurosos.

2.1.5. Calidad del pellet de hierro

El hierro es uno de los materiales de mayor demanda a nivel mundial pues su uso está extendido a una gran variedad de aplicaciones de la que se puede destacar la producción de acero. Con el aumento de la demanda de hierro de mejor calidad y con la regulación para limitar la contaminación ambiental existen diversos procesos para la obtención de hierro. En la Tabla 6 se tiene algunos procesos para la obtención de hierro en los que se usan los pellets, como se observa en la tabla los pellets son los más empleados en estos procesos, a diferencia de los sinterizados y el material fino.

Tabla 6. Procesos de fabricación de hierro y requerimientos de la alimentación

Furnace Type	Process	Raw Material Requirements		Product
		Iron Ore	Reductant	
Shaft furnace	Blast furnace	Sinter, pellets	Metallurgical coke, pulverized coal	Molten iron
	MIDREX	Pellets, lump	Natural gas, syngas	
	HyL/ ENERGIRON	Pellets, lump	Natural gas, syngas	Solid (DRI)
Fluidized bed	Finex	Fines	Coal	
	FINMET	Fines (size 0.15–7 mm)	Natural gas	
Rotary kiln	SL/RN	Lump, pellets	Coal and recycle char	
	Krupp- CODIR	Lump, pellets	Char, coal	
Rotary hearth furnace	FASTMET [®]	Composite pellets (size 16–22 mm)	Coal	
	Inmetco	Composite pellets	Coal	

Nota. Tomado de Seetharaman (2013)

En el método de Reducción Directa de Hierro (DRI) la calidad del pellet en base a su composición química se muestra en la Tabla 7, donde se observa la composición para un pellet de alto grado comercial con un porcentaje de masa de óxido férrico de 97.25 % en comparación al 91.37% para un pellet de bajo grado. La cantidad de compuestos de hierro en el mineral tiene un alto impacto en el resultado final del producto.

Tabla 7. Rango de composición química para DRI

Source	High-Grade Merchant Pellet (%)	Low-Grade Captive Pellet (%)
<i>Pellet</i>		
Fe ₂ O ₃	97.25	91.37
SiO ₂ + TiO ₂	1.26	5.60
Al ₂ O ₃	0.55	0.28
CaO	0.65	1.49
MgO	0.25	1.25
P	0.03	0.00
S	0.01	0.01

Nota. Tomado de Seetharaman (2013)

Otro aspecto importante en la calidad del pellet son sus características mecánicas pues los pellets deben ser transportados hacia el proceso en que se va a emplear y deben soportar las cargas durante el transporte o el secado previo al transporte. Entre las propiedades mecánicas se puede mencionar a la distribución media del tamaño de partícula, la resistencia mecánica, la cantidad de humedad, etc. Para determinar estas propiedades se realizan ensayos normalizados como se puede ver en la Tabla 8 donde se muestra el rango óptimo de pellets para alto horno.

Tabla 8. Caracterización de los pellets

	What is measured?	Results	Acceptable Range	Reference
MeanSize	Sizedistribution	%6.3–16mm % < 6.3 mm	> 95 % < 2 %	ISO 4701
ColdStrength	Compression Strength Tumbling Strength and Abrasion	Average kg/p % < 60 kg/p % > 6.3 mm % < 0.5 mm	> 150 kg/p < 5 % > 90 % < 5 %	ISO 4700 ISO 3271
LTB (Low Temp. Breakdown)	Size distribution after static reduction and tumbling	%>6.3mm	>80%	ISO4696
Reducibility	Weight decrease during reduction	%/min (dR/dt) ₄₀	>0.5%/min	ISO4695

Nota. Tomado de Geerdes et al. (2009)

Para el caso del tamaño medio (MeanSize) se mide la distribución de tamaños de los pellets, donde la mayoría de los ellos (95%) deben tener medidas entre 6.3 y 16 mm, por otra parte, la resistencia en frío (ColdStrength) para la mayoría de los pellets (90%) debe ser mayor a 150 kg/pellet para considerarse adecuado. En el caso de la ruptura a baja temperatura (LTB) la cantidad de partículas sobrevivientes después del ensayo debe ser mayor al 80% con diámetros mayores al 6.3 mm y finalmente la reductibilidad según la Tabla 8 debe ser mayor al 0.5%/min para considerarse óptimo.

2.1.6. Cantidad de humedad

El crecimiento sustancial de gránulos (crecimiento constante) ocurre dentro de un rango bastante estrecho de contenido de humedad. Por lo tanto, es necesario hacer una estimación inicial de los requisitos de humedad calculando la cantidad de líquido necesaria para saturar los poros de los gránulos. Para predecir el contenido óptimo de humedad para el pellet crudo (green pellet) Capes (1980) se proporciona la ecuación 1. En el capítulo tres se utilizará esta ecuación para determinar la cantidad de humectante necesario y dimensionar la bomba hidráulica.

$$W = \frac{100AK}{1 + \frac{V_p d_w + (d_{comb} - d_w) S_m l_0 V_s}{V_s d_s}} \quad (1)$$

Donde:

- W : Es el porcentaje en peso de humedad en un pellet (%)
- A : Parámetro que define si las partículas son hidrófilas
- K : Parámetro que depende de las condiciones de mezcla
- V_s : Volumen de la fase sólida en el pellet (cm³)
- d_s : Densidad de la fase sólida (gr/cm³).
- V_p : Volumen de poro en un pellet (cm³)
- d_w : Densidad del agua libre (gr/cm³)
- d_{comb} : Densidad del agua combinada a la temperatura del pellet (gr/cm³)
- S_m : Superficie específica de la mezcla (cm²/cm³)
- l_0 : Espesor combinado de la película de agua (cm)

2.1.7. Escala y operación de granuladores giratorios

Para determinar la relación entre la capacidad y la potencia con las dimensiones del disco se establecieron las relaciones que se muestran en la Tabla 9 para discos y tambores. Estos datos son adecuados para cálculos rápidos de orden de magnitud. Para los granuladores de tambor, el consumo de energía y la capacidad están relacionados con el volumen del tambor, lo que permite mayores rendimientos de lo que es posible con los discos, donde la capacidad se escala con el área del disco.

Tabla 9. Dimensiones y reglas de escala para granuladores de disco y tambor

Disco Inclinado	Tambor
Rendimiento o capacidad: $Q \propto D^2$ (<i>area</i>)	$Q \propto LD^2$ (10 – 20% <i>del volumen</i>)
El consumo de energía: $P \propto D^2$ (<i>area</i>)	$P \propto LD^2$ (<i>volumen</i>)
Velocidad: 50 – 75% de N_c	30 – 50% <i>de N_c</i>
Ángulo: 40 – 70° desde la vertical (45 – 55° mas comun)	0 – 10° <i>desde la horizontal</i>
Altura o longitud: 20% de D	2 a 5 D

Nota. Tomado de Litster & Ennis (2004, p. 192).

Las relaciones de la Tabla 9 requieren que la constante de proporcionalidad sea definida tanto para la capacidad (Q) y la potencia (P) Capes & Williams (1980), al depender del diámetro del disco que debe estar en metros. Tomando los valores obtenidos por Pietsch (1966) se tiene los siguientes datos para la capacidad y la potencia:

$$P = 1.1D^2 \text{ kW} \quad (2)$$

$$Q = 1.5D^2 \text{ Mg/h} \quad (3)$$

El borde del disco (H) en metros (Capes & Williams, 1980) se calcula como:

$$H \cong 0.2 D \quad (4)$$

2.1.8. Velocidad crítica

Un parámetro operativo clave para el diseño del disco es la velocidad crítica. Esto se define como la velocidad a la que un gránulo se mantiene estacionario en el borde del disco solo por las fuerzas centrípetas, la velocidad crítica se puede calcular con la Ecuación (5). (Capes & Williams, 1980; Kapur, 1978)

$$N_c = 42.3 \sqrt{\frac{\sin \beta}{D}} \quad (5)$$

Los discos suelen operar entre 50% y 75% de la velocidad crítica (N_c) en rpm, para ángulos β entre 45 y 55 ° (Capes & Williams, 1980) y (D) en metros.

2.1.9. Especificaciones de ingeniería

Los requerimientos del Laboratorio de Carbón Biomasa se toman como base para iniciar el diseño del granulador (Tabla 10). Estos valores posteriormente se ajustarán a lo largo del diseño según la viabilidad técnica existente. Al finalizar el diseño los valores reales para estas variables se establecerán como características técnicas de la máquina. Para efectos de diseño se tomó que el diámetro máximo es de 20 mm porque es el tamaño máximo de los pellets de hierro.

Tabla 10. Especificaciones de ingeniería para el diseño del disco granulador

Características	Variable o parámetro	Valor o Rango
Angulo de inclinación	θ	30 – 60 °
Tamaño inicial de la partícula	d_1	2 – 20 μm
Tamaño final máximo de la partícula	d_2	20 mm
Densidad del producto granulado	ρ	430 kg/m ³

Nota. Tomado del Laboratorio de Carbón Biomasa PUCP

2.2. Lista de exigencias

El grupo de investigación de Carbón Biomasa de la PUCP como parte de su trabajo de investigación en el área de biocombustible desean producir pellets esféricos empleando biocarbones para cual requieren de un equipo de granulación con un diseño flexible. Bajo estos requerimientos se elaboró la Tabla 11 con la lista de deseos y/o exigencias establecidas. El listado de exigencias se toma como punto de partida para elaborar y evaluar los conceptos de solución.

Tabla 11. Lista de exigencias para la máquina.

LISTA DE EXIGENCIAS			Página 1 de 1
			Ed: Rev.1
Proyecto		DISEÑO DE UN EQUIPO DE AGLOMERACION POR RODADURA PARA EL LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN CARBÓN BIOMASA PUCP	Fecha: 25/04/2022
Cliente		PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ	Revisado: Elaborado S.F.B.L.
Fecha	Deseo o Exigencia	Descripción	Responsable
25/04/2022	E	Función Principal: Aumentar el tamaño de los pellets.	S.F.B.L.
25/04/2022	E	Materia: Mineral de hierro y aglutinante orgánico.	S.F.B.L.
25/04/2022	E	Sub-Funciones: Variar la inclinación, variar la velocidad, humedecer la materia prima, suministrar de manera continua el mineral.	S.F.B.L.
25/04/2022	E	Seguridad: El diseño no debe poner en riesgo la integridad física del operario, ni contaminar el medio ambiente.	S.F.B.L.
25/04/2022	D	Geometría: Las dimensiones de la máquina deben ser lo más compactas posibles, para un espacio de 1.5x1.5m	S.F.B.L.
25/04/2022	E	Energía: La máquina será alimentada por energía eléctrica monofásica.	S.F.B.L.
25/04/2022	E	Fabricación: La fabricación debe hacerse en un taller de manufactura con materiales existentes en el mercado local.	S.F.B.L.

Nota. Elaboración propia.

2.3. Estructura de funciones

Habiendo definido la lista de exigencias y las especificaciones de ingeniería, se procede a describir las funciones con la que debe de cumplir el equipo de aglomeración por rodadura. Se describen tanto el diagrama de caja negra, así como las funciones del equipo durante el proceso de aglomeración.

2.3.1. Diagrama de caja negra

En el proceso de granulación existen relaciones entre las propiedades finales del producto (pellet) con las características del mineral de hierro y las características del equipo empleado. Los parámetros que afectan sustancialmente a este proceso son el contenido de humedad, la inclinación del disco, el tiempo de granulación, el tipo de aglutinante, etc. (Pietsch, 1966) Aunque de manera experimental se conocen tales relaciones las ecuaciones analíticas para expresarlas aún son escasas, debido a la complejidad y la cantidad de variables que intervienen en el proceso de granulación. A pesar de ello empleando modelos estadísticos se pueden establecer las relaciones entre las variables y con ello determinar la influencia de los parámetros del mineral de hierro sobre las características mecánicas del pellet. (Timofeeva et al., 2013; Patra & Rayasam, 2018)

Debido a que dentro de las exigencias se desea un diseño flexible, el cual permita controlar varios de los parámetros que intervienen en el proceso de granulación, se presenta el diagrama de la Figura 8, que muestra las diversas variables que tienen mayor influencia en el proceso de granulación y son necesarios para definir las características finales de los pellets durante este proceso.



Figura 8. Diagrama de caja negra para el proceso de granulación

2.3.2. Descripción de las funciones del equipo

El proceso de granulado o aglomeración por rodadura es uno de los métodos más usados para incrementar el tamaño de material particulado dentro de la industria. Como se vio en el capítulo II, este proceso emplea como materia prima el mineral de hierro con una composición que varía según el yacimiento del que es sacado; por su parte el aglutinante, que puede ser orgánico o inorgánico, acompaña a la materia en forma de polvo y mediante un sistema de rociado el humectante es esparcido sobre la mezcla de mineral de hierro y aglutinante. Para cambiar las propiedades finales de pellet se puede manipular la rotación y la inclinación hasta que se obtiene el tamaño adecuado, después de lo cual se almacenaran en un depósito.

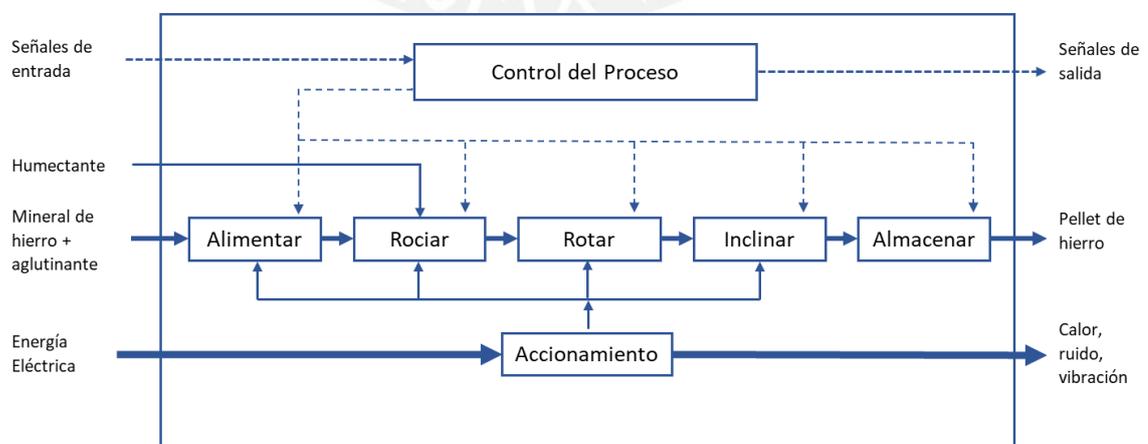


Figura 9. Estructura de funciones del equipo de aglomeración por rodadura

Cada una de las funciones que se muestran en la Figura 9, se describen como sigue:

Alimentar: Mediante un alimentador, se depositará de manera continua la mezcla de mineral de hierro con el aglutinante en forma de polvo. La capacidad del alimentador se ajustará en función de la velocidad y la cantidad de pellets que se desean producir.

Rociar: Mediante un dosificador de líquidos, se rociará el humectante sobre la mezcla seca de mineral de hierro y aglutinante que se encuentra dentro del equipo.

Rotar: Como el proceso de aglomeración se realiza por rodadura, el equipo mantendrá girando continuamente la mezcla haciendo que las pequeñas partículas se desplacen hasta la parte superior, y mediante unos rascadores las partículas se desprenderán de la parte superior del equipo y rodaran hacia abajo aumentando su tamaño.

Inclinar: Para que el pellet alcance un tamaño determinado, debe pasar cierta cantidad de tiempo llamado “tiempo de residencia”, este tiempo dependerá del ángulo del material y la inclinación del disco. Como el ángulo de reposo es una propiedad de la materia, el equipo debe permitir cambiar la inclinación del disco a gusto del investigador para obtener el tamaño adecuado de pellet

Almacenar: Los pellets que tengan el tamaño adecuado por acción de la gravedad saldrán equipo y serán llevados por medio de una tolva hacia un depósito que almacenara los pellets terminados.

Control del proceso: Se empleará un control manual sobre los equipos que componen el equipo de aglomeración.

Accionamiento: El accionamiento se realizará mediante motores del tipo eléctrico alimentados desde la red eléctrica de 220V.

2.4. Conceptos de diseño

En la generación de conceptos de diseño se empleará la matriz morfológica de la Tabla 12, utilizando como subfunciones las presentadas en la Figura 9.

Tabla 12. Matriz morfológica para la máquina.

Solución	Subfunción	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
1	Alimentar	Manual 	Faja 	Tornillo sinfín 
		Difusor de agua 	Boquilla aspersor 	
2	Rociar	Unidad Hidraulica 	Motor eléctrico 	
		Motor hidráulico 	Variador de velocidad 	Caja reductora 
3	Accionar	Pistón Hidráulico 	Engranaje-cremallera 	Pistón eléctrico 
		Tolva cónica y deposito 	Tolva abierta inclinada y deposito 	Tolva plástica y deposito 
4	Rotar			
5	Inclinar			
6	Almacenar			
7	Controlar	Manual 	PLC 	PC 

Solución 1	
Solución 2	
Solución 3	

Para la generación de los conceptos de diseño se empleará como base los granuladores de disco inclinado de la Tabla 9; esto debido a que estos equipos ocupan menos espacio que los de tipo tambor, además los ángulos de inclinación de los discos son mucho mayores, permitiendo un mayor rango para el control de la inclinación y consecuentemente en el diámetro del pellet.

Concepto de Solución 1

La alternativa 1 sigue el camino trazado por las flechas de color rojo y presenta los siguientes elementos:

1. Alimentación manual: Evita el uso de un equipo adicional para alimentar al equipo, por lo cual se trabajaría por lotes y no de manera continua.
2. Difusor de agua: Entrega un flujo de agua con gotas de gran tamaño y el caudal constante.
3. Unidad hidráulica: Entrega potencia hidráulica para el accionamiento de los dispositivos del sistema hidráulico. Emplea hidrolina como fluido de trabajo.
4. Motor hidráulico: Entrega alto torque y se emplea para mantener en movimiento el disco granulador, la velocidad de estos motores se puede regular desde el sistema hidráulico y no necesita un sistema de transmisión adicional.
5. Pistón hidráulico: Sirve como actuador en el sistema hidráulico para inclinar el disco granulador mientras está en movimiento.
6. Tolva cónica con deposito: Recepciona los pellets que salen del disco y los dirige hacia un depósito ubicado en la parte inferior.
7. PLC: Se emplea como unidad de control para el sistema hidráulico del equipo de aglomeración por rodadura. Este sistema permite la automatización del proceso de peletizado.

Concepto de Solución 2

La alternativa 2 sigue el camino trazado por las flechas de color azul y presenta los siguientes elementos:

1. Alimentación por faja: Permite la alimentación constante de la materia y el aglutinante, aunque como el sistema es abierto podría haber pérdida de material.
2. Boquilla aspersor: Entrega un flujo de agua con gotas más finas y un caudal que puede variarse controlando la presión.
3. Motor eléctrico: Entrega potencia mecánica para mover los elementos rotatorios del equipo de aglomeración. Emplea la toma de tensión de 220 v.
4. Caja reductora: Reduce la velocidad del motor a en función a la relación de transmisión de la caja. La velocidad de salida es constante.
5. Pistón eléctrico: Sirve como actuador para inclinar el disco granulador mientras está en movimiento. Usa energía eléctrica a 24V.
6. Tolva plástica con depósito: Recepciona los pellets que salen del disco y los dirige hacia un depósito ubicado en la parte inferior. Al ser plástica no se oxida, pero es sensible al desgaste.
7. PC: Se emplea como unidad de control para el sistema eléctrico del equipo de aglomeración por rodadura. Este sistema permite la automatización del proceso de peletizado pero requiere de módulos de potencia para manejar los equipos eléctricos.

Concepto de Solución 3

La alternativa 3 sigue el camino trazado por las flechas de color naranja y presenta los siguientes elementos:

1. Alimentación por tornillo sinfín: Permite la alimentación constante de la materia y el aglutinante; como el sistema es cerrado no hay pérdida de material, pero este llegaría a compactarse si la velocidad es muy elevada.
2. Boquilla aspersor: Entrega un flujo de agua con gotas más finas y un caudal que puede variarse controlando la presión.
3. Motor eléctrico: Entrega potencia mecánica para mover los elementos rotatorios del equipo de aglomeración. Emplea la toma de tensión de 220 v.
4. Variador de velocidad: Reduce la velocidad del motor a en función a la programación del variador. La velocidad de salida es variable en un amplio rango.
5. Engranaje-cremallera: Sirve como actuador para inclinar el disco granulador mientras está en movimiento. Requiere intervención manual del investigador para ajustar la inclinación del disco.
6. Tolva abierta inclinada con depósito: Recepciona los pellets que salen del disco y los dirige hacia un depósito ubicado en la parte inferior. Es metálica y compacta.
7. Manual: Se requiere la intervención del investigador para configurar el equipo de aglomeración. Este sistema no permite la automatización del proceso de peletizado.

2.5. Evaluación técnica y económica

Tomando las recomendaciones de la VDI 2225 se hace la evaluación técnico-económica de los conceptos formulados anteriormente.

Valor Técnico: Para la evaluación técnica se tendrán en cuenta diferentes criterios tomando una escala de puntuación del 0 al 4; donde 4 significa que cumple totalmente con el criterio a evaluar y 0 que no cumple. Para esta evaluación se toman los criterios siguientes:

- **Función:** Cumple con el objetivo principal de aumentar el tamaño de los pellets de mineral de hierro mediante el proceso de rodadura.
- **Forma:** Posee una forma sencilla y compacta, permitiendo aprovechar mejor el espacio asignado para la máquina.
- **Diseño:** El diseño es fácil de plasmar e implementar.
- **Seguridad:** Presenta baja probabilidad de causar daños a los operarios.
- **Energía:** El diseño permite un consumo mínimo de energía.
- **Ergonomía:** Presenta comodidad y facilidad de uso para el operario.
- **Materiales:** Emplea materiales que se pueden conseguir en el mercado local.
- **Fabricación:** Es posible realizar la fabricación de manera sencilla, o con la menor cantidad de procesos de fabricación.
- **Montaje:** El diseño es fácil de ensamblar y desensamblar.
- **Mantenimiento:** Se puede hacer un mantenimiento rápido y sencillo.

Tabla 13. Valor Técnico (Xi)

DISEÑO MECANICO - EVALUACION DE PROYECTOS								
EQUIPO DE AGLOMERACIÓN POR RODADURA								
P: Puntaje de 0 a 4 (Escala de valores según VDI 2225)								
0=No satisface, 1=aceptable las justas, 2=Suficiente,3=bien,4=Muy bien(ideal)								
g: Peso ponderado según importancia de los criterios								
Criterios de evaluación para diseño en fase en concepto								
Variantes de Concepto		Concepto 1			Concepto 2		Concepto 3	
Nr.	Criterio de Evaluación	g	p	g*p	p	g*p	p	g*p
1	Función	5	4	20	4	20	4	20
2	Forma	4	1	4	3	12	4	16
3	Diseño	4	2	8	4	16	3	12
4	Seguridad	3	3	9	3	9	3	9
5	Energía	4	1	4	3	12	4	16
6	Ergonomía	2	3	6	2	4	2	4
7	Materiales	3	2	6	3	9	4	12
8	Fabricación	4	2	8	3	12	3	12
9	Montaje	3	2	6	3	9	4	12
10	Mantenimiento	4	2	8	3	12	3	12
Sumatoria		36	22	79	31	115	34	125
Valor Técnico (Xi)				0.549	0.799	0.868		

Valor Económico: De la misma manera se evalúa el valor económico en función de diversos criterios y con la misma escala de puntuación.

Tabla 14. Valor Económico (Yi)

DISEÑO MECANICO - EVALUACION DE PROYECTOS								
EQUIPO DE AGLOMERACIÓN POR RODADURA								
P: Puntaje de 0 a 4 (Escala de valores según VDI 2225)								
0=No satisface, 1=aceptable las justas, 2=Suficiente,3=bien,4=Muy bien(ideal)								
g: Peso ponderado según importancia de los criterios								
Criterios de evaluación para diseño en fase en concepto								
Variantes de Concepto		Concepto 1			Concepto 2		Concepto 3	
Nr.	Criterio de Evaluación	g	p	g*p	p	g*p	p	g*p
1	Costos de Fabricación	5	1	5	3	15	4	20
2	Costo de Mantenimiento	3	2	6	3	9	3	9
3	Costo de montaje	2	2	4	3	6	4	8
Sumatoria		10	5	15	9	30	11	37
Valor Económico (Xi)				0.375	0.750	0.925		

Al representar los valores obtenidos en las Tablas 13 y 14 para los ejes X y Y se tiene la Figura 10, donde al trazar la línea de color azul, se puede ver que el concepto 3 es la solución más apta para el diseño.

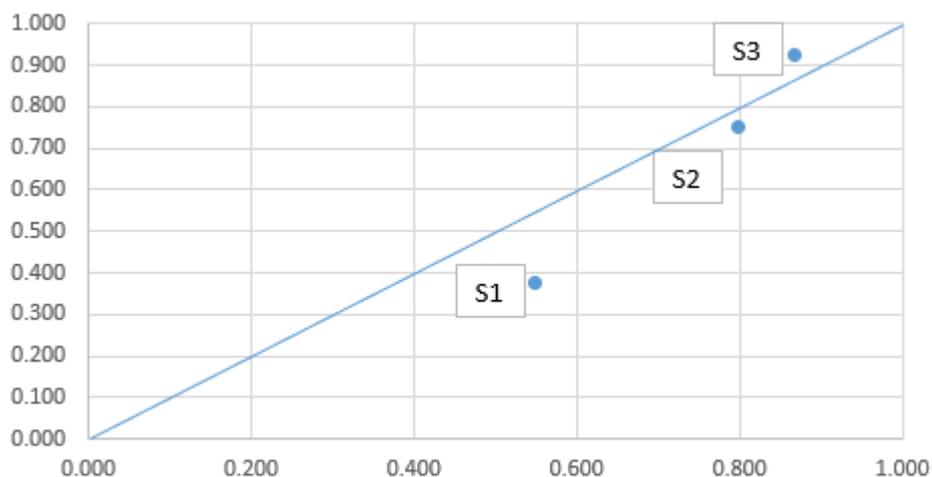
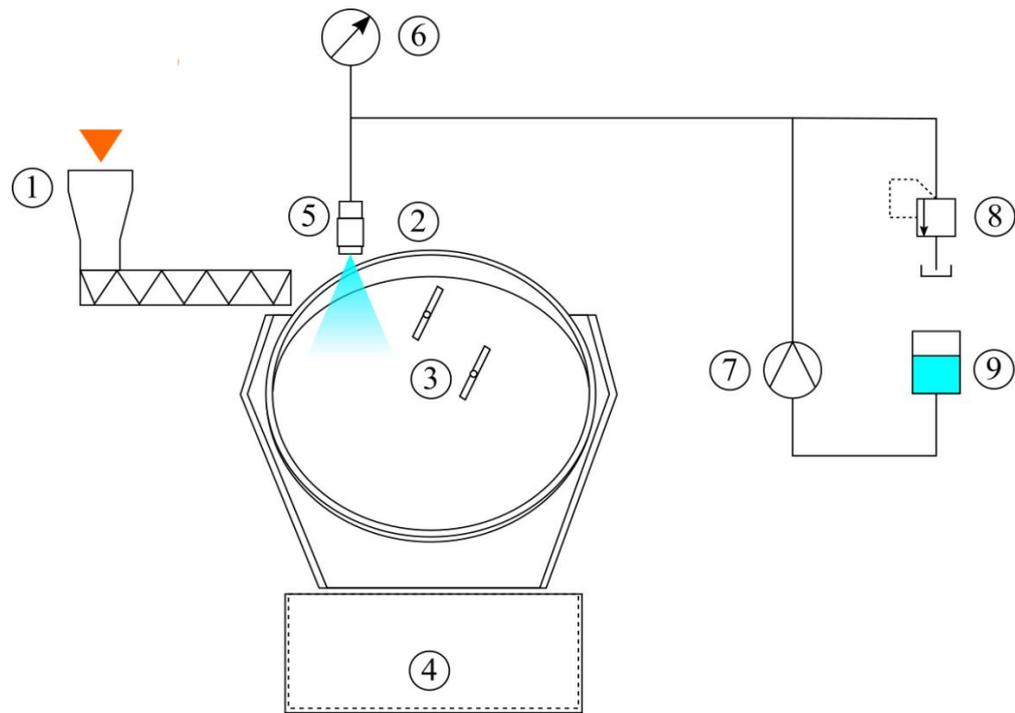


Figura 10. Evaluación Técnica-Económica

2.6. Diseño preliminar del equipo de Aglomeración

El equipo de aglomeración de disco estará compuesto principalmente por tres partes, un dosificador de material fino (polvo), un dosificador del humectante y el disco granulador junto a su soporte. Cada uno interviene en el proceso de granulación y su funcionamiento están íntimamente relacionados entre sí. Una descripción más detallada del sistema del equipo está representada en la Figura 11, donde se aprecia sus componentes principales. En este equipo el proceso de granulación es como sigue: en primer lugar, la materia prima (mineral de hierro) mezclada con la bentonita (aglomerante) es depositada en la tolva del transportador de tornillo sinfín (1), a su vez el eje del tornillo gira a una velocidad adecuada para proporcionar la cantidad necesaria de mezcla. El disco granulador indicado con el número (2) en la Figura 11 contiene las partículas finas que luego van creciendo en tamaño mientras el disco gira; la capacidad de producción pellets de esta relacionada con el diámetro y la altura del borde. Sobre el disco granulador se encuentran los rascadores (3), estos están montado sobre una estructura para mantenerse fijos y a una estrecha separación con la superficie del disco. En la misma estructura se encuentra montado una tolva exterior al disco, la cual igualmente está montado con una separación para evitar interferir con la rotación del disco y tiene la única función de dirigir los pellets que salen del disco hacia el depósito de aglomerados (4). Para proporcionar el humectante, que en este caso es agua, se emplea una boquilla pulverizadora (5) que de la misma manera que los rascadores la boquilla estará montada sobre la misma estructura, adicional a ello se implementará un manómetro (6) para monitorear la presión del líquido entregado por la bomba de agua (7). Debido a que el flujo la boquilla depende de la presión es necesario una válvula reguladora de presión (8) el cual sirve también como equipo de protección del circuito hidráulico. Finalmente, el depósito de agua se encuentra representada con el número (9).



- | | |
|-------------------------------------|----------------------------------|
| 1. Transportador de tornillo sinfín | 6. Manómetro |
| 2. Disco granulador | 7. Bomba de agua |
| 3. Rascadores | 8. Válvula reguladora de presión |
| 4. Deposito para aglomerados | 9. Deposito del humectante |
| 5. Boquilla pulverizadora | |

Figura 11. Esquema del funcionamiento del granulador de disco

2.6.1. Disco granulador

El disco granulador es uno de los elementos más importante del equipo, pues en él se lleva a cabo el proceso de granulación. A diferencia de los granuladores de tambor que se usan en procesos por lotes, los discos son empleados para un proceso continuo (Pandey et al., 2012). Sobre la base del disco el polvo de hierro proveniente del alimentador y las gotas del humectante suministrada por la bomba de agua se unen y son llevadas por acción de la rotación del disco hacia los rascadores los cuales se encargan de barrer las partículas que llegan a la parte superior y que posteriormente caen rodando sobre la base aumentando su tamaño en el proceso. En la Figura 12 se puede ver el patrón típico que siguen las partículas a diferentes velocidades, observándose como conforme al aumento de velocidad las partículas recorrerán mayores trayectorias. El tamaño que alcanzan los

gránulos está relaciones con algunas características del disco granulador, como son: la inclinación y la velocidad y el tiempo de residencia.

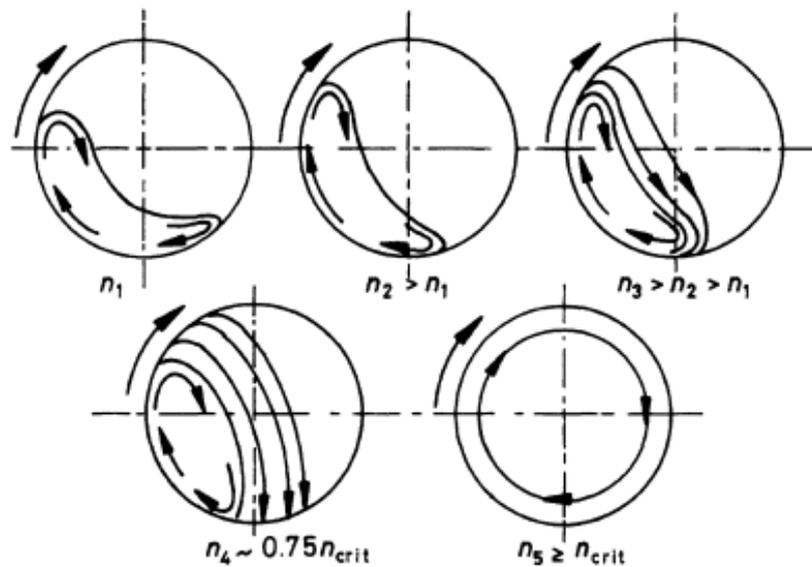


Figura 12. Movimiento de los gránulos sobre el disco a diferentes velocidades
Tomado de Pietsch (1997)

En la Figura 13 se presenta al disco granulador con sus dimensiones básicas, donde D es el diámetro del disco y H la altura del borde. Como el equipo es para uso en laboratorio y para una baja producción, el diámetro debe estar acorde a ello y considerando el espacio designado por el Laboratorio de Carbón Biomasa el cual es un área cuadrada de 1.5 m de lado, se estimó que el diámetro no debe superar el 1/3 del lado, lo que es igual a 0.5 m.

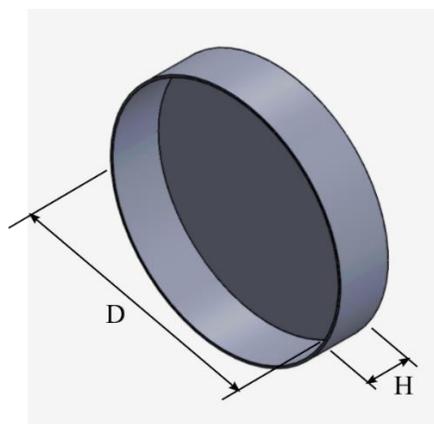


Figura 13. Disco granulador

2.6.1.1. Inclinación del disco

La inclinación del disco está relacionada con el ángulo dinámico de reposo específico del material como se ve en la Figura 14. Este ángulo determina el apilamiento de los gránulos y para que un pellet completamente formado salga del disco, el diámetro alcanzado por el mismo y las fuerzas que se generan en la rotación deben permitirle superar este ángulo. La inclinación es una variable importante, pues si el ángulo es demasiado empinado, los gránulos ya no se elevarían por fricción. El ángulo de inclinación para altas tasas de producción con un diámetro mínimo de 6 mm varía entre 45-48°, dependiendo del coeficiente de fricción del mineral y el coeficiente de elevación, así también la altura del borde del disco está determinada por el ángulo de inclinación y por su parte el volumen de llenado en el disco depende de tanto de la inclinación como de la altura del borde. (Pandey et al., 2012)

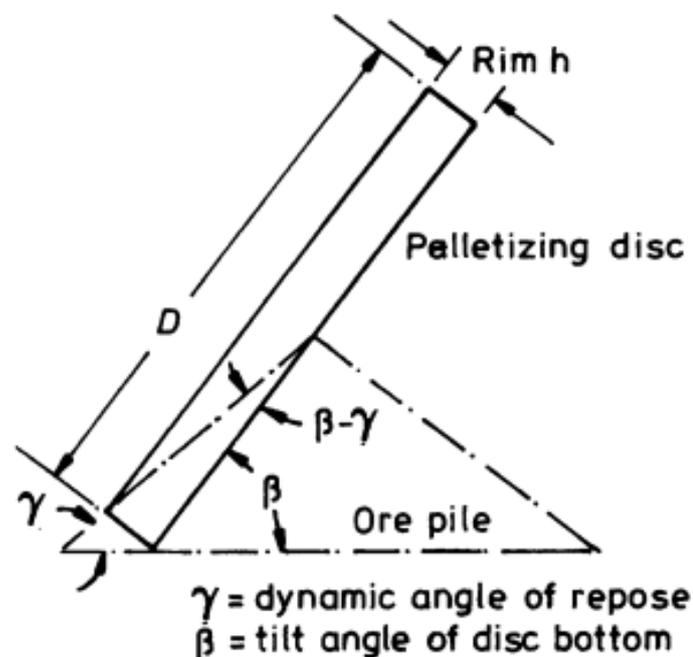


Figura 14. Relación entre la inclinación del disco, la altura y el ángulo de reposo

Tomado de Pietsch (1997)

2.6.1.2. Velocidad de rotación del disco

Durante el movimiento regular y estable de los gránulos estos van aumentando de tamaño, cuando la velocidad de rotación del disco es menor se forman pellets de mayor tamaño, debido a que la velocidad es insuficiente para lanzarlos del plato, por otra parte, cuando la velocidad es excesiva los gránulos pueden llegar a mantenerse en la parte superior sin rodar por acción de la fuerza centrífuga (Pandey et al., 2012). El disco granulador será accionado y controlado por medio de un variador de frecuencia el cual permite cambiar la velocidad del motor eléctrico al variar la frecuencia del mismo. Como el equipo es para laboratorio es más conveniente usar un variador de frecuencia que un reductor de velocidad, pues este último es pesado, costoso y difícil de conseguir en el mercado opciones para baja potencia.

2.6.2. Dosificador de material fino

Para mantener un flujo de alimentación constante de mineral hierro mezclado con el aglomerante es necesario contar con sistema transportador de velocidad ajustable. Entre los sistemas más usados están los transportadores de tonillo sinfín y las fajas transportadoras. Las fajas transportadoras generalmente están constituidas por unos tambores que son accionados por un motor y que arrastran la faja llevando a su vez a material deseado, estos sistemas se usan para transportar materiales granulados, agrícolas e industriales y hasta se usan en las cadenas de montaje en algunos procesos de fabricación. Entre las ventajas que poseen esta la capacidad de transportar materiales a gran distancia, permiten una gran capacidad de transporte y carecen de materiales de rápido desgaste. En la Figura 15 se muestra este sistema de transporte.

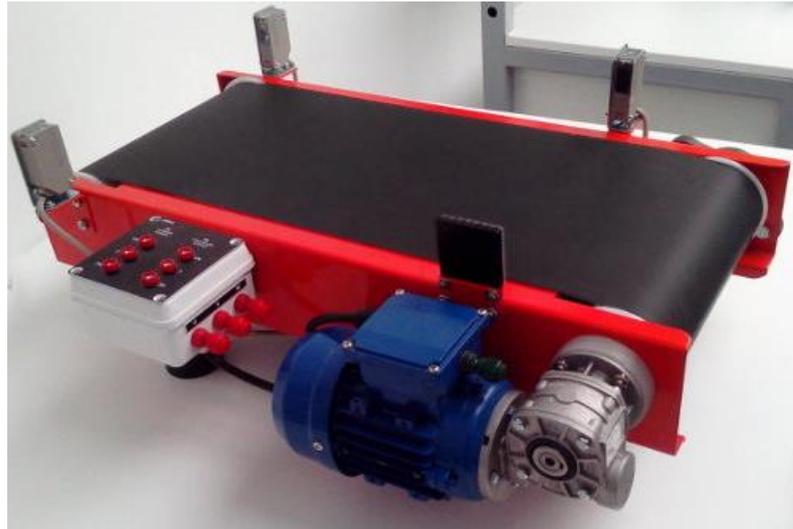


Figura 15. Sistema de faja transportadora

Tomado de TecnoEdu (2020)

Por otro lado, el transportador de tornillo sinfín es un mecanismo que por la acción de la rotación de un eje se puede desplazar un material en la dirección axial. Entre las ventajas del tornillo sinfín se tiene que es posible realizar otros procesos durante el transporte como el mezclado, deshidratación, compresión, enfriamiento y secado. Los tornillos sinfín tienen aplicación tanto en pequeña como en gran escala para el transporte de diversos tipos de materiales (Figura 16).



Figura 16. Sistema transportador de tornillo sinfín

Tomado de Metalfab MHS, LLC (2020).

2.6.3. Dosificador del humectante

Al emplear como aglomerante la bentonita la cual es un polvo arcilloso se debe agregar cierta cantidad de agua para iniciar el proceso de granulación. La cantidad de agua que debe ser agregada depende del porcentaje de humedad requerido para el tipo de pellets que se desea producir. El sistema que adiciona el agua a la mezcla de mineral de hierro y bentonita está compuesto básicamente por una boquilla y una bomba de agua, el sistema debe contar además con una válvula reguladora de presión, y un manómetro (ver Figura 11). La ubicación de la boquilla tiene un alto impacto en la efectividad de la humectación (Pyandey & Kumar, 2012) y se determinara de manera experimental, por tal razón se debe tomar en consideración el área cubierta por el agua pulverizada, el sentido de giro del disco y la ubicación de los rascadores siendo lo más común ubicar las boquillas cerca de ellos. Dependiendo del diámetro del disco se pueden emplear varias boquillas. La potencia de la bomba depende esencialmente del caudal del agua la cual debe ser determinada en función del porcentaje de humedad del pellet.

2.6.4. Rascadores

Los rascadores tienen como finalidad evitar que los gránulos se adhieran a las paredes del disco granulador. Durante la rotación del disco las partículas son llevadas hasta la parte superior donde chocan con la cara lateral de los rascadores alterando su trayectoria y enviándolas de regreso hacia la parte inferior. Para velocidades bajas la trayectoria de las partículas no llega a la parte superior y por consiguiente no chocan con los rascadores, por otro lado, si las velocidades son altas o los ángulos de inclinación son bajos, entonces las partículas lograrán llegar a la parte más alta del disco donde serán barridas por los rascadores y caerán de regreso a la parte inferior del disco. El uso de los rascadores favorece el aumento de tamaño de los pellets pues estas logran recorrer la mayor distancia posible durante la caída desde los rascadores. En el diseño es importante

tomar en cuenta la separación entre el rascador y la base del disco pues no deben entrar en contacto, ya que al hacerlo provocarían un desgaste prematuro del disco y un aumento en la potencia consumida por el motor. Para mantener fijos los rascadores estos van montados sobre la misma estructura que soporta al disco como se ve en la Figura 17, por lo cual cuando hay un cambio en la inclinación ambos mantienen la distancia relativa entre ellos.



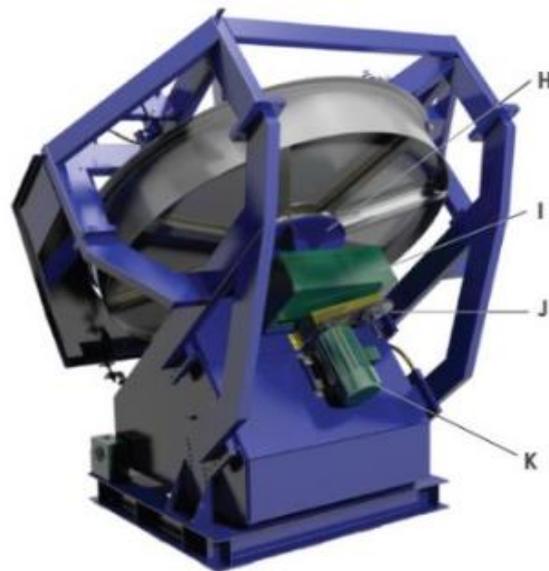
Figura 17. Disco granulador típico

Tomado de FEECO Internacional, (2020).

2.6.5. Estructura de soporte

La estructura del quipo se divide en dos partes, una parte es fija y la otra bascula con respecto a la primera. La estructura basculante soporta al disco granulador, su motor y a los rascadores permitiendo variar del conjunto según se requiera el proceso de granulación. La parte fija está apoyada sobre el suelo y se diseña tomando en consideración el centro de gravedad de todo el equipo a diversos ángulos de inclinación,

esto es para evitar que inestabilidad mecánica. Otra consideración adicional es que la estructura debe ser lo suficientemente rígida para disminuir la vibración y que sus dimensiones vayan de acuerdo con los requerimientos del laboratorio. En la Figura 18 se puede ver las partes de la estructura, siendo la parte superior la que sostiene al motor, al eje y al disco granulador.



H. Cubo de montaje

J. Correa de transmisión y polea

I. Reductor de engranajes

K. Motor de accionamiento

Figura 18. Vista posterior de la estructura de un disco granulador

Tomado de FEECO Internacional, (2020).

2.6.6. Configuración geométrica del disco granulador a diseñar

En todo proceso de diseño la metodología de diseño empieza con la recopilación de los requerimientos del producto a la vez que se define el problema de diseño, luego se generan varias alternativas para el diseño del equipo los cuales deben cumplir con los requerimientos establecidos (Eggert, 2005). Además, considerando que el diseño de discos granuladores tiene ya más de 60 años (Kbatt, 1958; Degler, 1963; Sommer y Herrmann, 1978) y que muchas configuraciones para esta máquina ya se han utilizado, en este diseño se usara una variante de la configuración mostrada en la literatura (Gorelov & Nenashev 1987). Como la configuración seleccionada se basa en un equipo industrial

de gran capacidad y la intención del presente trabajo es desarrollar un diseño escalado a un menor tamaño para laboratorio, se muestra en la Figura 19 la configuración base tomada para el desarrollo del nuevo diseño.



Figura 19. Configuración de Granulador de Disco

Tomado de FEECO Internacional, (2020).

Otra variante para la configuración del disco granulador se puede ver en la Figura 20. Este concepto está basado en el modelo de granuladores para investigación y laboratorio. El sistema cuenta con una bomba y una tobera que en simultaneo ingresan el humectante en el disco, por otro lado, se tiene un depósito de materia prima conectado a un transportador el cual trasladara el material de aporte, tras la incorporación de ambos materiales el disco realiza su función de aglomerar con ayuda de la configuración de los rascadores, el ángulo seleccionado y la velocidad de giro. Para finalmente ser depositados en un recipiente para su conservación.

La característica más resaltante de este tipo de granulador es su pequeño tamaño y la facilidad con la que los gránulos una vez que alcanzan un tamaño determinado salen del plato. Esto permite que el producto final tenga una distribución de tamaño de granulo más uniforme.

Las características de la Figura 20 sumado a los requerimientos específicos de la aplicación para la que se desea el equipo se emplearán para elaborar el nuevo diseño.



- | | |
|-------------------------------------|------------------------------|
| 1. Armario de distribución | 7. Depósito para aglomerados |
| 2. Dosificador de material sólido | 8. Disco granulador |
| 3. Balanza | 9. Rascadores |
| 4. Válvula de desahogo de presión | 10. Tobera binaria |
| 5. Depósito para líquido granulador | 11. Vibrador |
| 6. Depósito de material sólido | 12. Silo de material sólido |

Figura 20. Granulador de Disco

Tomado de G.U.N.T. Gerätebau GmbH (2020)



CAPÍTULO 3

DISEÑO DEL DISCO GRANULADOR GIRATORIO Y DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN

Capítulo 3

Diseño del disco granulador giratorio y del sistema de alimentación

En este capítulo se realizan los cálculos para el dimensionamiento de los componentes relacionados al disco granulador, los dosificadores de material fino y del humectante, del equipo de aglomeración.

3.1. Secuencia de cálculos para el disco y el sistema de alimentación

En la Figura 21 se ha esquematizado en un diagrama de flujo la secuencia de cálculo tanto para el disco como para el sistema de alimentación, pues ambas partes están íntimamente relacionadas. Como se aprecia en la Figura 21 al iniciar el cálculo se requiere como datos de entrada las propiedades del mineral de hierro y del aglomerante, tomando estos datos y la ecuación 1 se obtiene la cantidad de agua que se empleara como humectante. Por otra parte, esta información también será empleada para la selección del dosificador de materia prima.

Para conocer el flujo masico de agua que debe ser suministrado se toma los datos de la composición de los pellets, obtenidos en el bloque anterior, en conjunto con la capacidad de producción de pellets por hora, se consigue el flujo volumétrico de agua. Cabe resaltar que la capacidad de producción de pellets depende del tiempo de residencia y que este a su vez depende de la inclinación del disco, velocidad del disco y la altura del borde, valores que pueden ser variados por el operario para tener el tamaño de pellets deseado y en función a ello se empleara diferentes cantidades del humectante. Para determinar la potencia de la bomba del humectante se emplea el máximo valor posible para el flujo volumétrico y a su vez con estos valores se consigue realizar la selección del dosificador del humectante, el cual principalmente tiene que ver con la boquilla (tobera) de aspersión.

Generalmente en los catálogos de boquillas de aspersión estas se encuentran definidos en función a la presión de trabajo y el flujo máximo. Como para este trabajo lo más importante es cumplir con el flujo volumétrico calculado, la presión de trabajo quedara definida en función al flujo máximo disponible en catálogo.

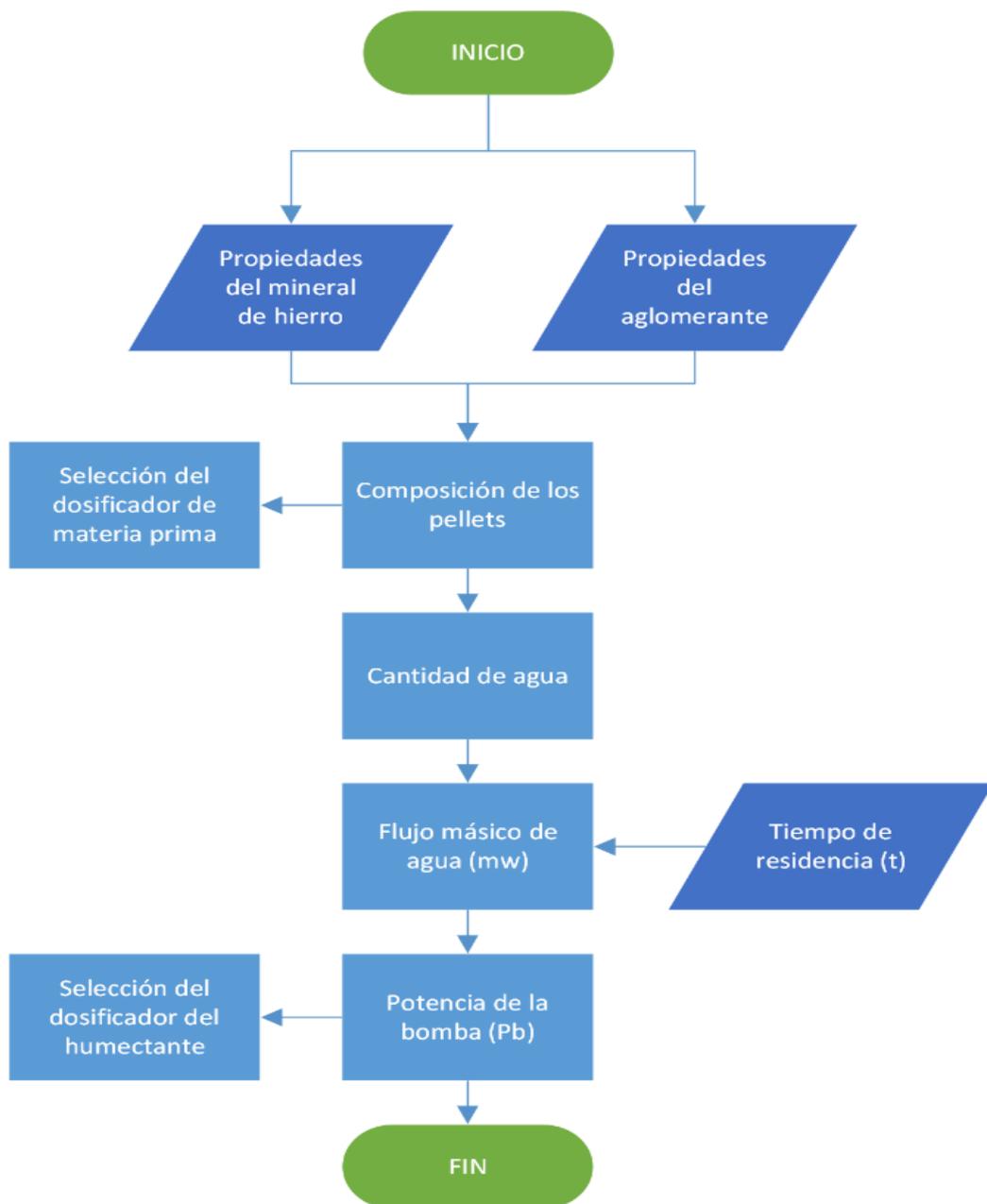


Figura 21. Diagrama de flujo para el cálculo del disco y el sistema de alimentación

3.2. Determinación de aspectos generales del equipo

Debido a que se desea obtener pellets de mineral de hierro que posteriormente se usaran en la industria siderúrgica y que al mismo tiempo las dimensiones del equipo permitan obtener valores empíricos o semi-empíricos de estudios de diseño previos. Para este fin se ha considerado 500 mm como valor para el diámetro del disco granulador; además una consideración adicional de diseño para tener en cuenta es que el laboratorio usara el equipo por periodos cortos de tiempo para obtener pellets en el orden de 1kg a 10 kg como máximo.

Empleando las relaciones de la Tabla 9 y el diámetro estimado se tiene que la potencia para el equipo sería:

$$P = 1.1(0.5)^2 = 0.275 \text{ kW}$$

Que redondeando aun valor estándar para la potencia del motor en HP quedaría:

$$P = 0.5 \text{ HP}$$

De igual manera empleando la relación entre el diámetro y la capacidad de producción de pellets (Q), para un disco de 0.5 m de diámetro se tiene que:

$$Q = 1.5(0.5)^2 \text{ Mg/h} = 375 \text{ kg/h}$$

Esto quiere decir que el disco operando de manera continua puede producir aproximadamente 104.2 gr/s. Como el diámetro es 50 cm la altura del borde es:

$$H = 0.2(50 \text{ cm}) = 10 \text{ cm}$$

En la Figura 22 se muestra al disco granulador con las dimensiones obtenidas anteriormente.

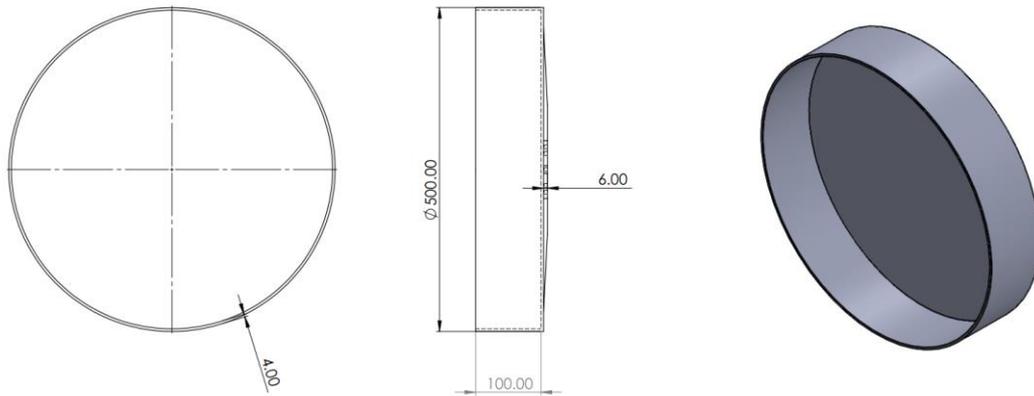


Figura 22. Dimensiones generales del disco granulador

Según Meyer (1980) para la formación de un pellet de mineral de hierro de 10 mm de diámetro se requiere un tiempo de residencia de 150 segundos, mientras que para 12 mm el tiempo es de 200 segundos. Extrapolando estos valores se puede calcular el tiempo de residencia para un pellet de 20 mm de diámetro (Tabla 10).

150 s \rightarrow 10 mm
 200 s \rightarrow 12 mm
 t \rightarrow 20 mm

$$t = 150 + \frac{(200 - 150)(20 - 10)}{12 - 10} = 400 \text{ s}$$

Esto indica que para obtener un pellet de 20 mm se requiere un tiempo de retención de 400s o 6.67 min. De la Tabla 4 se observa que el valor de la humedad para el mineral de hierro de diversas fuentes de extracción presenta una gran variación (2.55 – 14.28). Por otra parte, la porosidad también varía significativamente (2.6 – 29.7) (Formoso et al., 2000). Por tal razón, se toman los valores promedio los cuales son:

$$\% \text{Humedad} = 8.415 \%$$

$$P_o = 16.15 \%$$

$$\rho_{ap} = 3.8 \text{ gr/cm}^3$$

$$\rho_{real} = 4.55 \text{ gr/cm}^3$$

Donde:

%Humedad: Porcentaje de humedad del mineral de hierro

Po: Porosidad del mineral de hierro

ρ_{ap} : Densidad aparente del mineral de hierro

ρ_{real} : Densidad real del mineral de hierro

El volumen de un pellet de 20mm es

$$V_{pellet} = \frac{4\pi}{3} (0.01)^3 = 4.19 * 10^{-6} m^3 = 4.19 cm^3$$

Cabe mencionar que para efectos de diseño se toma la condición más crítica, en este caso, se toma el diámetro máximo que se desea obtener para el pellet y se realizan los cálculos en base a ello. Debido a que el proceso de pelletizado depende varias variables hay algunos trabajos que tratan de predecir y optimizar el resultado final de un pellet empleando modelos estadísticos (Timofeeva et al., 2013; Patra & Rayasam, 2018). En el caso práctico el tamaño final del pellet lo fija el investigador ajustando los parámetros como contenido de humedad, inclinación y velocidad del disco, tipo de materia prima, etc., según lo requiera el investigador.

Sabiendo que el porcentaje de porosidad es 16.15 % el volumen total de los poros (V_p) es:

$$V_p = \left(\frac{Po}{100}\right) (V_{pellet}) \quad (6)$$

$$V_p = (0.1615)(4.19 * 10^{-6}) = 6.77 * 10^{-7} m^3 = 0.677 cm^3$$

Por lo tanto, el volumen de la fase sólida (V_s) del pellet es:

$$V_s = \left(1 - \frac{Po}{100}\right) (V_{pellet}) \quad (7)$$

$$V_s = (1 - 0.1615)(4.19 * 10^{-6}) = 3.51 * 10^{-6} m^3 = 3.51 cm^3$$

Para calcular la superficie específica (S_m) de la mezcla se emplea la ecuación siguiente:

$$S_m = \frac{A}{V_s} = \frac{4\pi \left(\frac{2 \text{ cm}}{2}\right)^2}{3.51 \text{ cm}^3} = 3.58 \frac{\text{cm}^2}{\text{cm}^3}$$

Con los valores obtenidos hasta ahora y tomando la ecuación 1, el porcentaje de humedad para el pellet es:

$$W = \frac{100(1.06)(0.7)}{1 + \frac{(3.51 \text{ cm}^3) \left(4.55 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}\right)}{(0.677 \text{ cm}^3) \left(1 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}\right) + (1.2 - 1) \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \left(3.58 \frac{\text{cm}^2}{\text{cm}^3}\right) (21 * 10^{-6} \text{ cm})(3.51 \text{ cm}^3)}$$

$$W = 3.01 \%$$

3.2.1 Cálculos de los flujos máxicos de la materia prima y del humectante

Para el cálculo de estas variables, se toma la máxima capacidad de producción del disco granulador, 375 kg/hr de pellets de hierro, cuya composición en masa en base seca será de 98.5% mineral de hierro, y 1.5% de aglomerante (Battle et al., 2014). En este caso se utilizará bentonita cuya densidad es de 2.25 g/cm³.

$$fraccion_{hierro} = 98.5\%$$

$$fraccion_{aglutinante} = 1.5\%$$

$$M_{pellets} = 375 \text{ kg/hr}$$

Convirtiendo las unidades a kg/m³

$$\rho_{real, mineral} = 4550 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{aglutinante} = 2250 \text{ kg/m}^3$$

Como se mencionó en el capítulo 2 los granuladores de disco se emplean para procesos continuos pues para la descarga de los pellets no es necesario detener el proceso. Para aprovechar la máxima producción, la alimentación de la mezcla de mineral de hierro

y bentonita debe ser igual al flujo másico de descarga de pellets. Si el flujo másico de alimentación es mayor que el flujo de descarga el disco se rebalsaría, por el contrario, si la alimentación fuera menor la producción disminuiría. Es así que para el cálculo másico de los flujos que intervienen, se debe emplear la ley de la conservación de la masa, por lo que todo lo que ingresa, debe ser igual al material de salida. Además, el empleo de rascadores permite que las partículas no se queden adheridas a la base del disco evitando que se desperdicie material.

Haciendo el balance de masa, se tiene:

$$M_{pellet} = M_s + M_{aglutinante} + M_{agua} \quad (8)$$

Donde:

M_{pellet} : Flujo masico de pellets

M_s : Flujo del mineral de hierro en base seca

$M_{aglutinante}$: Flujo del aglomerante en base seca

M_{agua} : Masa del agua agregada

3.2.2 Flujo másico del humectante

En la mezcla se usa la bentonita como aglomerante para el pellet, esta es una arcilla que en contacto con el agua se vuelve una pasta ligosa y mantiene unidas las partículas del mineral de hierro durante el aglomeramiento. Para saber cuánta agua debe contener el pellet crudo (Green pellet), se emplea el resultado de la ecuación 4 ($W = 3.01\%$). Por lo tanto, la masa de agua que debe ser agregada es:

$$W = \frac{M_{agua}}{M_s + M_{aglutinante}} \quad (9)$$

$$M_{agua} = (M_s + M_{aglutinante})W \quad (10)$$

Empleando el balance de masa y sustituyendo M_{agua} se tiene:

$$M_{pellet} = M_s + M_{aglutinante} + (M_s + M_{aglutinante})W \quad (11)$$

$$M_{pellet} = (M_s + M_{aglutinante})(1 + W) \quad (12)$$

Entonces la masa de la fase solida es:

$$(M_s + M_{aglutinante}) = \frac{M_{pellets}}{(1+W)} \quad (13)$$

$$(M_s + M_{aglutinante}) = \frac{375 \text{ kg/hr}}{(1 + 0.0302)} = 364 \text{ kg/hr}$$

Con este valor se puede calcular la masa correspondiente al mineral de hierro y al aglomerante:

$$M_s = fraccion_{mineral} \cdot m_{ingreso} \quad (14)$$

$$M_{aglutinante} = fraccion_{aglutinante} \cdot m_{ingreso} \quad (15)$$

$$M_s = 0.985 \cdot 364 \text{ kg/hr} = 358.54 \text{ kg/hr}$$

$$M_{aglutinante} = 0.015 \cdot 364 \text{ kg/hr} = 5.46 \text{ kg/hr}$$

Finalmente calculando el flujo masico y el volumétrico de agua, se tiene:

$$M_{agua} = (358.54 \text{ kg/hr} + 5.46 \text{ kg/hr})(0.0302) = 10.99 \text{ kg/hr}$$

$$V_{agua} = \frac{10.99 \text{ kg/hr}}{997 \text{ kg/m}^3} = 11.02 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{hr}} = 0.1837 \frac{\text{L}}{\text{min}}$$

3.2.3 Diagrama de cuerpo libre del disco granulador

Cabe mencionar que el accionamiento de disco será por medio de un motor eléctrico el cual tendrá una velocidad directamente controlada por un variador de velocidad. En la Figura 23 se observa cómo están montados los componentes sobre la estructura superior, donde se puede apreciar que el peso de toda la estructura esta soportada por los rodamientos (R1 y R2) los cuales se encuentran montados sobre la estructura inferior.

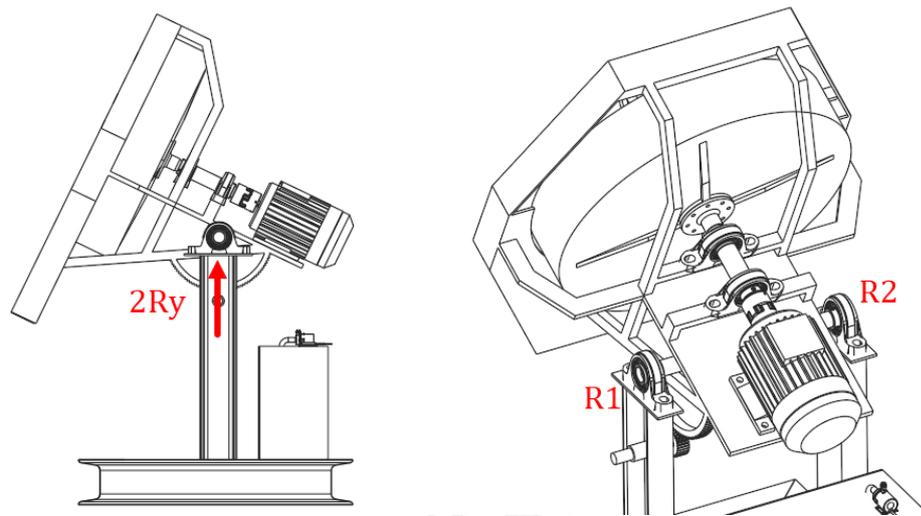


Figura 23. Estructura superior con sus componentes montados

En la Figura 24 se aprecia con más detalle la unión entre el disco granulador y el eje, el cual se hace a través de una brida. La distancia entre los apoyos R1 y R2 es de 0.339 m medido desde los centros de cada rodamiento.

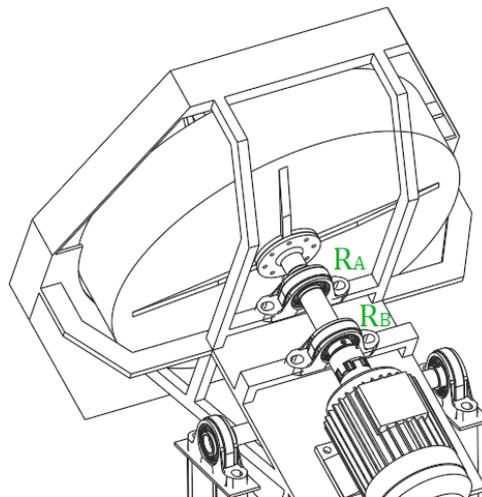


Figura 24. Disco granulador montado en el eje

Aislado solamente el disco granulador y el eje (Figura 25) en el diagrama de cuerpo libre (DCL) se tiene tres pesos, los cuales son: el peso del disco (W_{disco}), el peso de la materia que se esta granulando (W_p) y el peso del eje (W_{eje}), a su vez la suma de estas fuerzas es soportada por las reacciones de los rodamientos (R_A y R_B).

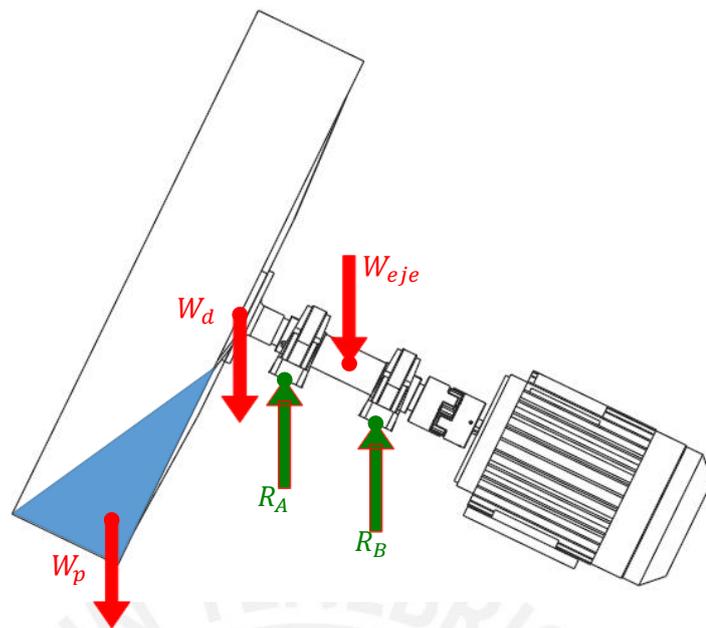


Figura 25. DCL del conjunto disco-eje

En la Figura 25 se aprecia el Diagrama de Cuerpo Libre del conjunto Disco-Masa de la materia a granular. En esta figura, se muestra el peso de la materia excéntrica respecto del centro de masa del disco debido a que durante la rotación del disco en estado estacionario la masa toma esta configuración (Chadwick, 1997). Según Litster, y Ennis (2004) los valores óptimos de operación para el ángulo de inclinación fluctúan entre $\beta = 45^\circ - 55^\circ$ y para el ángulo de reposo dinámico del mineral de hierro Wang (2015) muestra que el valor se encuentra entre $\alpha = 30^\circ - 40^\circ$.

Como los valores se encuentran entre unos rangos se empleará como criterio determinar el volumen máximo de material dentro de estos rangos para el ángulo de inclinación y el ángulo de reposo. Con las ecuaciones 16 hasta la 22 se pueden determinar los puntos de intercepción del plano formado por la superficie del material con el borde del disco. Estos definen la distribución del volumen del material sobre el borde del disco en función del diámetro (D), al ángulo de reposo del material (α) y la inclinación (β), como se observa en la Figura 26.

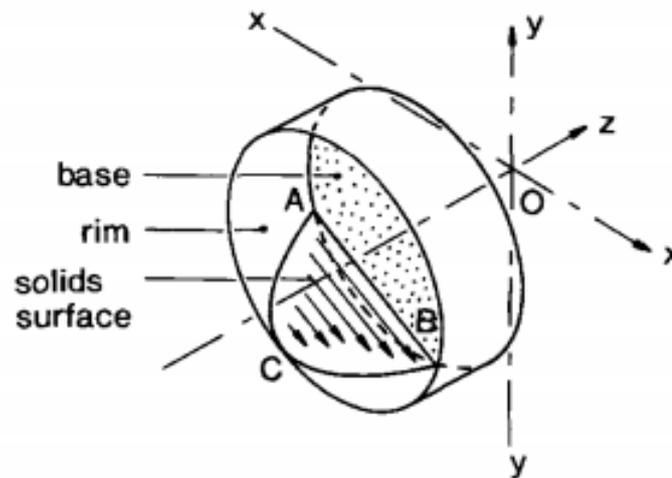


Figura 26. Distribución del volumen de la materia prima sobre el borde del disco

Tomado de Chadwick (1997)

En la Figura 27 se puede observar el patrón de distribución del volumen que ocupan los gránulos dentro del disco. En el patrón se pueden ver claramente que este volumen está delimitado por la base del disco y la altura de borde, además el volumen aumenta con la profundidad del mismo, siendo que el máximo volumen se alcanza al llegar a la base del disco en sentido (-z).

$$A = \tan \alpha \quad (16)$$

$$a = \frac{\frac{D}{2} \tan \alpha}{\sqrt{[\tan^2 \beta + (\sin \beta - \cos \beta \tan \alpha)^2]}} \quad (17)$$

$$B = \sin \theta - \cos \theta \tan \alpha \quad (18)$$

$$b = \frac{\frac{D}{2} [\sin \beta - \cos \beta \tan \alpha]}{\sqrt{[\tan^2 \beta + (\sin \beta - \cos \beta \tan \alpha)^2]}} \quad (19)$$

$$C = \cos \beta - \sin \beta \tan \alpha \quad (20)$$

$$E = \frac{(Cz + Aa)}{B} + b \quad (21)$$

$$\left(\frac{A^2}{B^2} + 1\right) X^2 + \frac{2AE}{B} X + \left(E^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2\right) = 0 \quad (22)$$

Para las ecuaciones anteriores se establece el origen de coordenadas en el centro del disco con el plano x-y paralelo a la superficie del mismo. Cuando la coordenada $z = 0$ se obtiene una recta que interseca a la circunferencia del disco e intercepta a la base del disco. Con diferentes valores de z se obtiene las coordenadas de los segmentos de recta que delimitan el volumen del material. Programando las ecuaciones anteriores en el software de Matlab y resolviendo la ecuación 22 se obtienen los puntos de la coordenada de la intercepción entre el disco y el segmento de recta a un valor de z arbitrario. En la gráfica de la Figura 27 se muestran las raíces que se obtienen al resolver la ecuación 22, están se han graficado para ángulos de inclinación del disco de 40° , 50° y 55° . Como se puede ver en la Figura 27 los resultados de las raíces para los ángulos de 50° y 55° necesitan alturas de borde mayores a 0.1 m, el cual es la altura máxima del borde para este diseño, por lo tanto, el máximo volumen para un disco de 0.5m de diámetro y 0.1m de borde se logra con un ángulo de 40° .

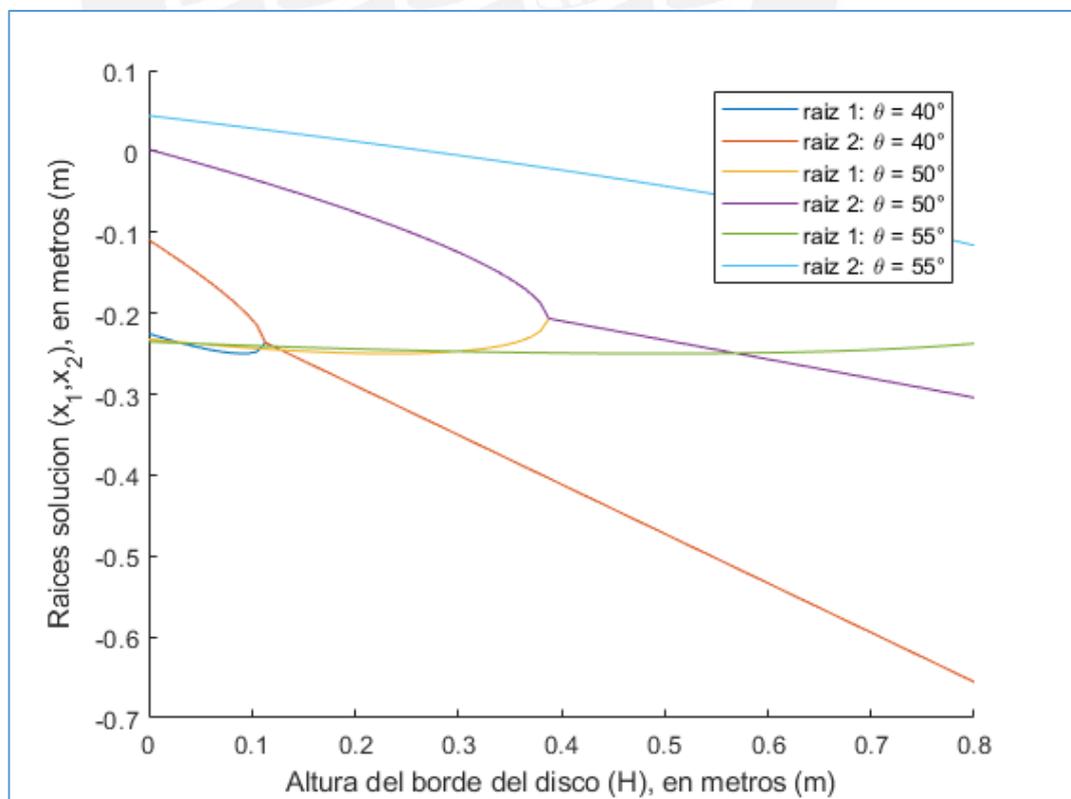


Figura 27. Gráfica del Software Matlab para determinar la altura del borde del disco.

Ahora para calcular el volumen es necesario un nuevo sistema de coordenadas (x', y') con como se muestra en la Figura 28.

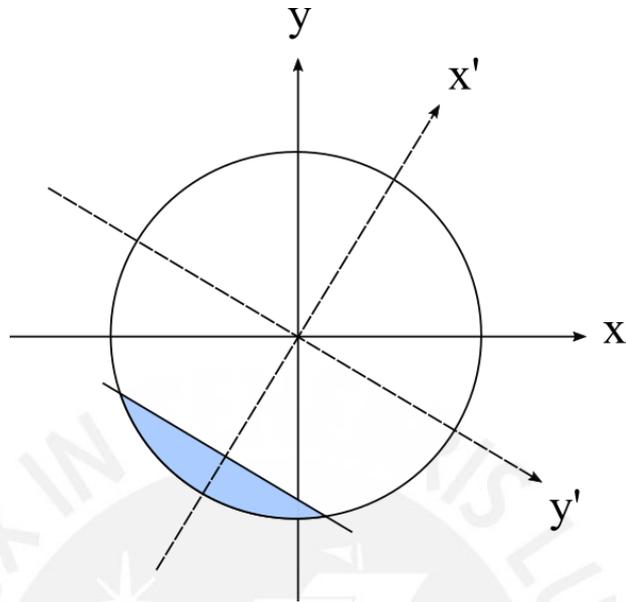


Figura 28. Sistemas de coordenadas (x, y) y (x', y')

Debido a que el volumen del material tiene forma de cuña se emplea las coordenadas (x', y') y se integra desde la posición x'_1 a x'_2 para obtener el volumen que se muestra en la Figura 29.

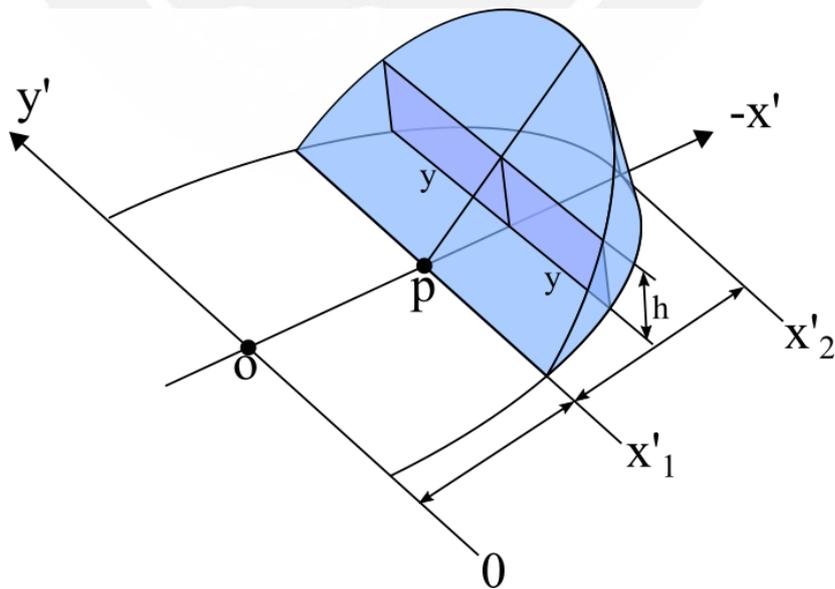


Figura 29. Volumen del material dentro del disco granulador

La distancia desde el punto medio del segmento de recta al origen en el sistema de coordenadas (x, y) se determinan con las ecuaciones 23 a 25. En el nuevo sistema de coordenadas (x', y') el punto medio del segmento de recta tiene coordenadas $(x'_1, 0)$ y es igual a $(\overline{op}, 0)$.

$$x_p = \left(\frac{x_1+x_2}{2}\right) \quad (23)$$

$$y_p = \left(\frac{y_1+y_2}{2}\right) \quad (24)$$

$$\overline{op} = \sqrt{x_p^2 + y_p^2} \quad (25)$$

Para obtener el volumen se integra el área $A(x) = 2(y)(h)$ de la región morada en la Figura 29, desde x'_1 a x'_2 , donde la relación entre h y la posición x' se obtiene por medio del triángulo rectángulo de la Figura 30. La altura del triángulo es igual a la altura del borde del disco granulador (H).

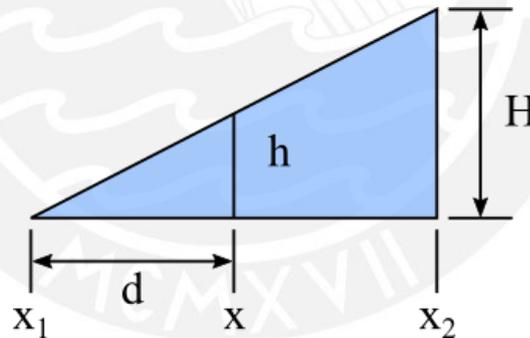


Figura 30. Relación entre la altura del borde del disco granulador (H) y (h)

De esta manera el volumen queda definido por las siguientes ecuaciones

$$V = \int_{x'_1}^{x'_2} 2(y)(h) dx' \quad (26)$$

$$V = \int_{x'_1}^{x'_2} 2 \left(\sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - x'^2} \right) \left(\frac{x' - x_1}{\left(\frac{x_2 - x_1}{H}\right)} \right) dx' \quad (27)$$

De los cálculos hechos en Matlab se encontró que el mayor volumen dentro de los rangos analizados se obtuvo para el ángulo de inclinación de $\beta = 40^\circ$ y $\alpha = 30^\circ$ donde el volumen de la mezcla de mineral de hierro, bentonita y agua es $V = 7.185 \times 10^{-4} \text{ m}^3$.

Para conocer la ubicación del centro de masa de la mezcla notamos que el volumen es simétrico respecto al eje x' , además visto lateralmente el plano que corta al volumen por este eje, tenemos un área triangular donde el centroide se encuentra a $1/3$ de la altura de cada cateto. Para el volumen calculado las coordenadas del punto medio se obtienen de las ecuaciones 23 y 24 son:

$$x_p = \left(\frac{(-0.2252) + (-0.1094)}{2} \right) = -0.1673 \text{ m}$$

$$y_p = \left(\frac{(0.1086) + (-0.2248)}{2} \right) = -0.0581 \text{ m}$$

Con la ecuación 25 la longitud desde el origen hasta el punto medio es:

$$\overline{op} = \sqrt{(-0.1673)^2 + (-0.0581)^2} = 0.1771 \text{ m}$$

Con estos valores las coordenadas del centroide con respecto al sistema de coordenadas (x', y', z') son:

$$\bar{x}' = X_c = \frac{\frac{D}{2} - \left(\frac{D}{2} - \overline{op}\right)}{3} = \frac{0.5 - \left(\frac{0.5}{2} - 0.1771\right)}{3} = 0.2257 \text{ m}$$

$$y' = 0 \text{ m}$$

$$\bar{z}' = Z_c = \frac{H}{3} = \frac{0.1}{3} = 0.0333 \text{ m}$$

En la Figura 31 se muestra el diagrama de cuerpo libre del disco granulador donde se grafican las fuerzas del peso del material ubicado en el centroide de su volumen y el peso del disco ubicado en su centro.

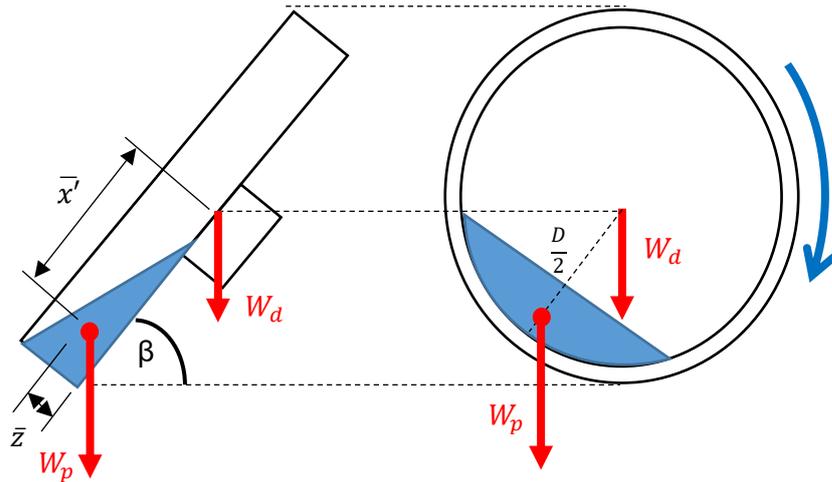


Figura 31. Diagrama de cuerpo libre del disco granulador

Elaboración propia

Donde:

W_p : Es el peso del material ubicado en su centro de masa

W_{disco} : Es el peso del disco ubicado en su centro de masa

α : Ángulo de reposo dinámico del material (Pampañaupa, 2018)

β : Ángulo de inclinación del plato

Para calcular el peso del material se multiplica el volumen por la gravedad y la densidad del material el cual es una combinación de las densidades de los materiales que componen la mezcla.

$$m_p = V(\text{fraccion}_{hierro} * \rho_{real,mineral} + \text{fraccion}_{aglutinante} * \rho_{aglutinante}) \quad (28)$$

$$m_p = (7.185 \times 10^{-4} \text{ m}^3)(0.985(4550 \text{ kg/m}^3) + 0.015(2250 \text{ kg/m}^3)) = 3.244 \text{ kg}$$

$$W_p = m_p g \quad (29)$$

$$W_p = (3.244 \text{ kg}) \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) = 31.827 \text{ N}$$

Para conocer las componentes de la fuerza W_p es necesario calcular los ángulos directores con respecto al sistema de coordenadas (x', y', z') cómo se puede apreciar en

la Figura 32 el peso del material que se está granulando se encuentra desplazado desde punto más bajo por la acción de la velocidad angular del disco, el ángulo (γ) representa este desplazamiento y el eje (x') del nuevo sistema de coordenadas representa la dirección de la línea que une los centros de masa de W_p y W_d . La componente axial ($W_{p,ax}$) del peso es perpendicular a la superficie del disco granulador, por otra parte, la componente radial ($W_{p,r}$) y la tangencial ($W_{p,t}$) parten desde el origen de la fuerza hacia las direcciones del nuevo sistema de coordenadas (x', y').

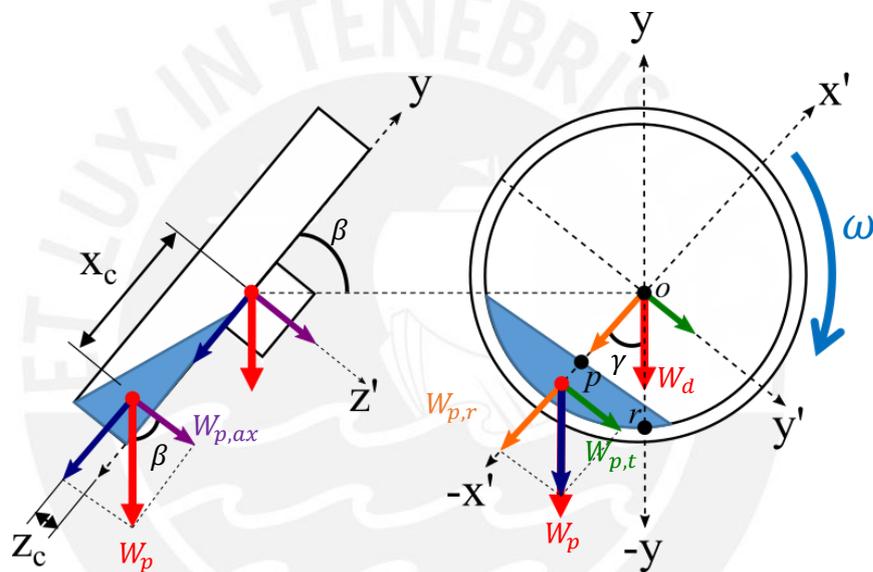


Figura 32. Componentes axial, tangencial y radial del peso del material en el granulado

Para efectos de cálculo se tomará las coordenadas del punto medio (p) para calcular el ángulo que ha rotado el centro de masa con respecto al eje ($-y$) como se observa en la Figura 32. Empleando la ecuación 30, las coordenadas del punto medio (p) y las coordenadas del radio (r) del disco sobre el eje ($-y$), el ángulo (γ) es:

$$\gamma = \cos^{-1} \left(\frac{\overline{op} \cdot \overline{or}}{|\overline{op}| |\overline{or}|} \right) \quad (30)$$

Donde:

\overline{op} : Vector posición del punto p .

\overline{or} : Vector posición del r .

Las coordenadas de ambos puntos en su forma vectorial son:

$$\vec{op} = -0.1673 \hat{i} - 0.0581 \hat{j} + 0 \hat{k}$$

$$\vec{or} = 0 \hat{i} - 0.2500 \hat{j} + 0 \hat{k}$$

$$|\vec{op}| = \sqrt{(-0.1673)^2 + (-0.0581)^2 + 0^2} = 0.1771 \text{ m}$$

$$|\vec{or}| = \sqrt{0^2 + (-0.2500)^2 + 0^2} = 0.25 \text{ m}$$

Operando y reemplazando los valores se tiene:

$$\gamma = \cos^{-1} \left(\frac{0.0145}{(0.1771)(0.25)} \right) = 70.848^\circ$$

Con los ángulos (β) y (γ) se puede establecer las ecuaciones para las componentes de la fuerza (W_p).

$$W_{p,r} = W_p \sin(\beta) \cos(\gamma) \quad (31)$$

$$W_{p,t} = W_p \sin(\beta) \sin(\gamma) \quad (32)$$

$$W_{p,ax} = W_p \cos(\beta) \quad (33)$$

Sustituyendo los resultados obtenidos hasta ahora:

$$W_{p,r} = 6.7119 \text{ N}$$

$$W_{p,t} = 19.3262 \text{ N}$$

$$W_{p,ax} = 24.3815 \text{ N}$$

En el eje y la fuerza es:

$$W_{p,y} = \sqrt{(W_{p,r})^2 + (W_{p,t})^2} = 20.4585 \text{ N}$$

3.2.4 Peso del disco granulador

Para calcular la masa del disco granulador se debe hallar su volumen total y multiplicarlo por la densidad del acero. Se empleará el acero Hardox 400 el cual posee

una densidad de $8\,000\text{ kg/m}^3$. El volumen se puede calcular multiplicando el área de borde del disco (Acc) por su altura (H) mas el área del disco (Acd) multiplicado por su espesor ($e = 4\text{ mm}$).

$$Acc = \left(\frac{\pi \left(D^2 - \left(D - \frac{2e}{1000} \right)^2 \right)}{4} \right) \quad (34)$$

$$Acd = \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) \quad (35)$$

$$Acc = 6.2329 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$Acd = 0.1963 \text{ m}^2$$

Para determinar el volumen empleamos la siguiente ecuación:

$$V_d = Acc * H + Acd * \frac{e}{1000} \quad (36)$$

$$V_d = (6.2329 \times 10^{-3} \text{ m}^2)(0.1 \text{ m}) + (0.1963 \text{ m}^2) \left(\frac{4}{1\,000} \text{ m} \right) = 1.409 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

Donde:

Acc : Área de la corona circular que forma el borde del disco

Acd : Área disco

V_d : Volumen del disco granulador

e : Espesor de la plancha de acero

Al volumen del disco se le adiciona el volumen de la brida que sirve de unión entre el disco y el eje. Como esta pieza tiene una geometría compleja se empleó las herramientas del software CAD para determinar su volumen y su factor de seguridad. En la Figura 33 se muestra la brida y su ubicación.

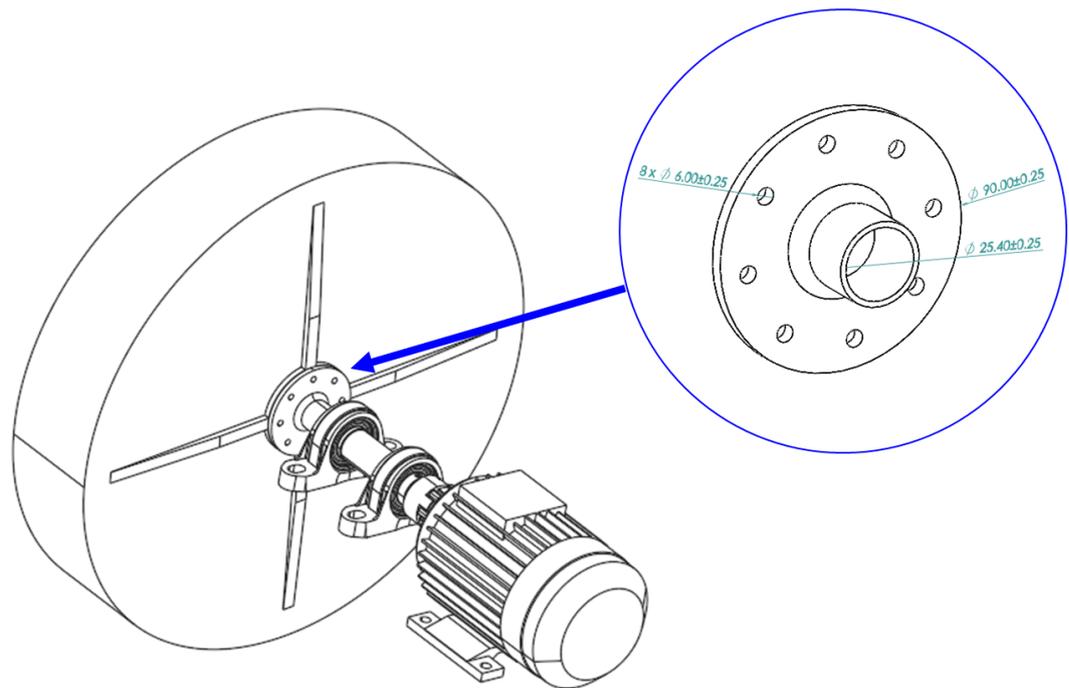


Figura 33. Brida de unión entre el disco y el eje

El volumen de la brida es entonces:

$$V_b = 3.5515 \times 10^{-5} \text{ m}^3 = 0.035515 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

El peso del disco granulador con la brida incluida es:

$$W_d = (V_d + V_b) * \rho_{inox} * g \quad (37)$$

$$W_d = ((1.409 + 0.035515) \times 10^{-3} \text{ m}^3) * 8000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 113.34 \text{ N}$$

De manera similar a los cálculos del peso del material, se calculan las componentes de la fuerza (W_d) en el nuevo sistema de coordenadas, para lo cual se tiene las ecuaciones 38 a la 40.

$$W_{d,r} = W_d \sin(\beta) \cos(\gamma) \quad (38)$$

$$W_{d,t} = W_d \sin(\beta) \sin(\gamma) \quad (39)$$

$$W_{d,ax} = W_d \cos(\beta) \quad (40)$$

Resolviendo las ecuaciones se tiene:

$$W_{d,r} = 23.9016 \text{ N}$$

$$W_{d,t} = 68.8220 \text{ N}$$

$$W_{d,ax} = 86.8244 \text{ N}$$

En el eje y la fuerza es:

$$W_{p,y} = \sqrt{(W_{d,r})^2 + (W_{d,t})^2} = \sqrt{(23.9016)^2 + (68.8220)^2} = 72.8543 \text{ N}$$

3.2.5 Torque del motor

Como ya se ha determinado la potencia para el motor se puede calcular el torque máximo que es capaz de generar a una cierta velocidad. La velocidad angular máxima se recomienda que sea el 75% de la velocidad crítica N_c . Para un disco de 0.5m con ángulo de inclinación de 40°, la velocidad crítica se calcula con la ecuación 8.

$$N_c = 42.3 \sqrt{\frac{\sin 40}{0.5}} = 47.96 \text{ rpm}$$

$$\omega = 0.75 N_c = 35.97 \text{ rpm}$$

El torque entonces se obtiene con la siguiente ecuación:

$$T = \frac{P}{\omega} = \frac{0.5 * 746}{\frac{\pi(35.97)}{30}} = 99.02 \text{ N.m}$$

3.2.6 Selección del dosificador de material fino

Este dosificador es básicamente un transportador de tornillo sinfín para el material fino, este se encarga de proporcionar el material ya sea por lotes o de manera continua según se requiera. El dosificador debe ser capaz de manejar materiales con diferentes tipos de densidades y granulometría. En esta parte se hace la selección de un transportador de tornillo sinfín empleando los siguientes datos (Conveyor Eng. & Mfg. Co, 2012):

$F_d = 0.67$	Factor de diámetro del transportador (Diám. = 2 Pulg).
$F_b = 1$	Factor de rodamiento de suspensión - (Rod. de bolas).
$F_m = 2.2$	Factor del material.
$F_f = 1$	Factor de vuelo (Tipo de tornillo estándar).
$F_p = 1$	Factor de aleta.
$e = 0.94$	Eficiencia de la transmisión
$Den = 150 \text{ lb}/\text{pie}^3$	Densidad del mineral de hierro.
$L = 0.492 \text{ ft}$	Longitud del transportador
$\text{rpm} = 120 \text{ rpm}$	Velocidad del tornillo sinfín

La potencia del transportador de tornillo sinfín se divide en dos: una potencia requerida para vencer la fricción del material a transportar y la potencia para desplazar la masa del material a lo largo del transportador. Para determinar estas potencias las empresas en sus manuales proporcionan un conjunto de Tablas con factores de corrección de la potencia para diversas condiciones de operación a la que está destinada la máquina. El factor F_d está relacionado con el diámetro del transportador el cual para este caso será de 2" (5.08 cm), el factor F_b tiene que ver con los rodamientos empleados en el transportador el cual para mayoría de las aplicaciones se emplean rodamientos de bolas. El factor F_m tiene que ver con las características del material (ver Anexo B) donde se seleccionó el mineral de hierro concentrado. El factor F_f es para la forma de la hélice que al ser estándar su valor es 1. Cuando el tornillo sinfín también se usará para mezclar el factor F_p es diferente a 1 y su valor depende de la cantidad de aletas de mezclado, como no es necesario en este caso $F_p = 1$.

3.2.6.1 Potencia requerida para vencer la fricción

$$HPf = \frac{L \cdot rpm \cdot Fd \cdot Fb}{1\,000\,000}$$

$$HPf = \frac{(0.492)(120)(0.67)(1)}{1\,000\,000}$$

$$HPf = 3.96 \cdot 10^{-5} \text{ HP}$$

3.2.6.2 Potencia para transportar el material

$$C = \frac{\left(\frac{375 \text{ kg}}{\text{hr}}\right) \left(\frac{2.204 \text{ lb}}{1 \text{ kg}}\right)}{150 \frac{\text{lb}}{\text{pie}^3}} = 5.35 \frac{\text{pie}^3}{\text{hr}}$$

$$HPm = \frac{C \cdot L \cdot Den \cdot Ff \cdot Fm \cdot Fp}{1\,000\,000}$$

$$HPm = \frac{(5.35)(0.492)(150)(1)(2.2)(1)}{1\,000\,000}$$

$$HPm = 8.93 \cdot 10^{-4} \text{ HP}$$

3.2.6.3 Factor de sobrecarga

Para cubrir fluctuaciones de potencias en condiciones anormales de funcionamiento se considera también un factor de sobrecarga. Dicho factor se obtiene de las potencias calculadas (HPf y HPm) con la expresión siguiente:

$$F_0 = \log(HPf + HPm) * (-0.6115) + 2.024$$

$$F_0 = \log(3.96 \cdot 10^{-5} + 8.93 \cdot 10^{-4}) * (-0.6115) + 2.024$$

$$F_0 = 6.29(\text{Adim})$$

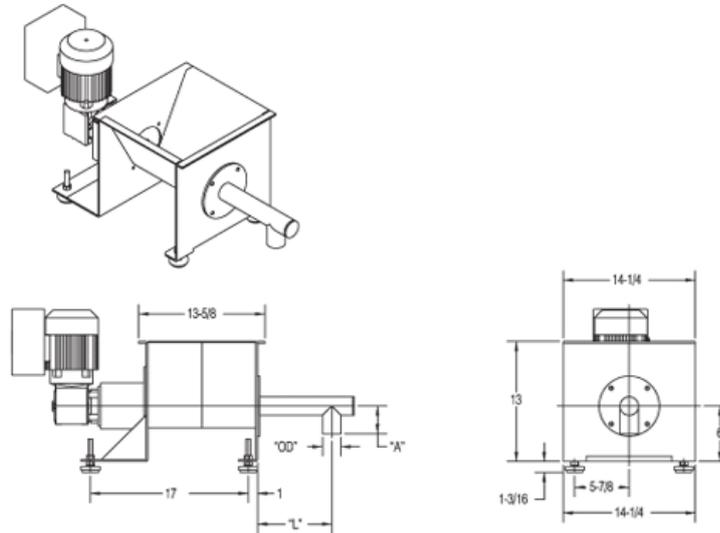
3.2.6.4 Potencia total consumida por el tornillo transportador

$$HP = (HPf + HPm) \cdot F_0/e$$

$$HP = (3.96 \cdot 10^{-5} + 8.93 \cdot 10^{-4}) \left(\frac{6.29}{0.94}\right)$$

$$HP = 6.24 \cdot 10^{-3}$$

De las características obtenidas se selecciona el transportador de la marca Metalfab (Figura 34).



Model	Feed Rate (cu ft/hr) Min-Max	Screw Dia.	A	L	OD	HP
MT Mini 1/2	0.03-0.3	1/2"	1 1/2"	8"	1"	1/2
MT Mini 3/4	0.05-1	3/4"	2"	8"	1 1/4"	3/4
MT Mini 1	0.15-3	1"	2"	8"	1 1/2"	3/4
MT Mini 1 1/2	0.4-8	1 1/2"	3"	8"	2"	3/4

Figura 34. Transportadores volumétricos

Tomado de Metalfab MHS, LLC (2020)

3.2.7 Selección del dosificador del humectante

El dosificador está compuesto por dos partes fundamentales la boquilla (tobera) y la bomba. Se empleará como humectante el agua con una densidad de 997 kg/m^3 . Como ya se ha calculado el flujo másico y volumétrico del agua se procederá a la selección de la tobera la cual se encargará de separar en pequeñas gotas el agua suministrada.

Para seleccionar el tipo según su aplicación, los proveedores entregan en sus catálogos Tablas con información necesaria el dimensionamiento de la tobera. La

mayoría de las empresas trabajan con unidades de litro por minuto (lpm) para el caudal y para la presión emplean el bar. Es así, que el caudal en lpm es:

$$Q = 11.02 * 10^{-3} \left(\frac{m^3}{hr} \right) \left(\frac{1 hr}{60 min} \right) \left(\frac{1000 L}{1 m^3} \right) = 0.184 lpm$$

Lo siguiente es determinar el tipo de patrón forman las gotas de agua al salir de la boquilla. Hay una gran diversidad de boquilla para diferentes aplicaciones, pero en este caso se empleará una boquilla estándar con un patrón cónico.

Tabla 15. Datos de rendimiento para boquillas con patrón cónico

PERFORMANCE DATA: STANDARD ANGLE SPRAY																									
Inlet Conn. (in.)	Nozzle Type										Capacity Size	Orifice Dia. Nom. (mm)	Max. Free Passage Dia. (mm)	Flow Rate Capacity (liters per minute)									Spray Angle (°)		
	Standard					Wall-Mount			Angle					0.4 bar	0.5 bar	0.7 bar	1.5 bar	3 bar	6 bar	7 bar	10 bar	0.5 bar	1.5 bar	6 bar	
	G	GG	H	HH	HF	GD	HD	GGD	GA	GGA															
1/8	•	•		•		•		•			1	.79	.64	-	-	.38	.54	.74	1.0	1.1	1.3	-	58	53	
	•	•		•							1.5	1.2	.64	.44	.49	.57	.80	1.1	1.5	1.6	1.9	52	65	59	
	•	•		•		•		•	•	•	2	1.2	1.0	.59	.65	.76	1.1	1.5	2.0	2.2	2.6	43	50	46	
	•	•		•		•		•	•	•	3	1.5	1.0	.88	.98	1.1	1.6	2.2	3.1	3.3	3.9	52	65	59	
	•	•		•		•		•	•	•	3.5	1.6	1.3	1.0	1.1	1.3	1.9	2.6	3.6	3.8	4.5	43	50	46	
									•	•	3.9	2.0	1.0	1.1	1.3	1.5	2.1	2.9	4.0	4.3	5.1	77	84	79	
	•	•		•		•		•	•	•	5	2.0	1.3	1.5	1.6	1.9	2.7	3.7	5.1	5.5	6.5	52	65	59	
									•	•	6.1	2.3	1.3	1.8	2.0	2.3	3.3	4.5	6.2	6.7	7.9	69	74	68	

Nota. Tomado de Spraying Systems Co. (2020)

En la Tabla 15 se observa que la boquilla más pequeña entrega un caudal 0.38L/min a una presión de 0.7 bar, lo cual es mayor a lo que se ha calculado, por esta razón tomando los datos de la tabla se calcula la presión adecuada para entregar un caudal de 0.184 lpm.

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{P_1^n}{P_2^n} \quad (41)$$

$$P_2 = \frac{P_1}{\left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)^{1/n}} \quad (42)$$

Donde:

Q_1 : Caudal de catálogo de la boquilla, (lpm)

Q_2 : Caudal requerido, (lpm)

P_1 : Presión de catálogo de la boquilla, (bar)

P_2 : Presión requerida, (bar)

n : Exponente de flujo, (adim). Para boquillas de patrón cónico $n = 0.46$

Reemplazando se tiene

$$P_2 = \frac{0.7}{\left(\frac{0.38}{0.184}\right)^{1/0.46}} = 0.145 \text{ bar}$$

Conociendo el caudal, la presión y patrón de pulverización lo que queda por definir es la longitud de recubrimiento. Este valor depende del ángulo de proyección y la distancia desde la salida de la boquilla hasta la superficie a rociar. Como la altura del borde del disco es 10 cm se buscó el mismo valor en la Tabla 16. Para una boquilla con un ángulo TSA = 60° ubicada a 10 cm de altura, la longitud real que puede llegar a cubrir el chorro de agua se obtiene de la Tabla 16.

Tabla 16. Cobertura teórica de pulverización a varias distancias en pulgadas y cm

Spray Angle	2 in.	5 cm	4 in.	10 cm	6 in.	15 cm	8 in.	20 cm	10 in.	25 cm	12 in.	30 cm	15 in.	40 cm	18 in.	50 cm	24 in.	60 cm	30 in.	70 cm	36 in.	80 cm	48 in.	100 cm
5°	.2	.4	.4	.9	.5	1.3	.7	1.8	.9	2.2	1.1	2.6	1.3	3.5	1.6	4.4	2.1	5.2	2.6	6.1	3.1	7.0	4.2	8.7
10°	.4	.9	.7	1.8	1.1	2.6	1.4	3.5	1.8	4.4	2.1	5.3	2.6	7.0	3.1	8.8	4.2	10.5	5.2	12.3	6.3	14.0	8.4	17.5
15°	.5	1.3	1.1	2.6	1.6	4.0	2.1	5.3	2.6	6.6	3.2	7.9	3.9	10.5	4.7	13.2	6.3	15.8	7.9	18.4	9.5	21.1	12.6	26.3
20°	.7	1.8	1.4	3.5	2.1	5.3	2.8	7.1	3.5	8.8	4.2	10.6	5.3	14.1	6.4	17.6	8.5	21.2	10.6	24.7	12.7	28.2	16.9	35.3
25°	.9	2.2	1.8	4.4	2.7	6.7	3.5	8.9	4.4	11.1	5.3	13.3	6.6	17.7	8.0	22.2	10.6	26.6	13.3	31.0	15.9	35.5	21.2	44.3
30°	1.1	2.7	2.1	5.4	3.2	8.0	4.3	10.7	5.4	13.4	6.4	16.1	8.1	21.4	9.7	26.8	12.8	32.2	16.1	37.5	19.3	42.9	25.7	53.6
35°	1.3	3.2	2.5	6.3	3.8	9.5	5.0	12.6	6.3	15.8	7.6	18.9	9.5	25.2	11.3	31.5	15.5	37.8	18.9	44.1	22.7	50.5	30.3	63.1
40°	1.5	3.6	2.9	7.3	4.4	10.9	5.8	14.6	7.3	18.2	8.7	21.8	10.9	29.1	13.1	36.4	17.5	43.7	21.8	51.0	26.2	58.2	34.9	72.8
45°	1.7	4.1	3.3	8.3	5.0	12.4	6.6	16.6	8.3	20.7	9.9	24.9	12.4	33.1	14.9	41.4	19.9	49.7	24.8	58.0	29.8	66.3	39.7	82.8
50°	1.9	4.7	3.7	9.3	5.6	14.0	7.5	18.7	9.3	23.3	11.2	28.0	14.0	37.3	16.8	46.6	22.4	56.0	28.0	65.3	33.6	74.6	44.8	93.3
55°	2.1	5.2	4.2	10.4	6.3	15.6	8.3	20.8	10.3	26.0	12.5	31.2	15.6	41.7	18.7	52.1	25.0	62.5	31.2	72.9	37.5	83.3	50.0	104
60°	2.3	5.8	4.6	11.6	6.9	17.3	9.2	23.1	11.5	28.9	13.8	34.6	17.3	46.2	20.6	57.7	27.7	69.3	34.6	80.8	41.6	92.4	55.4	115
65°	2.5	6.4	5.1	12.7	7.6	19.1	10.2	25.5	12.7	31.9	15.3	38.2	19.2	51.0	22.9	63.7	30.5	76.5	38.2	89.2	45.8	102	61.2	127
70°	2.8	7.0	5.6	14.0	8.4	21.0	11.2	28.0	14.0	35.0	16.8	42.0	21.0	56.0	25.2	70.0	33.6	84.0	42.0	98.0	50.4	112	67.2	140
75°	3.1	7.7	6.1	15.4	9.2	23.0	12.3	30.7	15.3	38.4	18.4	46.0	23.0	61.4	27.6	76.7	36.8	92.1	46.0	107	55.2	123	73.6	153

Nota. Tomado de Spraying Systems Co. (2020)

La boquilla por lo tanto debe ser de al menos 0.145 bar con un ángulo de aspersión de 60° y ubicado a 10 cm de la base del plato para que la longitud que es capaz de cubrir sea de 11.6 cm de diámetro.

En la Figura 35a se puede ver la ubicación para la boquilla y la región de aspersion, esta ubicación puede ser cambiada según las necesidades del operario y el mecanismo para fijarlo se componen de espárragos en C sujetadas por una placa de unión (Figura 35b). Este medio de fijación es simple y permite ubicar a la boquilla sobre una de la barra transversales de la estructura, así como también a los rascadores. La boquilla puede ir ubicada al lado izquierdo o derecho del disco según el sentido de rotación del motor que se configure en el variador de frecuencia.

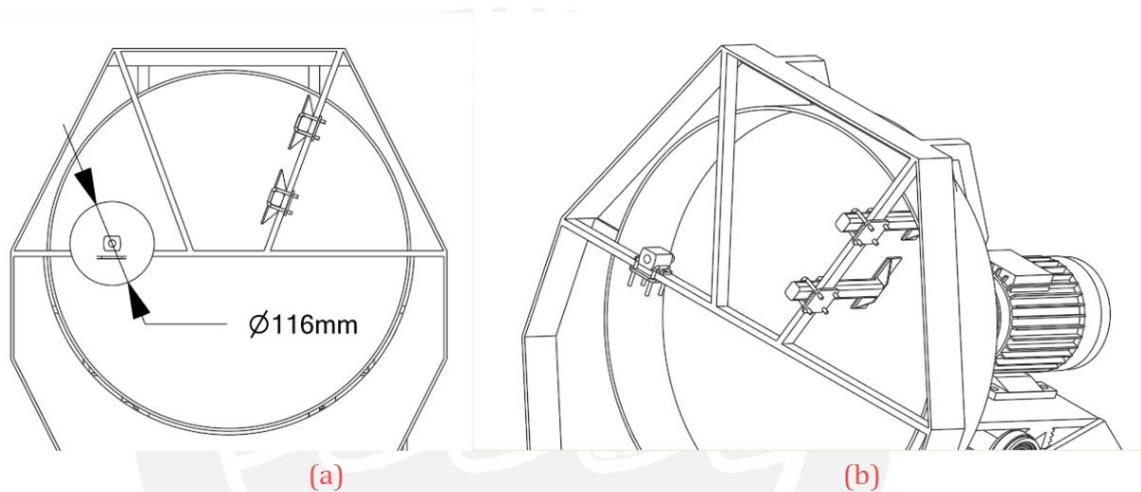


Figura 35. Área de aspersion y ubicación de la boquilla

3.2.7.1 Bomba de agua

Debido a que la bomba es de bajo caudal se encontró que la mejor opción a emplear son bombas de corriente directa a 12 V como la que se muestra en la Figura 36. Esta bomba es de baja potencia y puede enviar agua hasta una altura de 5 m con un flujo máximo de 800 L/h.



Figura 36. Bomba de agua de 1/2" a 12VDC

Nota. Tomado de Naylamp Mechatronics SAC. (2020).





CAPÍTULO 04

DISEÑO DEL SISTEMA DE ACCIONAMIENTO Y ESTRUCTURA DE SOPORTE

Capítulo 4

Diseño del sistema de accionamiento y estructura de soporte

En este capítulo se desarrollarán los cálculos de la estructura y componentes críticos. Se finalizará con la selección de piezas y componentes que no son necesario diseñar pues estos existen en el mercado, en otras palabras, componentes estándar.

4.1. Secuencia de los cálculos para la estructura y el sistema de accionamiento

En el diagrama de la Figura 37 se plasmó la secuencia de cálculo para el diseño de la estructura y el sistema de accionamiento. Como se puede ver, el cálculo inicia con el valor del diámetro del disco granulador, esto es debido a las ecuaciones 2 y 3 que relacionan el diámetro del disco con la potencia y la capacidad del granulador (Producción de pellets). Por otra parte, conociendo la producción de pellets y las dimensiones del disco se puede determinar el peso del material y el peso del disco, las cuales serán las cargas que se aplicarán sobre el disco, a esto se debe sumar el torque generado por el motor para realizar el diseño del eje.

Se tomó como elemento crítico al eje de potencia del disco granulador debido a las cargas de flexión y de torsión que debe soportar, las cuales son representadas en un diagrama de cuerpo que se emplea para determinar las reacciones y el momento de flexión máximo. Empleando la teoría de falla se calcularán los esfuerzos y el factor de seguridad del eje bajo fatiga; a esto se le agregará los datos de dos materiales diferentes para el eje, obteniéndose una gráfica paramétrica, la cual permitirá comparar los resultados y justificar el diseño desde una perspectiva técnica.

Posteriormente al diseño del eje, se importan los resultados de las reacciones sobre el eje y el peso elementos adicionales como la estructura y el motor para realizar la simulación de la estructura superior.

Para la estructura inferior se sigue el mismo procedimiento tomando los resultados de los cálculos para la estructura superior y aplicándolos sobre los soportes de la otra estructura. Después de finalizarse las simulaciones y al obtenerse valores de factores de seguridad satisfactorios se realizará la selección de los componentes estándar y con ellos se elaborará los planos de fabricación y ensamblaje.

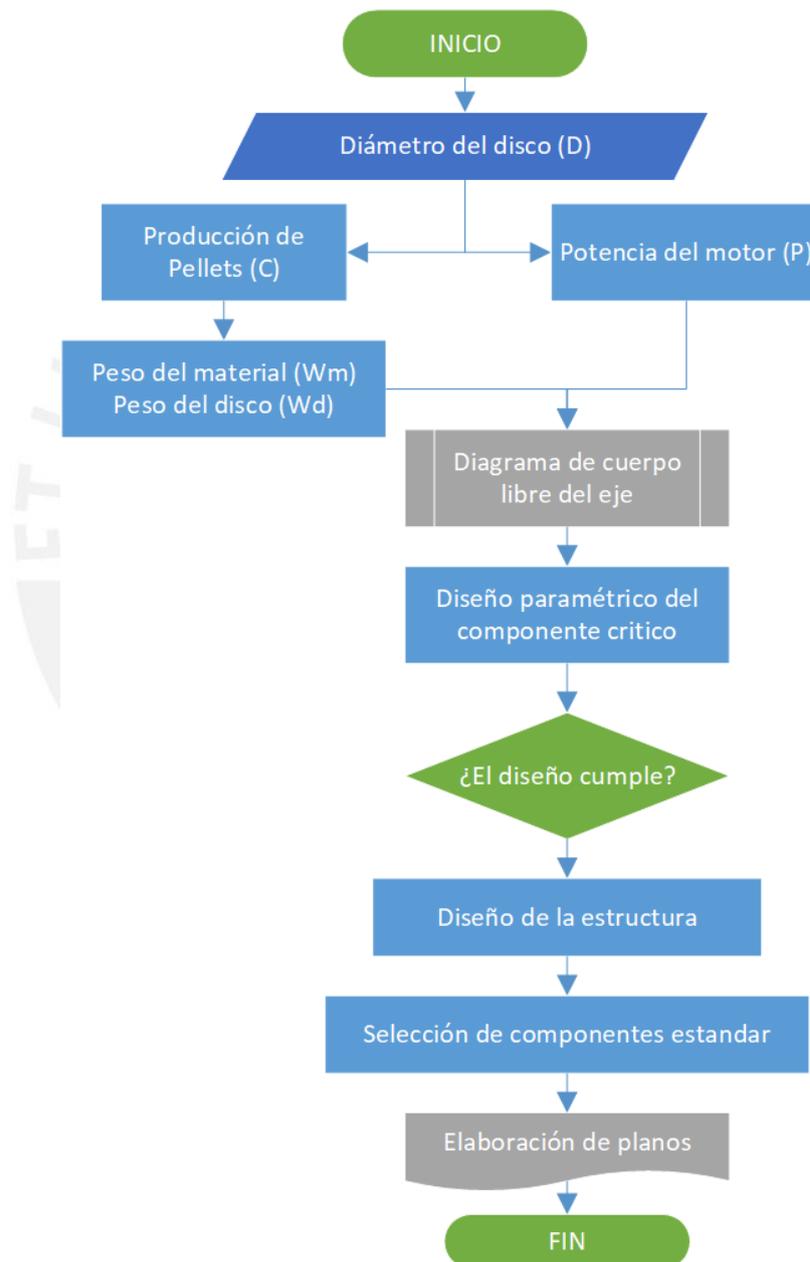


Figura 37. Diagrama de flujo para el cálculo de la estructura y el sistema de accionamiento

Nota. Elaboración propia

Los componentes de las fuerzas que se intervienen en la estructura superior se muestran en la Figura 38. Las flechas en rojo representan el peso de cada componente y la de color verde es la reacción en el eje y .

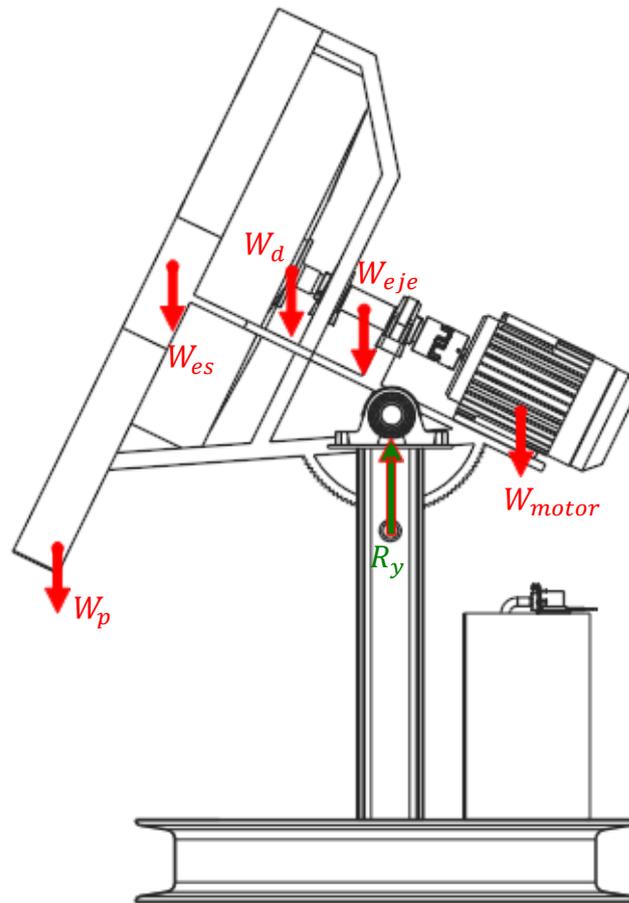


Figura 38. Fuerzas sobre la estructura superior con sus componentes montados

Elaboración propia

Donde:

- W_d : Es el peso del disco granulador, (N)
- W_{es} : Es el peso de la estructura superior, (N)
- W_{eje} : Es el peso del eje, (N)
- W_{motor} : Es el peso del motor, (N)
- W_p : Es el peso del material a granular, (N)
- R_y : Es la reacción generada en los rodamientos, (N)

4.2. Diseño del eje

Después de determinar las dimensiones y las cargas en el disco granulador se diseñará el eje el cual es tomado como la parte la más crítica en el diseño del equipo en general, esto es debido a que sirve como elemento de transmisión de potencia desde el motor hacia el disco y a su vez soporta tanto el peso del material a granular (W_p), como el peso del disco (W_d) durante el proceso de granulación.

4.2.1. Diagrama de cuerpo libre del eje:

El proceso típico en el diseño de ejes empieza con la elaboración del diagrama de cuerpo libre (DCL), donde se grafican solamente las cargas externas que se aplican sobre el eje y las reacciones. Por la naturaleza del equipo el eje no trabaja en una sola posición, sino que su inclinación puede variar en un rango de 45° a 55° . Por lo cual, para el diseño se tomará el caso en el cual el eje este sometido a los mayores niveles de esfuerzos el cual será a 45° , pues en esta posición se procesa el mayor volumen para el material. En la Figura 39 se muestran las fuerzas del peso del material (W_p) y del peso del disco (W_d) en el plano (y, z') y sus componentes a lo largo de esos ejes.

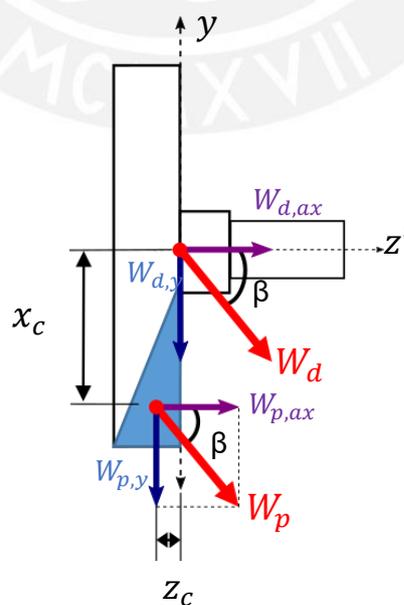


Figura 39. Fuerzas aplicadas en el disco

Elaboración propia

Como la fuerza (W_p) se encuentra ubicado sobre el centro de gravedad de la masa y una distancia X_c del centro del disco, para trasladar la fuerza hacia el centro del disco y hacerlo coincidente con la fuerza (W_d) se calcula el momento generado por la fuerza (W_p) con respecto al origen de coordenadas que coincide con el centro del disco. Empleando las fuerzas de la Figura 39 se tiene que dicho momento es:

$$M_{wp} = W_{py} * z_c + W_{pax} * x_c \quad (43)$$

$$M_{wp} = 6.1849 \text{ N.m}$$

Con el ángulo de inclinación establecido y las ubicaciones de las fuerzas se grafica el eje horizontalmente y se representan las cargas mediante sus componentes en los ejes (y, z'). En la Figura 40 se muestra el DCL para el eje con las cargas aplicadas en color rojo y las reacciones en color verde, los puntos de interés para el análisis están enumerados de A hasta F.

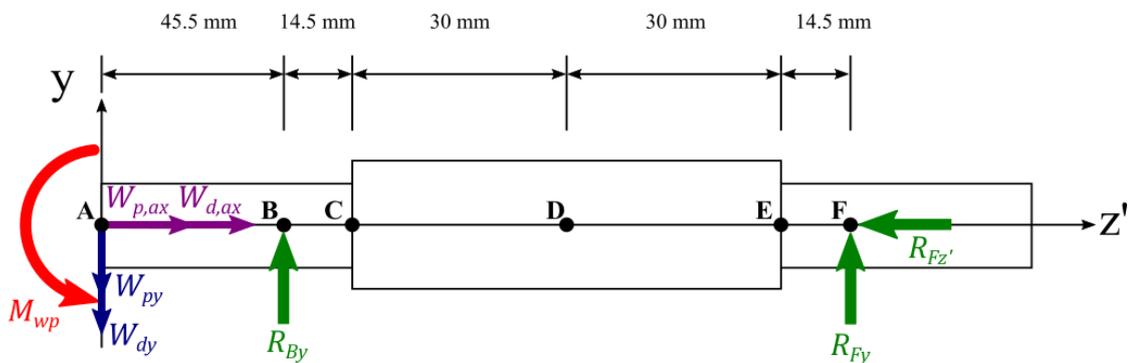


Figura 40. Diagrama de cuerpo libre del eje

Elaboración propia

Aplicando las ecuaciones de equilibrio se obtienen las reacciones $R_{Bx'}$, $R_{Cx'}$ y $R_{Cz'}$.

$$\sum F(y) = -W_{py} - W_{dy} + R_{By} + R_{Fy} = 0 \quad (44)$$

$$\sum F(z') = W_{p,ax} + W_{d,ax} - R_{Fz'} = 0 \quad (45)$$

$$\sum M(A) = M_{wp} + R_{By}(d_{AB}) + R_{Fy}(d_{AF}) = 0 \quad (46)$$

Despejando las ecuaciones 47 – 49 se tiene:

$$R_{By} = \frac{-M_{wp} - (W_{py} + W_{dy}) * d_{AF}}{d_{AB} - d_{AF}} \quad (47)$$

$$R_{Fz'} = W_{p,ax} + W_{d,ax} \quad (48)$$

$$R_{Fy} = W_{py} + W_{dy} - R_{By} \quad (49)$$

Reemplazando valores a las ecuaciones 47-49 se tiene:

$$R_{By} = 210.51 \text{ N}$$

$$R_{Fz'} = 111.21 \text{ N}$$

$$R_{Fy} = -117.20 \text{ N}$$

El signo negativo de R_{Fy} indica que la dirección de la fuerza es opuesta a la asumida en la Figura 40.

4.2.2. Diagrama de fuerza cortante y momento flector

Del DCL de la Figura 40 se observa que las cargas están aplicadas en el extremo izquierdo del eje, en el mismo punto se ha tomado como el origen de coordenadas para la ubicación de las fuerzas y momentos. Tanto las componentes de las fuerzas W_p y W_d son colineales y se aplican en el mismo sentido y dirección. Los momentos flectores se pueden determinar mediante los diagramas de fuerza cortante y momento flector de la Figura 41. En el diagrama de fuerza cortante se observa que la fuerza cortante máxima es de 117.2 N, además del diagrama de momento flector se tiene que el máximo momento es -10.43 N.m y está en la misma ubicación que la fuerza cortante máxima. A pesar de que los mayores valores de fuerza cortante y momento flector se dan en la ubicación del primer rodamiento es necesario analizar los esfuerzos generados en los cambios de

sección de los puntos *C* y *E* de la Figura 40. Esto es debido a la concentración de esfuerzos que se dan en estas zonas.

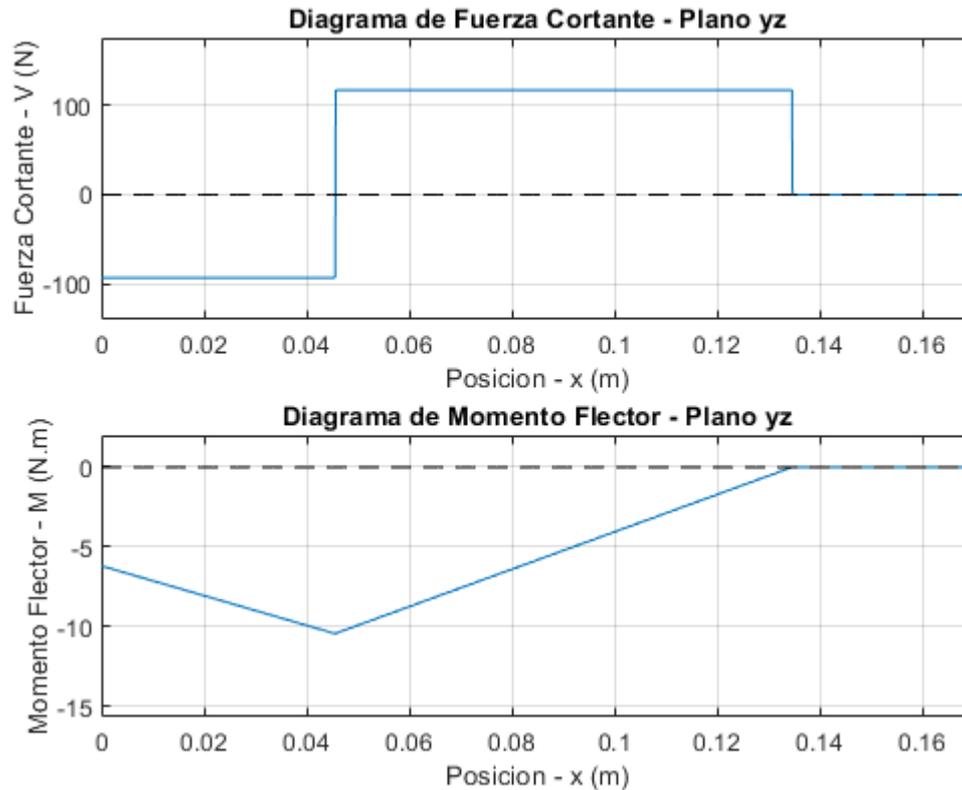


Figura 41. Diagramas de fuerza cortante y momento flector

Elaboración propia

En la Tabla 17 se encuentra un listado con los puntos de interés en el eje y sus respectivos momentos flectores y torques.

Tabla 17. Puntos de análisis en el eje

Punto de análisis	Distancia desde el origen	Momento flector	Torque
A	0.0000 m	-6.1849 N.m	99.02 N.m
B	0.0455 m	-10.4331 N.m	99.02 N.m
C	0.0600 m	-8.7271 N.m	99.02 N.m
D	0.0900 m	-5.2208 N.m	99.02 N.m
E	0.1200 m	-1.7028 N.m	99.02 N.m
F	0.1345 m	-0.0024 N.m	99.02 N.m

Nota. Elaboración propia

4.2.3. Concentradores de esfuerzos

En los ejes con cambio de sección se pueden generar concentraciones de esfuerzos que elevan los esfuerzos calculados y del mismo modo disminuyen el factor de seguridad. Este problema no se presenta en eje lisos, pero en este caso debido a que existe una fuerza axial el eje debe tener un borde que sirva como asiento para que el eje repose sobre el rodamiento, evitando que se deslice axialmente. Para la altura del borde del eje se tomará 1/8 de pulgada quedando el diámetro mayor 1/4 más grande $D_{eje} = \left(\frac{5}{4}\right) d_{eje}$ (Figura 40)

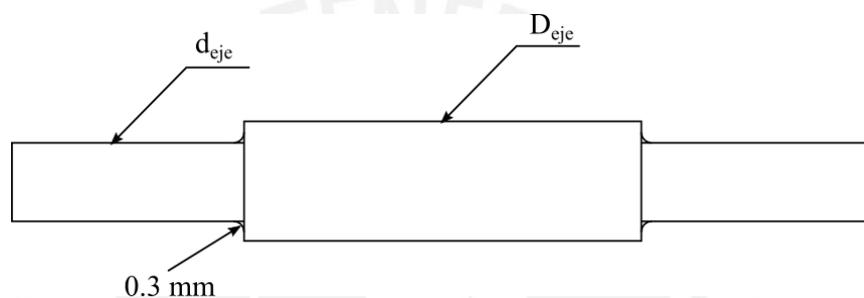


Figura 42. Diámetro menor y mayor del eje

Elaboración propia

Para calcular los factores de concentración de esfuerzos para torsión y flexión se tiene:

$$\frac{D}{d} = 1.25$$

$$\frac{r}{d} = 0.012$$

En la Figura 43 se encuentran las gráficas para determinar los concentradores de esfuerzos para flexión (k_t) y torsión (k_{ts}). Para los valores de $\frac{D}{d}$ y $\frac{r}{d}$ los concentradores de esfuerzos son:

$$k_t = 2.8$$

$$k_{ts} = 2.3$$

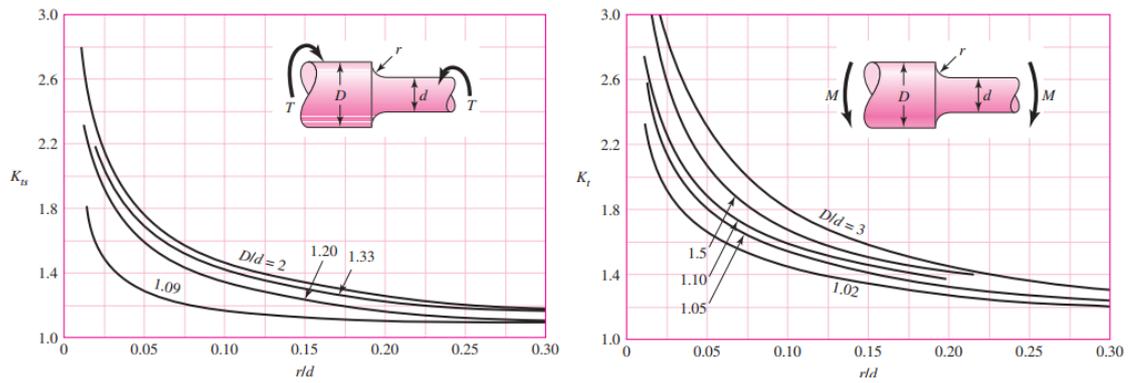


Figura 43. Gráficas de factores teóricos de concentración del esfuerzo

Tomado de Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2012)

Para obtener los esfuerzos del eje en fatiga los concentradores de esfuerzos k_t y k_{ts} son modificados con la sensibilidad a la muesca q de las ecuaciones 50 y 51.

$$k_f = 1 + q(k_t - 1) \quad (50)$$

$$k_{fs} = 1 + q_{cortante}(k_t - 1) \quad (51)$$

Donde:

k_f : Factor de concentración del esfuerzo por fatiga en flexión

k_{fs} : Factor de concentración del esfuerzo por fatiga en torsión

q : Sensibilidad a la muesca en tensión

$q_{cortante}$: Sensibilidad a la muesca en torsión

Para un eje con radio de muesca $r = 0.3 \text{ mm}$ los valores de sensibilidad a la muesca y los factores de concentración de esfuerzos k_s y k_{fs} son:

$$k_f = 1 + (0.8)(2.8 - 1) = 2.44$$

$$k_{fs} = 1 + (0.85)(2.3 - 1) = 2.11$$

Para saber en qué punto se da el mayor esfuerzo combinado se calcula el esfuerzo de Von Mises máximo para cada punto del eje con la ecuación 52, donde se incluyen el esfuerzo axial y los concentradores de esfuerzos.

$$\sigma'_{max} = \sqrt{k_f \left(\frac{32M}{\pi d^3}\right)^2 + 3k_{fs} \left(\frac{16T}{\pi d^3}\right)^2} \quad (52)$$

La ecuación anterior depende del diámetro por tal razón se harán los cálculos para un diámetro inicial de 1", obteniendo los resultados de la Tabla 18.

Tabla 18. Esfuerzo de Von Mises para cada punto de análisis en el eje

Punto de análisis	Esfuerzo de Von Mises	k_f	k_{fs}	Esfuerzo máximo
A	53.442 MPa	1	1	53.442 MPa
B	53.697 MPa	1	1	53.697 MPa
C	53.579 MPa	2.44	2.11	77.891 MPa
D	53.403 MPa	1	1	53.403 MPa
E	53.314 MPa	2.44	2.11	77.446 MPa
F	53.304 MPa	1	1	53.304 MPa

Nota. Elaboración propia

4.2.4. Diseño paramétrico del eje

De la Tabla 18 se obtiene que el mayor esfuerzo se alcanza en el punto C, el cual viene a ser el punto más crítico en el eje. Tomando este punto para el análisis paramétrico se haya el factor de seguridad como función del diámetro del eje, teniendo como parámetros la resistencia de dos aceros inoxidables comerciales el 304 y 316 (Anexo A). Se realiza la programación de los cálculos en Matlab y se analiza la variación del factor de seguridad para diámetros desde 0.5" a 1.5".

Como se observa en las gráficas de la Figura 44 al valor asumido inicialmente de 1" le corresponde un factor de seguridad $FS = 1.9$ y $FS = 2.119$ para los aceros inoxidables 304 y 316 respectivamente. Para el diámetro asumido se verifica que un valor de 1" se logra un factor de seguridad de aproximadamente 2, lo que indica que los esfuerzos sobre el eje son aproximadamente la mitad de la resistencia del material, esto confirma que el diámetro es adecuado para para este equipo.

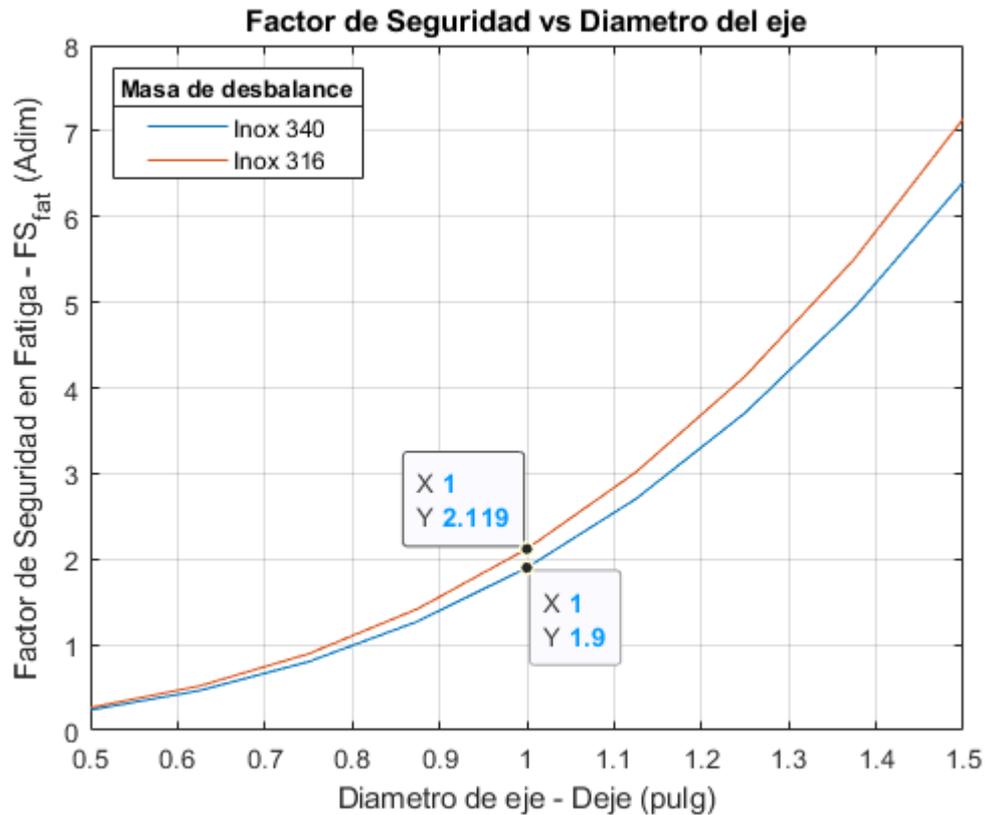


Figura 44. Graficas paramétricas del factor de seguridad vs diámetro

Elaboración propia

4.3. Diseño de la estructura soporte

Como se definió en la Figura 44 para el diseño de la estructura superior del equipo es esencial tener ya definido las dimensiones del disco, el eje y el motor a utilizar. Teniendo en consideración que cada componente tiene un peso definido y que se aplican en diferentes lugares de la estructura los cálculos analíticos son complicados por lo cual el mejor más eficiente es analizar la estructura en un software de simulación por elementos finitos, en el cual se tienen que definir las fuerzas actuantes y las regiones de soporte. Con los puntos anteriores se procede a graficar el diagrama de cuerpo libre de la estructura donde se muestra la carga aplicada y los puntos de apoyo de cuales se obtendrán los valores de las reacciones. En la Figura 45a se muestra la estructura superior con sus componentes y en la Figura 45b el diagrama de cuerpo libre de la estructura.

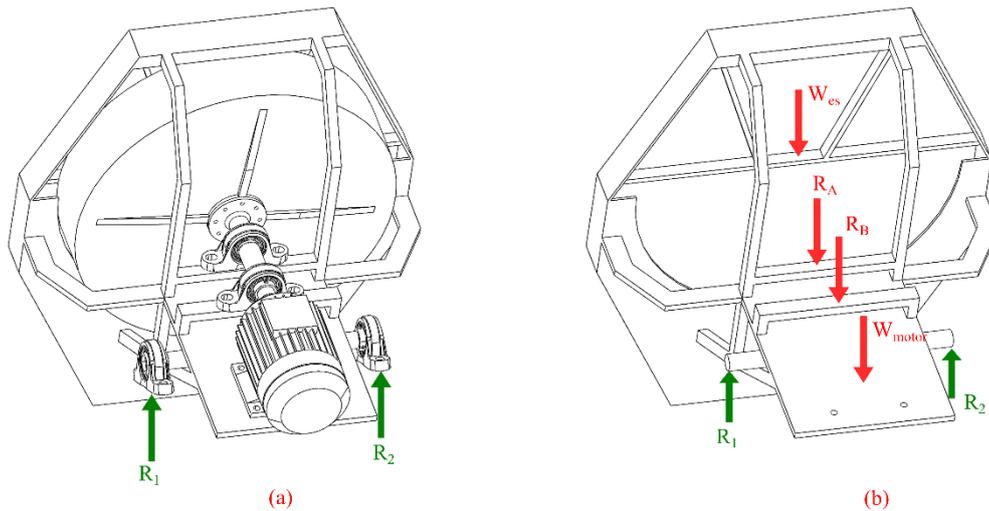


Figura 45. (a) Estructura superior (b) Diagrama de cuerpo libre de la estructura

Elaboración propia

Las fuerzas que se muestran como R_A y R_B son el resultado de las reacciones en R_{By} y R_{Fy} más suma del peso del eje. Estas relaciones se expresan con las ecuaciones 53 y 54.

$$R_A = R_{By} + \frac{W_{eje}}{2} \quad (53)$$

$$R_B = R_{Fy} + \frac{W_{eje}}{2} \quad (54)$$

Donde:

$$W_{eje} = (1.0324 \times 10^{-4} \text{ m}^3) \left(8000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) = 8.102 \text{ N}$$

$$R_A = 172.04 \text{ N} + \frac{8.102 \text{ N}}{2} = 176.09 \text{ N}$$

$$R_B = -80.6403 + \frac{8.102 \text{ N}}{2} = -76.59 \text{ N}$$

El peso del motor se obtiene del catálogo del Anexo D, el cual es:

$$W_{motor} = 7.5 \text{ kg} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 73.575 \text{ N}$$

El peso de la estructura es calculado por el software y depende del material asignado. Para la simulación se usará el acero inoxidable 304 por ser más barato y de fácil acceso en el mercado.

Para efectos de la simulación se toman las cargas antes mencionadas y se aplican sobre la estructura como se puede ver en la Figura 46, donde se observa el modelo 3D de la estructura superior con las cargas asignadas y los soportes en la región del eje donde irán ubicados los rodamientos.

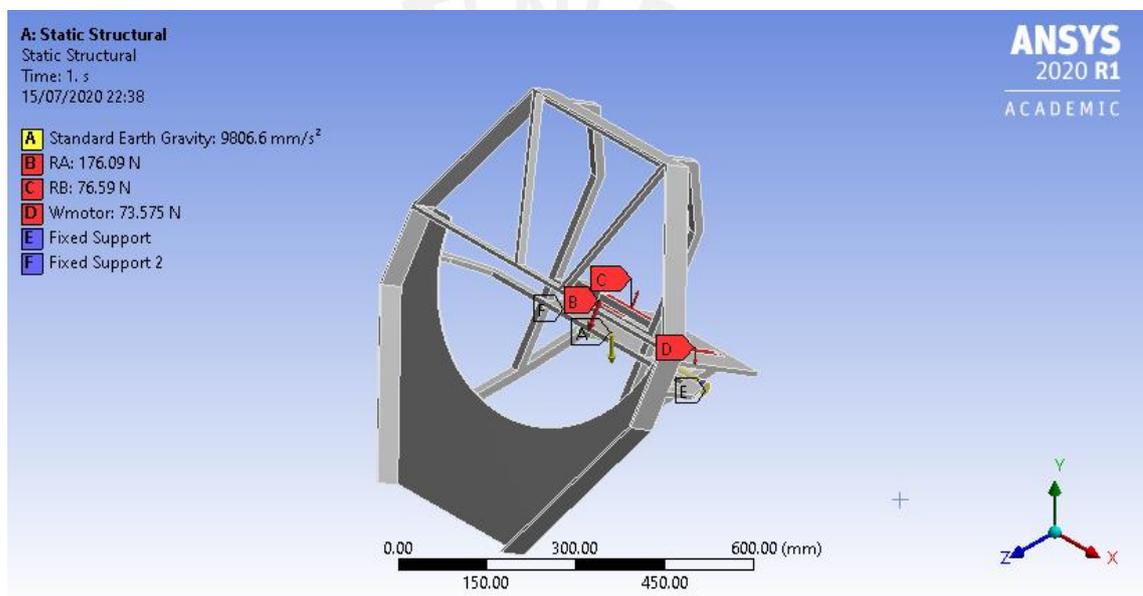


Figura 46. Cargas aplicadas en la simulación de la estructura superior

Elaboración propia

En la Figura 47 se muestran los resultados de la simulación en donde se observa que el factor de seguridad mínimo para esta estructura es de 14.317 lo cual es bastante alto y por lo tanto la estructura presenta la resistencia suficiente para instalar los componentes deseados.

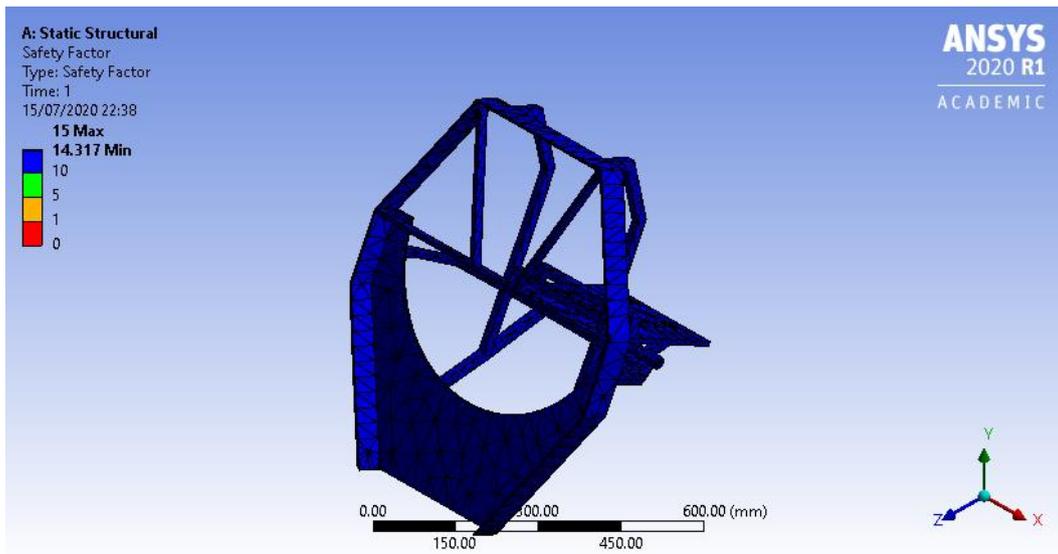


Figura 47. Factor de seguridad de la estructura superior

Elaboración propia

De igual manera se simuló la estructura inferior asignando como cargas las reacciones en los rodamientos de obtenidos de la simulación de la estructura superior. Estas reacciones son $R_1 = 201.97 \text{ N}$ y $R_2 = 205.61 \text{ N}$. Los resultados de la simulación se muestran en la Figura 48 y se puede que el factor de seguridad mínimo es superior a 15 mostrando esta estructura es la más resistente.

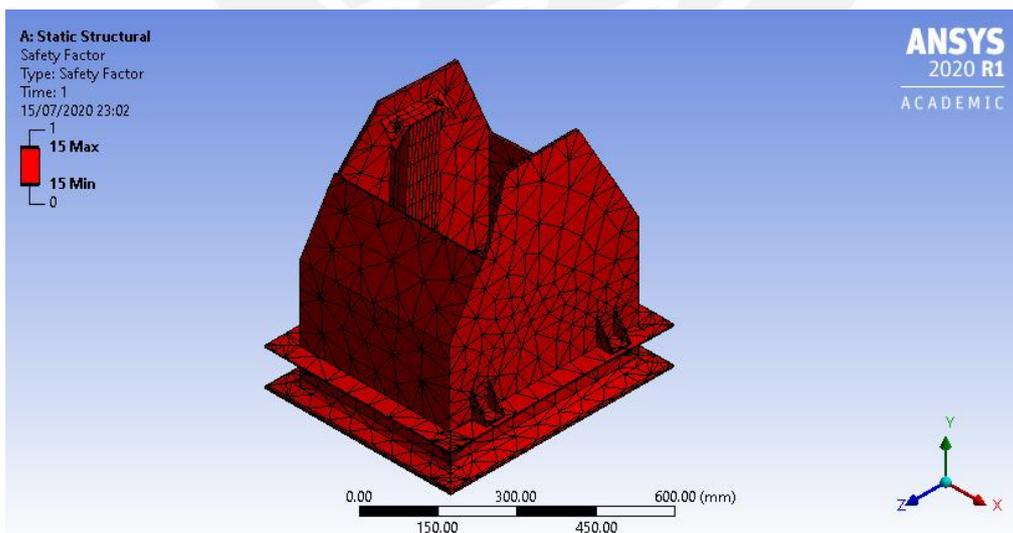


Figura 48. Factor de seguridad de la estructura inferior

Elaboración propia

4.4. Cálculo de soldadura

Para realizar la unión de los elementos estructurales se han empleado un proceso de unión por soldadura. Como la mayor parte de la estructura no soporta cargas importantes, se ha realizado el cálculo de las zonas críticas. Para el caso de la estructura superior, como su fabricación es compleja se analizó la estructura de mediante simulación como se puede ver en la Figura 49.

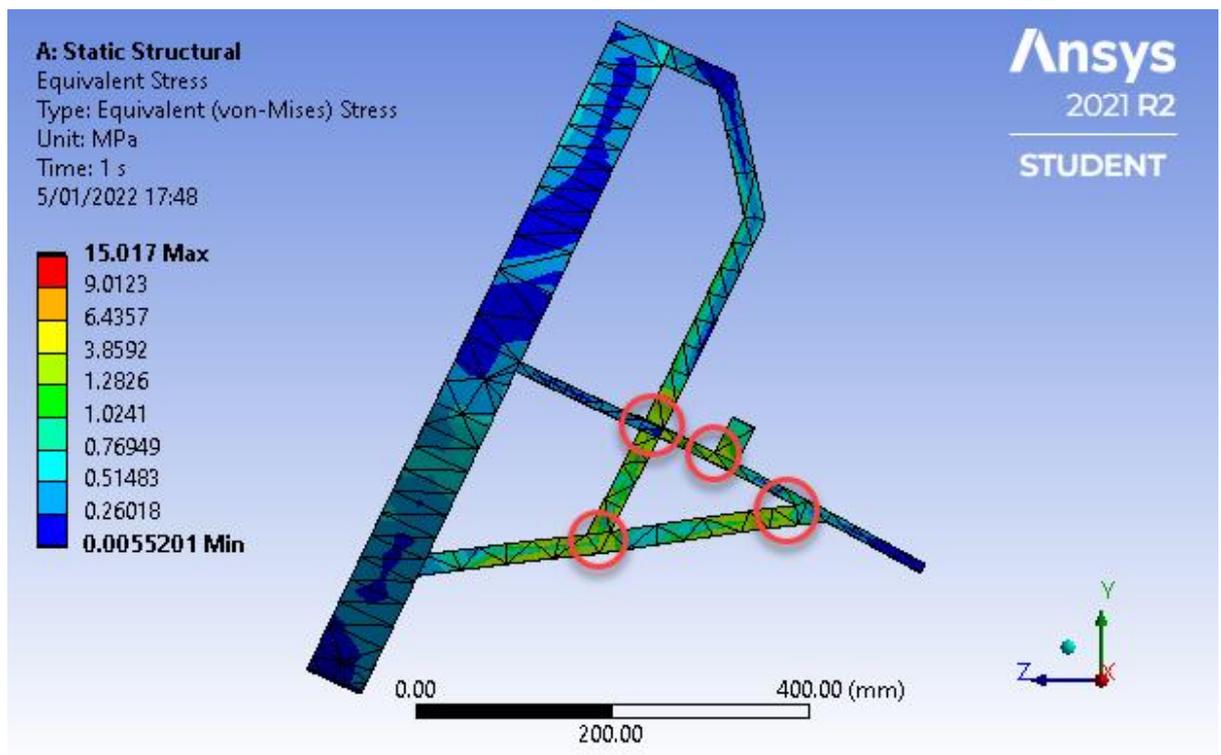


Figura 49. Detalle de la distribución de esfuerzos dentro de la estructura superior

Elaboración propia

De la figura anterior podemos ver que las zonas de mayor concentración de esfuerzos esta representadas en color naranja y encerradas en un círculo rojo. Como estas uniones están hechas con soldadura se hará el cálculo para estimar el factor de seguridad mínimo de la soldadura.

Para simplificar el análisis se ha refinado el mallado y se ha tomado los valores de los esfuerzos donde se ha aplicado soldadura, tal y como se puede ver en la Figura 50.

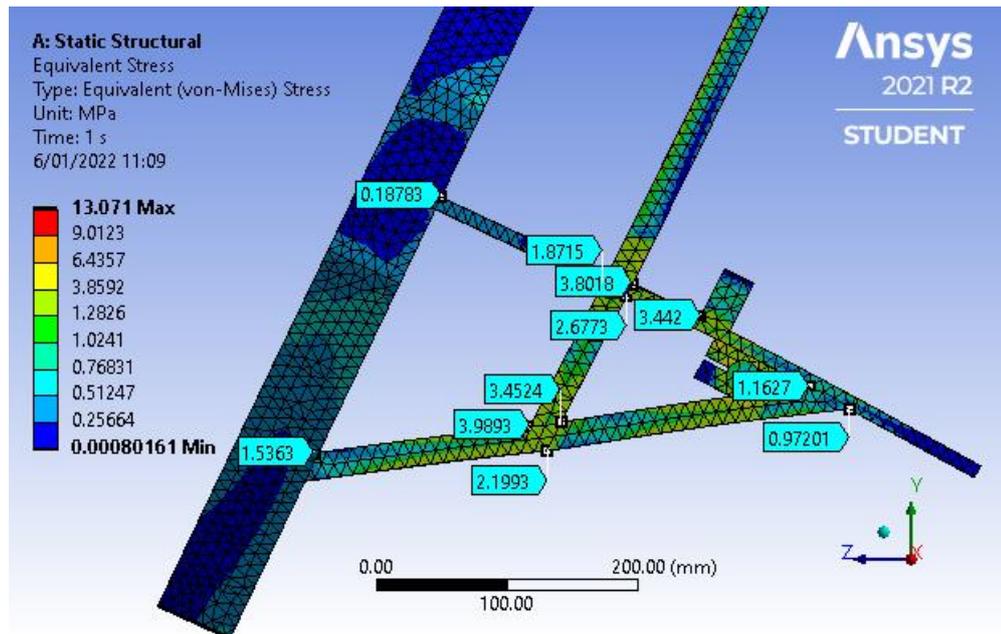


Figura 50. Valores de los esfuerzos en las zonas críticas.

Elaboración propia

Empleando el máximo valor como cota superior se estima el factor de seguridad de la soldadura para la estructura superior. De la Figura 50 se puede notar que el máximo valor del esfuerzo es de 3.99 MPa y en esa zona se propone un cordón de soldadura continua de cateto de 5mm. Para obtener los parámetros para el cálculo se hace uso de la Figura 51.

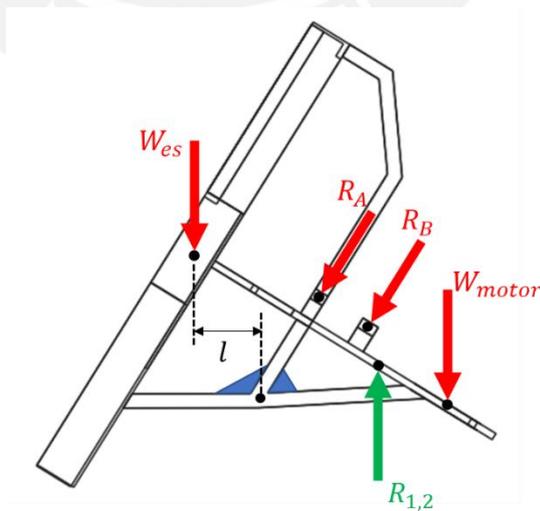


Figura 51. Diagrama de cuerpo libre de la estructura superior.

Elaboración propia

En la figura anterior se puede notar que el peso de la estructura se encuentra concentrada a la izquierda y se encuentra equilibrado por las fuerzas al lado derecho para que se cumpla las condiciones de equilibrio estático. Bajo estas condiciones, se sabe que la suma de los momentos alrededor de un punto arbitrario debe ser igual a cero, por lo tanto, si se toma el centroide de la zona donde se concentra el mayor esfuerzo en la Figura 50, se puede obtener el momento, conociendo el peso de la estructura y la longitud $l = 0.15 \text{ m}$. Como el peso de la estructura superior es 22.72 kg se tiene que el momento flector es:

$$M = W_{es} \cdot l = 33.44 \text{ Nm}$$

Organizando los datos y haciendo los cálculos se tiene que los esfuerzos cortantes primario y secundario son:

$$\tau' = \frac{F}{A} = 11.29 \text{ MPa}$$

$$\tau'' = \frac{1.414 M}{L \cdot g \cdot H} = 44.58 \text{ MPa}$$

Y el esfuerzo cortante total sobre la soldadura en la región más crítica es:

$$\tau = \sqrt{(\tau')^2 + (\tau'')^2} = 45.99 \text{ MPa}$$

Tabla 19. Especificaciones de diferentes materiales de aporte

AWS Electrode Number*	Tensile Strength kpsi (MPa)	Yield Strength, kpsi (MPa)	Percent Elongation
E60xx	62 (427)	50 (345)	17-25
E70xx	70 (482)	57 (393)	22
E80xx	80 (551)	67 (462)	19
E90xx	90 (620)	77 (531)	14-17
E100xx	100 (689)	87 (600)	13-16
E120xx	120 (827)	107 (737)	14

Como material de aporte se usará el de menor resistencia de los que se muestra en la Tabla 19. El electrodo E60xx tiene como resistencia a la fluencia $S_y = 345 \text{ MPa}$ y para ese material se calcula el factor de seguridad basado en la resistencia mínima y la teoría de la máxima energía de la distorsión (Von Mises), con la ecuación siguiente.

$$FS = \frac{0.577 S_y}{\tau} = 4.33$$

Se observa entonces que el valor del factor de seguridad para la soldadura en la zona más crítica tiene un valor bastante alto, aun cuando se está utilizando el material de aporte de menor resistencia mecánica de la Tabla 19. De esta manera para las zonas con esfuerzos menores al tomado en este cálculo, el factor de seguridad será mayor a 4.33, por lo tanto, para el resto de los cordones de soldadura se empleará el mismo material de aporte con un ancho del cordón de soldadura de 5 mm, permitiendo así tener en otros cordones de soldadura factores de seguridad mayores a 4.33.

En conclusión, se recomienda construir la estructura mediante cordones continuos de soldadura utilizando electrodos de la serie E60XX con cateto de 5 mm. Sin embargo, podría utilizarse electrodos de la serie E70XX, tal como el electrodo es 7018, todo esto sujeto a disponibilidad. Con esto último, se aseguraría un factor de seguridad superior al calculado en los apartados superiores.

4.5. Selección del motor

La potencia del motor se estimó a partir de la ecuación 2, el cual proporcionó un valor de 0.275 kW, que sería el valor de la potencia consumida por el proceso de peletizado, y equivale a 0.369 HP; para evitar problemas de falta de potencia durante el arranque debido a la inercia del disco, se consideró un factor de servicio de 2 el cual al multiplicarse se tiene que el motor finalmente debería tener una potencia de 0.737 HP.

En el Anexo D se tiene el catálogo de motores trifásicos de la marca SIEMENS de donde se selecciona un motor con valor estandarizado superior al valor calculado, el cual viene a ser 0.5 HP a 1715 RPM.



Figura 52. Motor Trifásico
Tomado de SIEMENS (2020)

4.6. Selección de rodamientos

Haciendo uso de las aplicaciones web de SKF se realizó la selección de los rodamientos con un diámetro interno de 1" cuyas especificaciones están en el Anexo F. El código de rodamiento en conjunto su soporte (housing) es SYWK 1. YTH y se muestra en la Figura 53.



Figura 53. Unidad de rodamiento SYWK 1. YTH
Tomado de SKF (2020)

4.7. Sistema de control

4.7.1. Selección del variador de velocidad

El variador de velocidad es el encargado de controlar la velocidad de rotación del motor por lo tanto su selección depende de sus características, por otra parte, debido a que el equipo será empleado en un laboratorio la alimentación del variador debe ser monofásica mientras su salida es trifásica. Por tal razón del catálogo de Schneider Electric se tomó el variador ATV12H037M2 cuyas características se pueden ver en el Anexo E.

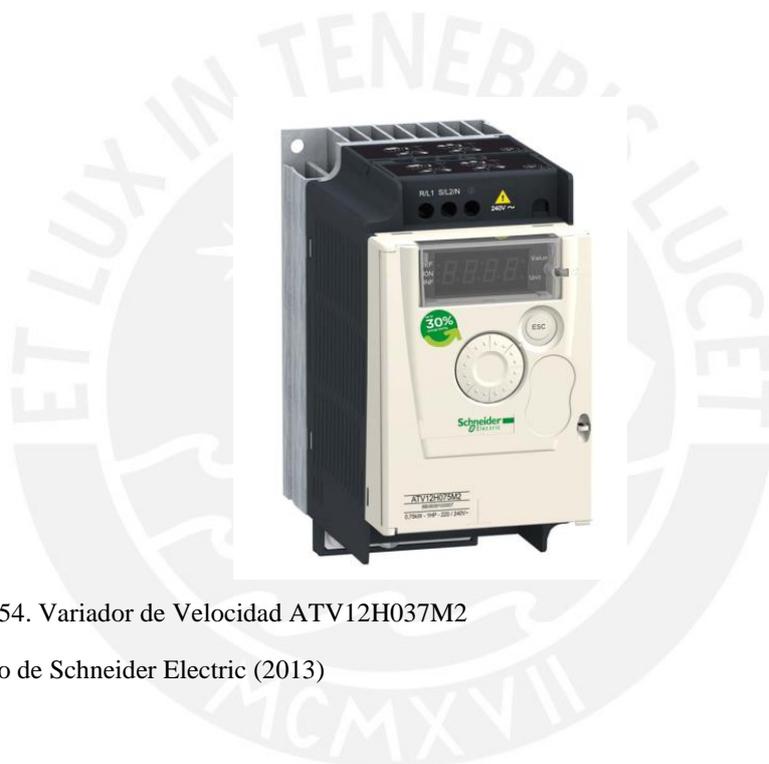


Figura 54. Variador de Velocidad ATV12H037M2

Tomado de Schneider Electric (2013)

4.7.2. Esquema eléctrico de conexión

El variador de velocidad para poder controlar el motor debe ser conectado según el tipo de motor adquirido, el caso más común es emplear un motor trifásico, pero para el caso en donde el suministro eléctrico sea monofásico el variador será alimentado con esta tensión y a su salida será trifásico, esto hace bastante versátil el uso de variadores. Para un correcto funcionamiento es necesario realizar las conexiones como se muestra en la Figura 55. Para el disco granulador se emplea el variador con código M2 donde la

conexión monofásica se realiza en los terminales R/L1 y R/L2, adicionalmente a esto es importante el uso de una conexión a tierra en la terminal respectiva. El motor será conectado en las terminales U1, V1, W1 y el armazón al terminal de tierra.

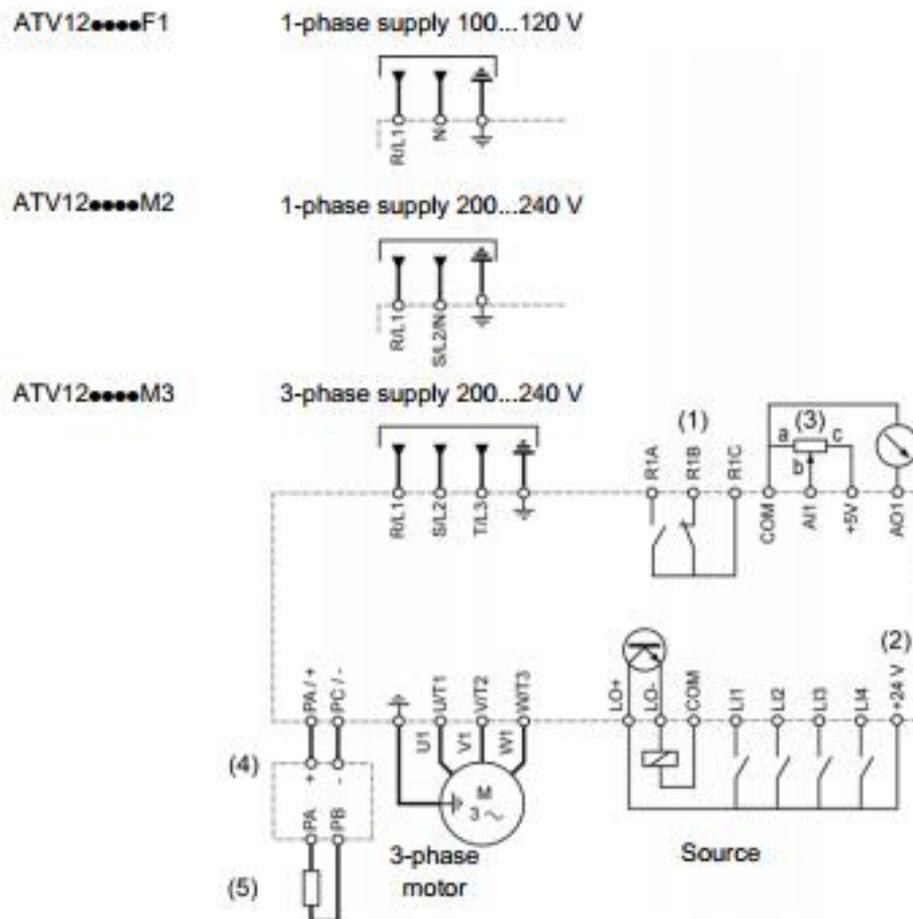


Figura 55. Diagrama de conexión del variador de velocidad

Tomado de Schneider Electric (2013)

4.8. Planos de fabricación

Los planos para el disco granulador se encuentran en el Anexo G, donde se puede apreciar el diseño completo de la maquina en sus diferentes vistas y los detalles dimensionales de los elementos que la componen.

En total se han elaborado 14 planos, los cuales están listados en la Tabla 20.

Tabla 20. Lista de planos para el diseño del disco granulador

CODIGO	PLANO	FECHA
DA01-1	VISTA GENERAL	27/07/2020
DA01-2	VISTA EXPLOTADA	27/07/2020
DA02	DISCO	27/07/2020
DA03	ESTRUCTURA SUPERIOR	27/07/2020
DA04	ESTRUCTURA INFERIOR	27/07/2020
DA05	SOPORTE	27/07/2020
DA06	BRIDA	27/07/2020
DA07	EJE DEL DISCO	27/07/2020
DA08	EJE PIVOTANTE	27/07/2020
DA09	MORDAZA	27/07/2020
DA10	VOLANTE	27/07/2020
DA11	DEPOSITO DE AGLOMERADOS	27/07/2020
DA12	MESA DE SOPORTE	27/07/2020
DA13	RASCADOR	27/07/2020

Nota. Elaboración propia

4.9. Costo del equipo

Para evaluar el costo en la fabricación del disco granulador para el laboratorio de Investigación Carbón y Biomasa PUCP se realizó el presupuesto del equipo en el que se incluyen el costo de materiales, accesorios, procesos de fabricación y mano de obra.

4.9.1. Costo del material

Como materiales se incluye a todo lo que será empleado en un proceso de fabricación.

Tabla 21. Costo de los materiales para la fabricación del equipo

MATERIALES	CANT. (UND)	COSTO UNITARIO (S/.)	COSTO TOTAL (S/.)
Plancha de acero Inox AISI 304L - 1220X2440X2	1	S/ 1 150.00	S/ 1 150.00
Plancha de acero galvanizado ASTM A653 - 1220X2440X2	1	S/ 41.00	S/ 41.00
Tubo rectangular 15mmX20mmX3m	2	S/ 90.00	S/ 180.00
Perfil estructural C – CH 80X8	1	S/ 120.00	S/ 120.00
Perfil estructural SC 100	1	S/ 250.00	S/ 250.00
Electrodo Supercito 7018 1/8" x 1 kg	10	S/ 15.90	S/ 159.00
Barra de acero Inox 304 – 1.5"	1	S/ 360.00	S/ 360.00
Perno hexagonal 6 mm	6	S/ 1.50	S/ 9.00
Perno hexagonal 1/2"	22	S/ 3.50	S/ 77.00
		TOTAL	S/ 2 346.00

Nota. Elaboración propia

4.9.2. Costo de componentes y accesorios

En los componentes se incluyen aquellas piezas o equipos que no han sido diseñadas y se pueden adquirir bajo medidas estandarizadas desde catálogo.

Tabla 22. Costo de los componentes para la fabricación del equipo

COMPONENTES	CANT. (UND)	COSTO UNITARIO (S/.)	COSTO TOTAL (S/.)
Motor 05 HP - trifásico	1	S/ 353.00	S/ 353.00
Chumacera SKF - SYWK 1. YTH	4	S/ 122.46	S/ 489.84
Variador de velocidad ATV12H037M2	1	S/ 373.50	S/ 373.50
Bomba de agua D1/2" 12VDC 5m 800L/h	1	S/ 75.00	S/ 75.00
Boquilla de aspersión	1	S/ 70.36	S/ 70.36
Acoplamiento Mandíbula L075	1	S/ 70.51	S/ 70.51
Alimentador de tornillo sinfín	1	S/ 8 750.00	S/8 750.00
Manguera de agua baja presión – 1 m.	5	S/ 15.00	S/ 75.00
		TOTAL	S/10 257.21

Nota. Elaboración propia

4.9.3. Procesos de fabricación

Para el proceso de fabricación se consultó con el Laboratorio de Manufactura de la PUCP el tiempo en horas de cada proceso necesario para la fabricación del equipo de aglomeración por rodadura. El detalle los tiempos de mecanizado tomo como base los planos presentados en el Anexo G y el resultado se muestra en la Tabla 23.

Tabla 23. Tiempos de mecanizado para el equipo de aglomeración

DESCRIPCION PLANOS	TIEMPO DE MECANIZADO (HORAS)					
	HABILITADO (Corte)	TORNEADO	FRESADO	TALADRADO	TRABAJO CHAPA	SOLDADURA
01 PLANO DE VISTA GENERAL	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
02 PLANO DISCO GRANULADOR	1.00	1.00	0.00	2.00	0.00	3.00
03 PLANO ESTRUCTURA SUPERIOR	10.00	2.00	6.00	1.00	0.00	4.00
04 PLANO ESTRUCTURA INFERIOR	10.00	0.00	0.00	2.00	0.00	6.00
05 PLANO ESTRUCTURA SOPORTE	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00
06 PLANO BRIDA	1.00	4.00	0.00	2.00	0.00	0.00
07 PLANO EJE 01	1.00	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00
08 PLANO EJE 02	1.00	1.50	0.00	0.00	0.00	0.00
09 PLANO MORDAZA	1.00	1.00	0.00	2.00	0.00	0.00
10 PLANO VOLANTE	1.00	1.00	0.00	1.00	0.00	2.00
11 PLANO DEPOSITO	1.00	0.00	0.00	0.00	2.00	0.00
12 PLANO MESA	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00
13 RASCADOR	1.00	0.00	0.00	0.50	0.00	1.00
TOTAL (HORAS)	30.00	12.50	6.00	10.50	2.00	18.00

Nota. Fuente: Laboratorio de

En la Tabla 24 se resume el costo por hora de los procesos de mecanizado proporcionados por el Laboratorio de Manufactura de la PUCP, así como el costo total.

Tabla 24. Costos de los procesos de mecanizado

	COSTO HORA (SOLES/hr)	HORAS (hr)	COSTO (SOLES)
HABILITADO	35.00	30.00	S/ 1,050.00
TORNEADO	60.00	12.50	S/ 750.00
FRESADO	80.00	6.00	S/ 480.00
TALADRADO	45.00.	10.50	S/ 472.50
TRABAJO CHAPA	4000	2.00	S/ 80.00
SOLDADURA	150.00	18.00	S/ 2,700.00
		TOTAL	S/ 5,532.50

Nota. Elaboración propia

4.9.4. Mano de obra

Se emplearán dos trabajadores (Técnico y ayudante) para la fabricación del equipo los cuales serán pagados por jornada diaria. El costo total de la mano de obra se encuentra en la Tabla 25.

Tabla 25. Costo de la mano de obra para la fabricación del equipo

MANO DE OBRA	CANT. (UND)	COSTO UNITARIO (S/.)	COSTO TOTAL (S/.)
Técnico (día)	5	S/ 60.00	S/ 300.00
Ayudante (día)	5	S/ 50.00	S/ 250.00
		TOTAL	S/ 550.00

Nota. Elaboración propia

Sumando los costos se tiene que en materiales, accesorios y procesos de fabricación el costo es de S/. 18 135.71, por otra parte, el costo de mano de obra para dos trabajadores (Operario y ayudante) durante 5 días de trabajo es de S/. 550. De este modo, la inversión total requerida para la fabricación del equipo de aglomeración es de S/. 18 685.71.

Conclusiones

1. El equipo consta de tres partes: la superior conformada por una estructura que sostiene al disco aglomerador y al sistema de potencia: Motor y Variador de frecuencia, la inferior que viene a ser el bastidor de la máquina y la de suministro del humectante y de la mezcla mineral de hierro y bentonita. La estructura inferior se une a la estructura superior mediante un sistema basculante simple, permitiendo variar el ángulo de inclinación del disco lo que a su vez impacta sobre la capacidad de producción y el diámetro final del pellet.
2. El disco granulador con diámetro de 50 cm rota mediante un motor trifásico de 0.5HP controlado por un variador de frecuencia. La velocidad de operación del disco se ajustará según el criterio del laboratorista y hasta una velocidad máxima de 48 rpm. Variando la frecuencia se podrá analizar el efecto de la velocidad de giro sobre el tamaño del producto y su distribución estocástica.
3. En base a los requerimientos del laboratorio, el equipo se diseñó con inclinaciones regulables de 40° a 55° alcanzando su máximo volumen procesado a los 40°. Con esto se consigue obtener variación en el tiempo de residencia de los pellets en la superficie del disco, lo que a su vez permite controlar el diámetro mismo de los pellets. Esta regulación de ángulo de inclinación permitirá adicionalmente, investigar la distribución estadística del diámetro de los pellets.
4. La producción máxima estimada fue 375 kg/h, la cual se determinó asumiendo flujo continuo de trabajo, una inclinación de disco de 40°, diámetro de salida de tornillo sinfín 2 pulgadas y dosificación de mezcla de 98.5% de mineral de hierro-1.5% de bentonita para el material fino.
5. El diseño estructural permitió definir un eje de potencia de diámetro de 1” correspondientes a factores de seguridad mínimos de 4.01 y 1.9 en carga estática y

carga dinámica (fatiga), respectivamente. La estructura superior, por otro lado, presenta un factor de seguridad estático mínimo de 14.32. La estructura es lo suficientemente robusta.

6. Para el dosificador del humectante se seleccionó una bomba de agua de 12V y 19 W de potencia, con un caudal máximo de 13.3 L/min el cual puede ser fácilmente controlado mediante un regulador PWM, y así poder producir diferentes caudales para la experimentación.
7. El diseño permite variar la posición de los rascadores, así como del rociador, lo cual otorga versatilidad al equipo para las actividades de investigación.



Bibliografía

- A. Degler, (1963). "The granulation of powdered materials on rotating disks," *Cement, Wapno, Gips*, No. 2, 25–31.
- Babich, A., & Senk, D. (2019). *Coke in the iron and steel industry*. In *New trends in coal conversion* (pp. 367-404). Woodhead Publishing.
- Battle, T., Srivastava, U., Kopfle, J., Hunter, R., & McClelland, J. (2014). *The direct reduction of iron*. In *Treatise on process metallurgy* (pp. 89-176). Elsevier.
- BETE Fog Nozzle, Inc. (2020) *Guide to spray properties*. 50 Greenfield Street, Greenfield, MA 01301 USA
- BP p.l.c. (2019). *BP Statistical Review of World Energy* (68th edition). Recuperado de: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>
- Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2012). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley* (Vol. 6). McGraw-Hill Interamericana.
- Cancho Franco, D. (2016). *Estudio de los parámetros de pelletizado de residuos biomásicos en pelletizadora semi-industrial* (Bachelor's thesis).
- Capes, C.E., Williams, J.C. (1980). *Particle Size Enlargement*, Elsevier.
- Cavaliere, P., & Silvello, A. (2016). *Ironmaking and Steelmaking Processes*. Springer-Verlag, Germany.
- Conveyor Eng. & Mfg. Co (2012). *Conveyor Design Manual*. Recuperado de: <https://www.conveyoreng.com/conveyor-design-manual/>
- Diez, M. A., Alvarez, R., & Cimadevilla, J. L. G. (2013). *Briquetting of carbon-containing wastes from steelmaking for metallurgical coke production*. *Fuel*, 114, 216-223.
- Earth Science Communications Team (2020). *GLOBAL CLIMATE CHANGE Vital Signs of the Planet. Facts. Vital Signs. Carbon Dioxide*. Recuperado de: <https://climate.nasa.gov/vital-signs/carbon-dioxide/>
- Eggert, R. (2005). *Engineering design*. Pearson/Prentice Hall.
- Fayed, M., & Otten, L. (2013). *Handbook of powder science & technology*. Springer Science & Business Media.

- FEECO Internacional, (2020). Considerations In Disc Pelletizer (Pan Granulator) Sizing & Design. Recuperado de: <https://feeco.com/considerations-in-disc-pelletizer-pan-granulator-sizing-design/>
- Formoso, A., Moro Antonio, A., Fernández-Pello, G., Muñiz, M., Jiménez, J., Moro, A., & Cores, A. (2000). Estudio de la granulación de la mezcla de minerales de hierro en el proceso de sinterización. I parte. Granulación. *Revista de Metalurgia*, 36 (4).
- Geerdes, M., Toxopeus, H., & Vliet, C. (2009). *Modern Blast Furnace Ironmaking: An Introduction* (2^a ed.). IOS Press.
- Gorelov, V. V., & Nenashev, E. N. (1987). Calculation of the operating parameters of pelletizing granulators. *Chemical and Petroleum Engineering*, 23(11), 548-551.
- G.U.N.T. Gerätebau GmbH (2020). CE 255 Rolling agglomeration. Recuperado de: <https://www.gunt.de/en/products/process-engineering/mechanical-process-engineering/mixing-and-agglomeration/rolling-agglomeration/083.25500/ce255/glct-1:pa-148:ca-236:pr-20>
- H. Kbatt, (1958). "The operational control of disk granulators," *Zement-Kalk-Gips*, No. 4, 141–154.
- Haas, L. A., Aldinger, J. A., & Zahl, R. K. (1989). Effectiveness of organic binders for iron ore pelletization (No. 9230). US Department of the Interior, Bureau of Mines.
- Halt, J. A., & Kawatra, S. K. (2014). Review of organic binders for iron ore concentrate agglomeration. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 31(2), 73-94.
- IEA (2020). *World Energy Balances 2019*. Recuperado de: <https://www.iea.org/reports/world-energy-balances-2019>
- Iveson, S. M., Litster, J. D., Hapgood, K., & Ennis, B. J. (2001). Nucleation, growth and breakage phenomena in agitated wet granulation processes: a review. *Powder technology*, 117(1-2), 3-39.
- K. Sommer and W. Herrmann, (1978). "The design of drum and disk granulators," *Chem. Ing. Tech.*, No. 7, 518–524.
- Kapur, P. C. (1978). Balling and granulation. In *Advances in Chemical Engineering* (Vol. 10, pp. 55-123). Academic Press.
- Kumar, S. R., & Malayalamurthi, R. (2017). Agglomeration and sizing of rolling particles in the sago sizing mechanism. *Powder technology*, 320, 428-444.
- Li, C., Zhao, J., Honeyands, T., & Moreno-Atanasio, R. (2016). Variables influencing the angle of repose of iron ore granulated mix. *Chemeca 2016: Chemical Engineering-Regeneration, Recovery and Reinvention*, 622.

- Litster, J., & Ennis, B. (2004). *The science and engineering of granulation processes* (Vol. 15). Springer Science & Business Media.
- Mendoza, J. (2012). Marco legal de las energías renovables en el Perú: seminario de energías renovables en el Perú y tecnología Made in Germany. Osinergmin, Lima. Recuperado de: http://www.camara-alemana.org.pe/downloads/05_OSINERG_121113-PRE-JMG-Marco-Legal-Energias-Renovables-Matriz-Energetica.pdf
- Metalfab MHS, LLC (2020). MTM "Mini" Volumetric Screw Feeder. Recuperado de: <https://www.metalfabinc.com/product.cfm?prod=mini-screw-feeder>
- Meyer, K. (1980). *Pelletizing of iron ores*. Springer-Verlag, xvii+ 302, 23 x 15 cm, illustrated (DM 136.00).
- Moraes, S. L., de Lima, J. R. B., & Ribeiro, T. R. (2018). Iron ore pelletizing process: an overview. *Iron Ores and Iron Oxide Materials*, 41.
- Mousa, E., Wang, C., Riesbeck, J., & Larsson, M. (2016). Biomass applications in iron and steel industry: An overview of challenges and opportunities. *Renewable and sustainable energy reviews*, 65, 1247-1266.
- Naylamp Mechatronics SAC. (2020). Actuadores. Motores DC. Recuperado de: https://naylampmechatronics.com/motores-dc/446-bomba-de-agua-d12-12vdc-5m-800lh.html?search_query=bomba&results=12
- Nojek Barbieri, J. P. (2009). Pellets de madera: una fuente de energía renovable.
- Núñez, C. A. F., Fajardo, C. A. G., & Vargas, F. E. S. (2012). Producción y uso de pellets de biomasa para la generación de energía térmica: una revisión a los modelos del proceso de gasificación. *Iteckne*, 9(1), 21-30.
- Obernberger, I., & Thek, G. (2004). Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour. *Biomass and bioenergy*, 27(6), 653-669.
- Obernberger, I., & Thek, G. (2010). *The pellet handbook: the production and thermal utilisation of pellets*. Routledge.
- Pampañaupa Alvites, E. (2018). Implementación del transporte continuo de mineral del tramo staker a transferencias de la mina Shougang Hierro Perú SAA Marcona/Ica 2017.
- Pandey, P., Lobo, N. F., & Kumar, P. (2012). Optimization of Disc Parameters Producing More Suitable Size Range of Green Pellets. *International Journal of Metallurgical Engineering*, 1(4), 48-59.

- Patra, S., & Rayasam, V. (2018). Pelletization of iron ore fines with parameter optimization through box-behnken design. *MOJ Mining Met*, 1(2), 72-77.
- Pietsch, W. B. (1966). Granulating pan operating variables and their effect on granulate properties. *Aufbereit.-Tech.*, 7(4), 177-191.
- Pietsch, W. (1997). Size enlargement by agglomeration. In *Handbook of powder science & technology* (pp. 202-377). Springer, Boston, MA.
- Pietsch, W. B. (2008). *Agglomeration processes: phenomena, technologies, equipment*. John Wiley & Sons.
- Salman, A. D., Hounslow, M., & Seville, J. P. (Eds.). (2006). *Granulation*. Elsevier.
- Seetharaman, S. (2013). *Treatise on process metallurgy, volume 3: industrial processes (Vol. 3)*. Newnes.
- Sierra, C. F., Guerrero, C., & Arango, J. (2008). *Tecnologías para el aprovechamiento de los biocombustibles*. Bogotá Colombia, 326.
- Spraying Systems Co. (2020). *RESOURCES HYDRAULIC SPRAY PRODUCTS*. Recuperado de: <https://www.spray.com/Resources/Catalogs/Catalog75-Hydraulic>
- Thella, J. S., & Venugopal, R. (2011). Modeling of iron ore pelletization using 3^{k-p} factorial design of experiments and polynomial surface regression methodology. *Powder technology*, 211(1), 54-59.
- Temmerman, M., Rabier, F., Jensen, P. D., Hartmann, H., & Böhm, T. (2006). Comparative study of durability test methods for pellets and briquettes. *Biomass and Bioenergy*, 30(11), 964-972.
- Timofeeva, A. S., Nikitchenko, T. V., & Rogova, A. L. (2013). Optimizing the granulometric composition of pellets obtained on a disc pelletizer. *Metallurgist*, 57(5), 402-407.
- Vásquez, Arturo; Tamayo, Jesús y Julio Salvador (Editores) (2017). *La industria de la energía renovable en el Perú: 10 años de contribuciones a la mitigación del cambio climático*. Osinergmin. Lima-Perú
- Wang, D., Servin, M., Berglund, T., Mickelsson, K. O., & Rönnbäck, S. (2015). Parametrization and validation of a nonsmooth discrete element method for simulating flows of iron ore green pellets. *Powder technology*, 283, 475-487.



ANEXO A

Tabla A1. Propiedades físicas del acero inoxidable 304

28/5/2020

304 Stainless Steel

304 Stainless SteelCategories: [Metal](#); [Ferrous Metal](#); [Heat Resisting](#); [Stainless Steel](#); [T 300 Series Stainless Steel](#)

Material Notes: This MatWeb entry has typical values for specimens of unknown form/heat treatment but appear to be annealed samples. We are creating other entries for more specific heat treatments and forms. Austenitic Cr-Ni stainless steel. Better corrosion resistance than Type 302. High ductility, excellent drawing, forming, and spinning properties. Essentially non-magnetic, becomes slightly magnetic when cold worked. Low carbon content means less carbide precipitation in the heat-affected zone during welding and a lower susceptibility to intergranular corrosion.

Applications: beer kegs, bellows, chemical equipment, coal hopper linings, cooking equipment, cooling coils, cryogenic vessels, dairy equipment, evaporators, flatware utensils, feedwater tubing, flexible metal hose, food processing equipment, hospital surgical equipment, hypodermic needles, kitchen sinks, marine equipment and fasteners, nuclear vessels, oil well filter screens, refrigeration equipment, paper industry, pots and pans, pressure vessels, sanitary fittings, valves, shipping drums, spinning, still tubes, textile dyeing equipment, tubing.

Corrosion Resistance: resists most oxidizing acids and salt spray.

UNS S30400; AMS 5501, 5513, 5560, 5565; ASME SA182, SA194 (8), SA213, SA240; ASTM A167, A182, A193, A194

Key Words: aisi304, AISI 304, T304, T 304, SUS304, SS304, 304SS, 304 SS, UNS S30400, AMS 5501, AMS 5513, AMS 5560, AMS 5565, AMS 5566, AMS 5567, AMS 5639, AMS 5697, ASME SA182, ASME SA194 (8), ASME SA213, ASME SA240, ASME SA249, ASME SA312, ASME SA320 (B8), ASME SA358, ASME SA376, ASME SA403, ASME SA409, ASME SA430, ASME SA479, ASME SA688, ASTM A167, ASTM A182, ASTM A193, ASTM A194, ASTM A666, FED QQ-S-763, MILSPEC MIL-S-5059, SAE 30304, DIN 1.4301, X5CrNi189, B.S. 304 S 15, EN 58E, PN 86020 (Poland), OH18N9, ISO 4954 X5CrNi189E, ISO 683/13 11, 18-8

Vendors: [Click here to view all available suppliers for this material.](#)

Please [click here](#) if you are a supplier and would like information on how to add your listing to this material.

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	8.00 g/cc	0.289 lb/in ³	
Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Hardness, Brinell	123	123	Converted from Rockwell B hardness.
Hardness, Knoop	138	138	Converted from Rockwell B hardness.
Hardness, Rockwell B	70	70	
Hardness, Vickers	129	129	Converted from Rockwell B hardness.
Tensile Strength, Ultimate	505 MPa	73200 psi	
Tensile Strength, Yield	215 MPa @Strain 0.200 %	31200 psi @Strain 0.200 %	
Elongation at Break	70 %	70 %	in 50 mm
Modulus of Elasticity	193 GPa	28000 ksi	
Poissons Ratio	0.29	0.29	
Shear Modulus	77.0 GPa	11200 ksi	
Izod Impact 	150 J @Temperature -195 °C	111 ft-lb @Temperature -319 °F	V-Notch
	150 J @Temperature 21.0 °C	111 ft-lb @Temperature 69.8 °F	V-Notch
Charpy Impact	325 J	240 ft-lb	
Electrical Properties	Metric	English	Comments

Tabla A2. Propiedades físicas del acero inoxidable 316

14/7/2020

316 Stainless Steel, annealed bar

316 Stainless Steel, annealed bar

Categories: [Metal](#); [Ferrous Metal](#); [Stainless Steel](#); [T 300 Series Stainless Steel](#)

Material Notes: Molybdenum content increases resistance to marine environments. High creep strength at elevated temperatures and good heat resistance. Biocompatible. Fabrication characteristics similar to Types 302 and 304.

Applications: food and pharmaceutical processing equipment, marine exterior trim, surgical implants, and industrial equipment that handles the corrosive process chemicals used to produce inks, rayons, photographic chemicals, paper, textiles, bleaches, and rubber.

Corrosion Resistance: better corrosion resistance than 302 and 304; resists sodium and calcium brines; hypochlorite solutions, phosphoric acid; and the sulfite liquors and sulfurous acids used in the paper pulp industry.

Key Words: UNS S31600, SS316, 316SS, AISI 316, DIN 1.4401, DIN 1.4408, DIN X5CrNiMo17122, TGL 39672 X5CrNiMo1911, TGL 7143X5CrNiMo1811, ISO 2604-1 F62, ISO 2604-2 TS60, ISO 2604-2 TS61, ISO 2604-4 P60, ISO 2604-4 P61, ISO 4954 X5CrNiMo17122E, ISO 683/13 20, ISO 683/13 20a, ISO 6931 X5CrNiMo17122, JIS SUS 316

Vendors: [Click here to view all available suppliers for this material.](#)

Please [click here](#) if you are a supplier and would like information on how to add your listing to this material.

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	8.00 g/cc	0.289 lb/in ³	
Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Hardness, Brinell	149	149	
Hardness, Knoop	169	169	Converted from Brinell
Hardness, Rockwell B	80	80	
Hardness, Vickers	155	155	Converted from Brinell
Tensile Strength, Ultimate	550 MPa	79800 psi	
Tensile Strength, Yield	240 MPa	34800 psi	
Elongation at Break	60 %	60 %	in 50 mm
Modulus of Elasticity	193 GPa	28000 ksi	
Izod Impact	129 J	95.1 ft-lb	
Charpy Impact	105 J	77.4 ft-lb	V-notch
Electrical Properties	Metric	English	Comments
Electrical Resistivity	0.0000740 ohm-cm	0.0000740 ohm-cm	at 20°C
Magnetic Permeability	1.008	1.008	at RT
Thermal Properties	Metric	English	Comments
CTE, linear 	16.0 µm/m-°C	8.89 µin/in-°F	
	@Temperature 0.000 - 100 °C	@Temperature 32.0 - 212 °F	
	16.2 µm/m-°C	9.00 µin/in-°F	
@Temperature 0.000 - 315 °C	@Temperature 32.0 - 599 °F		
	17.5 µm/m-°C	9.72 µin/in-°F	
	@Temperature 0.000 - 540 °C	@Temperature 32.0 - 1000 °F	
Specific Heat Capacity	0.500 J/g-°C	0.120 BTU/lb-°F	
@Temperature 0.000 - 100 °C	@Temperature 32.0 - 212 °F		
Thermal	16.3 W/m-K	113 BTU-in/hr-ft ² -°F	

www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=dfced4f11d63459e8efb733d1c7c1ad2

1/2

Tabla A3. Propiedades físicas del acero Hardox 400



HARDOX®

WEAR PLATE

Data Sheet: HARDOX 400

ABRASION RESISTANT PLATE

HARDOX 400 is an abrasion resistant plate with a hardness of 400 HBW, intended for applications where demands are imposed on abrasion resistance in combination with good cold bending properties. HARDOX 400 offers very good weldability.

Applications Crushers, sievers, feeders, measuring pockets, skips, cutting edges, conveyors, buckets, knives, gears, sprockets, dumptrucks, loaders, industrial trucks, lorries, bulldozers, excavators, slurry pipe systems, screw conveyors, presses etc.

Chemical Composition (ladle analysis)	Plate	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B	CEV	CET
	thickness mm	max %	max typv.	max typv.								
3*1 - (8)		0,15	0,70	1,60	0,025	0,010	0,30	0,25	0,25	0,004	0,33	0,23
8 - 20		0,15	0,70	1,60	0,025	0,010	0,50	0,25	0,25	0,004	0,43	0,29
(20) - 32		0,18	0,70	1,60	0,025	0,010	1,00	0,25	0,25	0,004	0,48	0,29
(32) - 45		0,22	0,70	1,60	0,025	0,010	1,40	0,50	0,60	0,004	0,57	0,31
(45) - 51		0,22	0,70	1,60	0,025	0,010	1,40	0,50	0,60	0,004	0,57	0,38
(51) - 80		0,27	0,70	1,60	0,025	0,010	1,40	1,00	0,60	0,004	0,65	0,41
(80) - 130		0,32	0,70	1,60	0,025	0,010	1,40	1,50	0,60	0,004	0,73	0,48

*1 Plate thickness below 4 mm only after special agreement.

$$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{15}$$

$$CET = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40}$$

The steel is grain refined.

Hardness	HBW		
	370-430		
Mechanical Properties	Yield strength	Tensile strength	Elongation
	Typical values for 20 mm plate thickness	R_p MPa 1000	R_m MPa 1250
Impact Properties	Test	Impact energy	
	Typical value for 20 mm plate thickness	temperature °C -40 (40 F)	Charpy-V, Longitudinal J 45
Testing	Brinell hardness, HBW according to EN ISO 6506-1, on a milled surface 0,5-2 mm below plate surface per heat and 40 tons. Tests are made for every variation of 15 mm in the thickness of plates from the same heat.		
Delivery Conditions	Q.		

ANEXO B

Tabla B1. Propiedades del material para selección de transportador de tornillo sinfín

(Conveyor Eng. & Mfg. Co, 2012)

TABLE B: Material Characteristics (continued)

MATERIAL	MAT'L CLASS CODE	CONV LOADING	COMPONENT GROUP	WEIGHT (LBS/CF)		MAT'L FACTOR F _m	VERT.*
				MIN	MAX		
Flue Dust, Basic Oxygen Furnace	53A36LM	30B	3D	45	60	3.5	
Flue Dust, Blast Furnace	118A36	30B	3D	110	125	3.5	
Flue Dust, Boiler H. Dry	38A36LM	30B	3D	30	45	2.0	
Fluorspar, Fine (Calcium Fluoride)	90B36	30B	2D	80	100	2.0	
Fluorspar, Lumps	100D36	30B	2D	90	110	2.0	
Flyash	38A36M	30B	3D	30	45	2.0	?
Foundry Sand, Dry (Sand)	95D37Z	15	3D	90	100	2.6	?
Fuller's Earth, Calcined	40A25	45	3D	40	40	2.0	
Fuller's Earth, Dry, Raw (Bleach Clay)	35A25	45	2D	30	40	2.0	
Fuller's Earth, Oily, Spent (Spent Bleach Clay)	63C45OW	30A	3D	60	65	2.0	
Galena (Lead Sulfide)	250A35R	30A	2D	240	260	-	?
Gelatine, Granulated	32B35PU	30A	1B	32	32	0.8	x
Gilsonite	37C35	30A	3D	37	37	1.5	
Glass, Batch	90C37	15	3D	80	100	2.5	
Glue, Ground	40B45U	30A	2D	40	40	1.7	
Glue, Pearl	40C35U	30A	1A,1B,1C	40	40	0.5	
Glue, Veg. Powdered	40A45U	30A	1A,1B,1C	40	40	0.6	
Gluten, Meal (Dry Corn Gluten)	40B35P	30A	1B	40	40	0.6	
Gluten, Meal (Wet Corn Gluten)	43B35OPH	30A	1B	43	43	2.2	
Granite, Fine	85C27	15	3D	80	90	2.5	
Grape, Pomace	18D45U	30A	2D	15	20	1.4	x
Graphite Flake (Plumago)	40B25LP	45	1A,1B,1C	40	40	0.5	x
Graphite Flour	28A35LMP	30A	1A,1B,1C	28	28	0.5	
Graphite Ore	70D35L	30A	2D	65	75	1.0	?
Guano Dry**	70C35	30A	3A,3B	70	70	2.0	
Gypsum, Calcined (Plaster of Paris)	58B35U	30A	2D	55	60	1.6	
Gypsum, Calcined, Powdered (Plaster of Paris)	70A35U	30A	2D	60	80	2.0	
Gypsum, Raw 1* (Calc. Sulfate, Plast. of Paris)	75D25	30A	2D	70	80	2.0	
Hay, Chopped**	10C35JY	30A	2A,2B	8	12	1.6	
Hexanedioic Acid (Adipic Acid)	45A35	30A	2B	45	45	0.5	?
Hominy, Dry	43C25D	30A	1A,1B,1C	35	50	0.4	x
Hops, Spent, Dry	35D35	30A	2A,2B,2C	35	35	1.0	x
Hops, Spent, Wet	53D45V	30A	2A,2B	50	55	1.5	
Ice, Crushed	40D35O	30A	2A,2B	35	45	0.4	x
Ice, Cubes	34D35O	30A	1B	33	35	0.4	x
Ice, Flaked**	43C35O	30A	1B	40	45	0.6	x
Ice, Shell	34D45O	30A	1B	33	35	0.4	x
Ilmenite Ore (Titanium Dioxide)	150D37	15	3D	140	160	2.0	
Iron Ore Concentrate	150A37	15	3D	120	180	2.2	
Iron Oxide Pigment	25A36LMP	30B	1A,1B,1C	25	25	1.0	
Iron Oxide, Millscale	75C36	30B	2D	75	75	1.6	
Iron Pyrites (see Ferrous Sulfide)							
Iron Sulfide (see Ferrous Sulfide)							
Iron Sulphate (Ferrous Sulfate)	63C35U	30A	2D	50	75	1.0	?
Iron Vitriol (Ferrous Sulfate)	63C35U	30A	2D	50	75	1.0	?
Kafir (Corn)	43C25	45	3D	40	45	0.5	x
Kaolin Clay	63D25	30A	2D	63	63	2.0	
Kaolin Clay (Tale)	49A35LMP	30A	2D	42	56	2.0	
Kryolith (see Cryolite)							
Lactose	32A35PU	30A	1B	32	32	0.6	
Lamp Black (see Carbon Black)							
Lead Arsenate	72A35R	30A	1A,1B,1C	72	72	1.4	
Lead Carbonate (Cerrusite)	250A35R	30A	2D	240	260	1.0	
Lead Ore, ½"	205C36	30B	3D	180	230	1.4	

ANEXO C

Criterio de falla en carga estática

En este criterio se utiliza la teoría de la energía de deformación máxima o teoría de Von Mises, la cual anticipa la falla por fluencia, esta falla ocurre cuando excede la energía de deformación total por unidad de volumen a la resistencia a la fluencia del material. Para este análisis se considera que el esfuerzo aplicado al volumen se encuentre en estado tridimensional, por lo cual se calcula el esfuerzo promedio que actúa en las tres direcciones principales (σ_1 ; σ_2 ; σ_3). Considerando que el esfuerzo equivalente o efectivo, se llama esfuerzo Von mises, σ' :

$$\sigma' = \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Para el esfuerzo plano, se denomina 2 esfuerzos (σ_a ; σ_b) que se obtienen de la siguiente Ecuación:

$$\sigma' = [\sigma_a^2 - \sigma_a * \sigma_b + \sigma_b^2]^{\frac{1}{2}}$$

Además, para obtener el esfuerzo más conservador se iguala con la resistencia a la fluencia del material.

$$\sigma' = S_y$$

Límite de resistencia a la fatiga

Para el diseño de componentes mecánicos, se estimará los límites de resistencia a la fatiga mediante una compilación de números ensayos de laboratorio lo cual tendrá una gran dispersión en los resultados, para atenuar estas desviaciones se aplicarán factores de diseño más grandes para el diseño estático.

Para el caso de aceros, se utilizará a la siguiente relación para estimar el límite de resistencia como:

$$S'_e = \begin{cases} 0.5 S_{ut} & S_{ut} \leq 200 \text{ kpsi (1400 MPa)} \\ 100 \text{ kpsi} & S_{ut} > 200 \text{ kpsi} \\ 700 \text{ MPa} & S_{ut} > 1400 \text{ MPa} \end{cases}$$

Donde:

S_{ut} : Resistencia ultima a la tensión (MPa)

S'_e : Límite de resistencia a la fatiga en viga rotatoria (MPa)

Resistencia a la fatiga

La resistencia a la fatiga S_f suele ser un poco menor a la resistencia a la tensión S_{ut} , se indica que el dominio de la fatiga de alto ciclo se extienda hasta 106 o 107 ciclos. Para determinar la resistencia a la fatiga a diferentes ciclos de trabajo de debe conocer el valor de f (fracción del S_{ut}). El número de ciclos hasta la falla se puede calcular con la siguiente Ecuación:

$$N = \left(\frac{\sigma a}{a} \right)^{\frac{1}{b}}$$

Donde:

a y b : Son constantes

N : Número de ciclos hasta la falla

Además:

$$a = \frac{(f * S_{ut})^2}{S_e}$$

$$b = -\frac{1}{3} * \log\left(\frac{f * S_{ut}}{S_e}\right)$$

Cuando se produce un esfuerzo invertido $\sigma_a = S_f$

Ecuación de Marín

La ecuación de Marín es la fórmula en la cual se rectifica el límite a la fatiga mediante diversos factores de corrección los cuales abarcan aspectos específicos de la pieza analizada, ya sea superficie, forma, esfuerzos sometidos, temperatura entre otros.

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S'_e$$

Donde:

k_a : Factor de modificación de la condición superficial (adim.)

k_b : Factor de modificación del tamaño (adim.)

k_c : Factor de modificación de la carga (adim.)

k_d : Factor de modificación de la temperatura (adim.)

k_e : Factor de confiabilidad (adim.)

k_f : Factor de modificación de efectos varios (adim.)

S'_e : Límite de resistencia a la fatiga en viga rotatoria (MPa)

S_e : Límite de resistencia a la fatiga de un componente real (MPa)

Diseño de ejes para el esfuerzo

Para diseñar los ejes, es necesario dimensionar tomando en cuenta los puntos críticos de máximo esfuerzo ya que esos puntos será los que no darán el diámetro necesario para cumplir

con los requerimientos. Por lo general, se localizan en la parte exterior, que presente momento torsor y un gran momento flexionante.

La ecuación es:

$$\frac{1}{n} = \frac{16}{\pi d^3} \left[4 \left(\frac{K_f M_a}{S_e} \right)^2 + 3 \left(\frac{K_{fs} T_a}{S_e} \right)^2 + 4 \left(\frac{K_f M_m}{S_y} \right)^2 + 3 \left(\frac{K_{fs} T_m}{S_y} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$d = \left\{ \frac{16n}{\pi} \left[4 \left(\frac{K_f M_a}{S_e} \right)^2 + 3 \left(\frac{K_{fs} T_a}{S_e} \right)^2 + 4 \left(\frac{K_f M_m}{S_y} \right)^2 + 3 \left(\frac{K_{fs} T_m}{S_y} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}^{1/3}$$

Donde

d : Diámetro (m.)

S_e : Límite de fatiga de la pieza (adim.)

M_a : Momento flexionante alternante (N.m)

M_m : Momento flexionante medio (N.m)

T_a : Par de torsión alternante (N.m)

T_m : Par de torsión medio (N.m)

K_f : Factor de concentración del esfuerzo por fatiga de la flexión (adim.)

K_{fs} : Factor de concentración del esfuerzo por fatiga de la torsión (adim.)

ANEXO D

Tabla D1. Catálogo General SDO3 2007 - SIEMENS

Motores trifásicos

Motores trifásicos

1LA5

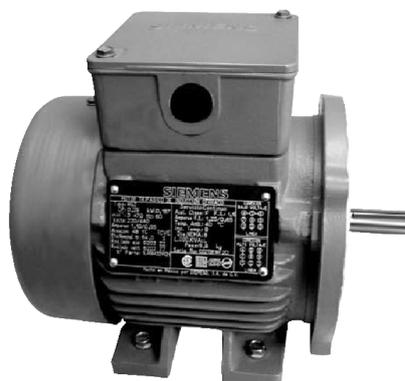
Armazón 48Y / Carcasa de aluminio, totalmente cerrados con ventilación exterior. TCCVE, caja de conexiones en la parte superior.

Aislamiento clase F

Factor de servicio 1.15

220YY / 440Y Volt, 60Hz

HP	Polos	Tipo*	Horizontal Catálogo Spiridon	B/C + Patas espiga c/cuña Spiridon
0.25	2	1LA58432YK3	1LA58432YK30	1LA58432YK31
	4	1LA58434YK3	1LA58434YK30	1LA58434YK31
0.33	2	1LA58442YK3	1LA58442YK30	1LA58442YK31
	4	1LA58444YK3	1LA58444YK30	1LA58444YK31
0.50	2	1LA58452YK3	1LA58452YK30	1LA58452YK31
	4	1LA58454YK3	1LA58454YK30	1LA58454YK31
0.75	2	1LA58462YK3	1LA58462YK30	1LA58462YK31
	4	1LA58464YK3	1LA58464YK30	1LA58464YK31
1.00	2	1LA58472YK3	1LA58472YK30	1LA58472YK31
1.5	2	1LA58482YK3	1LA58482YK30	1LA58482YK31



* Última posición en el tipo:

0 = Horizontal con patas

1 = Con brida "C" + patas y espiga con cuñero

HP	Polos	Tipo*	Velocidad nominal RPM	Tensión nominal V	Corriente nominal A	Eficiencia nominal %	Letra de código	Par nominal Nm	Par Arranque % del nom.	Máximo % del nom.	Peso neto aprox. Kg
0.25	2	1LA5 843-2YK30	3470	220/440	1.1/0.55	64.0	L	0.6	260	400	5.8
	4	1LA5 843-4YK30	1720	220/440	1.2/0.60	62.0	J	1.0	165	280	6.1
.033	2	1LA5 844-2YK30	3480	220/440	1.3/0.65	68.0	L	0.7	200	440	6.1
	4	1LA5 844-4YK30	1720	220/440	1.6/0.80	66.0	J	1.3	215	280	6.7
0.50	2	1LA5 845-2YK30	3485	220/440	1.8/0.90	74.0	L	1.0	350	420	6.6
	4	1LA5 845-4YK30	1715	220/440	2.0/1.00	70.0	J	2.0	230	275	7.5
0.75	2	1LA5 846-2YK30	3450	220/440	2.3/1.15	75.5	K	1.5	290	550	7.4
	4	1LA5 846-4YK30	1710	220/440	3.0/1.50	72.0	J	3.0	240	320	8.9
1.00	2	1LA5 847-2YK30	3440	220/440	2.8/1.40	75.5	J	2.0	290	430	8.2
1.5	2	1LA5 848-2YK30	3415	220/440	4.2/2.10	77.0	J	3.0	270	320	9.2



ANEXO E

Tabla E1. Altivar 12 - Variable speed drives - Schneider Electric

Drive ratings

1-phase supply voltage: 100...120 V 50/60 Hz

For 3-phase Output 200/240 V motors

Motor		Line supply (input)				Drive (output)			Reference (2)	Size (3)
		Maximum line current		Apparent power	Power dissipated at nominal current (1)	Nominal current In	Max. transient current for			
Power indicated on plate (1)		at 100 V	at 120 V						60 s	2 s
kW	HP	A	A	kVA	W	A	A	A		
0.18	0.25	6	5	1	18	1.4	2.1	2.3	ATV12H018F1	1C1
0.37	0.5	11.4	9.3	1.9	29	2.4	3.6	4	ATV12H037F1	1C1
0.75	1	18.9	15.7	3.3	48	4.2	6.3	6.9	ATV12H075F1	2C1

1-phase supply voltage: 200...240 V 50/60 Hz

For 3-phase Output 200/240 V motors

Motor		Line supply (input)				Drive (output)			Reference (2)	Size (3)
		Maximum line current		Apparent power	Power dissipated at nominal current (1)	Nominal current In	Max. transient current for			
Power indicated on plate (1)		at 200 V	at 240 V						60 s	2 s
kW	HP	A	A	kVA	W	A	A	A		
0.18	0.25	3.4	2.8	1.2	18	1.4	2.1	2.3	ATV12H018M2	1C2
0.37	0.5	5.9	4.9	2	27	2.4	3.6	4	ATV12H037M2	1C2
0.55	0.75	8	6.7	2.8	34	3.5	5.3	5.8	ATV12H055M2	1C2
0.75	1	10.2	8.5	3.5	44	4.2	6.3	6.9	ATV12H075M2	1C2
1.5	2	17.8	14.9	6.2	72	7.5	11.2	12.4	ATV12HU15M2	2C2
2.2	3	24	20.2	8.4	93	10	15	16.5	ATV12HU22M2	2C2

3-phase supply voltage: 200...240 V 50/60 Hz

For 3-phase Output 200/240 V motors

Motor		Line supply (input)				Drive (output)			Reference (2)	Size (3)
		Maximum line current		Apparent power	Power dissipated at nominal current (1)	Nominal current In	Max. transient current for			
Power indicated on plate (1)		at 200 V	at 240 V						60 s	2 s
kW	HP	A	A	kVA	W	A	A	A		
0.18	0.25	2	1.7	0.7	16	1.4	2.1	2.3	ATV12H018M3	1C3
0.37	0.5	3.6	3	1.2	24	2.4	3.6	4	ATV12H037M3	1C3
0.75	1	6.3	5.3	2.2	41	4.2	6.3	6.9	ATV12H075M3	1C3
1.5	2	11.1	9.3	3.9	73	7.5	11.2	12.4	ATV12HU15M3	2F3
2.2	3	14.9	12.5	5.2	85	10	15	16.5	ATV12HU22M3	2F3
3	4	19	15.9	6.6	94	12.2	18.3	20.1	ATV12HU30M3	3F3
4	5.5	23.8	19.9	8.3	128	16.7	25	27.6	ATV12HU40M3	3F3

(1) These power ratings are for a switching frequency of 4 kHz, in continuous operation. The switching frequency is adjustable from 2 to 16 kHz.

Above 4 kHz, the drive will reduce the switching frequency if an excessive temperature rise occurs. The temperature rise is detected by a probe in the power module. Nonetheless, derating should be applied to the nominal drive current if continuous operation above 4 kHz is required:

- 10% derating for 8 kHz
- 20% derating for 12 kHz
- 30% derating for 16 kHz

(2) Reference description, example: ATV12HU15M3

ATV12: Altivar 12;

H: product on heatsink;

U15: drive power rating,

see **n L u** parameter page 41;

M3: drive voltage rating,

see **u L A L** parameter page 41.

(3) Size description

	[2]		[E]		[3]
possible values	1 physical size 1	possible values	F Flat	possible values	1 100 V 1-phase
	2 physical size 2		C Compact		2 200 V 1-phase
	3 physical size 3				3 200 V 3-phase

ANEXO F

Figura F1. Rodamiento SYWK1. YTH - SKF

SKF

Generado desde [sitio] el [fecha]

SYWK 1. YTH

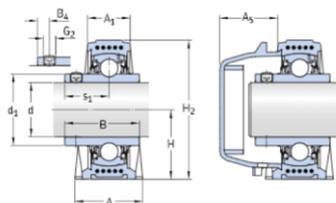
Soportes de pie con rodamientos de bolas



Especificación técnica

Cumplimiento con el estándar	ISO
Para un propósito específico	For food and beverage applications
Material del soporte	Material compuesto para la línea de procesamiento de alimentos SKF
Sealing solution	Multiple seals

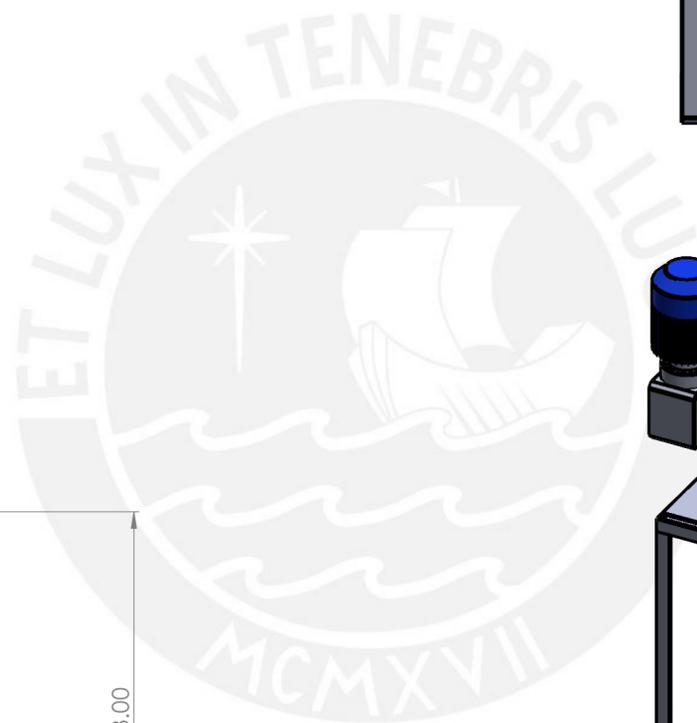
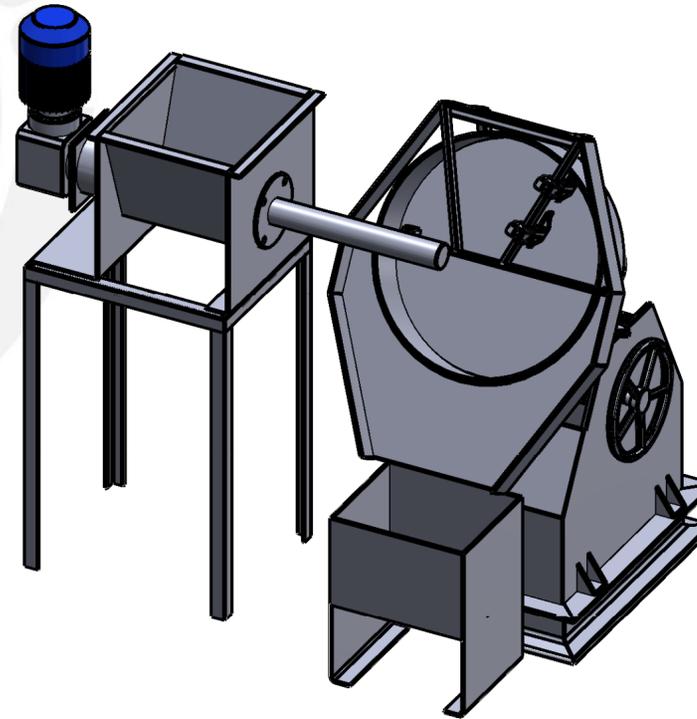
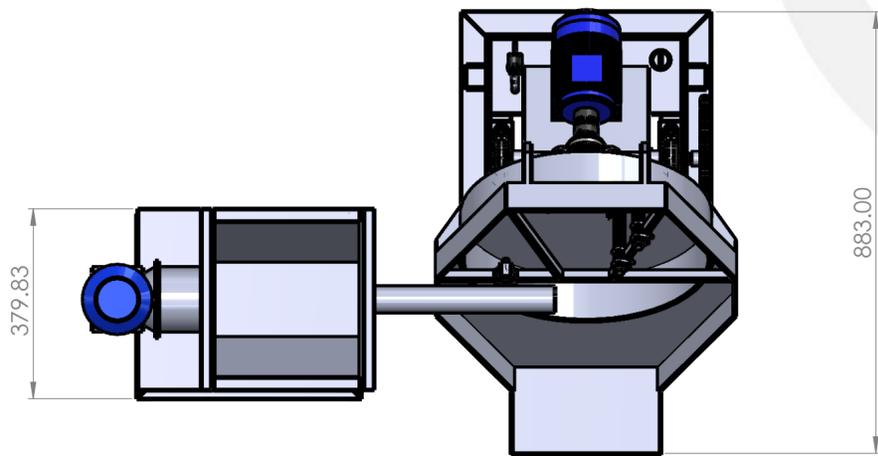
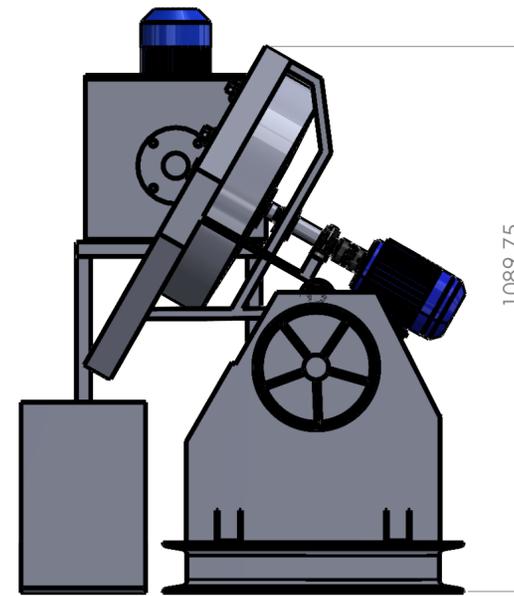
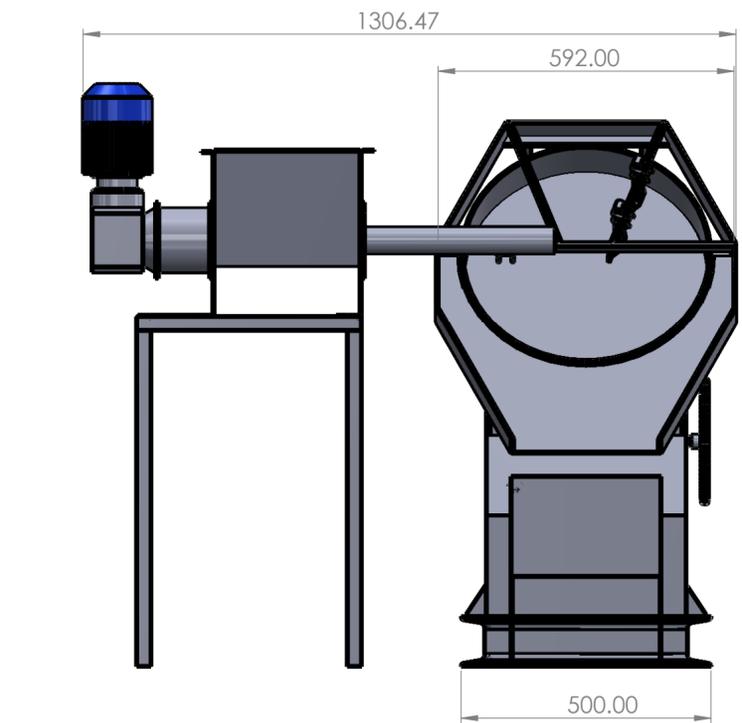
DIMENSIONES



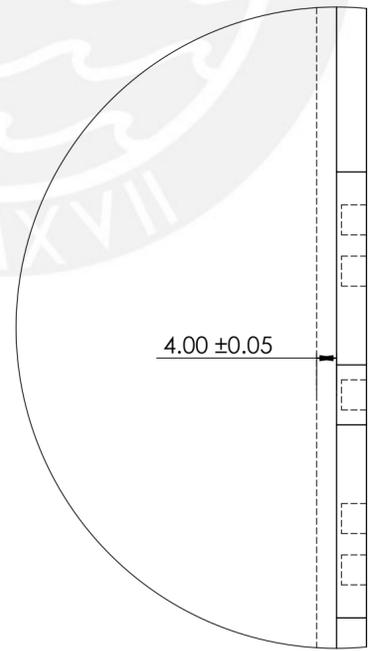
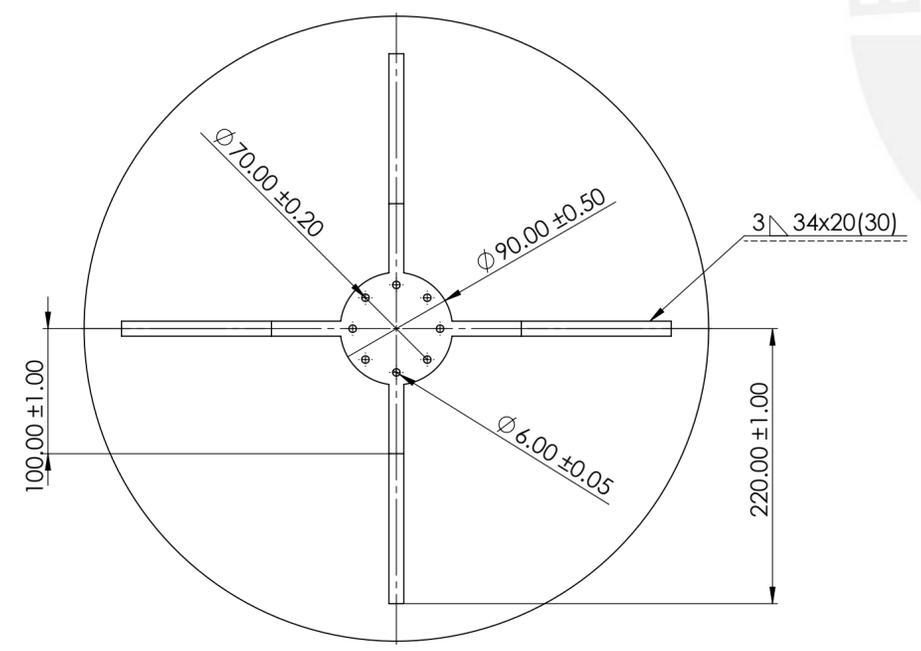
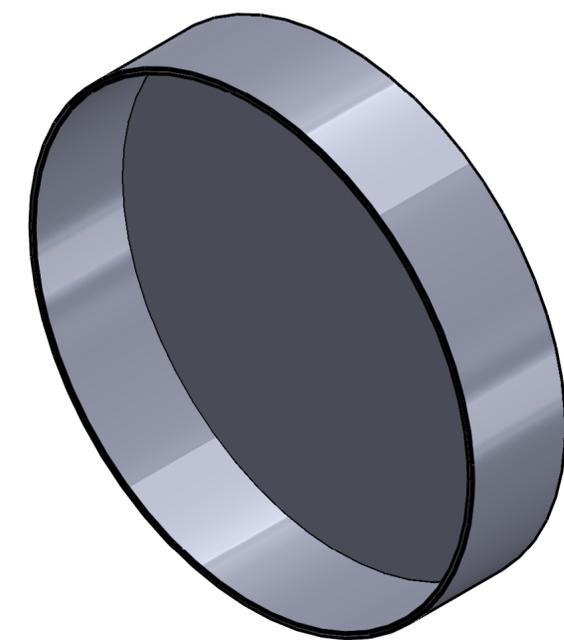
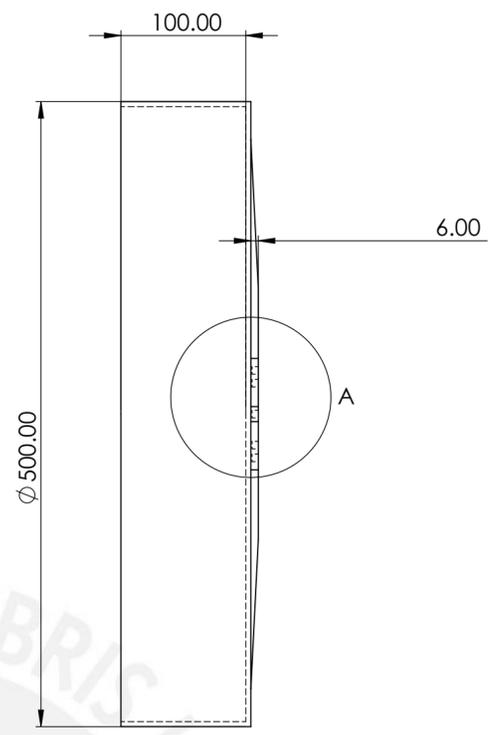
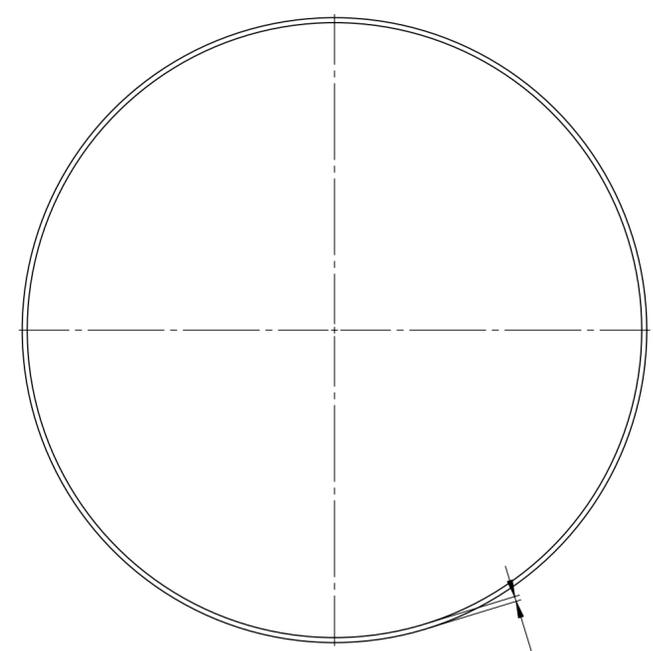
d	1 in
	≈ 1.3283 in
A	1.2598 in
	0.8661 in
	1.0236 in
B	1.3425 in
	0.1969 in
H	1.437 in
	0.6299 in
	2.7756 in
J	4.1535 in
J	max. 4.3701 in
J	min. 3.937 in

SKF

Página [página] de 5



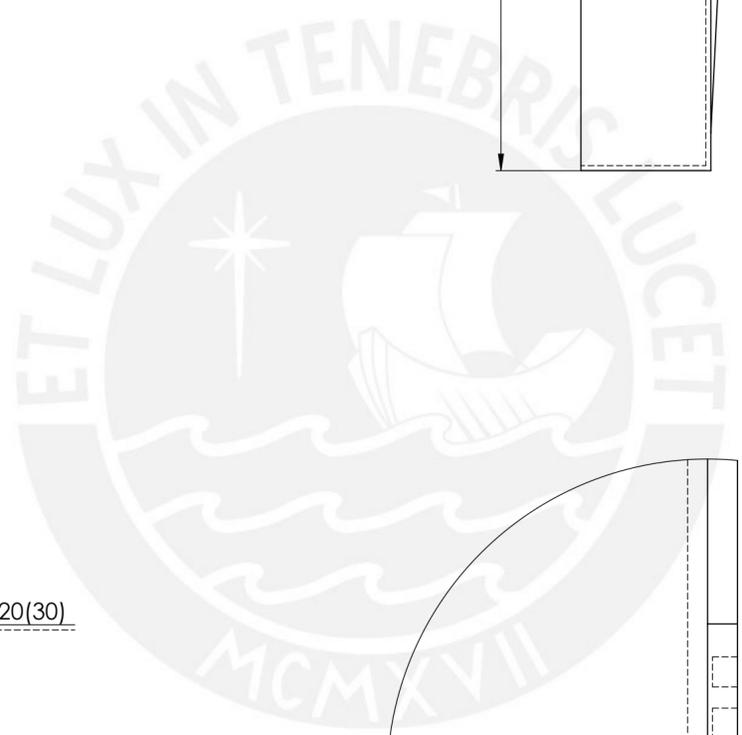
ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERIA – ESPECIALIDAD: ING. MECÁNICA		
METODO DE PROYECCION	DISCO AGLOMERADOR	ESCALA
	VISTA GENERAL	1:10
20140304	BALDEON LAM, SERGIO FERNANDO	FECHA: 2020.07.27
COTA NOMINAL	COTA MAXIMA	COTA MINIMA
		LAMINA: A2 – DA01

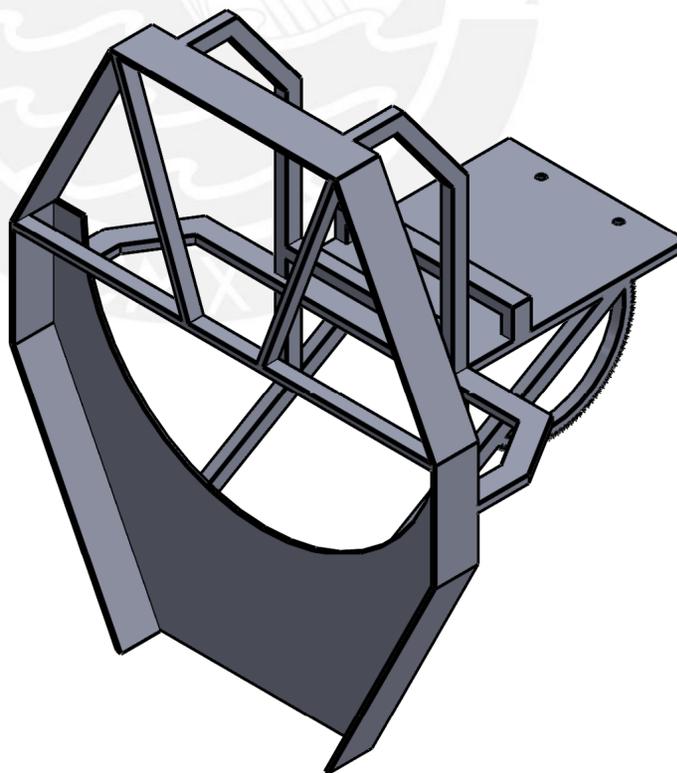
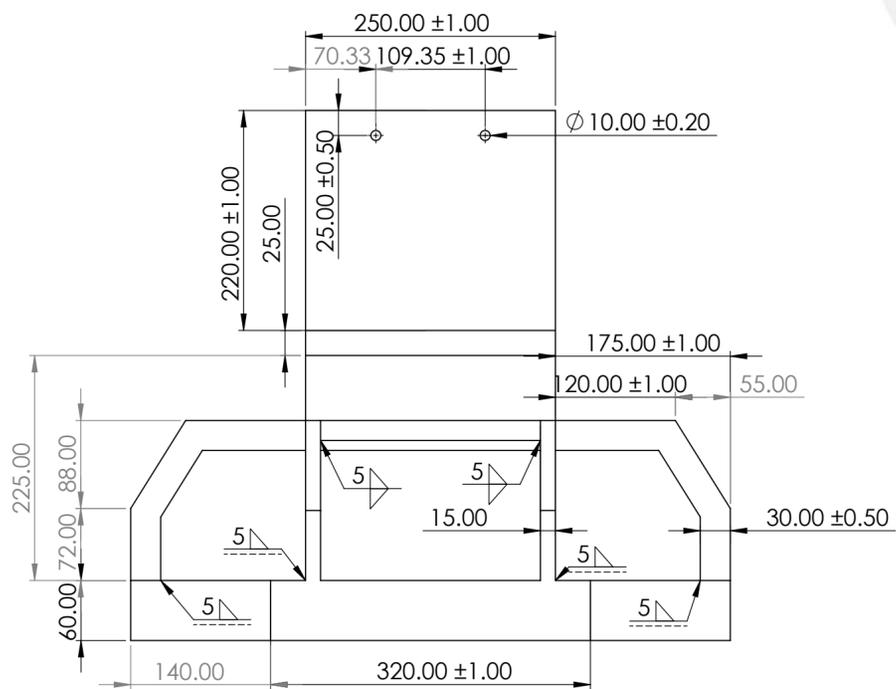
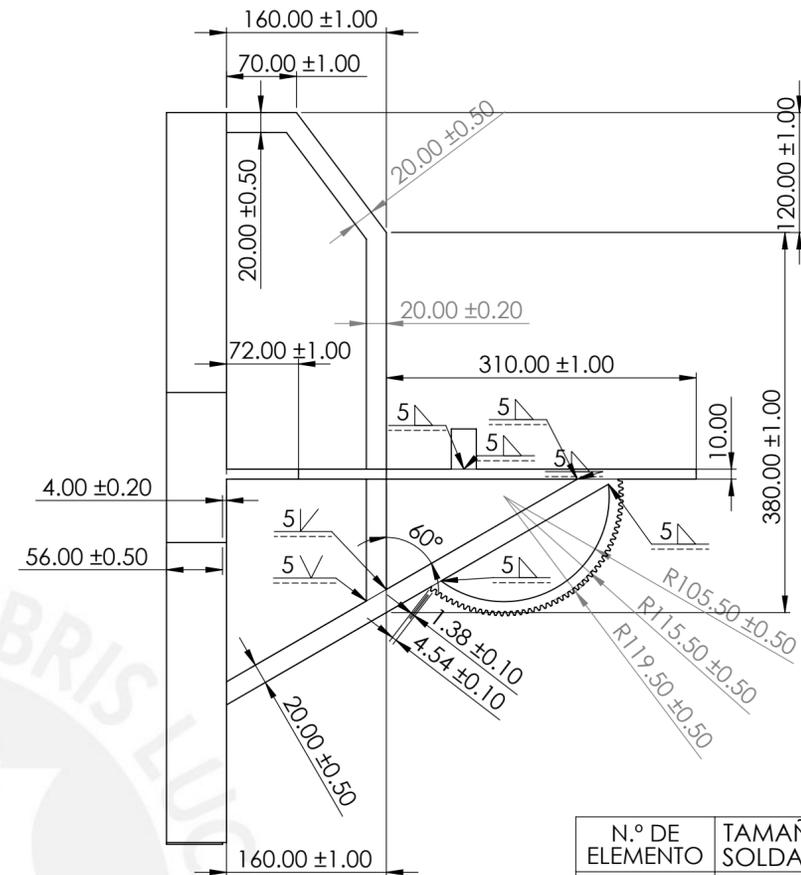
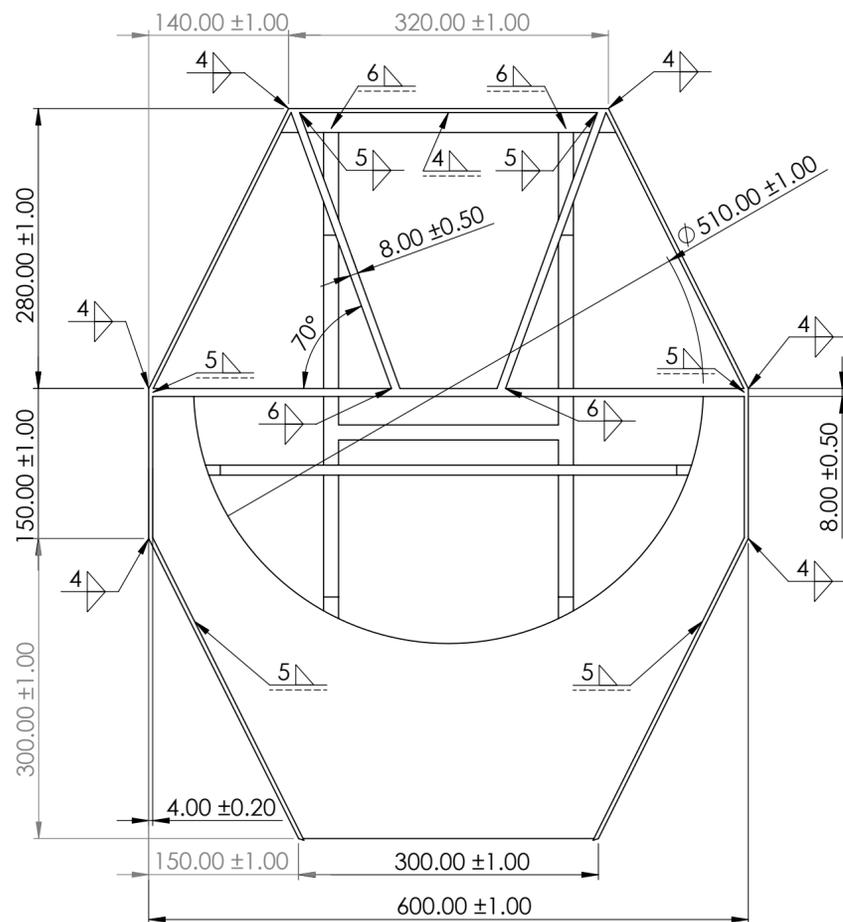


DETALLE A
ESCALA 1 : 1

N.º DE ELEMENTO	TAMAÑO DE SOLDADURA	SÍMBOLO	LONGITUD DE SOLDADURA	CANTIDAD
1	3	∇	34X20(30){680}	1

ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL
		AISI 304
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERIA – ESPECIALIDAD: ING. MECÁNICA		
METODO DE PROYECCION	DISCO AGLOMERADOR	ESCALA
	DISCO	1:4
20140304	BALDEON LAM, SERGIO FERNANDO	FECHA: 2020.07.27
COTA NOMINAL	COTA MAXIMA	COTA MINIMA
		LAMINA: A2 – DA02

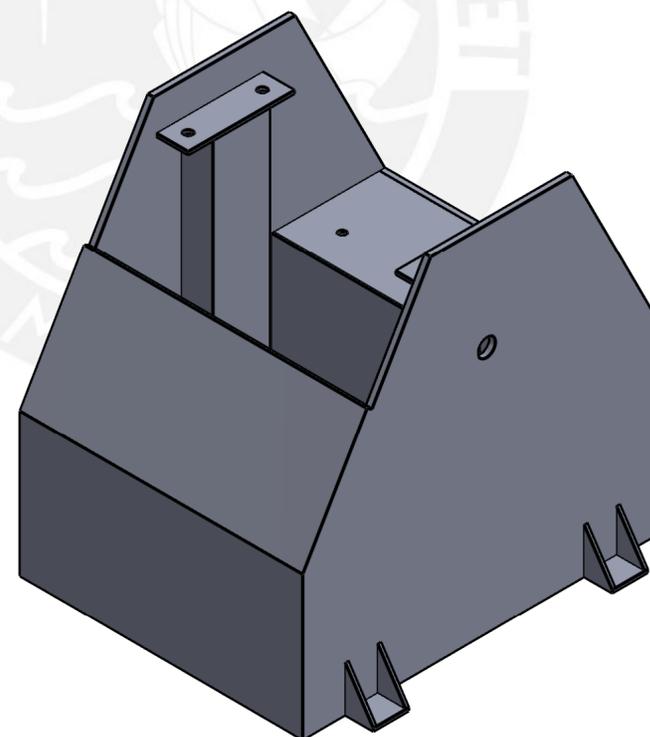
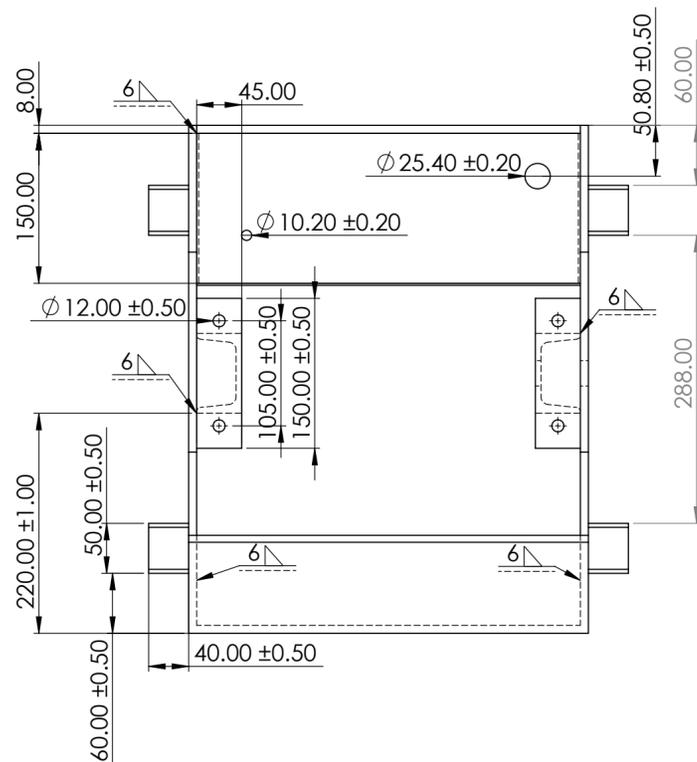
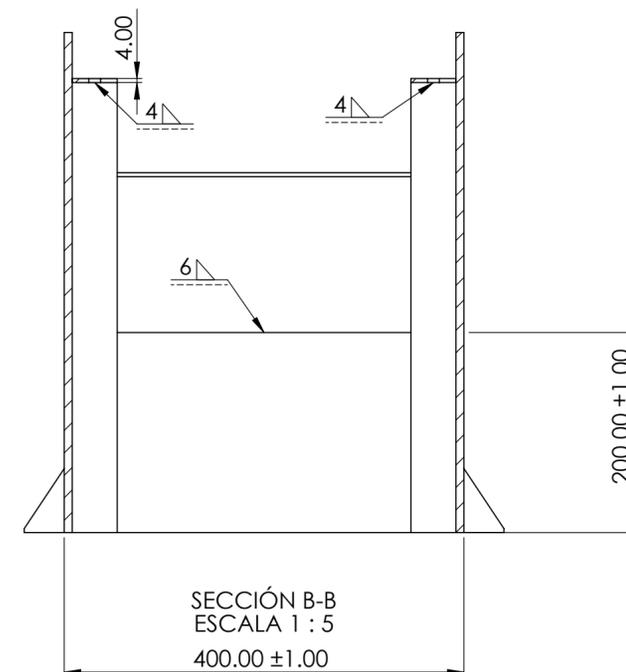
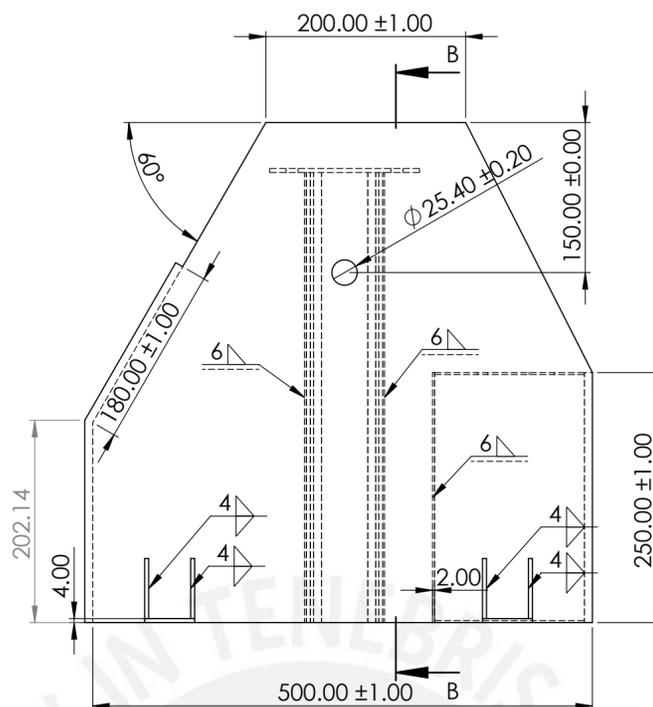
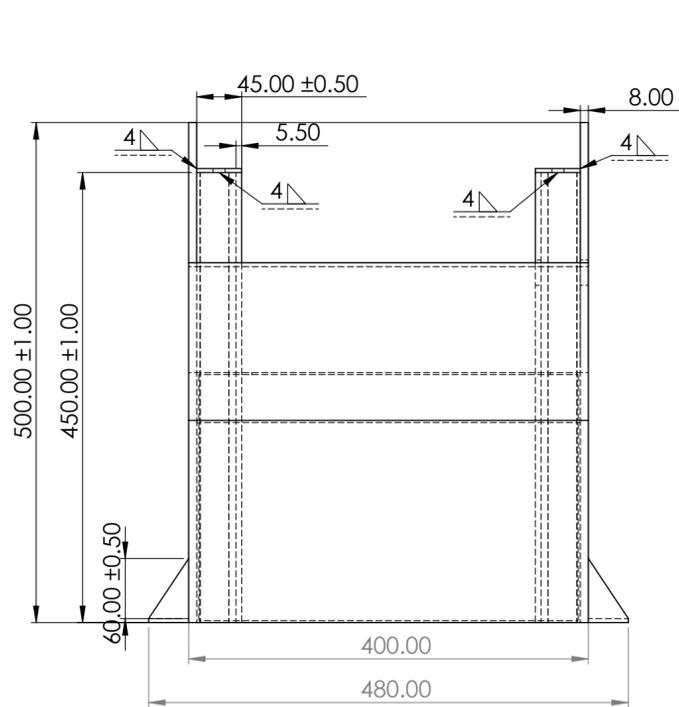




N.º DE ELEMENTO	TAMAÑO DE SOLDADURA	SÍMBOLO	LONGITUD DE SOLDADURA	CANTIDAD
1	6	▷	55	2
2	6	▷	20	2
3	5	▷	20	2
4	5	▷	48.47	2
5	5	▷	485.52	2
6	5	▷	70	4
7	5	▷	55	2
8	5	✓	15	1
9	5	▷	15	5
10	5	▷	76.19	2
11	4	▷	60	6
12	4	▷	359.78	1
13	5	✓	15	1

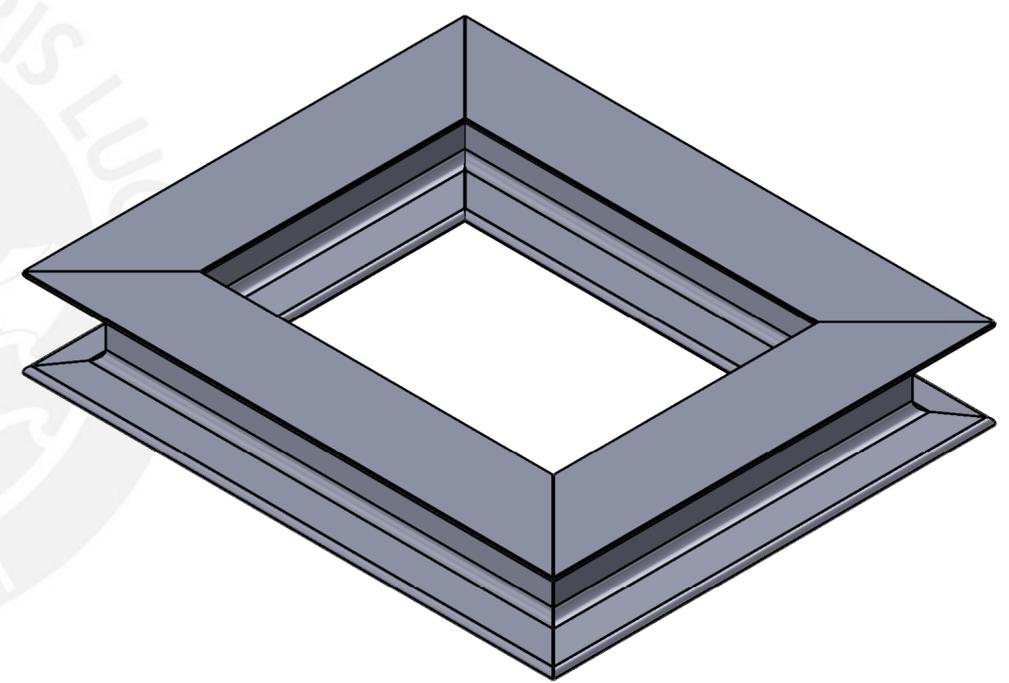
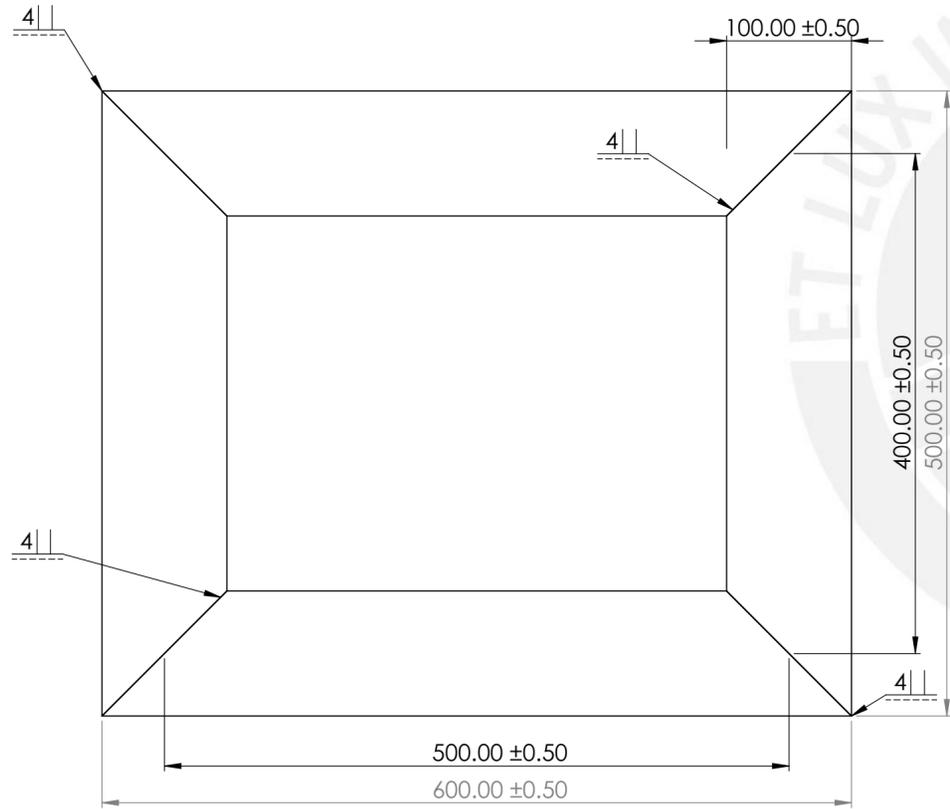
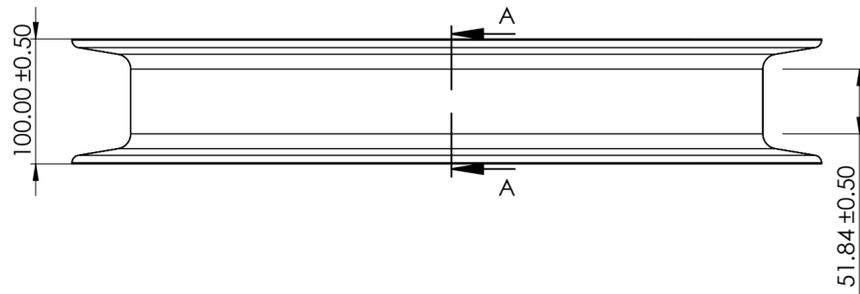
ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL
		AISI 304
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERIA – ESPECIALIDAD: ING. MECÁNICA		
METODO DE PROYECCION	DISCO AGLOMERADOR	ESCALA
	ESTRUCTURA SUPERIOR	1:5
20140304	BALDEON LAM, SERGIO FERNANDO	FECHA: 2020.07.27
		LAMINA: A3 – EV1

COTA NOMINAL	COTA MAXIMA	COTA MINIMA



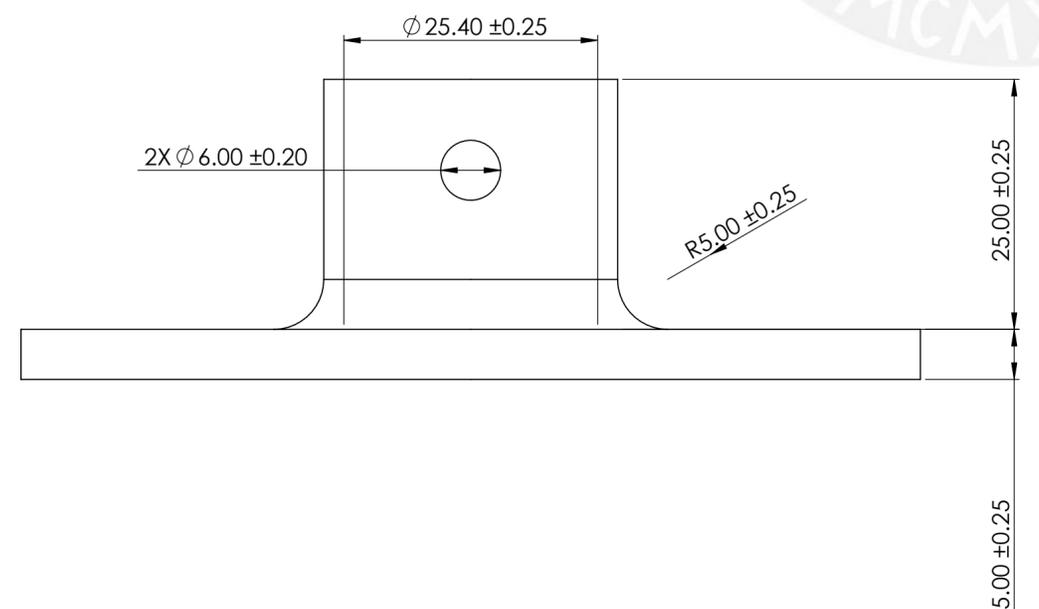
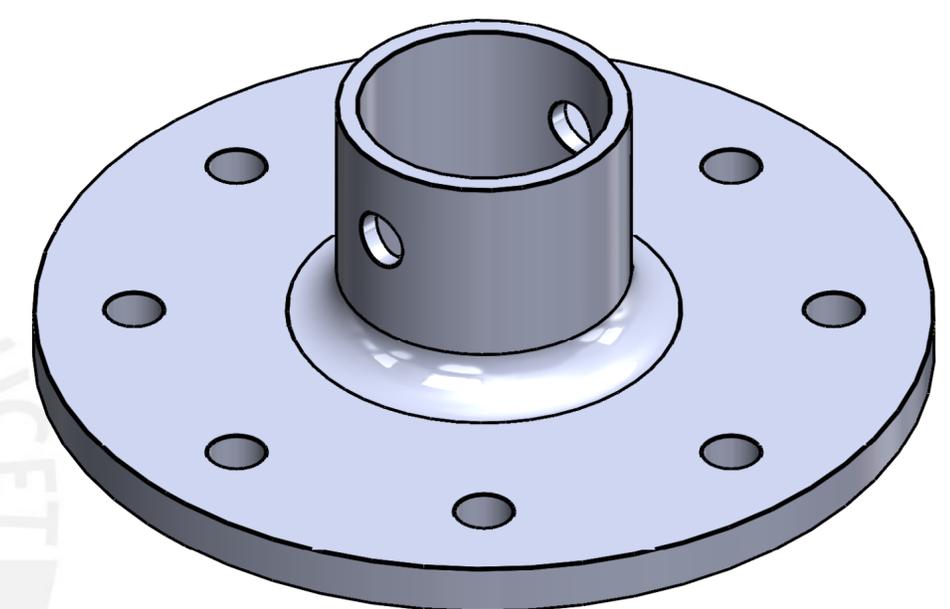
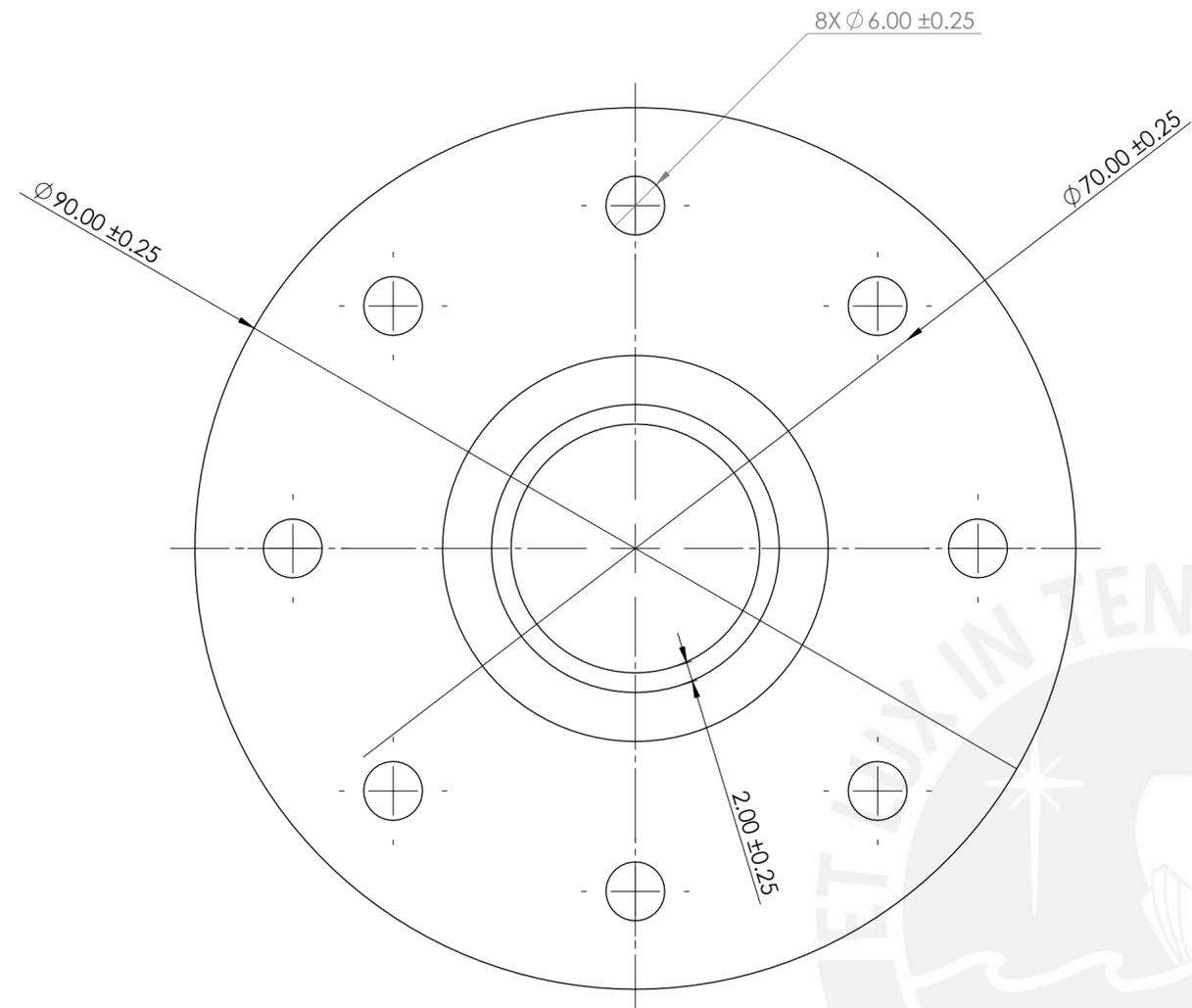
N.º DE ELEMENTO	TAMAÑO DE SOLDADURA	SÍMBOLO	LONGITUD DE SOLDADURA	CANTIDAD
1	6		784	1
2	6		180	2
3	6		1068	1
4	6		250	2
5	6		450	4
6	4		45	4
7	4		150	2
8	4		60	8

ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL
		AISI 304
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA – ESPECIALIDAD: ING. MECÁNICA		
METODO DE PROYECCION	DISCO AGLOMERADOR	ESCALA
	ESTRUCTURA INFERIOR	1:5
20140304	BALDEON LAM, SERGIO FERNANDO	FECHA: 2020.07.27
COTA NOMINAL	COTA MAXIMA	COTA MINIMA
		LAMINA: A2 – DA04



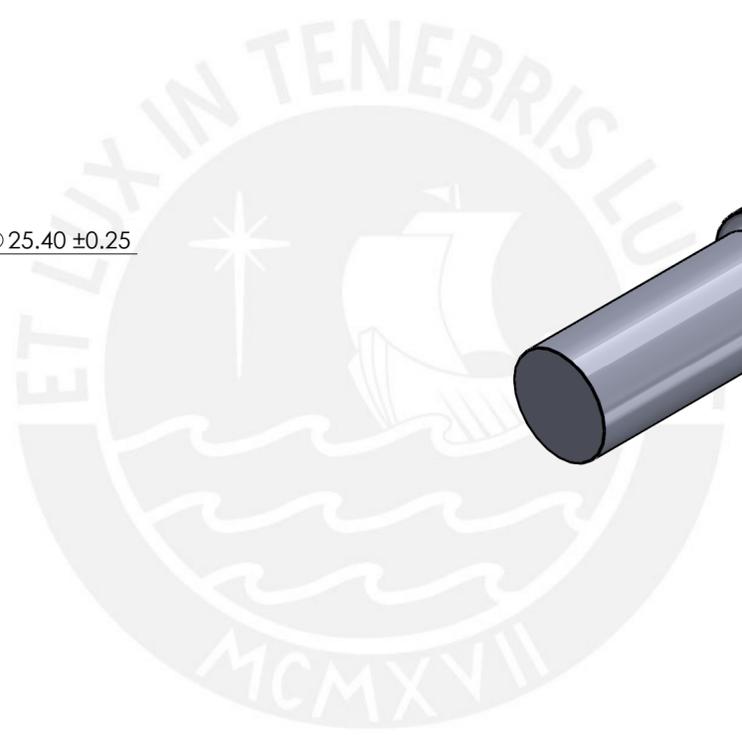
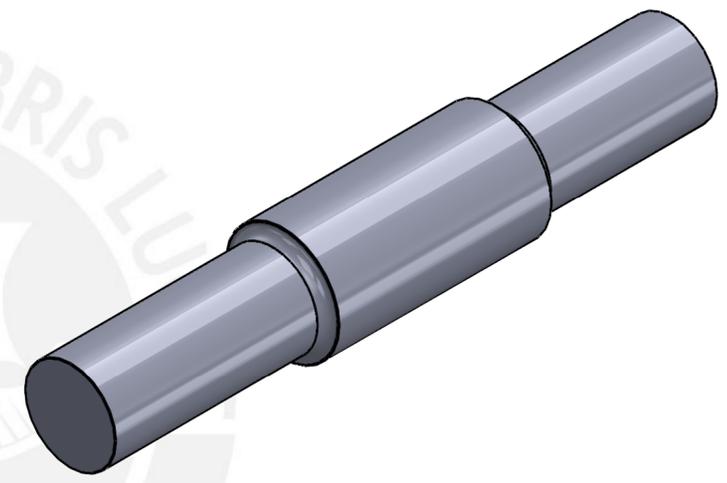
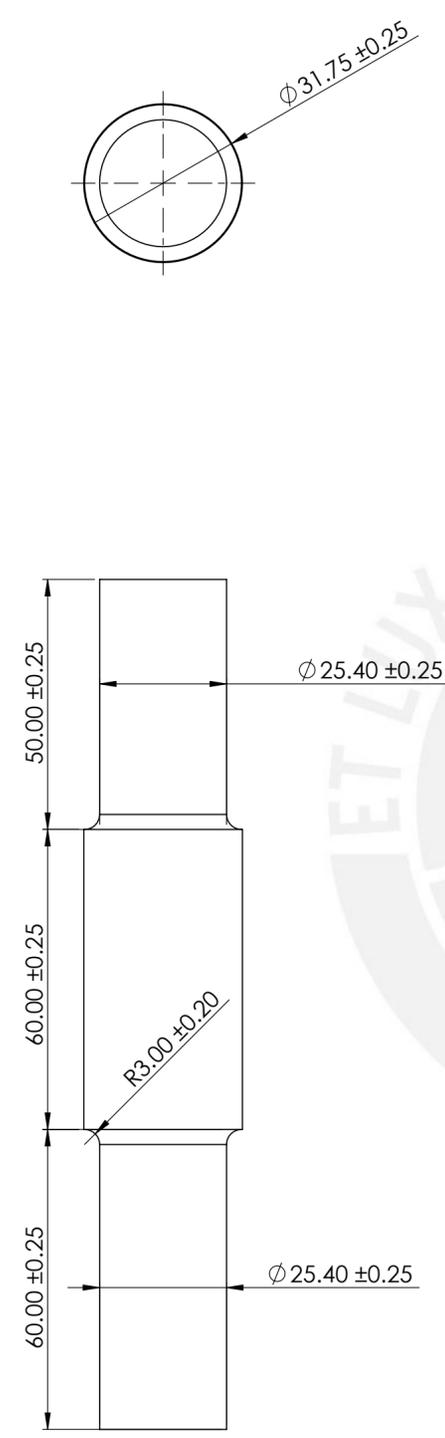
N.º DE ELEMENTO	TAMAÑO DE SOLDADURA	SÍMBOLO	LONGITUD DE SOLDADURA	CANTIDAD
1	4		693.3	4

ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL
		AISI 304
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERIA – ESPECIALIDAD: ING. MECÁNICA		
METODO DE PROYECCION	DISCO AGLOMERADOR	ESCALA
		1:4
20140304	BALDEON LAM, SERGIO FERNANDO	FECHA: 2020.07.27
COTA NOMINAL	COTA MAXIMA	COTA MINIMA
		LAMINA: A2 – DA05



ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL
		AISI 304
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERIA – ESPECIALIDAD: ING. MECÁNICA		
METODO DE PROYECCION	DSICO AGLOMERADOR	ESCALA
	BRIDA	2:1
20140304	BALDEON LAM, SERGIO FERNANDO	FECHA: 2020.07.27
		LAMINA: A2 – DA06

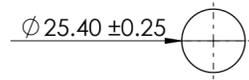
COTA NOMINAL	COTA MAXIMA	COTA MINIMA



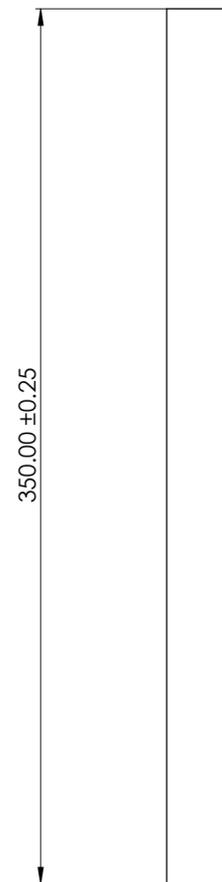
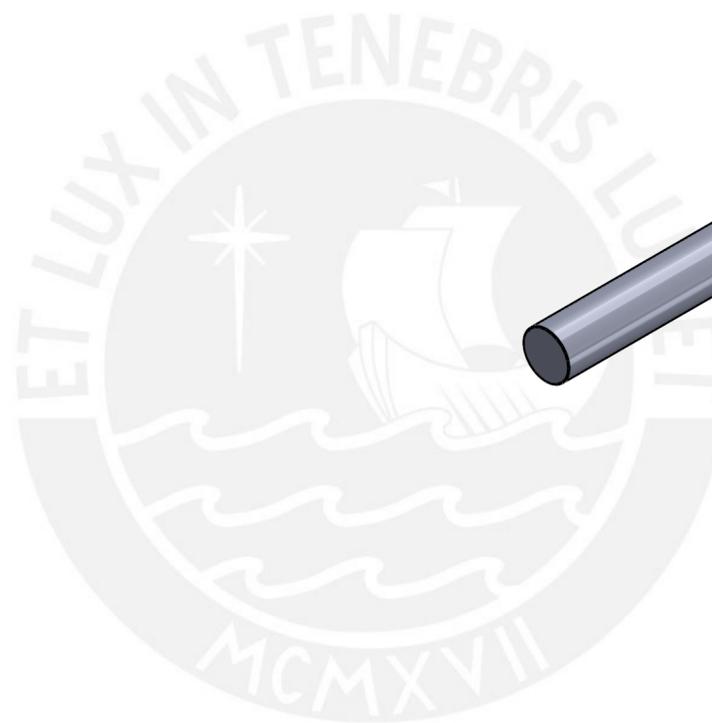
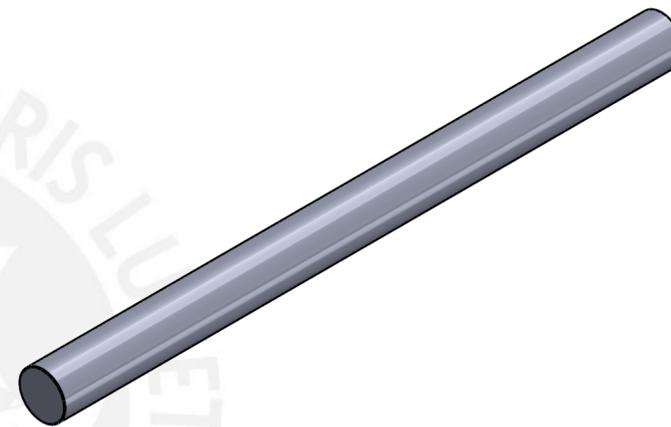
ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL
		AISI 304
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERIA – ESPECIALIDAD: ING. MECÁNICA		
METODO DE PROYECCION	DISCO AGLOMERADOR	ESCALA
	EJE DEL DISCO	1:1
20140304	BALDEON LAM, SERGIO FERNANDO	FECHA: 2020.07.27
		LAMINA: A2 – DA07

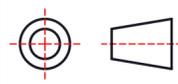
COTA NOMINAL	COTA MAXIMA	COTA MINIMA

$\varnothing 25.40 \pm 0.25$

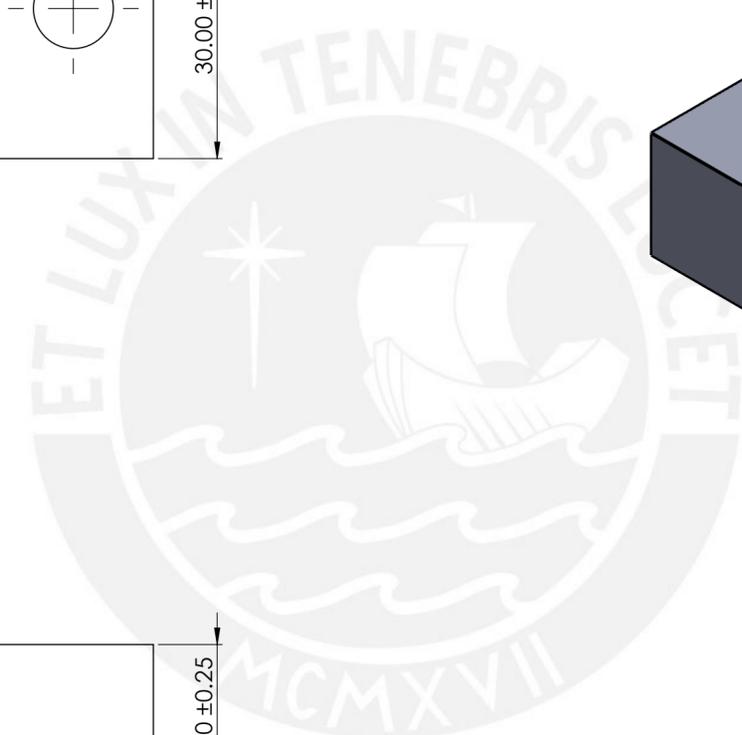
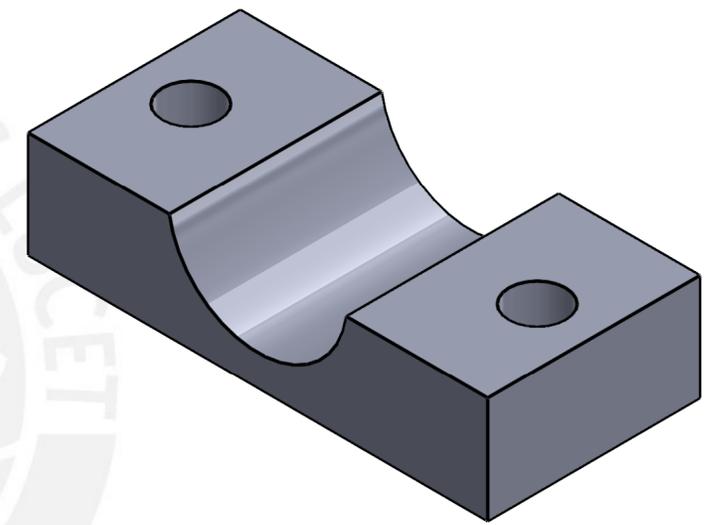
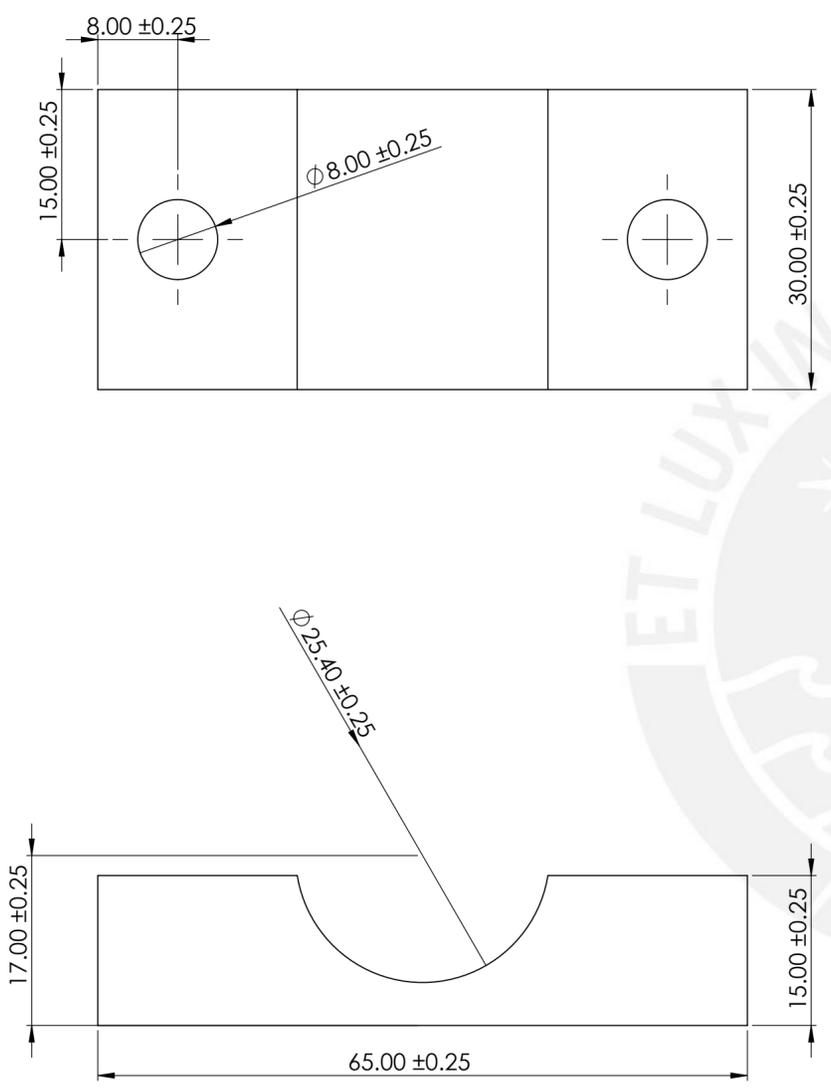


350.00 ± 0.25

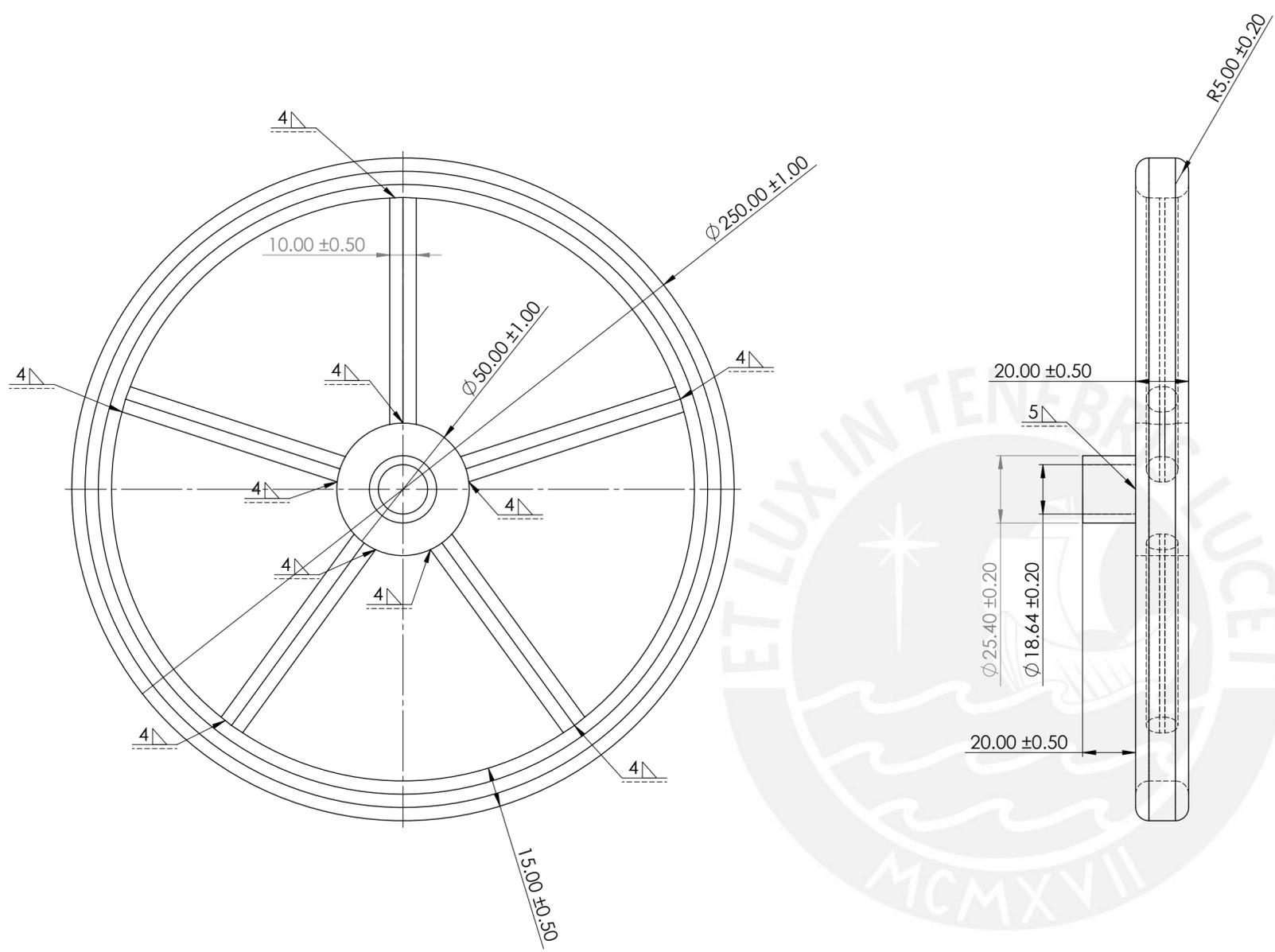



ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL
		AISI 304
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERIA – ESPECIALIDAD: ING. MECÁNICA		
METODO DE PROYECCION	DISCO AGLOMERADOR	ESCALA
	EJE PIVOTANTE	1:2
20140304	BALDEON LAM, SERGIO FERNANDO	FECHA: 2020.07.27
COTA NOMINAL	COTA MAXIMA	COTA MINIMA
		LAMINA: A2 – DA08

COTA NOMINAL	COTA MAXIMA	COTA MINIMA

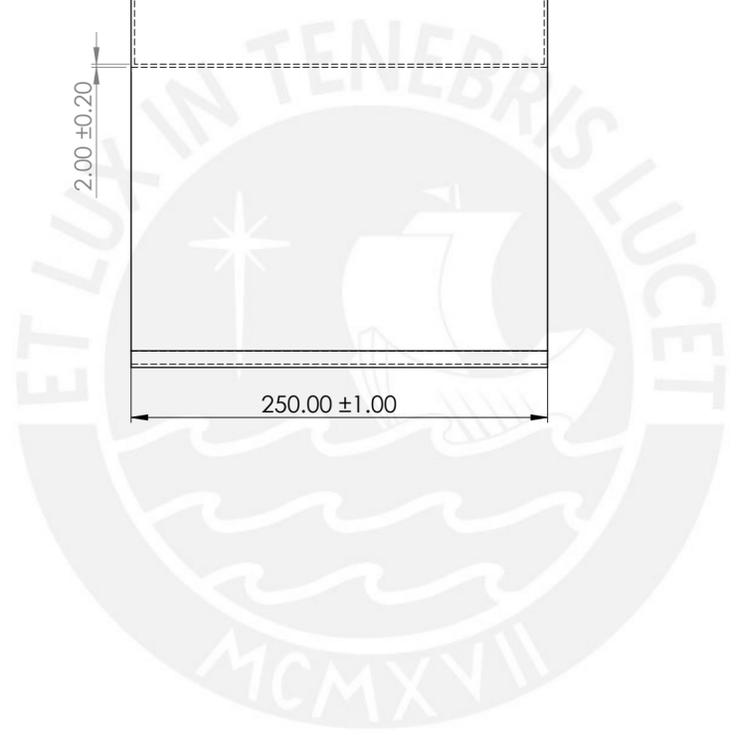
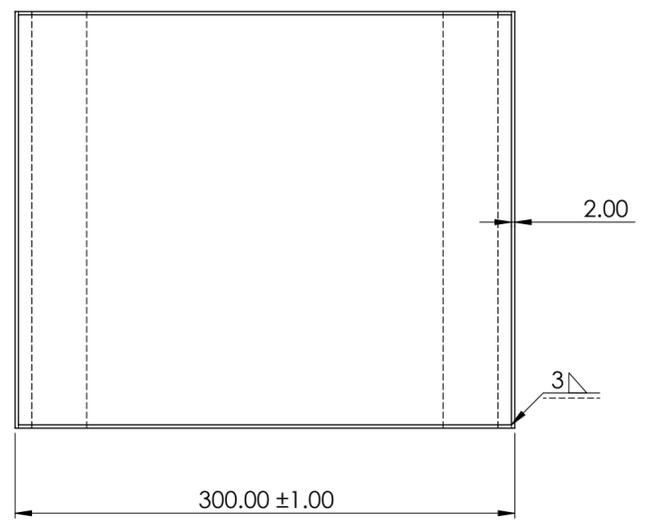
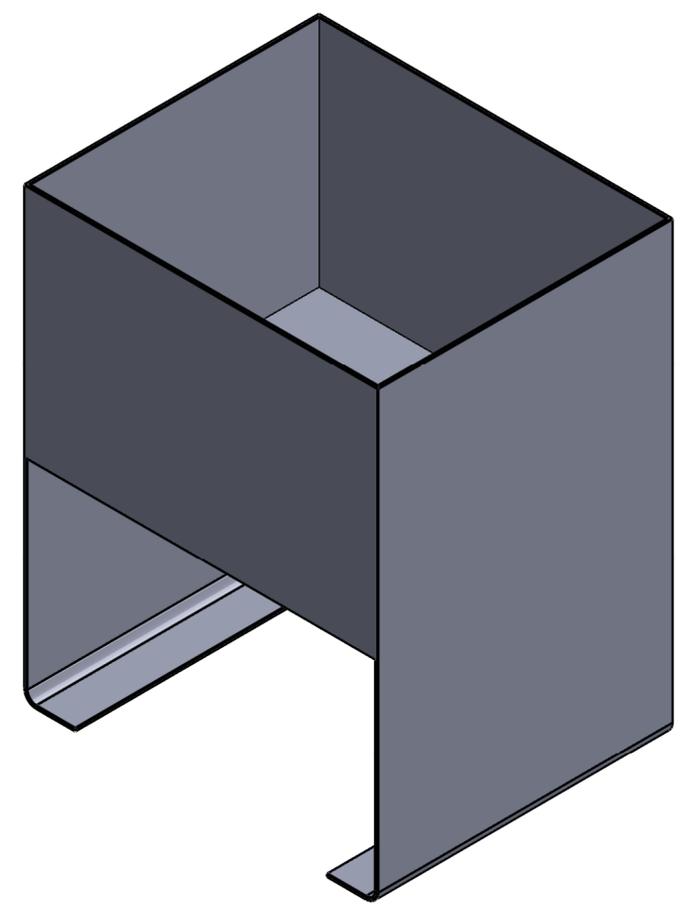
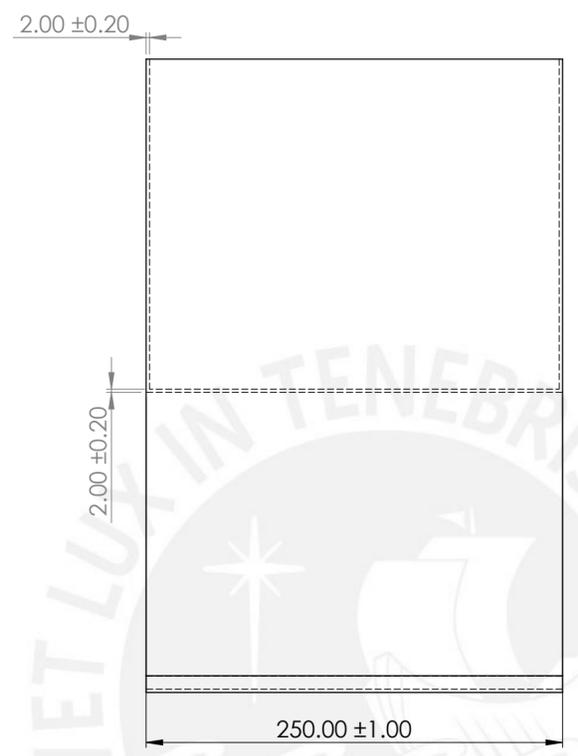
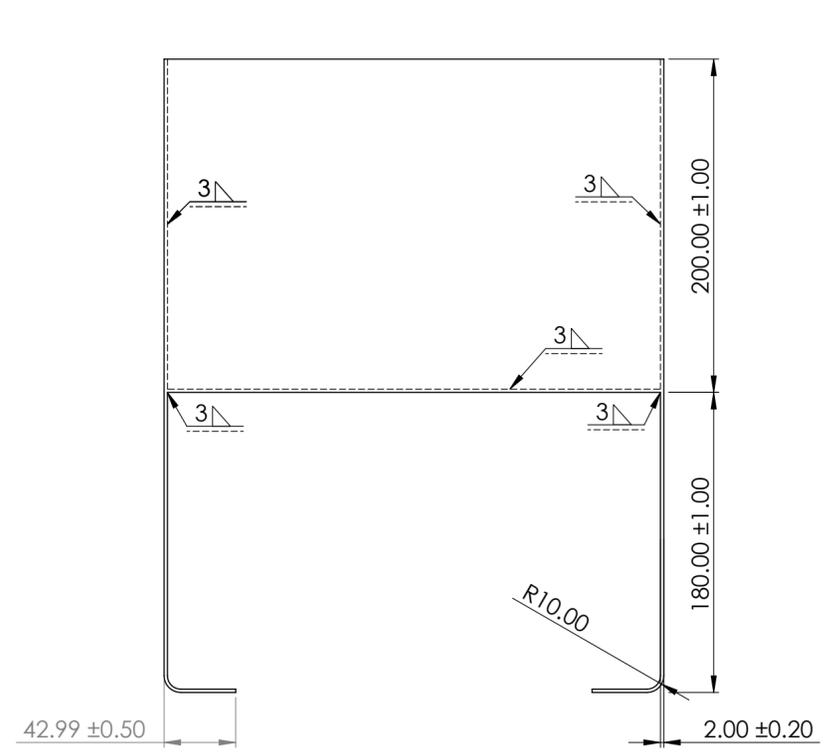


ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL
		AISI 304
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERIA – ESPECIALIDAD: ING. MECÁNICA		
METODO DE PROYECCION	DISCO AGLOMERADOR	ESCALA
	MORDAZA	2:1
20140304	BALDEON LAM, SERGIO FERNANDO	FECHA: 2020.07.27
COTA NOMINAL	COTA MAXIMA	COTA MINIMA
		LAMINA: A2 – DA09



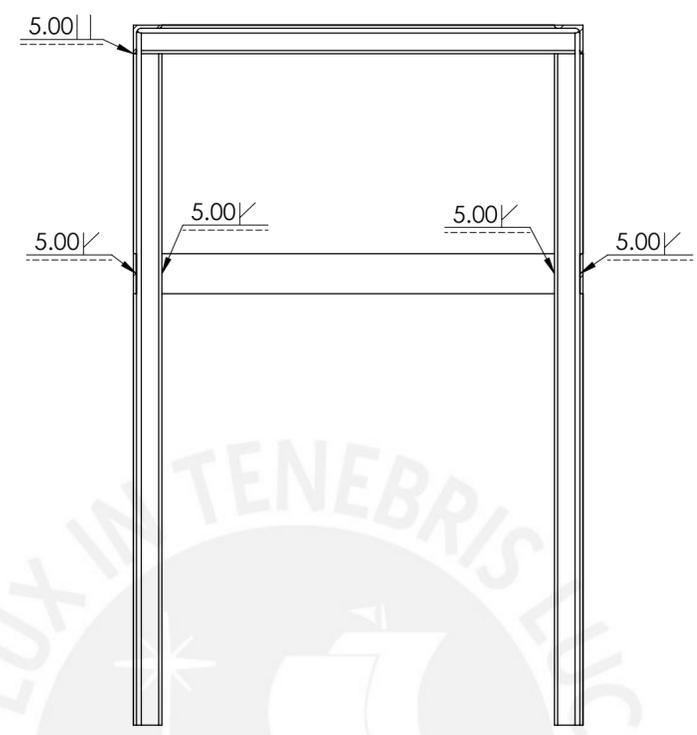
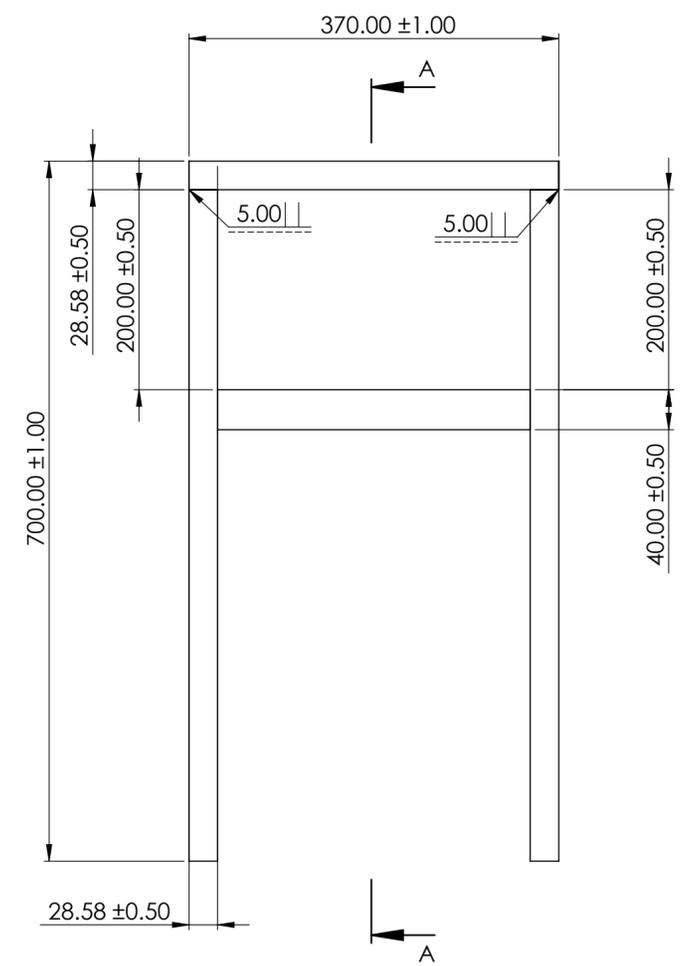
N.º DE ELEMENTO	TAMAÑO DE SOLDADURA	SÍMBOLO	LONGITUD DE SOLDADURA	CANTIDAD
1	4	▷	35.5	5
2	4	▷	35.43	5
3	5	▷	79.8	1

ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL
		AISI 304
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERIA – ESPECIALIDAD: ING. MECÁNICA		
METODO DE PROYECCION	DISCO AGLOMERADOR	ESCALA
	VOLANTE	1:1.5
20140304	BALDEON LAM, SERGIO FERNANDO	FECHA: 2020.07.27
COTA NOMINAL	COTA MAXIMA	COTA MINIMA
		LAMINA: A2 – DA10

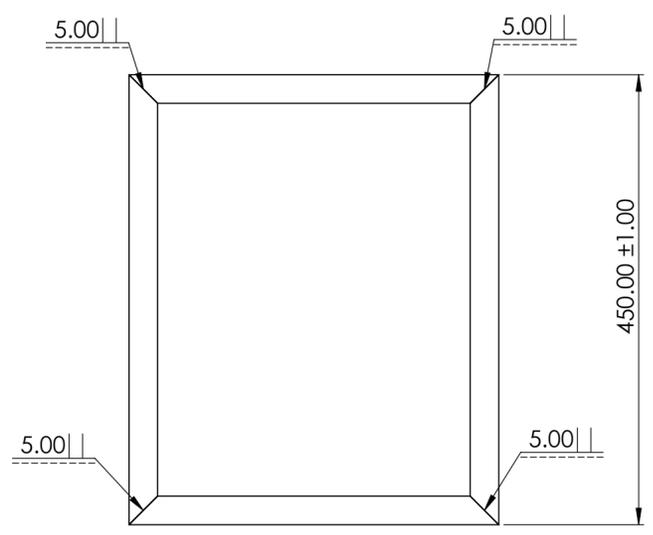
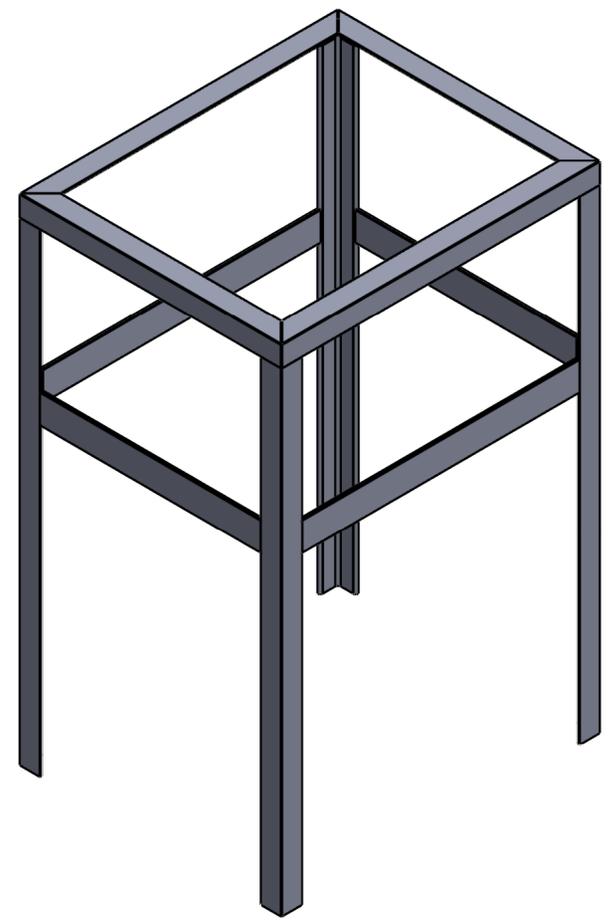


N.º DE ELEMENTO	TAMAÑO DE SOLDADURA	SÍMBOLO	LONGITUD DE SOLDADURA	CANTIDAD
1	3	△	1084	1
2	3	△	198	4
3	3	△	250	2

ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL
		AISI 304
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERIA – ESPECIALIDAD: ING. MECÁNICA		
METODO DE PROYECCION	DISCO AGLOMERADOR	ESCALA
	DEPOSITO DE GLOMEROS	1:3
20140304	BALDEON LAM, SERGIO FERNANDO	FECHA: 2020.07.27
COTA NOMINAL	COTA MAXIMA	COTA MINIMA
		LAMINA: A2 – DA11



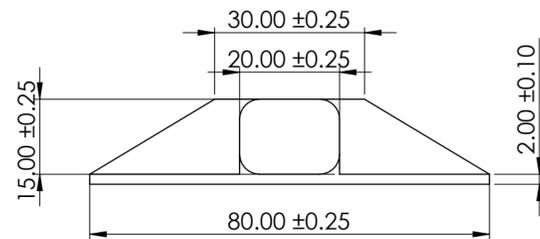
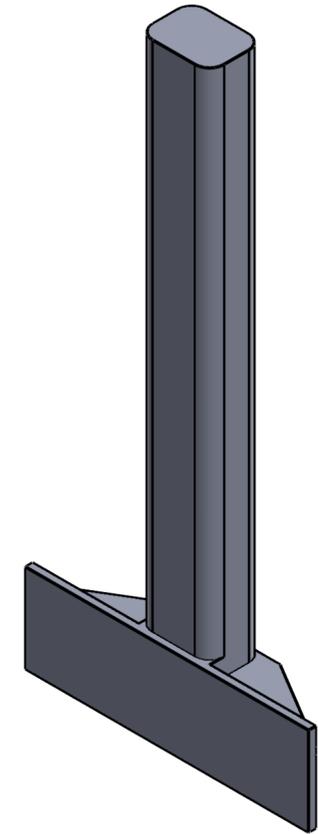
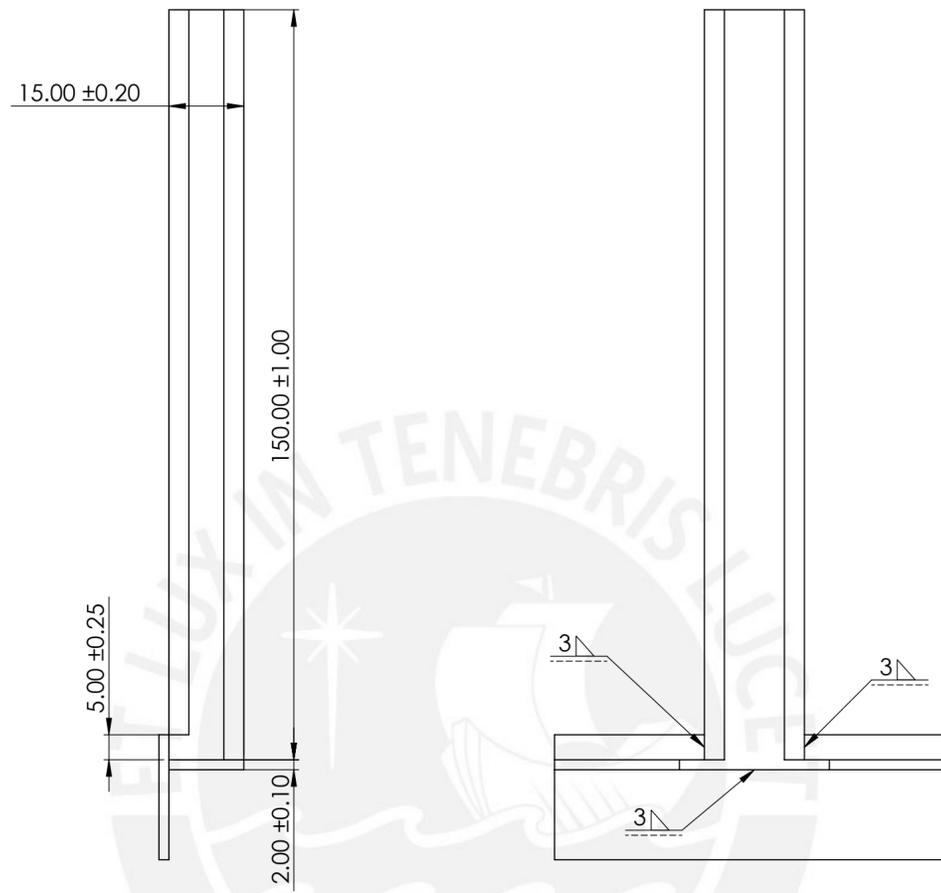
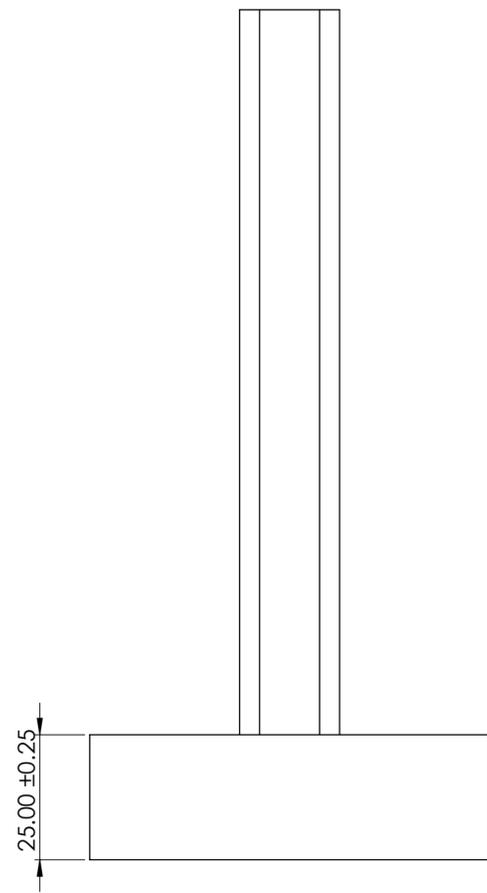
SECCIÓN A-A
ESCALA 1 : 5



N.º DE ELEMENTO	TAMAÑO DE SOLDADURA	SÍMBOLO	LONGITUD DE SOLDADURA	CANTIDAD
1	5.00		57.15	4
2	5.00		40.41	4
3	5.00	✓	40	6

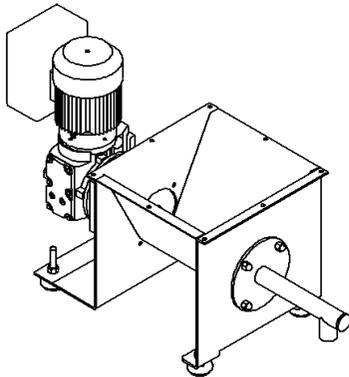
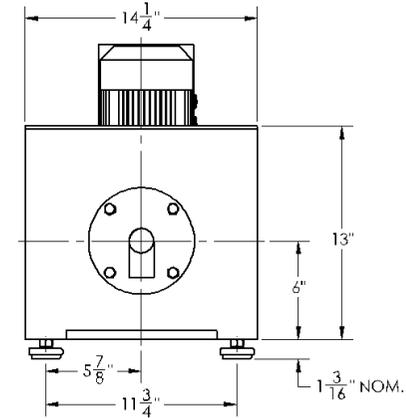
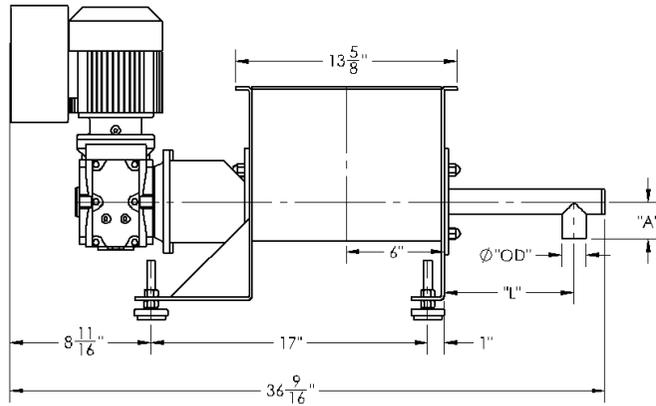
ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL
		AISI 304
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERIA – ESPECIALIDAD: ING. MECÁNICA		
METODO DE PROYECCION	DSICO AGLOMERADOR	ESCALA
	MESA SOPORTE	1:5
20140304	BALDEON LAM, SERGIO FERNANDO	FECHA: 2020.07.27
		LAMINA: A2 – DA12

COTA NOMINAL	COTA MAXIMA	COTA MINIMA



N.º DE ELEMENTO	TAMAÑO DE SOLDADURA	SÍMBOLO	LONGITUD DE SOLDADURA	CANTIDAD
1	3		80	1
2	3		5	2

ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL
		AISI 304
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERIA – ESPECIALIDAD: ING. MECÁNICA		
METODO DE PROYECCION	DISCO AGLOMERADOR	ESCALA
	RASCADOR	1:1
20140304	BALDEON LAM, SERGIO FERNANDO	FECHA: 2020.07.27
COTA NOMINAL	COTA MAXIMA	COTA MINIMA
		LAMINA: A2 – DA13



Features / Benefits

- . Accuracy: +/- 1 to 1-1/2%
- . Screw Sizes: 1/2", 3/4", & 1"
- . Feed Rates: 0.03 to 3 cf/hr. max.

Operating Characteristics

- . Dependable, accurate metering of a wide variety of dry solid materials on an extremely small footprint.
- . Rugged design.

Specifications

- . Construction: Carbon steel, carbon steel (epoxy coated), 304 or 316 stainless steel. Other materials available.

Model	Feed Rate (cu ft/hr) Min. -Max.	Screw Dia.	A	L	OD	HP
MT Mini 1/2	0.03 - 0.3	1/2"	1-1/2"	8"	1"	1/2
MT Mini 3/4	0.05 - 1	3/4"	2"	8"	1-1/4"	3/4
MT Mini 1	0.15 - 3	1"	2"	8"	1-1/2"	3/4

PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL
 THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF METALFAB, INC. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF METALFAB, INC. IS PROHIBITED.

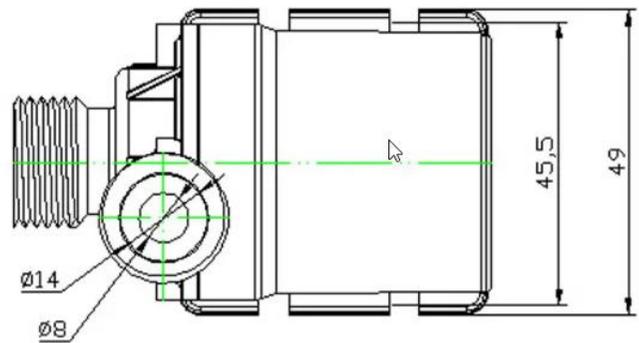
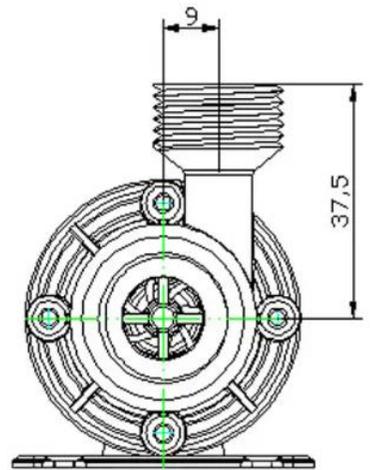
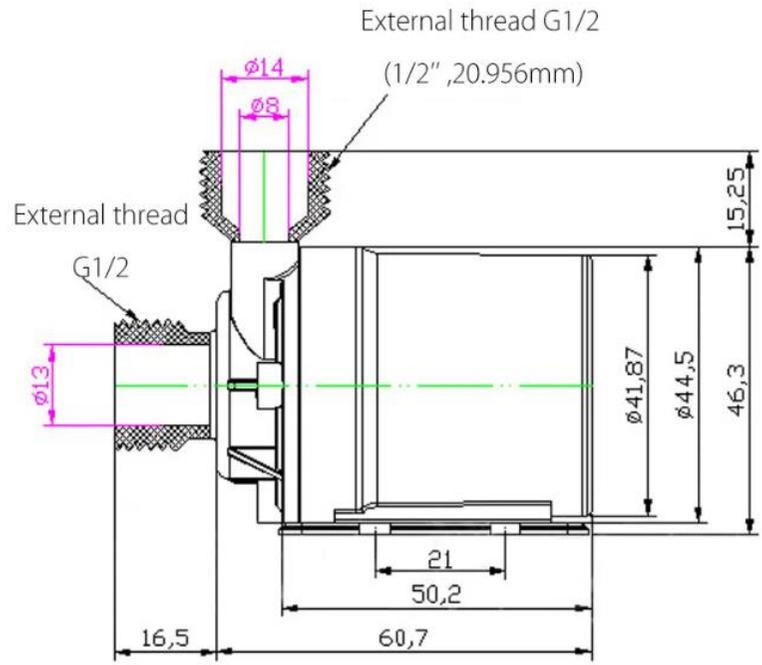
MetalFab, Inc. P.O. Box 9, Prices Switch Road, Vernon, NJ 07462
 (973) 764-2000 Fax: (973) 764-0272
 Web Site: www.metalfabinc.com

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:	NAME	DATE	TITLE:
DIMENSIONS ARE IN INCHES	DRAWN	PAC	11/15/2011
TOLERANCES:	CHECKED		
FRACTIONALS: 1/16"	ENG APPR.		
ANGULAR: MATCH 1/2" BENDS	COMMENTS:		
TWO PLACE DECIMAL ± .003			
THREE PLACE DECIMAL ± .005			
MATERIAL			
FINISH			
DO NOT SCALE DRAWING			

SIZE DWG. NO. REV
B REP DRAWING

SCALE: 1:8 SHEET 1 OF 1

Water pump D1/2" 12VDC 5m 800L/h



Specification:

Material	PA66 + 30% GF
Inlet/Outlet	1/2" male thread
Voltage	12V -24V DC can't more than 24V ,so if you use 24v power supply pls test it first
Maximum Rated Current	1000MA
Rated flow	350-700L/H
Max Flow Rate	1000 L/H use the 24V 2A power horizontal use
Max Water Head	5.5 metre
Working environment temperature	- 10-50 °C
Max circulating water temperature	100°C
Noise	< 40 db (water) under operation
IP Rate	IP68

**FULL
CONE**
FULLJET® G AND H NOZZLES


STANDARD ANGLE SPRAY



WIDE ANGLE SPRAY



NARROW ANGLE SPRAY

OVERVIEW: FULLJET G AND H

- Solid cone-shaped spray pattern with round impact area
- Unique vane design minimizes turbulence of the fluid to ensure uniform spray distribution and consistent spray coverage
- Large unobstructed flow passages minimize clogging and increase throughput
- Removable caps and vanes in most models make maintenance fast and easy
- Standard, wide and narrow spray angles


FullJet G and H Nozzles

The liquid enters the nozzle and proceeds through the vane. The vane causes the liquid to swirl. The design of the nozzle ensures the liquid continues to swirl as it enters the orifice. The liquid breaks up as it exits the nozzle orifice forming a well defined cone pattern. The drops are uniform in size and distributed equally throughout the spray pattern.

FULLJET G NOZZLES

- Spray angles: Standard – 43° to 94°, Narrow – 15° or 30°, Wide – 112° to 120°
- Uniform spray distribution from .07 to 25 gpm (.29 to 92 lpm)
- Operating pressures up to 300 psi (20 bar)
- Wall-mount versions for installation on room exterior, vessel or pipeline
- Right-angle mount versions for 90° angle mounting in areas with limited space


G

1/8" to 1/2" female conn.


GG

1/8" to 1/2" male conn.