

FECHA	18/06/07
-------	----------

NÚMERO RAE	
PROGRAMA	Programa de Ingeniería Mecatrónica

AUTOR (ES)	AMAYA AVILA, Arley.
TÍTULO	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MAGNETRÓN DESBALANCEADO PARA DEPOSITAR RECUBRIMIENTOS DE CrN.

PALABRAS CLAVES	
Diseño, Magnetron Desbalanceado, Recubrimientos duros, Sputtering, Plasma, Corrosión.	

DESCRIPCIÓN	
<p>Diseño de un Magnetron Desbalanceado para un equipo de sputtering ubicado en el laboratorio de Superconductores y nuevos materiales de la Universidad Nacional de Colombia, cuya función es asistir recubrimientos duros de Nitruro de cromo, se utilizaron imanes permanentes de alto poder para generar un campo magnético desbalanceado sobre el blanco (disco de cromo). Los imanes se desplazan con respecto al blanco para poder variar el campo magnético sobre el mismo, produciendo cambios en el plasma generado.</p>	

FUENTES BIBLIOGRÁFICAS	
<p>ADOLFO, Rodrigo, Tercer curso de procesamiento de materiales por plasma: Descargas eléctricas en gases de baja densidad, JICA y CENA, Buenos Aires</p> <p>CHEN, Francis.F., Introduction to Plasma Physics. Plenum Press, Corr printing, 2da ed., 1984., 421p</p> <p>DEXTER MAGNETIC TECHNOLOGIES COMPANY, Reference and design manual, 32p</p> <p>D.M. Mattox, "Ion Plating Technology: Deposition Technologies for films and coatings", R.F. Bunshah et al. Noyes Publications, Park Ridge, NJ, 1982, 40p.</p> <p>DONALD R. Askeland, Ciencia e Ingeniería de los materiales, 4 edición, Edit. Thomson, 2003, 362p</p> <p>FAIRES, Virgil F, Diseño de Elementos Mecánicos, Limusa, 1994, 802p.</p> <p>I. L. Singer, R. N. Bolster, S.A. Wolf, E.F. Skelton, R.A. Jeffries, Thin Solid Films, 1983, 207p.</p> <p>L. CUNHA, M. Andriatschky, K. Pischow, Z. Wang, A. Zarychta, A. S. Miranda, A. M. Cunha, Surf. Coat. Technol, 2000, 133p.</p> <p>L. H. Chiu, C. F. Yang, W. C. Hsieh, A. S. Cheng, Surf. Coat. Technol, 2002, 282p</p> <p>MUHL SAUNDERS, Stephen, Jefe del Departamento de Estado Sólido y Criogenia, UNAM.</p>	

NORTON, Robet, Diseño de Maquinas, Primera Edición, Prentice Hall, 7a. ed., 1998, 498p.

OLAYA FLOREZ, J.J, Nitruros metálicos de transición depositados con espurreo asistido con campos magnéticos variables, 2005, 240p, PhD, MSc, Ing. UNAM, Facultad de Química.

OLAYA FLOREZ, J.J. Recubrimientos de TiN sobre el acero AISI M2 por el método de sputtering reactivo, Tesis de Maestría, 2002, 210p, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Física.

P. ENGEL, G. Schwarz, G.K. Wolf, Surf. Coat. Technol, Argentina, 2000. 286p

UNIVERSIDAD DE SEVILLA, Plasmas e Interacciones Partículas –Superficies, Ingeniería de Superficies, Departamento de Química Inorgánica.

YUNUS A., Cengel, Transferencia de Calor, Segunda Edición, Mc Graw Hill, 2003, 793p.

NÚMERO RAE	
PROGRAMA	Programa de Ingeniería Mecatrónica

CONTENIDOS	
Objetivo general	
Construir un magnetron desbalanceado en un sistema de Sputtering reactivo para depositar recubrimientos duros tipo CrN	
Objetivos Especificos	
<ul style="list-style-type: none">• Diseñar un magnetron desbalanceado con imanes permanentes.• Construir un magnetron desbalanceado para un sistema de Sputtering reactivo.• Producir recubrimientos de Cromo sobre aceros.	

NÚMERO RAE	
PROGRAMA	Programa de Ingeniería Mecatrónica

METODOLOGÍA
<ol style="list-style-type: none"> 1. El enfoque de esta investigación es de carácter empírico-analítico, ya que para su desarrollo de esta, ue necesario tener un conocimiento previo del equipo, establecer un estudio sobre recubrimientos duros y su influencia en las propiedades tribológicas de los materiales. 2. La línea de investigación es Tecnologías actuales y sociedad, la sub-línea de la facultad Control y Automatización de Procesos y el Campo temático del programa Automatización industrial. 3. Para desarrollar el proyecto se realizó una investigación sobre técnicas de sputtering, generación de plasma, recubrimientos duros de nitruro de cromo, influencia de los campos magnéticos sobre el plasma y alto vacío. 4. Se procuró generar un campo magnético desbalanceado con imanes permanentes con un desplazamiento respecto a la superficie donde se produce el plasma y así variar la intensidad del mismo.

CONCLUSIONES
<ul style="list-style-type: none"> • El vacío hace parte fundamental del Sputtering, ya que la presencia de oxígeno genera una reacción que altera la estructura del recubrimiento. Por esta razón, la coloración final obtenida es de color negro, producto de la presencia de oxígeno dentro del equipo de Sputtering. • En vista de las múltiples variables que se pueden involucrar en el proceso de Sputtering, la adopción de un modelo matemático se complica. Para el desarrollo del proyecto, y por recomendación de expertos, se partió del supuesto de que el 90% de energía proporcionada por la fuente de alimentación se convertiría en calor. Al efectuar el procedimiento, la temperatura de salida de agua no varió. Por lo anterior se concluye que este porcentaje es adecuado y por lo tanto confiable para el desarrollo del experimento. • La descarga luminosa es intensa, aunque se concentra en un área reducida sobre el blanco, de lo cual se deduce que el sistema de Sputtering no es del todo eficiente. • Por medio del desbalance entre los imanes se logró que las líneas de campo magnético llegaran hasta los sustratos de manera efectiva. • El teorema de Biot-Savart sirvió para lograr una buena aproximación para determinar la distancia a la cual las líneas de campo magnético dejan de cerrarse entre los imanes, este teorema muestra que a mayor diámetro del imán interno mayor será la distancia a la cual las líneas de campo magnético dejan de cerrarse entre los imanes.

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MAGNETRÓN DESBALANCEADO PARA
DEPOSITAR RECUBRIMIENTOS DE CrN**

ARLEY OVIDIO AMAYA AVILA

**UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRONICA
BOGOTA
2007**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MAGNETRÓN DESBALANCEADO PARA
DEPOSITAR RECUBRIMIENTOS DE CrN**

ARLEY OVIDIO AMAYA AVILA

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecatrónico

**Dr. JHON JAIRO OLAYA
Profesor asistente
Universidad Nacional de Colombia**

**UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRONICA
BOGOTA
2007**

Nota de aceptación

Presidente del jurado

Jurado

Jurado

CONTENIDO

	Pag.
INTRODUCCIÓN	11
1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
1.1 ANTECEDENTES	14
1.2 DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	16
1.3 JUSTIFICACIÓN	16
1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	17
1.4.1 Objetivo General	17
1.4.2 Objetivos Específicos	17
1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES DEL PROYECTO	18
1.5.1 Alcances	18
1.5.2 Limitaciones	18
2 MARCO REFERENCIAL	19
2.1 MARCO CONCEPTUAL	19
2.1.1 Depósito de los recubrimientos duros	19
2.1.2 Procesos de sputtering	20
2.1.3 Sputtering d.c.	21
2.1.4 Sputtering con magnetron balanceado “BM”	22
2.1.5 Sputtering con magnetron desbalanceado “UBM”	24
2.1.7 Imanes permanentes	25
2.1.8 Plasma	26
2.2 MARCO TEÓRICO	29
2.2.1 Generación de plasma frío.	29
2.2.2 Recubrimientos de CrN.	33
2.2.3 Campo magnético para imanes permanentes.	34
2.2.4 Transferencia de calor.	37

2.2.5 Resistencia mecánica de juntas.	39
3 METODOLOGÍA	41
3.1 ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN	41
3.2 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN DE USB / SUB-LÍNEA DE FACULTAD / CAMPO TEMÁTICO DEL PROGRAMA	41
3.3 TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN	41
4 DESARROLLO INGENIERIL	43
4.1 BASES DEL DISEÑO	43
4.2 DISEÑO DE CAMPO MAGNÉTICO	46
4.3 DISEÑO SISTEMA DE REFRIGERACIÓN	50
4.4 DISEÑO AISLAMIENTO	55
4.5 DISEÑO DE JUNTAS	56
4.6 AJUSTES DE VACIO	61
4.7 ANÁLISIS DE CAMPO MAGNÉTICO	65
4.8 MONTAJE E IMPLEMENTACION	69
CONCLUSIONES	75
BIBLIOGRAFIA	76
ANEXOS	78

LISTA DE FIGURAS.

	Pag.
FIGURA 1. Cámara de vacío para multicapa Universidad Nacional de Colombia.	14
FIGURA 2. Cámara Vacío monocapa Universidad Nacional de Colombia.	15
FIGURA 3. Esquema del proceso de intercambio de momento para generar el espurreo (a) antes del impacto y (b) después del impacto.	20
FIGURA 4. Sistema de Espurreo d.c.	22
FIGURA 5. Magnetron convencional utilizado en un sistema de sputtering.	23
FIGURA 6. Esquema del trabajo de Window y Savvides sobre magnetron desbalanceado en 1986.	25
FIGURA 7. Imanes de alto poder.	26
FIGURA 8. Plasma frío.	28
FIGURA 9. Corte por plasma térmico.	29
FIGURA 10. Características del plasma de corriente continua.	31
FIGURA 11. Flujo de Agua.	44
FIGURA 12. Polaridad imanes	45
FIGURA 13. Configuración de imanes permanentes.	45
FIGURA 14. Curvas de campo magnético imanes permanentes.	47
FIGURA 15. Porta-imites.	49
FIGURA 16. Cámara de refrigeración.	55

FIGURA 17. Aislamiento.	55
FIGURA 18. Juntas.	57
FIGURA 19. Junta soldada.	58
FIGURA 20. Disposición de O Rings.	62
FIGURA 21. Diseño del alojamiento para O Rings.	62
FIGURA 22: Sello de Brida- Deformación axial o frontal.	63
FIGURA 23. Disco de unión.	64
FIGURA 24. Aislante.	64
FIGURA 25. Cámara de refrigeración.	65
FIGURA 26. Campo magnético radial B_r .	66
FIGURA 27. Campo magnético axial B_z .	66
FIGURA 28. Campo Magnético total B .	67
FIGURA 29. Vectores de campo magnético total.	68
FIGURA 30. Vectores unitarios de campo magnético resultante	69
FIGURA 31. Carcasa	70
FIGURA 32. Unión carcasa y aislante.	70
FIGURA 33. Cámara de refrigeración.	71
FIGURA 34. Cámara de refrigeración y O Ring	71
FIGURA 35. Sistema de desplazamiento de imanes.	72
FIGURA 36. Magnetron sin atornillar.	72
FIGURA 37. Magnetron ensamblado.	73
FIGURA 38. Magnetron ensamblado al equipo de sputtering.	73
FIGURA 39. Descarga de Plasma.	74

LISTA DE ANEXOS.

	Pag.
ANEXO A. Propiedades imanes de neodimio.	78
ANEXO B. Codificación de graficas en MATLAB.	79
ANEXO C. Propiedades del agua saturada.	82
ANEXO D. Propiedades Nylon 6.	83
ANEXO E. Esfuerzos de cálculo para uniones soldadas.	85
ANEXO F. Tablas y consideraciones para O Ring.	86
ANEXO G. Planos.	89
ANEXO H. Tablas campo magnético medido.	104

GLOSARIO

Carcasa: Cubierta exterior de una maquina, Tiene propiedades protectoras, estáticas y a veces magnéticas.

Coercitividad: H_c define la intensidad del campo que es necesaria para volver a desmagnetizar completamente un imán. Dicho más fácil: cuanto mayor sea este número, tanto mejor mantendrá un imán su magnetización al ser expuesto a un campo magnético opuesto.

CrN: Nitruro de Cromo.

La galvanoplastia es el proceso basado en el traslado de iones metálicos desde un ánodo a un cátodo en un medio líquido, compuesto fundamentalmente por sales metálicas y ligeramente aciduladas.

NbN: Nitruro de Niobio.

NMT: Nitruros Metálicos de Transición.

Pd: Presión Dinámica.

Plasma: es un sistema que contiene un número significativo de partículas cargadas (iones) libres y cuya dinámica presenta efectos colectivos dominados por las interacciones electromagnéticas de largo alcance entre las mismas. Con frecuencia se habla del plasma como un estado de agregación de la materia con características propias, diferenciándolo de este modo del estado gaseoso, en el que no existen efectos colectivos importantes.

PVD: Physical Vapour Deposition (Deposición Física en Fase de Vapor)

Sinergismo: La acción combinada de varias sustancias químicas, las cuales producen un efecto total más grande que el efecto de cada sustancia química separadamente.

Remanencia: (Br) es una medida para la inducción magnética o densidad de flujo que permanece en el imán tras su magnetización. Dicho más fácil: Cuanto mayor sea este valor más "fuerte" será el imán.

Sputtering (espurreo): El proceso de sputtering consiste en la extracción de átomos de la superficie de un electrodo debido al intercambio de momento con iones que bombardean los átomos de la superficie.

TiN:: Nitruro de titanio.

Tribología: La palabra TRIBOLOGIA procede del griego tribos (frotamiento) y "logos estudio", por tanto la "Tribología" es el estudio de la fricción. La definición académica más aceptada es "...la Ciencia y la Tecnología de la interacción de las superficies con movimientos relativos y las prácticas relativos a ellos..."

ZrN: Nitruro de Circonio.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo histórico de la evolución industrial de los materiales para fabricar elementos estructurales y herramientas de corte apunta a encontrar mecanismos y técnicas para mejorar sus propiedades. En este proceso, se ha observado que la durabilidad de un material sometido a diferentes tipos de esfuerzos depende principalmente de sus características superficiales. Para el caso particular de los aceros, se ha notado que el desgaste y la corrosión superficial dan origen a la falla de los elementos. Esto se ha comprobado por medio de indicadores que estudian el impacto nacional en Estados Unidos, los cuales arrojan como resultado pérdidas anuales debido a efectos de corrosión y desgaste que exceden los 300 billones de dólares y continúan creciendo (en 1990 estas pérdidas representaban el 7% del Producto Interno Bruto). Es por ello que se ha visto la necesidad de mejorar las propiedades superficiales de los materiales para así aumentar su utilidad y durabilidad.

Una alternativa económica y competitiva ha sido la aplicación de recubrimientos duros, los cuales son empleados ampliamente en la industria metalúrgica porque mejoran las propiedades tribológicas de los aceros e incrementan la resistencia a la corrosión de los materiales metálicos que están sometidos a ambientes agresivos como el agua salina y ambientes industriales. El ejemplo más típico es el recubrimiento de TiN (Nitruro de Titanio) para la protección al desgaste de los aceros rápidos en herramientas de corte. De esta forma, se logra obtener un material de alta resistencia al desgaste abrasivo en la superficie (recubrimiento duro) y alta tenacidad en el núcleo (acero), el cual se encuentra dirigido al mejoramiento de la calidad y la producción.

Dentro de los recubrimientos duros, los NMT (Nitruros Metálicos de Transición), tales como TiN, NbN, CrN, han demostrado su utilidad al depositarse sobre aceros

para herramientas al mejorar sus propiedades superficiales permitiéndole así ser competitivos con las nuevas exigencias del mercado. Los nitruros metálicos presentan bajos coeficientes de fricción, elevada dureza superficial, buena capacidad de adhesión y resistencia a la abrasión, aumentan la resistencia a la corrosión y permiten dar tonalidades de colores brillantes y decorativos. Debido a estas propiedades, dichos recubrimientos son ampliamente utilizados en la industria de alimentos, metalmecánica, aeronáutica, electrónica, petroquímica y como biomaterial.

A pesar del incremento comercial de los recubrimientos duros y el gran volumen de literatura científica disponible, existe aún un pobre entendimiento de la relación entre las propiedades de las películas y su comportamiento en ambientes combinados de erosión-corrosión. La unión de estos procesos genera un estado de sinergismo que acelera la degradación en las superficies. Actualmente, los trabajos científicos sobre el comportamiento de erosión-corrosión son escasos y básicamente están orientados al estudio de películas en monocapas de TiN y CrN y multicapas de CrN/NbN.

En Colombia, la investigación de recubrimientos duros ha estado enfocada a la optimización de películas delgadas en el laboratorio, principalmente en la producción de ZrN, TiN y TiAlN (Nitruro de Titanio y Aluminio) con técnicas de arco o sputtering convencional. Sin embargo, aún hace falta una investigación sistemática y profunda de la producción de estos materiales depositados con un sistema de sputtering con magnetrón desbalanceado. Teniendo en cuenta este aspecto, este trabajo propone participar científicamente en la construcción de un magnetrón desbalanceado para producir recubrimientos de CrN (Nitruro de Cromo). Actualmente en Colombia hay sistemas de sputtering con magnetrón balanceado, sin embargo, no se tiene mayor experiencia en la realización del diseño y construcción de magnetrones desbalanceados. Los magnetrones

desbalanceados mejoran la calidad de los recubrimientos duros, es decir mejoran su adherencia y dureza.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

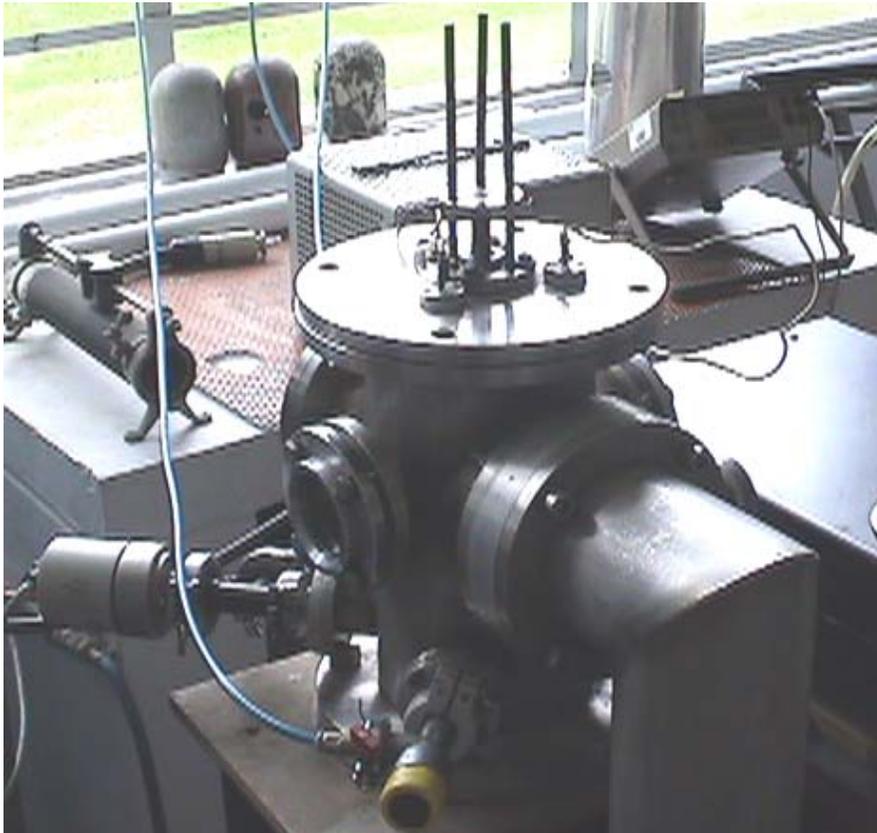
1.1 ANTECEDENTES

Entre los trabajos realizados en el país sobre el tema, se destaca el realizado en la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, en el laboratorio de superconductores y nuevos materiales. En este laboratorio se han construido dos equipos de Sputtering, los cuales fueron diseñados para realizar recubrimientos en muestras del tamaño de una moneda.

Figura 1. Cámara de vacío para multicapa Universidad Nacional de Colombia.



Figura 2. Cámara Vacío monocapa Universidad Nacional de Colombia.



Los estudios realizados en la Universidad Nacional se basan en magnetrones balanceados, en la actualidad la implementación del magnetrón desbalanceado cobra gran importancia.

Cada equipo consta de una bomba de vacío mecánica, una bomba de vacío turbo molecular, fuente DC, fuente RF, fuente AC, equipos de medición (manómetros y termocuplas), una cámara de vacío, un porta sustrato y un magnetrón. Las partes no comerciales se han fabricado en la Universidad Nacional de Colombia.

Este trabajo de grado se enfoca a la adecuación el magnetrón a la cámara de vacío multicapa (ver Figura 1), ya que este posee cavidades que no están ocupadas.

1.2 DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Este estudio se apoya en la premisa de que actualmente la mayoría de los equipos de PVD para depositar recubrimientos duros utilizan un magnetrón convencional o balanceado, pero no se ha desarrollado el sistema de magnetrón desbalanceado. Este sistema mejora considerablemente la dureza y calidad de los recubrimientos duros tipos NMT ya que las líneas del campo magnético son más prolongadas. De esta forma, el material de aporte alcanza mayor velocidad y orientación.

¿Cómo mejorar el recubrimiento duro producido por sputtering convencional o balanceado?

1.3 JUSTIFICACIÓN

Los NMT son recubrimientos atractivos debido a su gran potencial para elevar la calidad superficial y durabilidad de los aceros. Esto se consigue con la combinación de alta tenacidad de los aceros y la elevada resistencia al desgaste y a la corrosión de los NMT. Ahora bien, películas como CrN han sido poco investigadas. En Colombia se desconocen trabajos donde estos recubrimientos estén depositados con el sistema de UBM (Por sus siglas en ingles, Unbalanced Magnetron).

Así mismo, el estudio busca relacionar las propiedades del recubrimiento con su respuesta cuando este es depositado con CrN. Se eligió el CrN, por su alto impacto a nivel industrial, lo cual permite suministrar información importante en aplicaciones ya existentes.

Las siguientes son las razones que justifican el desarrollo de este proyecto de investigación:

- Continuar la línea de investigaciones iniciadas en Colombia en el tema de los Nitruros Metálicos de Transición, en este caso los recubrimientos duros de CrN.
- Impulsar el desarrollo científico e investigativo del país en este campo.
- Ofrecer a la industria nacional del sector un soporte científico que permita el desarrollo de los recubrimientos duros y la técnica de sputtering con magnetrón desbalanceado en el ámbito industrial.
- Aprovechar la capacidad humana, técnica y científica existente en Bogotá para el desarrollo del proyecto.
- La existencia en Colombia de empresas que potencialmente pueden ser usuarias de estos recubrimientos y técnicas de producción.

1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1 Objetivo General

Construir un magnetrón desbalanceado en un sistema de Sputtering reactivo para depositar recubrimientos duros tipo CrN

1.4.2 Objetivos Específicos

- Diseñar un magnetrón desbalanceado con imanes permanentes.
- Construir un magnetrón desbalanceado para un sistema de Sputtering reactivo.
- Producir recubrimientos de Cromo sobre aceros.

1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES DEL PROYECTO

1.5.1 Alcances

De acuerdo con la propuesta se procede a la realización de ensayos de dureza y estudio de fases a las pruebas que se hagan y se compararan con estudios ya realizados con el magnetrón balanceado existente.

El campo magnético será medido con un teslametro que se encuentra en el laboratorio de superconductores y nuevos materiales de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.

1.5.2 Limitaciones

El diseño se verá limitado a la disponibilidad de piezas en el mercado, en especial los imanes, ya que su adquisición depende de la producción del proveedor, costo, forma, tamaño y material de fabricación.

Es necesario adecuar el magnetrón al equipo, no el equipo al magnetrón. Derivado de esto, el aparato puede presentar limitaciones de tamaño, forma y capacidad.

2. MARCO REFERENCIAL

2.1 MARCO CONCEPTUAL

2.1.1 Depósito de los recubrimientos duros.

El PVD es una de las herramientas tecnológicas más usadas para proteger las superficies de los aceros de diferentes ambientes corrosivos y aumentar ciertas propiedades mecánicas tales como la dureza y la resistencia al desgaste. Los procesos PVD utilizan medios físicos (intercambio de energía y momento) para obtener directamente las especies (átomos, iones o moléculas, etc) de un material llamado blanco. Los átomos superficiales en el blanco son evaporados ó espurreados para luego ser transportados y depositados sobre un sustrato. Las tasas de depósito pueden variar desde Amstrongs (Å) hasta Micras (μm) por minuto. Bajo condiciones apropiadas pueden generarse, de manera controlada, microestructuras amorfas y cristalinas.

Las técnicas de PVD tradicionalmente se han clasificado en evaporación y sputtering, sin embargo, en los últimos años los procesos de evaporación han sido asistidos por plasma, surgiendo así una tercera técnica llamada “Plateado iónico”¹. En la evaporación se funde el material por medio de un haz de electrones, un calentamiento resistivo, ablación láser, etc. Las especies evaporadas viajan a través del vacío para condensarse sobre un sustrato formando una película delgada². En el proceso de espurreo se obtiene el material del recubrimiento por medio de un bombardeo iónico sobre el blanco. En el proceso de plateado iónico, se polariza el sustrato para acelerar los iones del blanco hacia el sustrato para

¹D.M. Mattox, “Ion Plating Technology: Deposition Technologies for films and coatings”, R.F. Bunshah et al. Noyes Publications, Park Ridge, NJ, 1982, 3p.

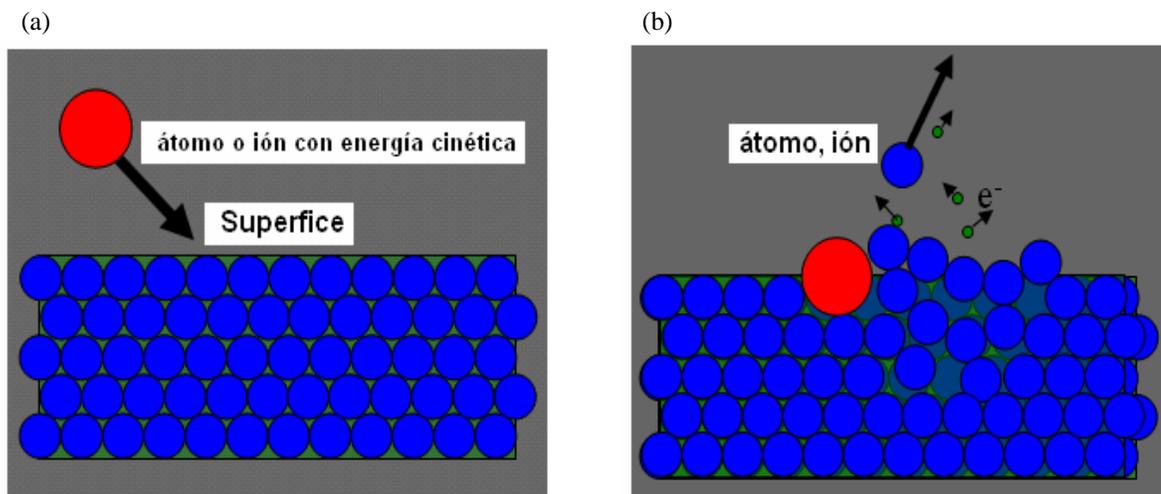
² L. H. Chiu, C. F. Yang, W. C. Hsieh, A. S. Cheng, Surf. Coat. Technol, 2002, 58p

generar películas más densas. Adicionalmente existen múltiples variedades y combinaciones de estas tres técnicas que por su gran extensión no se citarán en este trabajo.

2.1.2 Procesos de Sputtering

El proceso de Sputtering es un fenómeno de transferencia de momento y energía a la superficie de un blanco mediante el bombardeo con iones o átomos neutros energéticos sobre esta. (Ver figura 3a). Como resultado se produce la fase de vapor por el arranque mecánico de los átomos o moléculas del material que constituye el blanco. (Ver figura 3b). Las especies pulverizadas viajan dentro de una cámara en vacío para condensarse sobre un sustrato³.

Figura 3. Esquema del proceso de intercambio de momento para generar el espurreo (a) antes del impacto y (b) después del impacto



Fuente: <http://www.pvd-coatings.co.uk/theory-of-pvd-coatings-magnetron-sputtering.htm>

³P. ENGEL, G. Schwarz, G.K. Wolf, Surf. Coat. Technol, Argentina, 2000. 20p

2.1.3 Sputtering d.c.

El sistema de sputtering d.c. o diodo d.c. se realiza en cámaras de vacío como la ilustrada en la figura 4. Dentro de esta cámara (la cual esta aterrizada) el sustrato se puede poner a un potencial positivo, negativo o dejarlo flotante y el blanco se utiliza como cátodo. El proceso se inicia con la evacuación del aire en la cámara a presiones que oscilan entre 0.75 y 7.5×10^{-4} mtorr. En estas condiciones, la cámara se llena parcialmente con gas (El gas más utilizado para procesos de espurreo es el argón, con p.d = 0.3 torr.cm, debido a su baja reactividad y su apreciable masa) hasta la presión de trabajo entre 10 y 1×10^{-3} mtorr, luego se aplica una diferencia de potencial de 300 a 5000V entre el ánodo y el cátodo, con lo que se produce una descarga eléctrica brillante con la respectiva ionización del gas, la cual se auto mantiene debido a la emisión de electrones desde el cátodo. Los iones positivos se aceleran contra el blanco (cargado negativamente) produciendo así la suficiente transferencia de energía y momento para pulverizar los átomos del blanco, que luego son depositados sobre el sustrato⁴.

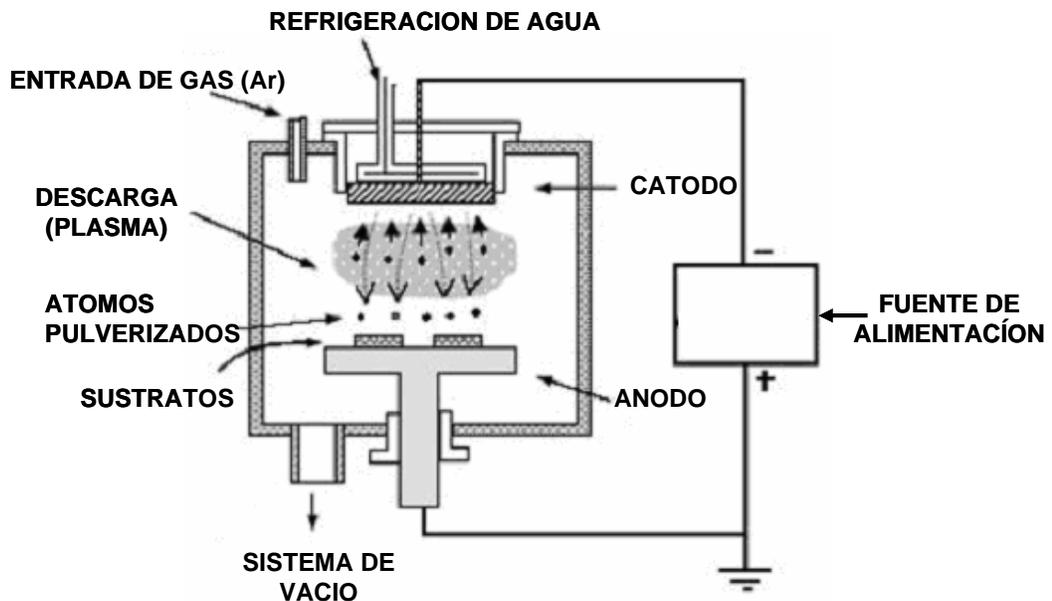
La ventaja de esta técnica está en la gran variedad de materiales que pueden ser usados como blancos y como desventajas se tienen las bajas tasas de depósito y la contaminación en las películas debido principalmente a partículas generadas por el calor del plasma en las paredes de la cámara y componentes del sistema de vacío.

En el Sputtering d.c. el gas inerte no participa en la formación de compuestos sobre el blanco o sustrato, su función principal es generar el plasma y pulverizar el material de cátodo. Sin embargo, este sistema puede ser reactivo cuando se adiciona un segundo gas que participe en la formación de un compuesto, por

⁴ OLAYA FLOREZ, J.J, Nitruros metálicos de transición depositados con espurreo asistido con campos magnéticos variables, 2005, 37 p, PhD, MSc, Ing. UNAM, Facultad de Química.

ejemplo el nitrógeno, que reacciona con los átomos pulverizados del blanco sobre la superficie del sustrato para formar un nitruro que se deposita en forma de película.

Figura 4. Sistema de Espurreo d.c.



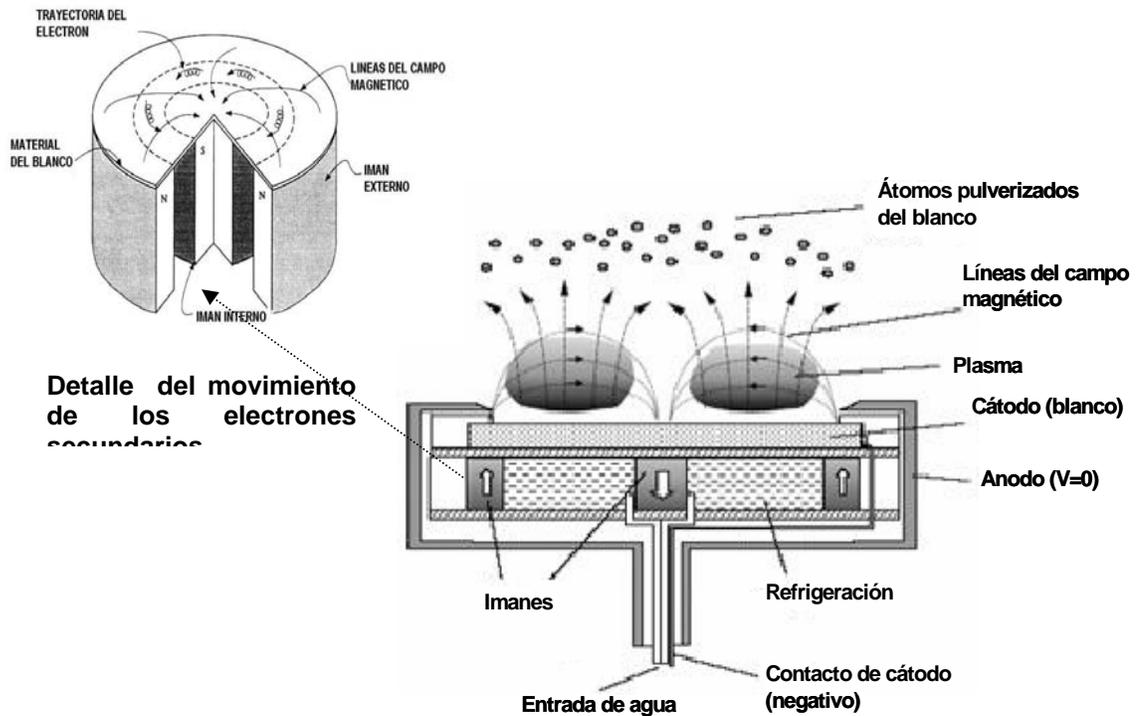
Fuente: OLAYA, J.J, Nitruros metálicos de transición depositados con espurreo asistido con campos magnéticos variables, 2005, 38 p, PhD, MSc, Ing. UNAM, Facultad de Química

2.1.4 Sputtering con Magnetron Balanceado “BM”

El magnetron está compuesto por un juego de imanes permanentes, un cátodo, un ánodo y un sistema de enfriamiento, tal como se muestra en la figura 5. Este sistema busca aumentar las densidades del plasma sobre el blanco por la combinación de campos eléctricos y magnéticos. El blanco está polarizado negativamente, el campo magnético se genera mediante unos imanes permanentes. Este proceso es el mismo sistema convencional del diodo, pero asistido magnéticamente, lo cual genera un confinamiento de los electrones

secundarios, que permiten aumentar el promedio de colisiones ionizantes y la velocidad de pulverización, así como la cantidad de material depositado sobre los sustratos. (Ver figura 5).

Figura 5. Magnetron convencional utilizado en un sistema de sputtering.



Fuente: Yamamoto S, "Effect of substrate bias voltage on the properties of arc ion-plated TiN films onto high speed steels", Materials, No.5, 1996.

El magnetron genera un fuerte campo magnético que confina los electrones secundarios. Los electrones capturados se caracterizan por largos recorridos en forma de espiral, lo cual aumenta el promedio de colisiones ionizantes. De esta forma se incrementa la densidad del plasma y por lo tanto se aumentan las

velocidades de espurreo y se disminuyen las presiones de trabajo, logrando así que el proceso tenga mayor eficiencia⁵.

El sputtering magnetrón es una de las técnicas más versátiles, ya que permite el depósito de casi todos los materiales, su funcionamiento es relativamente simple y es fácil de escalar para procesos industriales. Lo anterior permite que el sistema se haya desarrollado con mayor rapidez que otros métodos de depósito y sea uno de los básicos en la industria de los recubrimientos superficiales.

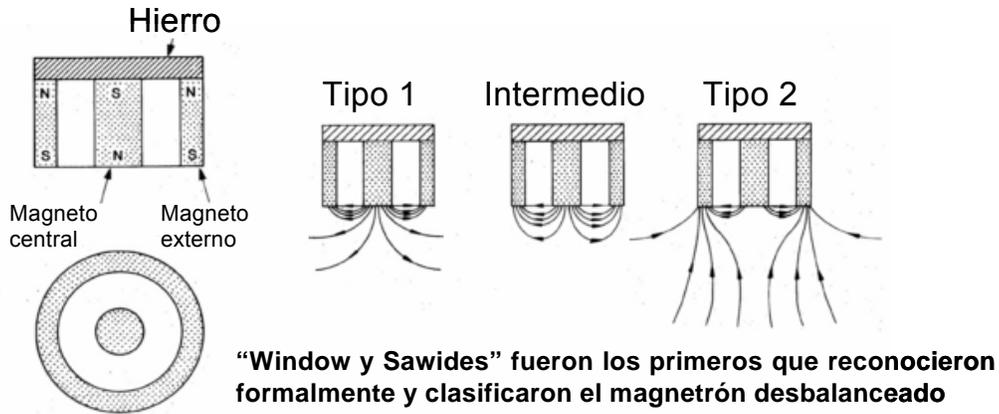
2.1.5 Sputtering con Magnetron Desbalanceado “UBM”

La aplicación inicial de espurreo d.c. para el depósito de películas duras en componentes industriales se vio limitada por el bajo grado de ionización y la no homogeneidad del plasma. Posteriormente, con el fin de mantener una alta tasa de espurreo del blanco, los magnetrones fueron diseñados y usados en el llamado modo balanceado, con una configuración del campo magnético que suprime el escape de los electrones de la región del cátodo o blanco. Sin embargo, en los años 80, Window y Savvides, (ver figura 6), demostraron que es posible mantener un buen espurreo del blanco y al mismo tiempo aumentar la densidad de corriente iónica hacia el sustrato con una configuración del campo magnético diferente, el llamado modo desbalanceado (UBM). La diferencia principal entre una magnetron convencional y el desbalanceado, es el grado de confinamiento al cual esta sometido el plasma⁶.

⁵ L. CUNHA, M. Andriatschky, K. Pischow, Z. Wang, A. Zarychta, A. S. Miranda, A. M. Cunha, Surf. Coat. Technol, 2000, 27p, 29p.

⁶ DONALD R. Askeland, Ciencia e Ingeniería de los materiales, 4 edición, Edit. Thomson, 2003, 110p.

Figura 6. Esquema del trabajo de Window y Savvides sobre magnetrón desbalanceado en 1986.



Fuente: B. Window y N. Savvides, J. Vac. Sci. A4(2) 196 (1986)

En el sistema convencional solo una pequeña región en frente del blanco contiene un plasma denso. Por lo tanto solo esta parte recibe bombardeo iónico. Window y Savvides han propuesto que incrementando el campo magnético en los magnetos externos, algunas de las líneas del campo magnético se dirigen hacia el sustrato, de esta forma algunos electrones que se encuentran confinados en el blanco pueden seguir en forma de trayectorias helicoidales las líneas de campo magnético, en dirección al sustrato. Estos electrones arrastran iones del blanco hacia el sustrato por atracción coulombiana, logrando así una mayor densidad de corriente iónica sobre el sustrato, la cual ha demostrado ser eficiente para modificar la microestructura de las películas y en particular para formar depósitos con mayor densidad y menor rugosidad.

2.1.7 Imanes permanentes.

Los imanes de tierras raras como el Neodimio y Samario representan, la última generación de los materiales magnéticos. Dichos imanes poseen propiedades muy superiores a las tradicionales. Su alta coercitividad y su elevada remanencia

permiten nuevos diseños. La utilización de estos imanes está condicionada, sobre todo, por el factor temperatura.

El imán de neodimio (NdFeB), compuesto por neodimio (Nd), hierro (Fe) y boro (B), posee una potencia de siete a diez veces superior a los materiales magnéticos tradicionales. Resulta menos frágil, aunque para protegerlo de la oxidación debe recubrirse con baños de zinc, níquel u otros materiales adecuados.

Figura 7. Imanes de alto poder



Fuente: http://www.ima.es/versio_html/es/imanes_tierras_raras/

2.1.8 Plasma.

El plasma es conocido como el cuarto estado de la materia, se puede definir como una clase particular de un gas de partículas cargadas que contiene iones y electrones libres capaces de moverse en forma independiente.

Desde el punto de vista eléctrico, se le considera como un sistema cuasineutro constituido por un gran número de partículas cargadas que exhiben movimientos colectivos. Las partículas cargadas permiten que el plasma sea un gas conductor capaz de auto-apatallarse frente a campos eléctricos. En esta definición, el término cuasineutro significa que la concentración de cargas positivas será

prácticamente igual a la concentración de cargas negativas⁷. Puesto que en el plasma existe muy poca restricción al movimiento de las cargas, tiende a mantener un estado de neutralidad eléctrica aún en regiones muy pequeñas.

Cualquier acumulación de carga de un solo signo en una cierta región del plasma producirá una fuerza atractiva para las cargas opuestas lo suficientemente grande como para recuperar el equilibrio de la carga eléctrica muy rápidamente. De esta manera, si el plasma no es forzado por campos eléctricos o magnéticos muy intensos a mantener acumulaciones locales de carga, permanecerá en un estado de cuasineutralidad. El término comportamiento colectivo significa que las partículas cargadas tienden a re-agruparse en caso de producirse una perturbación electrostática en el plasma, de esta forma se puede aislar el plasma de dicha perturbación.

Las fuerzas dominantes en el interior del plasma son las eléctricas; cada ion y cada electrón en el interior de un plasma pueden sentir la influencia de muchas partículas a su alrededor, de manera que el comportamiento del plasma estará determinado por interacciones colectivas y no solamente por la interacción entre dos partículas individuales. Un ejemplo típico se presenta al introducir dentro de un plasma un cuerpo extraño cargado negativamente (cátodo). Como respuesta inmediata un flujo de iones positivos se agrupa alrededor del cuerpo y un flujo de electrones se mueve en dirección opuesta, de esta forma se produce una zona de carga espacial positiva que cancela la perturbación, manteniendo así la neutralidad del plasma⁸. Industrialmente se conocen dos tipos de plasma:

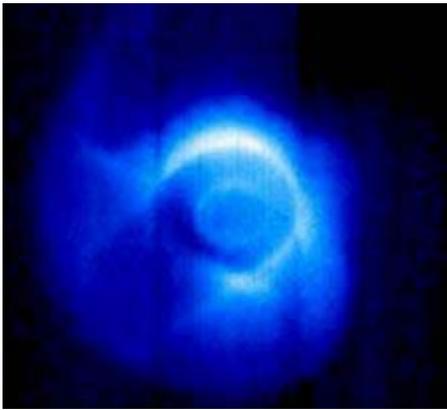
⁷ ADOLFO, Rodrigo, Tercer curso de procesamiento de materiales por plasma: Descargas eléctricas en gases de baja densidad, JICA y CENA, Buenos Aires, 2000.

⁸ OLAYA FLOREZ, J.J. Recubrimientos de TiN sobre el acero AISI M2 por el método de sputtering reactivo, Maestría, 2002, 38p, UNAL, Facultad de Física.

- Plasma frío de no equilibrio o de baja densidad

Se caracterizan por formarse a bajas presiones y por que la temperatura de los electrones es mayor que la de las demás especies (iones, átomos neutros, etc), sus principales aplicaciones son: deposición química de vapor (CVD), modificación superficial y deposición física de vapor (PVD).

Figura 8 Plasma frío



Fuente http://www.geocities.com/edug2406/estudio_plasma.htm

- Plasmas térmicos o de equilibrio.

Se caracteriza por que se presentan en gases ionizados a alta presión en donde la temperatura de todas las especies es aproximadamente igual, llegando a temperaturas superiores a los 3000°K sus principales aplicaciones son proyección por plasma, hornos, corte y soldadura.

Figura 9 Corte por plasma térmico.



Fuente: <http://www.ifi.unicamp.br/gftp/aplicacoes%20geral/aplicacoes.htm>

2.2 MARCO TEORICO

2.2.1 Generación de plasma frío.

Cuando a un gas ordinario se le aplica un campo eléctrico, pueden desprenderse algunos de los electrones orbitales, quedando los átomos ionizados y electrones libres. Al incrementar el campo eléctrico, los electrones libres son acelerados, colisionando con otros átomos y desprendiendo a su vez más electrones para que el plasma se mantenga estable. Esto se denomina descarga eléctrica de la cual existen diferentes tipos, entre los cuales se destacan las descargas luminiscentes, que son las más importantes en la tecnología de los recubrimientos duros.

Las descargas luminiscentes utilizan como conductor eléctrico un gas en estado ionizado. El gas ionizado se produce mediante una descarga eléctrica a baja presión. Los mecanismos esenciales en el plasma son excitación y relajación,

ionización y recombinación. Produciéndose una serie de colisiones importantes, que forman un ambiente altamente reactivo. Estas colisiones son de dos tipos⁹:

- Las colisiones elásticas se presentan cuando existe un intercambio de energía cinética de las especies que componen el gas ionizado. Los electrones chocan con las sustancias pesadas (iones y átomos neutros) o los iones colisionan con las especies neutras.
- Las colisiones inelásticas se presentan cuando la energía cinética de una de las especies se transforma en energía interna de otra especie, de tal forma que la energía cinética del sistema disminuye. Además permiten la creación de especies con mayor reactividad química¹⁰. Estas descargas luminosas también llamadas “glow discharges o de cátodo frío”, se producen en un sistema de descarga gaseoso de corriente continua. Este sistema consta de un gas a baja presión en una cámara de vacío compuesta por dos electrodos que están conectados a una fuente de corriente continua de tensión variable. La corriente del sistema se controla con una resistencia externa R.

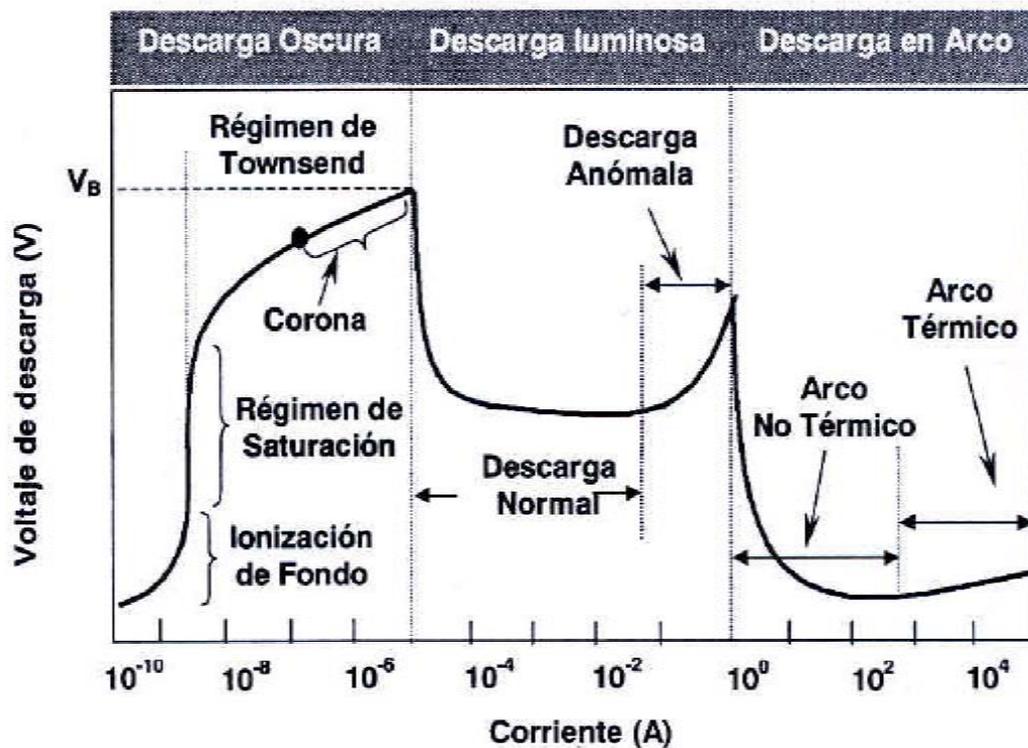
El proceso para producir ionización en el gas se inicia al aplicar progresivamente un voltaje entre los electrodos hasta producir una descarga que puede ser o no auto sostenible.

⁹ CHEN, Francis.F., Introduction to Plasma Physics. Plenumm Press, Corr printing, 2da ed., 1984., 3p, 19p

¹⁰ CHEN, Francis.F., Introduction to Plasma Physics. Plenumm Press, Corr printing, 2da ed., 1984., 15p

De la figura 10 la descarga no auto sostenible o conocida como Townsend, se caracteriza por utilizar electrones libres de fuentes ionizantes externas o naturales. Se inicia con el primer incremento de voltaje entre los electrodos, a fin de generar un campo eléctrico que proporcione energía cinética y aceleración a los electrones. Sin embargo, esta energía no es suficiente para producir nuevos electrones por ionización, de manera que la corriente eléctrica aumenta hasta llegar a un valor de saturación. Si se sigue aumentando el voltaje, los electrones adquieren mayor energía, siendo capaces de generar nuevos electrones y produciendo un pequeño incremento de corriente. En estas condiciones la descarga no emite luz; en caso de retirar la fuente externa de ionización, la descarga desaparece.

Figura 10. Características del plasma de corriente continua.



Fuente: Plasmas e Interacciones Partículas –Superficies, Ingeniería de Superficies, Departamento de Química Inorgánica, Universidad de Sevilla

Al continuar aumentando el voltaje entre los electrodos se produce un aumento de la corriente, lo cual produce el cambio de la transición de descarga de Townsend a una que es luminosa y auto sostenible. El voltaje mínimo para que se produzca esta transición se le conoce como voltaje de ruptura (V_R), que se caracteriza por la emisión de luz visible y por que se desarrolla una corriente auto sostenida. Paschen demostró en 1989¹¹ que V_R depende de la distancia entre electrodos, d , y la presión del gas, p . La regla de Paschen permite conocer el valor crítico del producto $p \cdot d$ donde el voltaje de ruptura es mínimo para diferentes tipos de gases¹².

A la primera etapa de la descarga estable se le denomina “descarga normal”, se caracteriza por el aumento en el voltaje externo que hace crecer la corriente pero no la caída de voltaje entre los electrodos. Lo anterior se debe a que no toda la superficie del cátodo participa en la descarga. En el momento que esto suceda, se inicia una descarga anormal que se caracteriza por el incremento del voltaje con la corriente. Este tipo de descargas son las utilizadas para el depósito de películas, ya que en esta zona se produce un alto bombardeo de iones sobre el cátodo. En esta zona la relación corriente-voltaje es casi lineal, sin embargo al continuar aumentando la corriente, el voltaje disminuye por debajo del V_R . De esta manera la descarga anormal pasa a ser una descarga de arco eléctrico.

¹¹ ADOLFO, Rodrigo, Tercer curso de procesamiento de materiales por plasma: Descargas eléctricas en gases de baja densidad, JICA y CENA, Buenos Aires, 2000.

¹² UNIVERSIDAD DE SEVILLA, Plasmas e Interacciones Partículas –Superficies, Ingeniería de Superficies, Departamento de Química Inorgánica.

2.2.2 Recubrimientos de CrN

Los recubrimientos de CrN_x han venido reemplazando en muchas aplicaciones al TiN^{11} debido a que sus propiedades mecánicas son muy similares. Posee una mayor resistencia a la oxidación a altas temperaturas y tienen la ventaja de que las tasas de depósito para el CrN son hasta 3 veces mayores que las del TiN^{13} . Por otra parte, resultados preliminares han mostrado que el CrN tiene también alta densidad, lo cual significa una mejor resistencia a la corrosión comparada con la que puede tener la capa de cromo duro aplicado galvánicamente, de tal manera que podría reemplazarlo en algunas aplicaciones, debido principalmente a que el CrN tiene mayor dureza y excelente resistencia a la corrosión. Adicionalmente, la producción del cromo duro produce problemas de contaminación ambiental generada durante el proceso electrometalúrgico, además de los conocidos problemas cancerígenos del Cr^{+6} , precursor que se usa para depositar el cromo duro¹⁴.

Por otra parte, se ha identificado por P. Engel, K. Pischow, B. Nvinsek, T. Hurkman, entre otros, que por diferentes métodos de deposición se pueden obtener varias fases de CrN al aumentar el contenido de nitrógeno, entre ellas: Cr, solución sólida Cr-N, Cr_2N y CrN_x . El CrN_x tiene una estructura con bajos esfuerzos residuales, lo cual permite el depósito de espesores mucho más gruesos que otros recubrimientos producidos por PVD. Los bajos esfuerzos residuales internos han permitido crecer películas monocapa de CrN con espesores mayores de 10 micras sin problemas de adherencia. Este efecto es especialmente importante ya que en los recubrimientos monocapas depositados mediante procesos PVD, el espesor en componentes sometidos a desgaste está

¹³ OLAYA FLOREZ, J.J, Nitruros metálicos de transición depositados con espurreo asistido con campos magnéticos variables, 2005, 69 p, PhD, MSc, Ing. UNAM, Facultad de Química.

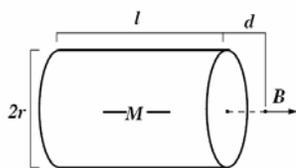
¹⁴ OLAYA FLOREZ, J.J. Recubrimientos de TiN sobre el acero AISI M2 por el método de sputtering reactivo, Maestría, 2002, 70p, UNAL, Facultad de Física.

normalmente limitado a 6 micras. Esto resulta de gran importancia, ya que el recubrimiento de CrN proveería un mayor volumen de material para ser sometido a desgaste. El CrN también se caracteriza por tener una temperatura de oxidación sobre los 700 °C, que lo hace muy efectivo para aplicaciones en herramientas de corte para maquinar materiales como aleaciones de titanio y cobre-níquel, que tienen baja afinidad por el Cr.

2.2.3 Campo magnético para imanes permanentes.

Usando la ley de Biot-Savart que determina la contribución del campo magnético de una partícula en movimiento, es posible calcular la densidad de flujo a lo largo del eje de imanes permanentes de forma simple. Sólo se requieren las dimensiones y la inducción residual (B_r) del material. Esta aproximación iguala los imanes permanentes a los solenoides con la misma forma. Estas ecuaciones son herramientas muy útiles para el uso del imán permanente. Debe tenerse en cuenta que la dirección de flujo será normal a la superficie del polo a lo largo del eje. Para un imán cilíndrico magnetizado axialmente:

$$B = \frac{Br}{2} \left[\frac{d+l}{\sqrt{(d+l)^2 + r^2}} - \frac{d}{\sqrt{d^2 + r^2}} \right] \quad (\text{Gauss}) \quad (1)$$



Donde:

r es el radio. (mm)

l es la longitud. (mm)

B_r es la inducción residual. (Gauss)

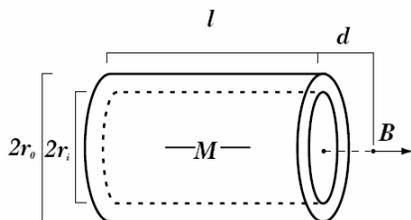
d es la distancia desde la superficie a lo largo de su eje. (mm)

Para un tubo cilíndrico, calcular la densidad de flujo a un punto fuera del eje es más complejo. Hay 3 componentes de densidad de flujo para considerar. Se debe tener en cuenta que las fórmulas de aproximación a un solenoide son más largas.

Al hacer el contraste correspondiente de los resultados de la ecuación para cilindros, es posible hacer el análisis de los imanes de geometría más compleja. Por ejemplo, se puede calcular la densidad de flujo a lo largo del eje de un tubo cilíndrico.

Substrayendo la densidad de flujo de un cilindro de diámetro interior ($2r_i$) de la densidad de flujo de un cilindro de diámetro externo ($2r_o$), se obtiene la densidad de flujo del tubo.¹⁵

$$B = \frac{Br}{2} \left[\left(\frac{d+l}{\sqrt{(d+l)^2 + r_o^2}} - \frac{d}{(d^2 + r_o^2)} \right) - \left(\frac{d+l}{\sqrt{(d+l)^2 + r_i^2}} - \frac{d}{(d^2 + r_i^2)} \right) \right] \quad (\text{gauss}) \quad (2)$$



Donde:

B es la inductancia magnética.

Br es la densidad residual.

d es la distancia desde la superficie.

l es la longitud.

r_o el radio interno.

¹⁵ DEXTER MAGNETIC TECHNOLOGIES COMPANY, Reference and design manual, 27p

r_i el radio externo.

Para un imán en contacto directo con acero, puede usarse una aproximación. Teniendo en cuenta que la relación longitud/diámetro debe ser menor a 2, se puede usar la siguiente formula¹⁶:

$$F = 0.577Br^2l\sqrt{A} \quad (\text{lbf}) \quad (3)$$

Donde:

F es la fuerza magnética (lbf)

Br es la densidad residual (Kgauss)

A es el área en contacto (inch²)

l es la longitud del imán (inch)

El factor de conversión al sistema internacional es 1 lbr = 4.448 N

Entonces:

$$F = 4.448 * 0.577Br^2l\sqrt{A} \quad (\text{N})$$

$$F = 2.566Br^2l\sqrt{A} \quad (\text{N}) \quad (4)$$

¹⁶ DEXTER MAGNETIC TECHNOLOGIES COMPANY, Reference and design manual, 32p

2.2.4 Transferencia de calor.

Para este proyecto es necesario tener como punto de referencia la primera ley de la termodinámica, conocida como Principio de Conservación de Energía (en ella se afirma que la energía no se crea ni se destruye, se transforma). El Principio de Conservación de Energía (o balance de energía) define que el cambio de energía neto de un sistema es igual a la energía que entra menos la energía que sale del sistema.

La energía es una propiedad y esta no varía, a menos que el sistema cambie de estado, de tal forma que el cambio de energía es igual a cero. Lo anterior se puede expresar de la forma:

$$\dot{E}_{ent} = \dot{E}_{sal} \quad (5)$$

La mayoría de aparatos de ingeniería en los que hay un flujo de masa hacia adentro y hacia fuera del sistema, se consideran como volumen de control y generalmente, se analizan en condiciones estacionarias. Ningún cambio con respecto al tiempo significa estado estacionario y sin cambios de posición (uniforme). De esta manera:¹⁷

$$\dot{m} = \rho V A c \quad (\text{kg/s}) \quad (6)$$

$$\dot{V} = V A c = \frac{\dot{m}}{\rho} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (7)$$

¹⁷ YUNUS A., Cengel, Transferencia de Calor, Segunda Edición, Mc Graw Hill, 2003, 13p.

$$\dot{Q} = m C_p \Delta T \quad (\text{KJ/s}) \quad (8)$$

Donde:

\dot{m} es el gasto de masa.

ρ es la densidad.

V es la velocidad media del fluido.

A_c es el área de la sección transversal.

\dot{V} es el gasto de volumen.

\dot{Q} es la velocidad neta de transferencia de calor.

C_p es el calor específico.

ΔT es la diferencia de temperatura.

El flujo dentro de un sistema puede ser laminar o turbulento, el número de Reynolds (Re) determina en que régimen se encuentra el fluido. El número de Reynolds para un tubo circular se define como:¹⁸:

$$\text{Re} = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (9)$$

Donde

D es el diámetro del tubo.

μ es la viscosidad dinámica.

¹⁸ YUNUS A., Cengel, Transferencia de Calor, Segunda Edición, Mc Graw Hill, 2003, 422p.

Para flujo por tubos no circulares, el número de Reynolds se calcula con diámetro equivalente, este se denomina diámetro hidráulico (Dh).

$$Dh = \frac{4Ac}{P} \quad (10)$$

Donde:

P es el perímetro del área transversal.

Los rangos del número de Reynolds para determinar el tipo de flujo son:

$Re < 2300$	Flujo laminar
$2300 \leq Re \leq 10000$	Flujo transitorio
$Re > 10000$	Flujo turbulento

2.2.5 Resistencia Mecánica de juntas.

Para una junta soldada a carga axial la fuerza máxima permisible esta dada por:

$$F = \frac{S_s L b \cos 45^\circ}{k_f} \quad (11)$$

Donde

S_s es el esfuerzo nominal.

K_f es el coeficiente de reducción por concentración de esfuerzos.

L es la longitud del cordón de soldadura.

b es el espesor de cordón de soldadura.

Para una junta atornillada el esfuerzo en la rosca del tornillo esta dado por¹⁹:

$$S_b = \frac{3Wh}{\pi * n * d_m * b^2} \quad (\text{Pa}) \quad (12)$$

Donde

W es la carga axial sobre la rosca

h es la altura de la cresta de la rosca

n es el número de hilos de la rosca sometidos a la carga

d_m es el diámetro medio de la rosca

b es el ancho de la sección de la rosca en el núcleo.

¹⁹ FAIRES, Virgil F, Diseño de Elementos Mecánicos, Limusa, 1994, 622p.

3. METODOLOGÍA

3.1 ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN

El enfoque de la investigación es de carácter empírico-analítico, ya que para su desarrollo es necesario tener un conocimiento previo del equipo y establecer un estudio sobre recubrimientos duros y su influencia en las propiedades tribológicas de los materiales.

Inicialmente se debe determinar como funciona el equipo en la actualidad, que partes lo componen, función de cada una de ellas y que influencia tiene en el proceso de recubrimiento.

3.2 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN DE USB / SUB-LÍNEA DE FACULTAD / CAMPO TEMÁTICO DEL PROGRAMA

La línea de investigación es Tecnologías actuales y sociedad, la sub-línea de la facultad es Control y Automatización de Procesos y el campo temático del programa es Automatización industrial.

3.3 TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

Para la recopilación de información las fuentes se centran en la bibliografía sobre magnetismo, transferencia de calor y catálogos de accesorios para vacío.

Por otro lado, los motores de búsqueda de Internet arrojan información sobre el funcionamiento de los equipos de sputtering, plasma, vacío, recubrimientos y materiales. Así mismo, los trabajos de grado que contienen algún tipo de

información útil para el desarrollo de este proyecto también se convierten fuente importante en el proceso de recopilación de información.

Para la sustentación de este proyecto se realizarán graficas en Solid Edge para tener una visión más amplia de cómo será la forma y apariencia de las piezas. Los registros fotográficos son pieza clave para mostrar los avances logrados en el desarrollo del proyecto, los cuales se harán después de construidas las piezas y del montaje en el equipo de Sputtering. Para realizar las gráficas de análisis del campo magnético se utilizará el programa MATLAB, por ser el más adecuado para este tipo de investigación.

4. DESARROLLO INGENIERIL

4.1 BASES DEL DISEÑO

El campo magnético es la clave del magnetrón, las líneas de campo que se establezcan sobre el blanco determinaran la forma del plasma, se ha mencionado con anterioridad el plasma frío que, se caracteriza por su baja temperatura, comparada con la temperatura de un plasma térmico.

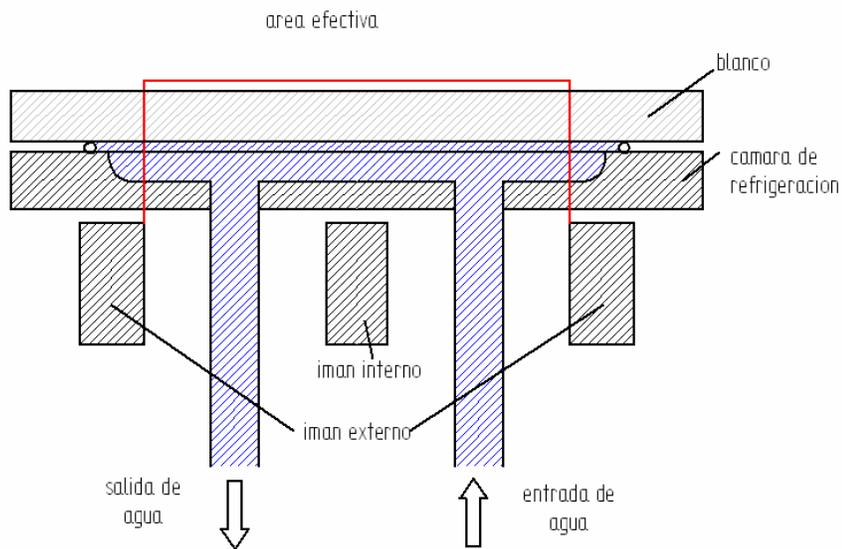
Para el diseño del magnetrón desbalanceado se debe establecer una idea general de capacidad y forma, por una parte estará definido por el blanco, este posee el tamaño promedio que se usa en cámaras de vacío con finalidad investigativa en las cámaras de los laboratorios de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia, tiene forma de disco con diámetro de 100 mm y espesor de 5 mm.

Este blanco es el que provee el material de aporte en el recubrimiento, una característica importante del proceso de sputtering es que aproximadamente el 20% de la energía entregada por la fuente es consumido por el plasma en el desprendimiento de partículas del blanco y el 80% restante se convierte en calor. Las altas temperaturas pueden afectar características físicas del blanco o de los imanes, que deben estar lo más cerca posible del blanco y todos los materiales ferromagnéticos por encima de cierta temperatura pierden sus características magnéticas totalmente, esta se denomina la temperatura Curie. Esto genera la necesidad de refrigerar el blanco, teniendo en cuenta que el equipo del laboratorio cuenta con magnetrón balanceado, el cual se refrigera haciendo recircular agua.

Se tiene en cuenta el área efectiva de desprendimiento de partículas del blanco desde el diámetro interno del imán externo hasta un diámetro menor al diámetro

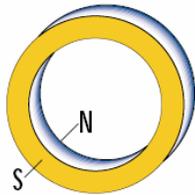
del imán interno, para simplicidad se tomará como área efectiva el diámetro interior del imán externo. (Ver figura 11).

Figura 11 Flujo de Agua



Esta sería la vista al hacer un corte por el centro de la pieza, habría un tubo de entrada y un tubo de salida de agua. En la gráfica se puede observar la disposición de los imanes, un imán externo en forma de anillo y un imán interno en forma de cilindro y sus polarizaciones serían paralelas al espesor (ver figura 12).

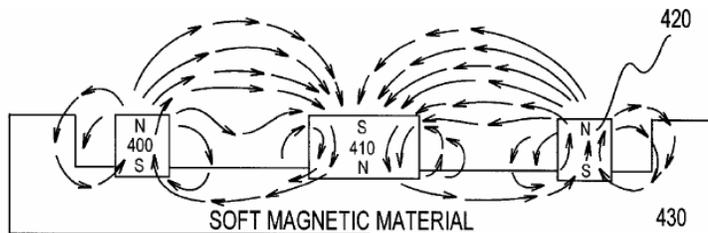
Figura 12 Polaridad imanes



Parallel to Thickness

Fuente: Reference and design manual, Dexter, Magnetic technologies
Con la siguiente configuración.

Figura 13 Configuración de imanes permanentes.



Fuente: Permanent Magnet Structure for use in a Sputtering Magnetron, Richard E. Stelter.

La figura 13 muestra el sentido de polarización de los imanes y la dirección, aunque no muestra el resultado que se espera en las líneas de campo ya que representa un magnetrón balanceado.

Estudios realizados como el de la compañía DEXTER Magnetic Technologies muestran que la manipulación de la distancia de los imanes al blanco mejora las posibilidades de obtener un mejor recubrimiento. Dado que el campo magnético del imán interno con respecto al imán externo es menor, se puede variar la distancia imanes-blanco, una variación del campo sobre el blanco, hasta

finalmente obtener sólo el campo del imán con mayor carga, que en este caso sería el imán externo.

La distancia entre el magnetrón y los sustratos varía entre 3 cm. y 10 cm. Teniendo en cuenta que los sustratos no deben estar sobre las líneas de campo que se cierran entre los dos imanes. Este aspecto es fundamental en el diseño, ya que para la técnica de Sputtering existen bastantes variables que determinan la calidad del recubrimiento, entre ellas, la forma de la cámara, calidad del vacío, cantidad de N, cantidad de Ar, tipo de fuente, voltajes, tipo de sustratos y forma del plasma. En este último radica el desplazamiento de los imanes ya que al variar el campo sobre el blanco se obtendrá un plasma variable.

El magnetrón es el cátodo de la máquina, es necesario que el blanco tenga un contacto eléctrico y que a su vez este aislado con respecto a la carcasa del magnetrón para que no haya continuidad con la cámara de vacío.

Teniendo en cuenta las anteriores consideraciones, se obtendrá el magnetrón desbalanceado.

En general, el material que se utilizará será acero inoxidable 304, por sus propiedades mecánicas, por ser no magnético y por ser comercialmente fácil de conseguir.

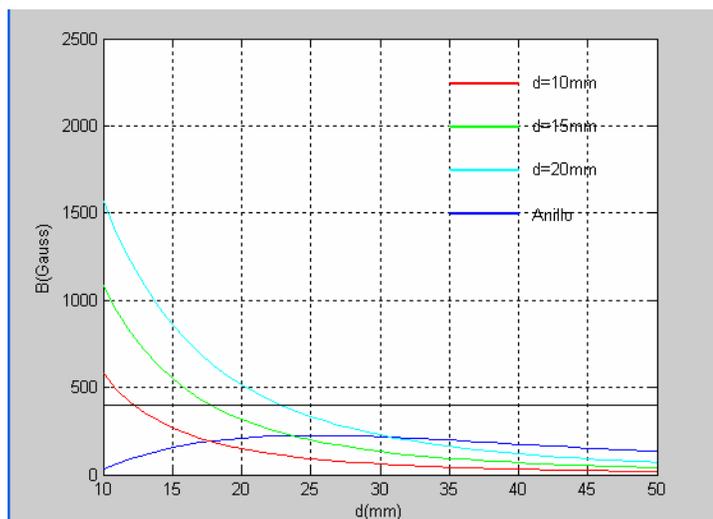
4.2 DISEÑO DE CAMPO MAGNÉTICO.

Se necesita que el campo magnético producido por los imanes sea lo más alto posible, comercialmente existe una gama de imanes llamados súper imanes, tierras raras o neodimium cuya composición esta formada por hierro, boro y neodimium (NbFeB).

Para aprovechar al máximo el blanco, se indagó en el mercado sobre el imán en forma de anillo más grande posible, en Bogotá sólo existen dos empresas distribuidoras de este tipo de imán: Dimetales y la Casa del imán, el proveedor de Dimetales exige una producción de 500 unidades mínimo o el pago de los moldes para poder hacer la producción e importación, el proveedor de la Casa del Imán cuenta entre sus productos con un imán en forma de anillo con un diámetro externo de 63.5 mm, diámetro interno de 46 mm, altura de 32mm y grado 35 siendo necesaria su importación, y establecerlo como punto de partida para el diseño (Ver Anexo A).

Para obtener un magnetrón desbalanceado de tal forma que las líneas de campo magnético se dirijan al sustrato, es necesario que el imán externo posea una densidad de campo magnético mayor al imán interno, aplicando las ecuaciones 1 y 2 se obtienen las graficas de imanes cilíndricos a varios diámetros y del anillo en MATLAB (Ver Anexo B) para establecer gráficamente su comportamiento.

Figura 14: Curvas de campo magnético imanes permanentes.



Se ha establecido en la práctica que se obtiene un buen plasma con un campo magnético de aproximadamente 400 Gauss en el centro blanco según J. J. Olaya,

pero entre más grande es el imán interno será menor el área efectiva de la cual se desprenden partículas del blanco²⁰. Según la figura 14, se puede optar por un imán (Frase incoherente) de 15 mm de diámetro. Teniendo en cuenta que la superficie del blanco se encontrará separada de los imanes por el sistema de refrigeración y por el mismo espesor del blanco, inicialmente se asumirá una distancia entre 10 y 20 mm,

La fijación de los imanes se hará por medio de un material ferromagnético para simplicidad de esta se ha escogido un acero 1020. La fuerza de sujeción de los imanes está dada por la ecuación 3, entonces:

Fuerza de sujeción para cilindro.

$$F = \left(0.577(11.8kgauss)^2 (32mm * \frac{1inch}{25.4mm}) \sqrt{\pi * (7.5mm * \frac{1inch}{25.4mm})^2} \right) Lbr * \frac{4.444822N}{1Lbr}$$

$$F = 235.6378 N$$

Fuerza de sujeción para tubo cilíndrico.

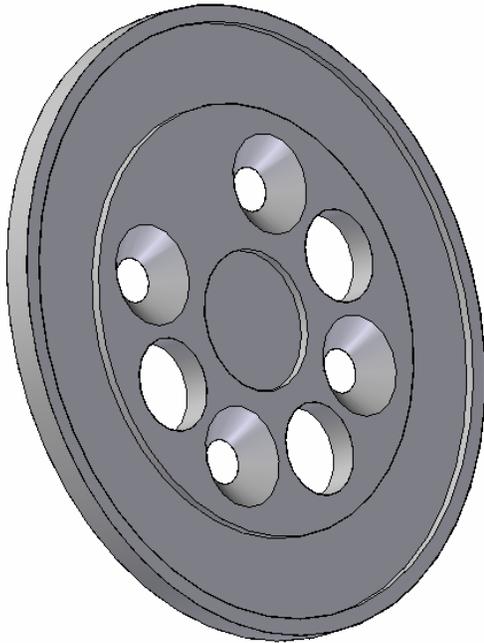
$$F = \left(0.577(11.8kgauss)^2 (32mm * \frac{1inch}{25.4mm}) \sqrt{\pi * ((\frac{31.5}{25.4})^2 - (\frac{23}{25.4mm})^2)} \right) Lbr * \frac{4.444822N}{1Lbr}$$

$$F = 901.8026 N$$

Para la sujeción de los imanes la pieza tendrá canales que restringen el movimiento lateral como se puede ver en la siguiente figura:

²⁰ MUHL SAUNDERS, Stephen, Jefe del Departamento de Estado Sólido y Criogenia, UNAM.

Figura 15: Porta-iman



Los cuatro agujeros avellanados serán utilizados para unir la pieza a un aislante eléctrico, por los otros tres orificios pasarán: Tubo de entrada de agua, un tubo de salida de agua y un contacto eléctrico.

Haciendo un análisis de la distancia entre el porta sustratos y la pared de la cámara de vacío se define la posición de la carcasa del magnetrón.

La distancia mínima entre sustratos y blanco debe ser 30 mm, de la Figura 14 podemos observar que a una distancia de 25mm las líneas de campo ya no se dirigen hacia el imán interno, cambian su trayectoria hacia los sustratos. Esta distancia es medida desde la cara frontal de los imanes, teniendo en cuenta el espesor de cámara de refrigeración y del blanco, sobre la cara del blanco esta distancia estaría entre 10 y 15 mm.

El espurreo no se genera sobre el plasma si no a cierta distancia de él. El equipo de espurreo cuenta con un sistema que permite acercar el porta sustratos al

blanco, la distancia entre porta sustratos a la parte interna de la tapa de uno de los orificios es de aproximadamente 45mm

De esta forma se define que el magnetrón estará inserto en la cámara una distancia de 15mm, como consecuencia se tendrá un rango de distancia blanco sustrato de 30 a 150 mm. A distancias más cortas se espera una mayor tasa de depósito pero baja homogeneidad y a mayor distancia se espera uniformidad del recubrimiento pero baja tasa de depósito²¹.

4.3 DISEÑO SISTEMA DE REFRIGERACIÓN

En este trabajo, el sistema de refrigeración se denominará cámara de refrigeración. Sus dimensiones estarán definidas por el flujo de agua necesario para mantener el blanco a una temperatura por debajo de 45 °C. Debido a que el desprendimiento de partículas posee un radio efectivo igual al diámetro interno del imán externo, es necesario que la cavidad por donde recircula el agua sea mayor a este diámetro y así evitar una alta transferencia de calor a zonas que no estarán en contacto con la circulación de agua como lo es la junta atornillada para fijar el blanco.

Existen muchas variables para determinar cual será la energía consumida por el plasma y determinar cuanta energía se convierte en calor, estudios antes

^o OLAYA FLOREZ, J.J. Recubrimientos de TiN sobre el acero AISI M2 por el método de sputtering reactivo, Tesis de Maestría, 2002, 210p, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Física.

desarrollados por J. J. Olaya y Stephen Muhl Saunders, plantean que entre el 80% y el 90% de la energía de la fuente DC se convierte en calor ²²

Analizando la figura 10 se puede observar que una descarga normal de plasma esta entre 0.1 y 1 A y voltajes entre 400 y 1000 V (datos suministrados por el laboratorio), la potencia máxima a la cual se encontrará expuesto el magnetrón será:

$$P = .9 * V_{\max} * I_{\max}$$

$$P = .9 * 1 * 1000$$

$$P = 900W$$

P (W) es la potencia que se convierte en calor, V_{max} es el voltaje máximo en voltios e I es la corriente máxima en amperios. Asumiendo estado estacionario y uniforme se hace un balance de energía (ecuación 5 y 8).

$$\dot{E}_{ent} = 900W$$

$$\dot{E}_{sal} = m C_p \Delta T$$

$$900W = m C_p \Delta T$$

$$m = \frac{900W}{C_p \Delta T}$$

$$m = \frac{900W}{C_p \Delta T}$$

De las tablas se obtienen las propiedades del agua para una temperatura promedio de 35 °C (ver Anexo C):

²² MUHL SAUNDERS, Stephen, Jefe del Departamento de Estado Sólido y Criogenia, UNAM.

$$C_p = 4178 \frac{J}{kg^\circ C}$$

$$\rho = 994 \frac{kg}{m^3}$$

$$\mu = 0.720 * 10^{-3} \frac{kg}{m * s}$$

Entonces:

$$\dot{m} = \frac{900W}{4178 \frac{J}{kg^\circ C} (25 - 45)^\circ C}$$

$$\dot{m} = 0.0108 \frac{kg}{s}$$

De la ecuación 7 establecemos el gasto volumétrico.

$$\dot{V} = \frac{0.0108 \frac{kg}{s}}{994 \frac{kg}{m^3}}$$

$$\dot{V} = 10.86 * 10^{-6} \frac{m^3}{s}$$

El gasto volumétrico teórico es de $10.86 * 10^{-6} m^3/s$. Los laboratorios del edificio de Física de la Universidad Nacional de Colombia donde se encuentra el laboratorio de superconductores y nuevos materiales cuenta con sistema de recirculación de agua. Luego de varios aforos, un recipiente de 3.43 litros se llena en 2 minutos con 50 segundos. El gasto volumétrico práctico equivalente es:

$$\dot{V}_p = 20.17 * 10^{-6} m^3/s$$

Se presume que la velocidad media es más alta en la salida de los tubos, cuyo diámetro interno es de $7\text{mm}=7*10^{-3}\text{m}$. Se despeja de la ecuación 7 la velocidad media y se reemplaza en la ecuación 9.

$$V = \frac{\dot{V}_p}{Ac}$$

$$\text{Re} = \frac{\rho \left(\frac{\dot{V}_p}{Ac} \right) D}{\mu} = \frac{\rho \dot{V}_p D}{\mu Ac}$$

$$\text{Re} = \frac{994 * 20.17 * 10^{-6} * 7 * 10^{-3}}{0.72 * 10^{-3} * \pi * (3.5 * 10^{-3})^2}$$

$$\text{Re} = 5064$$

El flujo por la tubería es transitorio.

Al hallar un área promedio de la cámara de refrigeración se obtiene.

$$Ac_{prom} = 6 * 10^{-2} * \text{sen}45 * 4 * 10^{-3}$$

$$Ac_{prom} = 169.71 * 10^{-6} \text{ m}^2$$

De la ecuación 10 se obtiene:

$$Dh = \frac{4ab}{2(a+b)} = \frac{2ab}{a+b}$$

$$Dh = \frac{2 * 6 * 10^{-2} * \text{sen}45 * 4 * 10^{-3}}{6 * 10^{-2} * \text{sen}45 + 4 * 10^{-3}}$$

$$Dh = 7.3 * 10^{-3} \text{ m}$$

Hallando el número de Reynolds para estas dimensiones tenemos que:

$$\text{Re} = \frac{\rho \dot{V}_p Dh}{\mu Ac}$$
$$\text{Re} = \frac{994 * 20.17 * 10^{-6} * 7.3 * 10^{-3}}{0.72 * 10^{-3} * 169.71 * 10^{-6}}$$
$$\text{Re} = 1197.8$$

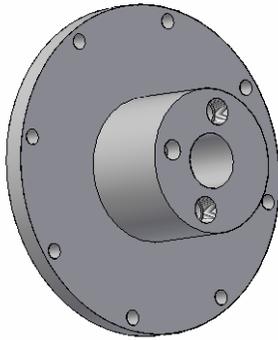
El flujo sobre un área trasversal promedio de la cámara es laminar.

Al tener un caudal más alto al teórico implica un factor de seguridad que se puede expresar de la siguiente forma.

$$n = \frac{\dot{V}_p}{\dot{V}} = \frac{20.17}{10.86}$$
$$n = 1.85$$

Los tubos de entrada y salida son seleccionados por el tipo de conexión con la que se cuenta en el laboratorio. Su diámetro externo es de 10mm, la tubería que más se le acerca es de 10.2mm y espesor de 1.5mm. Para fijarlos a la cámara de refrigeración se propone un una fijación tipo NPT que asegure su estanquidad. Como resultado (Ver figura 16)

Figura 16: cámara de refrigeración.

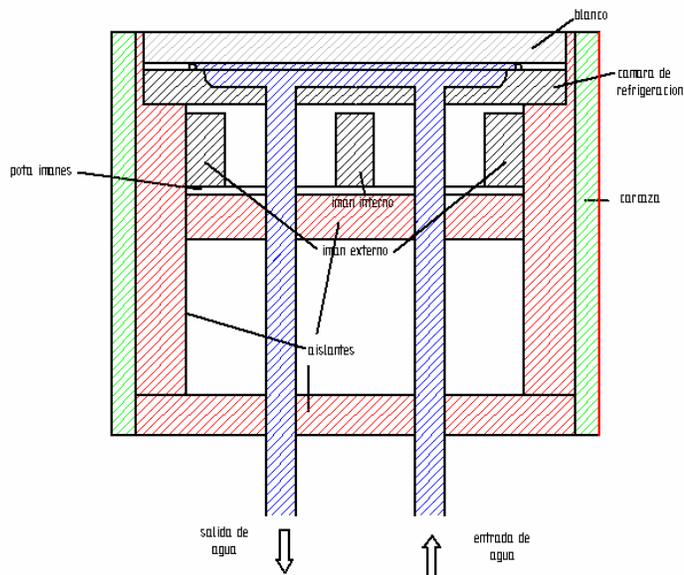


Para evitar pérdidas y mantener el flujo laminar los orificios pasantes se taladran con el diámetro interno del tubo, y se abocan a la profundidad de la rosca NPT.

4.4 DISEÑO AISLAMIENTO.

El blanco actúa como cátodo del equipo, este debe estar aislado de la cámara.

Figura 17 Aislamiento



Como se muestra en la figura 17, las partes sombreadas con rojo son aislantes, el blanco estará conectado como cátodo. Así pues, es necesario asegurar un buen aislamiento. Para ello se establece la zona crítica en la parte superior de la figura 17, entre el blanco y la carcasa (sombreado con verde).

Se selecciona para la carcasa un tubo de 4" de Diámetro nominal, Diámetro externo de de 114.3 mm y espesor de 8.57mm y diámetro interno de 97.18mm de acero inoxidable 304, el diámetro externo se maquinará hasta 110mm. La diferencia de diámetros entre el blanco y la carcasa será de 2mm, por consiguiente el material aislante debe tener una constante dieléctrica mayor a 1Kv/mm.

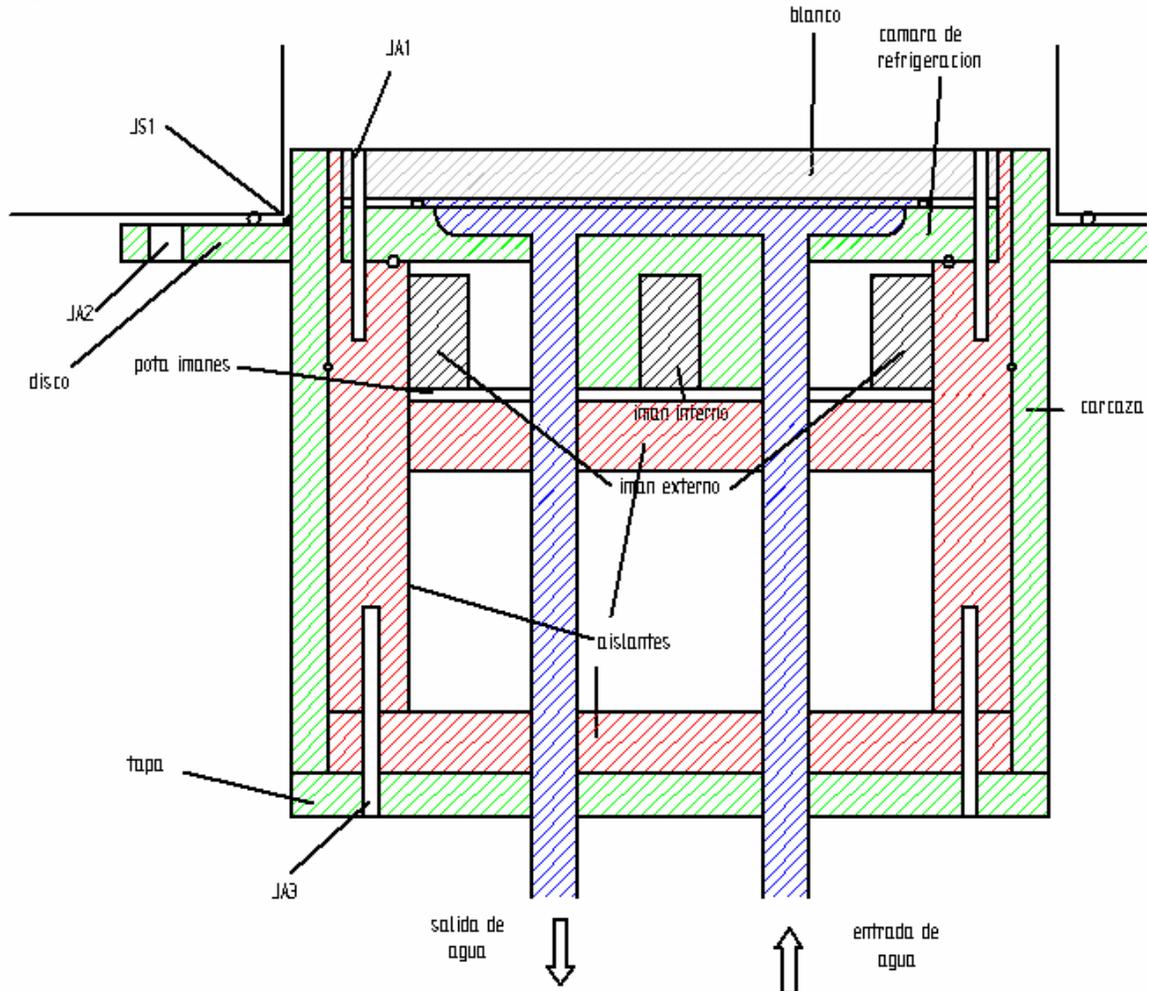
Para el aislante de la tapa y el aislante que sujeta el porta imanes se utilizará PA6 (poliamida 6) o también llamado Nylon 6 por ser un buen aislante, poseer buenas propiedades mecánicas y su bajo costo, comparado con el del teflón (ver Anexo D).

Para definir la selección del material es necesario evaluar la resistencia mecánica de la junta atornillada que unirá el blanco y la cámara de refrigeración al aislante.

4.5 DISEÑO DE JUNTAS.

Se establecen dos tipos de junta en el diseño, junta soldada y juntas atornilladas de la siguiente forma (Ver figura 18):

Figura 18: Juntas



Junta soldada uno (JS1): Presente entre la carcasa y un disco que unirá el magnetrón a la cámara de vacío. Se define como junta soldada ya que se necesita asegurar la estanqueidad, para que el equipo logre alto vacío. El acero inoxidable pierde sus propiedades a altas temperaturas. Lo más adecuado es soldar con alambre en una atmósfera protegida por Argón.

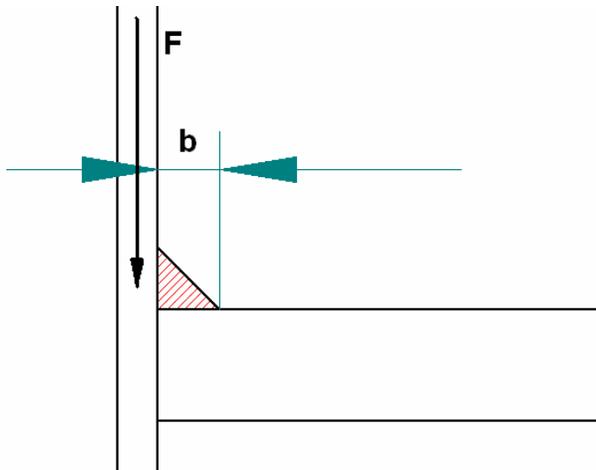
La carga sobre la junta está determinada por la diferencia de presiones, donde la resultante es transversal al cordón de soldadura. Por tablas se obtiene²³. (Ver Anexo E)

$$S_s = 1124 \frac{Kg}{cm^2}$$

$$k_f = 1.5$$

S_s se asume para la soldadura con alambre protegida con atmósfera de argón y K_f se asume para soldaduras en Angulo transversal.

Figura 19: Junta soldada.



²³ NORTON, Robert, Diseño de Maquinas, Primera Edición, Prentice Hall, 7a. ed., 1998, 480p.

De la ecuación 11.

$$F = \frac{1124 * \pi * 11 * .5 * \cos 45^\circ}{1.5}$$

$$F = 9155.3Kg$$

$$F = 89782.8N$$

La fuerza permisible aplicada sobre soldadura es de 89782.8N.

El resultante de analizar la diferencia de presión con presión atmosférica a nivel del mar y presión de vacío igual a cero, es:

$$P = \frac{F}{A}$$

$$F = P * A$$

$$F = 101325 \frac{N}{m^2} * \pi (.05m)^2$$

$$F = 795.8N$$

La Fuerza Permisible es 113 veces mayor a la fuerza aplicada.

Junta atornillada uno (JA1): Unirá el blanco y la cámara de refrigeración al aislante.

El punto crítico de la junta es el material roscado, las cargas presentes son la diferencia de presiones y el par de apriete.

Del análisis de JS1 se obtiene que la fuerza debida a la diferencia de presiones es igual a 795.8N, se parte del supuesto que la junta posee 8 tornillos, entonces la carga para cada tornillo por diferencia de presiones estará dada por:

$$Fu = \frac{F}{8}$$

$$Fu = \frac{795.8}{8} = 99.5N$$

El par de apriete no debe exceder 2 Lbf que equivalen a 8.9N. La carga total sobre la rosca sería igual a:

$$W=99.5+8.9=108.4N$$

El diámetro de los tornillo es de 3/16 rosca UNC por 1" ¼ de longitud.

Paso = 24 hilos por pulgada

El diámetro medio para este tornillo es $dm= 3.461e-3m$

El diámetro externo es $de=4.7625e-3m$

El diámetro interno o del núcleo es $di=3.047e-3m$

De esta forma:

$$h = \frac{de - di}{2}$$

$$h = 0.8577e - 3m$$

$$b = \frac{25.4}{24}e - 3m$$

$$b = 1.0583e - 3m$$

Al calcular n se tiene en cuenta que 12mm de su longitud no rosca, esta es la distancia del blanco y la cámara de refrigeración, entonces

$$n = \frac{(1.25 * 25.4e-3 - 12e-3)}{b}$$
$$n = 18.6614$$

El esfuerzo producido en la hélice de un tornillo es el equivalente al inducido en la rosca, resolviendo la ecuación 12:

$$S_b = \frac{3 * 108.4 * 0.8577e-3}{\pi * 18.6614 * 3.461e-3 * (1.0583e-3)^2}$$
$$S_b = 1.22 \text{ Mpa}$$

La resistencia a la flexión del PA6 es de 1050 LB/cm² (ver Anexo D) o 103Mpa.

El esfuerzo a flexión que resiste el material es mayor que el inducido por las cargas a una razón de aproximadamente 100 veces.

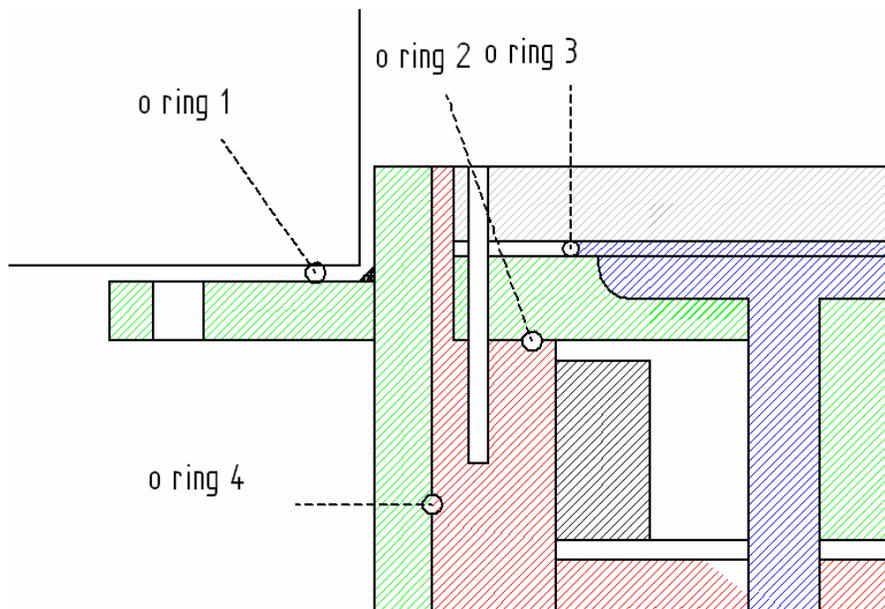
Junta atornillada dos (JA2): Unirá el magnetrón a la cámara de vacío (se ubica entre el disco y la cámara antes mencionada). Esta junta es irrelevante en el diseño ya que los tornillos no estarán sometidos a carga axial y su carga cortante será el peso del magnetrón.

Junta atornillada tres (JA3): Sujetará la tapa del magnetrón. Esta junta es irrelevante en el diseño ya que su única función es la sostener la tapa de magnetrón.

4.6 AJUSTES DE VACIO.

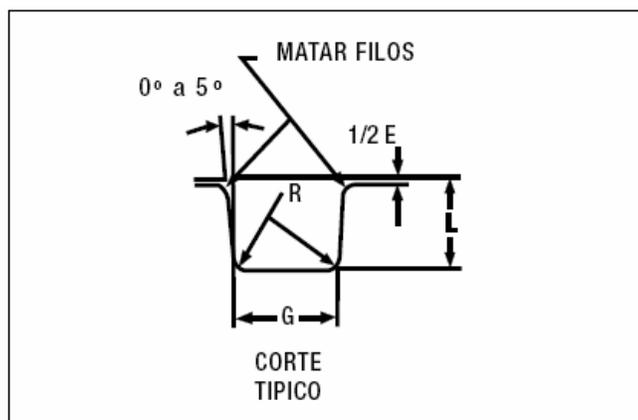
Para que se llegue a alto vacío se deben tener en cuenta las posibles fugas de aire para implementar O Rings adecuadamente.

Figura 20: disposición de O Rings



Se dispone de cuatro O Rings para sellar el magnetrón, se seleccionó la marca Parker por su gran variedad de productos. Para obtener una buena implementación de estos se debe tener en cuenta el diseño del alojamiento.

Figura 21: Diseño del alojamiento para O Ring



Fuente: www.parker.com/ar/catalogs/o_ring.pdf

Los acabados superficiales de los alojamientos debe ser 32 μ inches (0.8128 μ m) para superficiales estáticas.

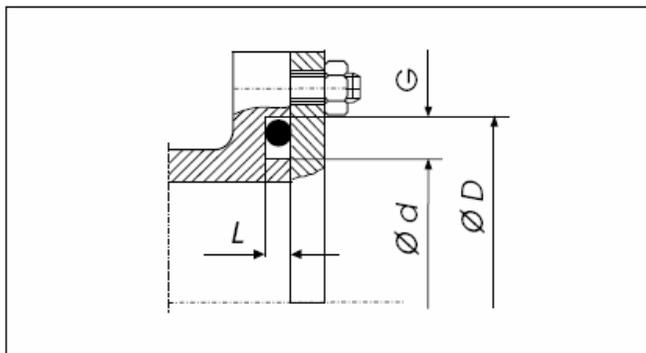
La selección de los O Rings esta limitada a forma ya que son estáticos por practicidad el diámetro de la sección transversal es igual a 3.53 mm, donde L para aplicaciones estáticas esta entre 2.8-2.95 mm, G es 4.9mm \pm 0.1mm y R esta entre .2 y .6mm (ver Anexo F)

Recomendaciones del proveedor:

“En caso de presión interna, el diámetro exterior del O-Ring "D.E", deberá respaldarse sobre el diámetro de ranura "D".

Si la presión es externa, el diámetro interior del O-Ring deberá estar en contacto con el diámetro de ranura "d".”

Figura 22: Sello de Brida- Deformación axial o frontal



Fuente: : www.parker.com/ar/catalogs/o_ring.pdf

“Parker Super-O-Lube: Lubricante para el montaje. Reduce el rozamiento e incrementa la vida útil del O-Ring. Indispensable en aplicaciones de vacío. Atóxica y compatible con todos los compuestos conocidos.”

**Parker Hannifin
Argentina S.A.I.C.**

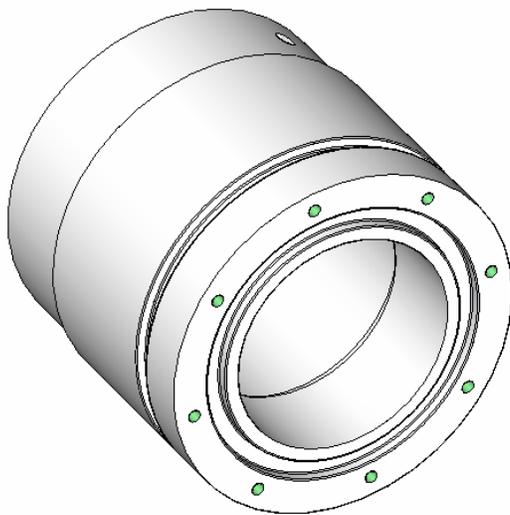
O Ring 1: El alojamiento estará sobre el disco, la junta del disco se hace de acuerdo a las roscas existentes en la cámara de vacío. La referencia es 2-248 (ver anexo F).

Figura 23: disco de unión.



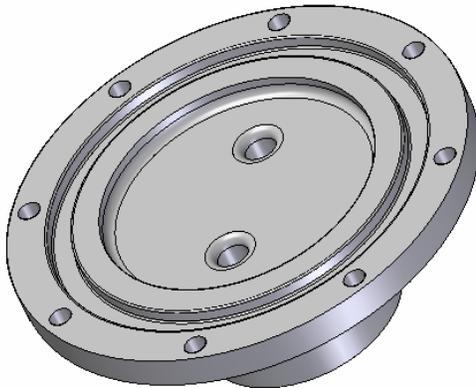
O Ring 2 y 4: El alojamiento estará sobre el aislante. La referencia es 2-233 y 2-40 (ver anexo F).

Figura 24: Aislante.



O Ring 3: El alojamiento estará sobre la cámara de refrigeración. La referencia es 2-233 (ver anexo F).

Figura 25: Cámara de refrigeración.

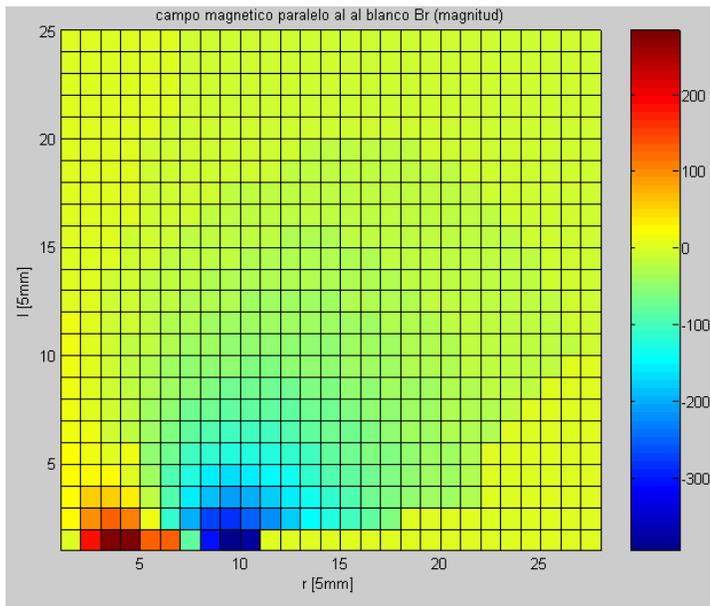


4.7 ANÁLISIS DE CAMPO MAGNÉTICO.

Para determinar empíricamente la forma del campo magnético se toman mediciones con un teslómetro o gaussmetro midiendo la componente paralela al blanco (componente radial) y el componente perpendicular al blanco (componente axial), desplazando la sonda cada 5mm sobre un plano imaginario que cruza por el centro del magnetrón (ver Anexo H).

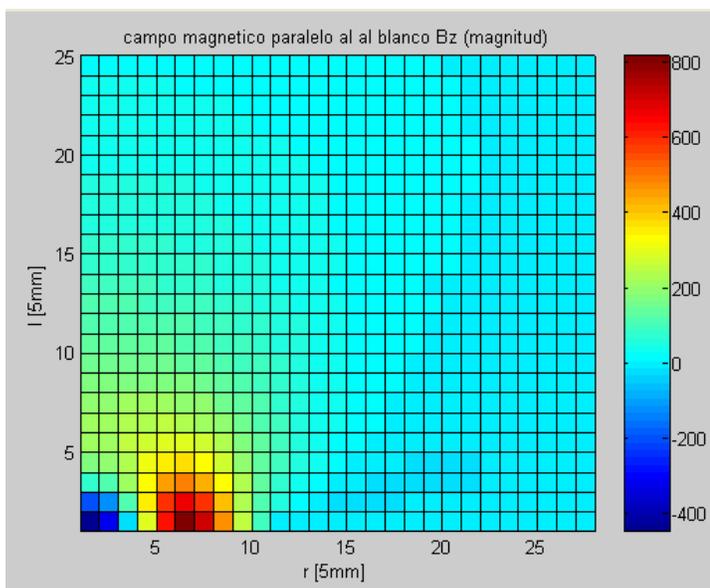
Ingresando los datos en MATLAB se obtuvieron las siguientes gráficas.

Figura 26: Campo magnético radial B_r .



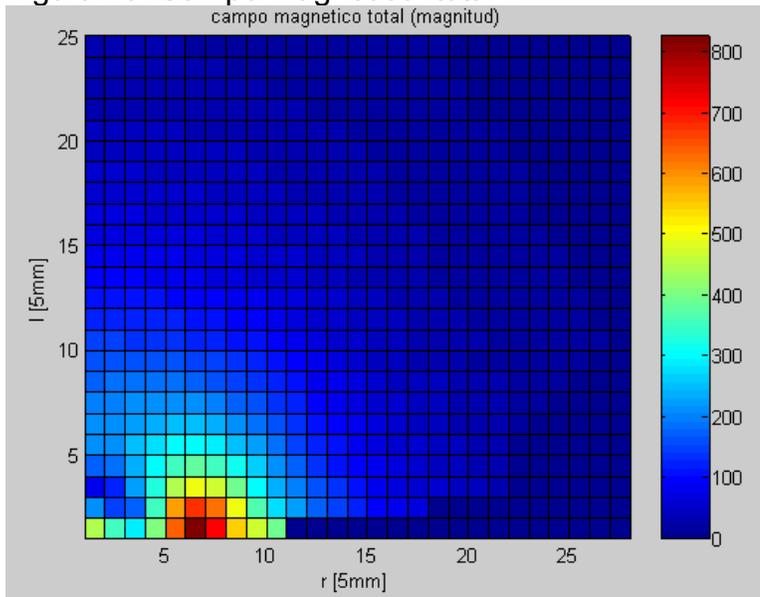
La figura 26 muestra el componente radial del campo magnético, cada cuadro representa 5mm, se observa que el componente radial está presente en los imanes pero en centro del imán externo no se genera campo magnético.

Figura 27: Campo magnético axial B_z



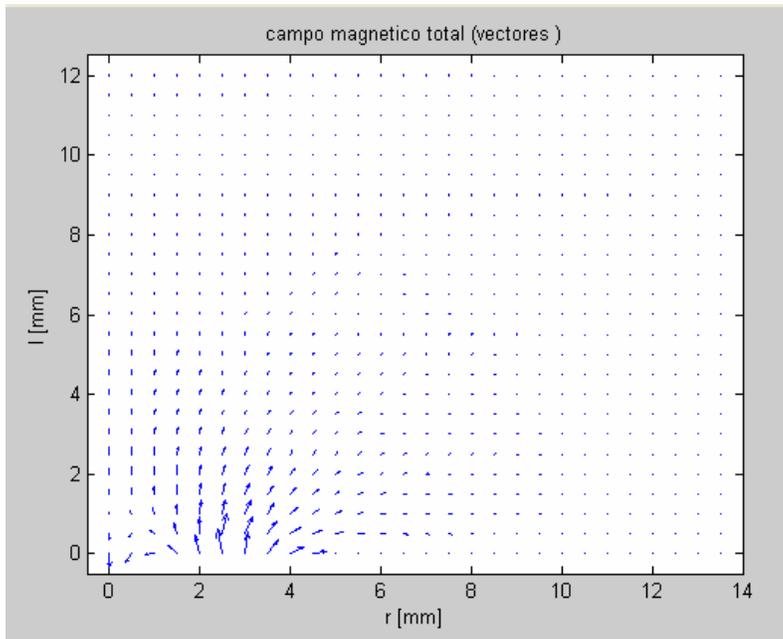
En la figura 27 se observa que el campo magnético está presente sobre la superficie de los imanes, a diferencia de B_r donde en campo sobre la superficie de los imanes es bajo y alto en los alrededores.

Figura 28: Campo Magnético total B



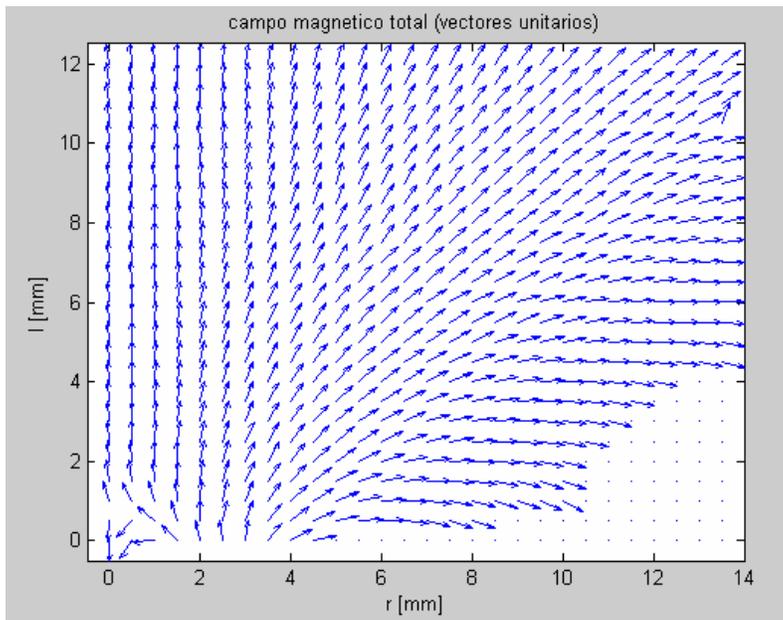
La resultante de campo magnético muestra una gran diferencia de magnitud entre los imanes, se comprueba la atracción del campo del imán externo hacia el centro. La figura se asemeja a una llama inclinada hacia el centro del magnetrón. Para una mejor visión de la dirección del campo magnético se establece una grafica vectorial.

Figura 29: Vectores de campo magnético total.



La figura 29 muestra los vectores resultantes de campo magnético en dirección y magnitud, es claro que algunas líneas de campo se cierran entre el imán externo y el interno, este es el resultado esperado, además se observa lo mismo que describió la figura 28 aunque con más dificultad; es necesario establecer una gráfica de vectores en donde sólo se conserve la dirección del vector resultante y la magnitud de los vectores sea igual para todos, de tal forma que exista la posibilidad de establecer la manera como se comportan las líneas de campo magnético.

Figura 30: Vectores unitarios de campo magnético resultante



En la figura 30 se puede ver más claramente el comportamiento de las líneas de campo magnético. De la gráfica se deduce que las líneas de campo salen hacia el sustrato a una distancia aproximada de 2 cm, luego de esta distancia los vectores cambian su dirección y se dirigen hacia las paredes de la cámara. Haciendo un análisis inicial se puede establecer que el desbalance entre imanes es considerablemente alto, lo cual beneficia los equipos de Sputtering a nivel industrial, donde las piezas a recubrir tienen amplias dimensiones, sin embargo a una distancia de 30mm (lo proyectado desde el comienzo) se tendría una tasa de depósito alta.

4.8 MONTAJE E IMPLEMENTACION

Se elaboraron las piezas de acuerdo con los planos (ver Anexo G) y se procedió a hacer el ensamble correspondiente.

Se procedió con la unión de la carcasa con el disco por medio de un cordón de soldadura con atmósfera de argón.

Figura 31. Carcasa



Ensamblaje del aislante dentro de la carcasa.

Figura 32: Unión carcasa y aislante.



En la figura 32 se observa la ubicación de dos O Ring. Entre la carcasa y el aislante se encuentra un tercero que no es posible visualizar. Se procede a ensamblar los tubos y el contacto eléctrico a la cámara de refrigeración.

Figura 33: Cámara de refrigeración.

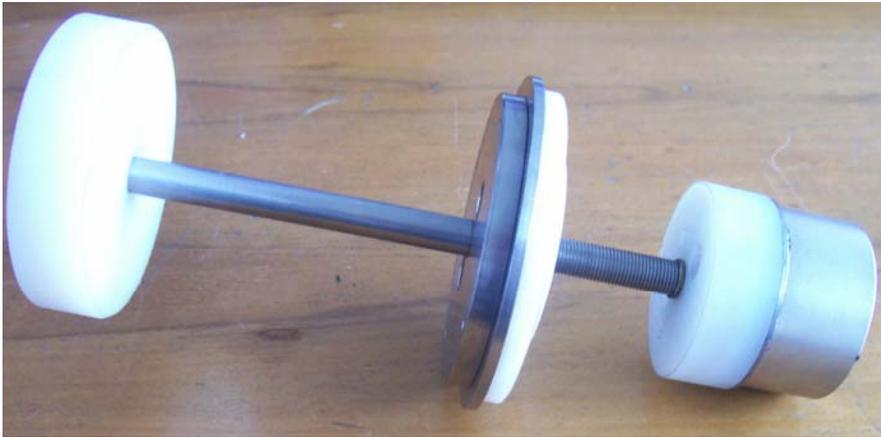


Figura 34: Cámara de refrigeración y O Ring



En la figura 34 se observa la ubicación del cuarto O Ring. Continuando con el ensamble se enrosca el eje a la tapa, se une el eje al aislante, luego se procede a unir el porta imanes al aislante, para así poder fijar los imanes. Por último se coloca la manija.

Figura 35: Sistema de desplazamiento de imanes.



Unión de las piezas faltantes (tapa de la cámara de vacío y blanco).

Figura 36: Magnetrón sin atornillar.

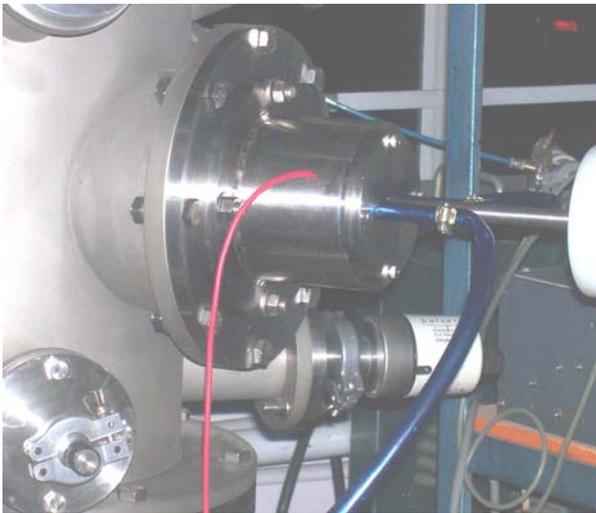


Figura 37: Magnetron ensamblado.



En esta etapa se hace la conexión de las mangueras para la entrada y salida de agua, conectando un cable al contacto eléctrico y ensamblándolo al equipo de Sputtering.

Figura 38: Magnetron ensamblado al equipo de sputtering.



El objetivo inicial de este proyecto fue hacer recubrimientos de CrN, pero no fue posible realizarlos debido a que la bomba turbo molecular presentó fallas técnicas al momento de su utilización. Esta bomba lleva la presión de la cámara al orden de

$1 \cdot 10^{-7}$ mbar, mientras que la bomba mecánica alcanza una presión de $2 \cdot 10^{-1}$ mbar presión con cual se trabajo.

Cuando la bomba mecánica alcanza la presión de trabajo, la atmósfera dentro de la cámara contiene un porcentaje de oxígeno que no permite que se pueda hacer el recubrimiento. Cuando las partículas de cromo se desprenden del blanco, la mayoría reaccionan con el oxígeno y muy pocas reaccionan con el nitrógeno, como resultado se obtiene óxido de cromo.

Para comprobar que se está depositando material del blanco sobre los sustratos, se introducen piezas de cobre que tomaron una coloración negra característica del óxido de cromo.

Para este experimento se recubrió un disco de cobre con cromo duro, el cual fue utilizado como blanco, ya que al usar el blanco de cromo duro se puede llegar a afectar su superficie. El espesor de la película de cromo duro sobre el disco de cobre fue de 40μ . Luego de dos horas de espurreo el plasma gastó la capa de cromo duro y comenzó a espurrear cobre.

Figura 39: Descarga de Plasma



CONCLUSIONES

- El vacío hace parte fundamental del Sputtering, ya que la presencia de oxígeno genera una reacción que altera la estructura del recubrimiento. Por esta razón, la coloración final obtenida es de color negro, producto de la presencia de oxígeno dentro del equipo de Sputtering.
- En vista de las múltiples variables que se pueden involucrar en el proceso de Sputtering, la adopción de un modelo matemático se complica. Para el desarrollo del proyecto, y por recomendación de expertos, se partió del supuesto de que el 90% de energía proporcionada por la fuente de alimentación se convertiría en calor. Al efectuar el procedimiento, la temperatura de salida de agua no varió. Por lo anterior se concluye que este porcentaje es adecuado y por lo tanto confiable para el desarrollo del experimento.
- La descarga luminosa es intensa, aunque se concentra en un área reducida sobre el blanco, de lo cual se deduce que el sistema de Sputtering no es del todo eficiente.
- Por medio del desbalance entre los imanes se logró que las líneas de campo magnético llegaran hasta los sustratos de manera efectiva.
- El teorema de Biot-Savart sirvió para lograr una buena aproximación para determinar la distancia a la cual las líneas de campo magnético dejan de cerrarse entre los imanes, este teorema muestra que a mayor diámetro del imán interno mayor será la distancia a la cual las líneas de campo magnético dejan de cerrarse entre los imanes.

BIBLIOGRAFÍA

ADOLFO, Rodrigo, Tercer curso de procesamiento de materiales por plasma: Descargas eléctricas en gases de baja densidad, JICA y CENA, Buenos Aires

CHEN, Francis.F., Introduction to Plasma Physics. Plenum Press, Corr printing, 2da ed., 1984., 421p

DEXTER MAGNETIC TECHNOLOGIES COMPANY, Reference and design manual, 32p

D.M. Mattox, "Ion Plating Technology: Deposition Technologies for films and coatings", R.F. Bunshah et al. Noyes Publications, Park Ridge, NJ, 1982, 40p.

DONALD R. Askeland, Ciencia e Ingeniería de los materiales, 4 edición, Edit. Thomson, 2003, 362p

FAIRES, Virgil F, Diseño de Elementos Mecánicos, Limusa, 1994, 802p.

I. L. Singer, R. N. Bolster, S.A. Wolf, E.F. Skelton, R.A. Jeffries, Thin Solid Films, 1983, 207p.

L. CUNHA, M. Andriatschky, K. Pischow, Z. Wang, A. Zarychta, A. S. Miranda, A. M. Cunha, Surf. Coat. Technol, 2000, 133p.

L. H. Chiu, C. F. Yang, W. C. Hsieh, A. S. Cheng, Surf. Coat. Technol, 2002, 282p

MUHL SAUNDERS, Stephen, Jefe del Departamento de Estado Sólido y Criogenia, UNAM.

NORTON, Robert, Diseño de Maquinas, Primera Edición, Prentice Hall, 7a. ed., 1998, 498p.

OLAYA FLOREZ, J.J, Nitruros metálicos de transición depositados con espurreo asistido con campos magnéticos variables, 2005, 240p, PhD, MSc, Ing. UNAM, Facultad de Química.

OLAYA FLOREZ, J.J. Recubrimientos de TiN sobre el acero AISI M2 por el método de sputtering reactivo, Tesis de Maestría, 2002, 210p, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Física.

P. ENGEL, G. Schwarz, G.K. Wolf, Surf. Coat. Technol, Argentina, 2000. 286p

UNIVERSIDAD DE SEVILLA, Plasmas e Interacciones Partículas –Superficies, Ingeniería de Superficies, Departamento de Química Inorgánica.

YUNUS A., Cengel, Transferencia de Calor, Segunda Edición, Mc Graw Hill, 2003, 793p.

ANEXO A. Propiedades imanes de neodimio

Propiedades magnéticas de NdFeB TABLA DE VALORES

Series	Grado	(BH)max MGOe	(Br)min MGOe	Hcb (min) KOe	Hcj (min) KOe	T(max) °C
N	30	28-30	10.8	10.0	12.0	80
	33	31-33	11.4	10.5	12.0	
	35	33-35	11.8	10.8	12.0	
	38	36-38	12.3	10.8	12.0	
	40	38-40	12.7	11.0	12.0	
	42	40-42	13.1	11.0	12.0	
	45	42-45	13.3	9.5	12.0	
M	48	46-48	13.8	8.5	10.0	100
	35	33-35	11.8	10.8	14.0	
	38	36-38	12.3	11.0	14.0	
H	40	38-40	12.7	11.4	14.0	120
	30	28-30	10.8	10.2	17.0	
	33	31-33	11.4	10.6	17.0	
	35	33-35	11.8	11.0	17.0	
	38	36-38	12.3	11.2	17.0	
SH	40	38-40	12.7	11.0	17.0	150
	28	26-28	10.5	9.5	20.0	
	30	28-30	10.8	10.0	20.0	
	33	31-33	11.4	10.5	20.0	
UH	35	33-35	11.8	11.0	20.0	180
	38	36-38	12.3	11.0	20.0	
	26	24-26	10.2	9.2	25.0	
EH	28	26-28	10.5	9.5	25.0	200
	30	28-30	10.8	9.5	25.0	
	28	26-28	10.5	9.5	30.0	200
	30	28-30	10.8	9.5	30.0	

ANEXO B: Codificación de graficas en MATLAB 6.

Codificación Figura 14.

```
close
clear
clc
clf
x=10:1:50;
%anillo
r=26;
R=31.75;
Br=11800;
l=32;
a0=(l+x)./sqrt(R^2+(l+x).^2);
a1=(l+x)./sqrt(r^2+(l+x).^2);
b0=x./sqrt(R^2+x.^2);
b1=x./sqrt(r^2+x.^2);
B1=(Br/2)*((a0-a1)-(b0-b1));
plot(x,B1)
hold on
%cilindro d=1 rojo
r2=5;
a2=(l+x)./sqrt(r2^2+(l+x).^2);
b2=x./sqrt(r2^2+x.^2);
B2=(Br/2)*(a2-b2);
plot(x,B2,'r')
hold on
grid on
%cilindro d=1.5 verde
r3=7.5;
a3=(l+x)./sqrt(r3^2+(l+x).^2);
b3=x./sqrt(r3^2+x.^2);
B3=(Br/2)*(a3-b3);
plot(x,B3,'g')
%cilindro d=2 azul claro
r4=10;
a4=(l+x)./sqrt(r4^2+(l+x).^2);
b4=x./sqrt(r4^2+x.^2);
B4=(Br/2)*(a4-b4);
plot(x,B4,'c')
xlabel('d(mm)')
ylabel('B(Gauss)')
x0=[35 40 40 35];
plot(x0,[2250 2250 2240 2240], 'r')
```

```

text(x0(2)+1,2250,'d=10mm')
plot(x0,[2000 2000 1990 1990],'g')
text(x0(2)+1,2000,'d=15mm')
plot(x0,[1750 1750 1740 1740],'c')
text(x0(2)+1,1750,'d=20mm')
plot(x0,[1500 1500 1495 1495],'b')
text(x0(2)+1,1490,'Anillo')
plot([10 50],[400 400],'k')

```

Codificación de graficas de campo magnético

```

clear
clc
close
r =['se introduce la matriz de campo radial'];
a=['se introduce la matriz de campo axial '];
for i=1:28
    y(i,:)=0:.5:12;
    for j=1:25
        result(i,j)=fix(sqrt(a(i,j)^2+r(i,j)^2));
        x(j,:)=0:.5:13.5;
        if result(i,j)~=0
            fac_a(i,j)=a(i,j)*5/result(i,j);
            fac_r(i,j)=r(i,j)*5/result(i,j);
            result_2(i,j)=fix(sqrt(fac_a(i,j)^2+fac_r(i,j)^2));
        else
            result_2(i,j)=0;
        end
    end
end
end

subplot(2,2,1)
pcolor(r')
xlabel('r [5mm]')
ylabel('l [5mm]')
title('campo magnético paralelo al al blanco Br (magnitud)')
colorbar
subplot(2,2,2)
pcolor(a')
xlabel('r [5mm]')
ylabel('l [5mm]')
title('campo magnético perpendicular al blanco Bz (magnitud)')
colorbar
subplot(2,2,3)

```

```
pcolor(result')
xlabel('r [5mm]')
ylabel('l [5mm]')
title('campo magnético total (magnitud)')
colorbar
subplot(2,2,4)
quiver(x,y',-fac_r',fac_a',1)
axis([-0.5 14 -0.5 12.5])
xlabel('r [mm]')
ylabel('l [mm]')
title('campo magnético total (vectores unitarios)')
```

ANEXO C: Propiedades del agua saturada

TABLA A-9

Propiedades del agua saturada

Temp., T °C	Presión de saturación, P _{sat} kPa	Densidad, ρ kg/m ³		Entalpia de vaporización, h _{fg} kJ/kg	Calor específico, C _p J/kg · °C		Conductividad térmica, k W/m · °C		Viscosidad dinámica, μ kg/m · s		Número de Prandtl, Pr		Coeficiente de expansión volumétrica, β 1/K
		Líquido	Vapor		Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	
0.01	0.6113	999.8	0.0048	2 501	4 217	1 854	0.561	0.0171	1.792 × 10 ⁻³	0.922 × 10 ⁻⁵	13.5	1.00	-0.068 × 10 ⁻³
5	0.8721	999.9	0.0068	2 490	4 205	1 857	0.571	0.0173	1.519 × 10 ⁻³	0.934 × 10 ⁻⁵	11.2	1.00	0.015 × 10 ⁻³
10	1.2276	999.7	0.0094	2 478	4 194	1 862	0.580	0.0176	1.307 × 10 ⁻³	0.946 × 10 ⁻⁵	9.45	1.00	0.733 × 10 ⁻³
15	1.7051	999.1	0.0128	2 466	4 186	1 863	0.589	0.0179	1.138 × 10 ⁻³	0.959 × 10 ⁻⁵	8.09	1.00	0.138 × 10 ⁻³
20	2.339	998.0	0.0173	2 454	4 182	1 867	0.598	0.0182	1.002 × 10 ⁻³	0.973 × 10 ⁻⁵	7.01	1.00	0.195 × 10 ⁻³
25	3.169	997.0	0.0231	2 442	4 180	1 870	0.607	0.0186	0.891 × 10 ⁻³	0.987 × 10 ⁻⁵	6.14	1.00	0.247 × 10 ⁻³
30	4.246	996.0	0.0304	2 431	4 178	1 875	0.615	0.0189	0.798 × 10 ⁻³	1.001 × 10 ⁻⁵	5.42	1.00	0.294 × 10 ⁻³
35	5.628	994.0	0.0397	2 419	4 178	1 880	0.623	0.0192	0.720 × 10 ⁻³	1.016 × 10 ⁻⁵	4.83	1.00	0.337 × 10 ⁻³
40	7.384	992.1	0.0512	2 407	4 179	1 885	0.631	0.0196	0.653 × 10 ⁻³	1.031 × 10 ⁻⁵	4.32	1.00	0.377 × 10 ⁻³
45	9.593	990.1	0.0655	2 395	4 180	1 892	0.637	0.0200	0.596 × 10 ⁻³	1.046 × 10 ⁻⁵	3.91	1.00	0.415 × 10 ⁻³
50	12.35	988.1	0.0831	2 383	4 181	1 900	0.644	0.0204	0.547 × 10 ⁻³	1.062 × 10 ⁻⁵	3.55	1.00	0.451 × 10 ⁻³
55	15.76	985.2	0.1045	2 371	4 183	1 908	0.649	0.0208	0.504 × 10 ⁻³	1.077 × 10 ⁻⁵	3.25	1.00	0.484 × 10 ⁻³
60	19.94	983.3	0.1304	2 359	4 185	1 916	0.654	0.0212	0.467 × 10 ⁻³	1.093 × 10 ⁻⁵	2.99	1.00	0.517 × 10 ⁻³
65	25.03	980.4	0.1614	2 346	4 187	1 926	0.659	0.0216	0.433 × 10 ⁻³	1.110 × 10 ⁻⁵	2.75	1.00	0.548 × 10 ⁻³
70	31.19	977.5	0.1983	2 334	4 190	1 936	0.663	0.0221	0.404 × 10 ⁻³	1.126 × 10 ⁻⁵	2.55	1.00	0.578 × 10 ⁻³
75	38.58	974.7	0.2421	2 321	4 193	1 948	0.667	0.0225	0.378 × 10 ⁻³	1.142 × 10 ⁻⁵	2.38	1.00	0.607 × 10 ⁻³
80	47.39	971.8	0.2935	2 309	4 197	1 962	0.670	0.0230	0.355 × 10 ⁻³	1.159 × 10 ⁻⁵	2.22	1.00	0.653 × 10 ⁻³
85	57.83	968.1	0.3536	2 296	4 201	1 977	0.673	0.0235	0.333 × 10 ⁻³	1.176 × 10 ⁻⁵	2.08	1.00	0.670 × 10 ⁻³
90	70.14	965.3	0.4235	2 283	4 206	1 993	0.675	0.0240	0.315 × 10 ⁻³	1.193 × 10 ⁻⁵	1.96	1.00	0.702 × 10 ⁻³
95	84.55	961.5	0.5045	2 270	4 212	2 010	0.677	0.0246	0.297 × 10 ⁻³	1.210 × 10 ⁻⁵	1.85	1.00	0.716 × 10 ⁻³
100	101.33	957.9	0.5978	2 257	4 217	2 029	0.679	0.0251	0.282 × 10 ⁻³	1.227 × 10 ⁻⁵	1.75	1.00	0.750 × 10 ⁻³
110	143.27	950.6	0.8263	2 230	4 229	2 071	0.682	0.0262	0.255 × 10 ⁻³	1.261 × 10 ⁻⁵	1.58	1.00	0.798 × 10 ⁻³
120	198.53	943.4	1.121	2 203	4 244	2 120	0.683	0.0275	0.232 × 10 ⁻³	1.296 × 10 ⁻⁵	1.44	1.00	0.858 × 10 ⁻³
130	270.1	934.6	1.496	2 174	4 263	2 177	0.684	0.0288	0.213 × 10 ⁻³	1.330 × 10 ⁻⁵	1.33	1.01	0.913 × 10 ⁻³
140	361.3	921.7	1.965	2 145	4 286	2 244	0.683	0.0301	0.197 × 10 ⁻³	1.365 × 10 ⁻⁵	1.24	1.02	0.970 × 10 ⁻³
150	475.8	916.6	2.546	2 114	4 311	2 314	0.682	0.0316	0.183 × 10 ⁻³	1.399 × 10 ⁻⁵	1.16	1.02	1.025 × 10 ⁻³
160	617.8	907.4	3.256	2 083	4 340	2 420	0.680	0.0331	0.170 × 10 ⁻³	1.434 × 10 ⁻⁵	1.09	1.05	1.145 × 10 ⁻³
170	791.7	897.7	4.119	2 050	4 370	2 490	0.677	0.0347	0.160 × 10 ⁻³	1.468 × 10 ⁻⁵	1.03	1.05	1.178 × 10 ⁻³
180	1 002.1	887.3	5.153	2 015	4 410	2 590	0.673	0.0364	0.150 × 10 ⁻³	1.502 × 10 ⁻⁵	0.983	1.07	1.210 × 10 ⁻³
190	1 254.4	876.4	6.388	1 979	4 460	2 710	0.669	0.0382	0.142 × 10 ⁻³	1.537 × 10 ⁻⁵	0.947	1.09	1.280 × 10 ⁻³
200	1 553.8	864.3	7.852	1 941	4 500	2 840	0.663	0.0401	0.134 × 10 ⁻³	1.571 × 10 ⁻⁵	0.910	1.11	1.350 × 10 ⁻³
220	2 318	840.3	11.60	1 859	4 610	3 110	0.650	0.0442	0.122 × 10 ⁻³	1.641 × 10 ⁻⁵	0.865	1.15	1.520 × 10 ⁻³
240	3 344	813.7	16.73	1 767	4 760	3 520	0.632	0.0487	0.111 × 10 ⁻³	1.712 × 10 ⁻⁵	0.836	1.24	1.720 × 10 ⁻³
260	4 688	783.7	23.69	1 663	4 970	4 070	0.609	0.0540	0.102 × 10 ⁻³	1.788 × 10 ⁻⁵	0.832	1.35	2.000 × 10 ⁻³
280	6 412	750.8	33.15	1 544	5 280	4 835	0.581	0.0605	0.094 × 10 ⁻³	1.870 × 10 ⁻⁵	0.854	1.49	2.380 × 10 ⁻³
300	8 581	713.8	46.15	1 405	5 750	5 980	0.548	0.0695	0.086 × 10 ⁻³	1.965 × 10 ⁻⁵	0.902	1.69	2.950 × 10 ⁻³
320	11 274	667.1	64.57	1 239	6 540	7 900	0.509	0.0836	0.078 × 10 ⁻³	2.084 × 10 ⁻⁵	1.00	1.97	—
340	14 586	610.5	92.62	1 028	8 240	11 870	0.469	0.110	0.070 × 10 ⁻³	2.255 × 10 ⁻⁵	1.23	2.43	—
360	18 651	528.3	144.0	720	14 690	25 800	0.427	0.178	0.060 × 10 ⁻³	2.571 × 10 ⁻⁵	2.06	3.73	—
374.14	22 090	317.0	317.0	0	∞	∞	∞	∞	0.043 × 10 ⁻³	4.313 × 10 ⁻⁵	—	—	—

Nota 1: La viscosidad cinemática ν y la difusividad térmica α se pueden calcular a partir de sus definiciones, $\nu = \mu/\rho$ y $\alpha = k/\rho C_p = \nu/Pr$. Las temperaturas de 0.01°C, 100°C y 374.14°C son las temperaturas de los puntos triple, de ebullición y crítico del agua, respectivamente. Las propiedades cuya lista se da arriba (excepto la densidad del vapor) se pueden usar a cualquier presión con error despreciable, excepto a temperaturas cercanas al valor del punto crítico.

Nota 2: La unidad kJ/kg · °C, para el calor específico, es equivalente a kJ/kg · K y la unidad W/m · °C, para la conductividad térmica es equivalente a W/m · K.

Fuente: Los datos de la viscosidad y la conductividad térmica se tomaron de J. V. Sengers y J. T. R. Watson, *Journal of Physical and Chemical Reference Data* 15 (1986), págs. 291-1322. Los otros datos se obtuvieron de diversas fuentes o se calcularon.

ANEXO D. Propiedades Nylon 6



Cast Nylon PA6G & 6/12

Carboplast S.A.

PLÁSTICOS DE INGENIERÍA

TABLA DE PROPIEDADES

IDENTIFICACION DEL PRODUCTO			NA-MS
PROPIEDADES	ASTM Métodos Ensayo	UNIDADES	PA6G-PAG6+M o S2
COLORES TÍPICOS			Natural, Negro
MECANICAS			
Módulo de elasticidad, 23°C	D-638 M	kgf/cm ² PSI N/mm ²	24.600 - 31.600 350.000 - 450.000 2.411 - 3.100
Resistencia a la tracción, 23°C	D-638 M	kgf/cm ² PSI	840 - 980 11.940 - 13.935
Elongación en ruptura, 23°C		%	30 - 40
Resistencia a la compresión, 23°C	D-695	kgf/cm ²	1.100
Resistencia a la flexión, 23°C	D-790	kgf/cm ²	1.050 - 1.100
Creep, Stress/1%, 1000 Hrs Condición: seco	D-2290	kgf/cm ²	220
Equilibrado a 50% RH			100
Deformación bajo carga 140 kgf/cm ² (2000 PSI) a 50°C	D-621	%	0.5 - 1.0 % después de 24 hrs.
Resistencia al impacto, IZOD, 23°C (Notch) Condición: Seco	D-256		3
Equilibrado a 50% RH	D-256	kJ/m ²	6
TERMICAS			
Punto de fusión	D-789	°C	220 - 225
Flamabilidad	D-635		Autoextinguible
Temperatura de deflexión 4.6 kgf/cm ² 1.8 N/mm ²	D-648	°C	155 - 165 95
Temperatura de servicio max en aire: Para retención 50% prop. mecánicas Períodos Cortos	5.000/20.000h	°C	105/90 170
Expansión térmica (23 - 100°C)	D-696	cm/cm/°C	8 x 10 ⁻⁵
OTROS			
Absorción de agua, 24 hrs.- 23°C			0.8 - 1.14
Absorción de agua, saturación	D-570	% peso	6 - 6.5
Saturación a 23°C, 50% RH			2.0 - 2.2
Densidad	D-792	gr/cm ³	1.15 - 1.16
Durezas: Durómetro, 23°C	D-1706	Shore	D80 - 85
Rockwell (Seco)	D-785		R112 - 120
Coefficiente de Fricción En seco 23°C En seco 40°C Inicialmente lubricado, 23°C		P=0.05N/mm2; V=0.6 m/s (Contra acero)	0.17 - 0.28 0.35 - 0.40 0.15 - 0.22

Nota: Los datos presentados son valores típicos que caen dentro del rango normal de las propiedades del material. Ellos pretenden guiar al usuario en la selección del mejor material y no representan especificaciones o cálculos de ingeniería en particular.

OFICINA PRINCIPAL Y PUNTO DE VENTA:
Cra. 48 No. 65 Sur-120 A.A. 56749
Tel.: 288 44 68 Fax: 288 86 65
e-mail: Carboplast@entic.net
SABANETA - ANTIQUIA

SANTAFE DE BOGOTÁ:
Cra. Transv. 22 No. 16-38
Tels: 370 22 54 - 370 22 53
Fax: 370 22 60 A.A. 78149

BARRANQUILLA:
Calle 37 No. 46 - 138 Electrisesg
Teléfono: 341 51 13
Calle 75 No. 67-30
Telefax: 53 03 46

BUCARAMANGA
Cra. General de Acaros
Cra. 14 No. 23-02
Teléfono: 33 83 23
Fax: 33 27 79

CALI
Ingerret
Cra. 37A No. 6-67
Telefax: 514 20 95

Propiedades Eléctricas

Constante Dieléctrica @1MHz	3,6
Factor de Disipación a 1 kHz	0,2
Resistencia Dieléctrica (kV mm ⁻¹)	25
Resistividad Superficial (Ohm/sq)	5x10 ¹⁰
Resistividad de Volumen (Ohmcm)	5x10 ¹²

Propiedades Físicas

Absorción de Agua - Equilibrio (%)	>8
Absorción de Agua - en 24 horas (%)	2,7
Densidad (g cm ⁻³)	1,13
Indice Refractivo	1,53
Indice de Oxígeno Límite (%)	25
Inflamabilidad	HB
Resistencia a la Radiación	Aceptable
Resistencia a los Ultra-violetas	Mala

Propiedades Mecánicas

Coefficient de Fricción	0,2-0,3
Dureza - Rockwell	M82
Módulo de Tracción (GPa)	2,6-3,0
Relación de Poisson	0,39
Resistencia a la Abrasión - ASTM D1044 (mg/1000 ciclos)	5
Resistencia a la Tracción (MPa)	78
Resistencia al Impacto Izod (J m ⁻¹)	30-250

Propiedades Térmicas

Calor Específico (J K ⁻¹ kg ⁻¹)	1700
Coefficiente de Expansión Térmica (x10 ⁻⁶ K ⁻¹)	95
Conductividad Térmica a 23C (W m ⁻¹ K ⁻¹)	0,24-0,28
Temperatura Máxima de Utilización (C)	80-160
Temperatura Mínima de Utilización (C)	-40
Temperatura de Deflección en Caliente - 0,45MPa (C)	200
Temperatura de Deflección en Caliente - 1,8MPa (C)	80

Resistencia Química

Acidos - concentrados	Mala
Acidos - diluidos	Mala
Alcalis	Buena-Aceptable
Alcoholes	Buena
Cetonas	Buena
Grasas y Aceites	Buena
Halógenos	Mala
Hidro-carbonios halógenos	Buena-Mala
Hidrocarburos Aromáticos	Buena

ANEXO E Esfuerzos de cálculo para uniones soldadas

TABLA AT 30 ESFUERZOS DE CÁLCULO

(a) Recomendaciones de Jennings [19.1]; (b) AWS Building Code (Código AWS para Edificación), adaptados por Blodgett de AWS Bridge Code y U.S. Steel [19.16]; para clase común de acero esfuerzo = s_{min}/s_{max} , § 4.5. Valores máximos para acero estructural, soldaduras a tope, kg/cm² (o bien 54 ksi); para soldaduras en ángulo, 878 y 2600 kg/cm² (o bien 12,5 y 37 ksi), (f) Código ASME, clase 3, doble soldadura a tope. (g) Resistencia máxima de aleación de de seguridad. (h) AISC Building Code (Código

CLASE DE SOLDADURA Y ESFUERZOS	CÓDIGOS		SOLDADURA PROTEGIDA		SOLDADURA NO PROTEGIDA			
	kg/cm ²	ksi	Carga constante	Carga invertida	Carga constante	Carga invertida		
SOLDADURAS A TOPE								
Tracción.	1406(b) 562(f)	20(b) 8(f)	1124(a) 773(g)	16(a) 11(g)	562(a) 8(a)	914(a) 13(a)	351(a) 5(a)	
Compresión.	1406(b) 1265(c)	20(b) 18(c)	1265(a)	18(a)	562(a) 8(a)	1054(a) 15(a)	351(a) 5(a)	
Cizalladura.	914(b)	13(b)	703(a)	10(a)	351(a) 5(a)	562(a) 8(a)	210(a) 3(a)	
Flexión			1054(d)	15(d)				
SOLDADURAS EN ÁNGULO								
Todas.	956(h)	13,6(h)	984(a)	14(a)	351(a) 5(a)	794(a)	11,3(a)	210(a) 3(a)
Paralelas.	956(b) 871(c)	13,6(b) 12,4(c)	794(g)	11,3(g)				
Transversales			1124(d) 892(g)	16(d) 12,7(g)				

ANEXO F: Tablas y consideraciones para O Ring

INFORMACION TECNICA

Un O-Ring es el elemento más accesible y eficaz para prevenir la fuga de fluidos bajo distintas condiciones de servicio.

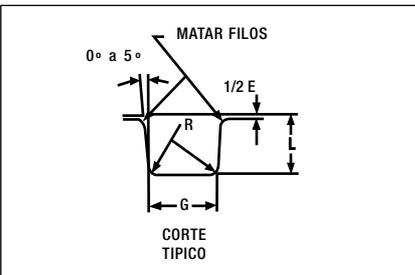
Sus principales ventajas son:

- Puede ser utilizado como sello estático, cuando las piezas no tienen movimiento y también en uso dinámico de vaivén, oscilante o rotativo.
- Permite el sellado en todas las direcciones, radial, axial u oblicua.
- El fluido puede ser líquido o gaseoso.
- Disponible en medidas y tolerancias normalizadas internacionalmente.
- Se dispone de una amplia variedad de dimensiones y compuestos.
- Son de bajo precio relativo.
- En muchos casos permiten su desarme y reutilización.
- Cierran en un amplio rango de presiones, temperaturas y tolerancias.
- Una vez instalados no requieren de ajustes durante su tiempo de vida útil.
- Son de peso reducido y requieren muy poco espacio, permitiendo un diseño muy compacto

DISEÑO DEL ALOJAMIENTO

La acción de sellado del O-Ring se materializa mediante la deformación de su sección "W", obtenida a través de un correcto diseño de su alojamiento.

Las dimensiones de ranura "L" y "G" pueden obtenerse de la tabla de diseño.



Para uso estático, el aplastamiento varía del 12% al 25%.

En uso dinámico la deformación debe ser del 8% al 20%

En alojamientos existentes, la cota "L" debe garantizar una deformación de la sección "W", no inferior a 0.25 mm en valor absoluto.

La terminación superficial del alojamiento debe ser de 32 *M*inches para superficies estáticas y de 16 *M*inches para superficies dinámicas

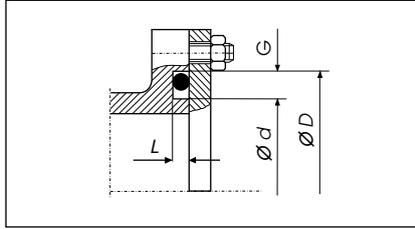
TABLA DE DISEÑO				
Secc. "W"	Dimensiones de Alojamiento			
	Profundidad "L"		Ancho "G" ± 0.1	Radio "R"
	Estático	Dinámico		
1.78	1.25	1.40	2.5	0.1
	1.35	1.45		
2.62	2.05	2.25	3.7	0.1
	2.15	2.30		
3.53	2.80	3.05	4.9	0.2
	2.95	3.10		
5.33	4.30	4.65	7.3	0.5
	4.50	4.75		
6.99	5.75	6.00	9.7	0.5
	5.95	6.10		

Para la correcta selección del O-Ring conviene observar las siguientes recomendaciones:

Sello de brida- Deformación axial ó frontal

En caso de presión interna, el diámetro exterior del O-Ring "D.E", deberá respaldarse sobre el diámetro de ranura "D".

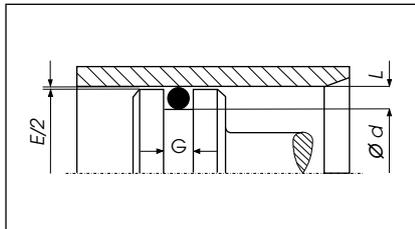
Si la presión es externa, el diámetro interior del O-Ring deberá estar en contacto con el diámetro de ranura "d".



Sello de pistón- Deformación radial

El diámetro interior del O-Ring "D.I", deberá ser igual o menor a "d".

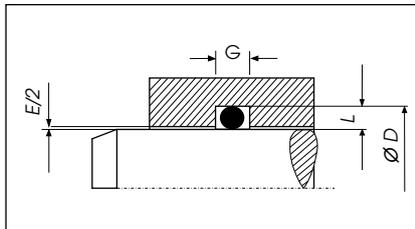
Estiramiento máximo: 7%.



Sello de vástago- Deformación radial

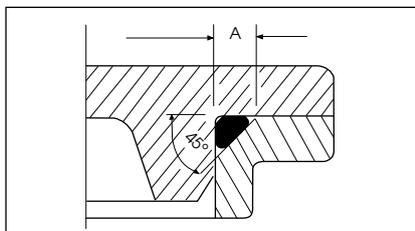
Se deberá elegir un O-Ring cuyo diámetro exterior "D.E", sea igual o mayor que "D".

Discrepancia máxima: 3 %



Sellado en diagonal

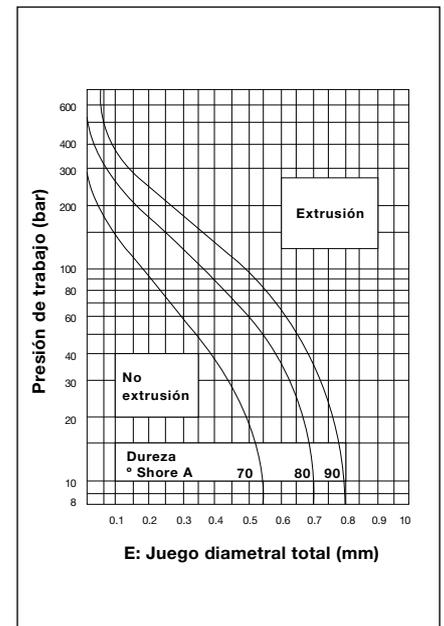
Se materializa con la deformación del O-Ring a través de un alojamiento a 45°. La longitud del chafán "A", debe ser un 30/ 35% superior a la sección "W".



EXTRUSION

Es el daño que experimenta el O-Ring sometido a elevadas presiones y/o huelgos considerables.

Para predecir este fallo puede recurrirse a la utilización del gráfico donde se delimita las zona de trabajo de los distintos compuestos en función de la dureza, presión y holgura "E", del alojamiento.



ALMACENAMIENTO

Para una mejor retención de las propiedades físicas originales de los productos de caucho, conviene observar las siguientes recomendaciones:

El almacén debe ser fresco, seco, sin polvo ni corrientes de aire.

Deberá evitarse la proximidad de tubos fluorescentes y toda fuente de luz emisora de rayos ultravioleta.

Los motores y tableros electricos son considerados perjudiciales por ser potenciales generadores de ozono.

La temperatura ideal debería estar comprendida entre -10°C y +20°C con una humedad óptima del 65%.

Las fuentes de calor deben ser indirectas y estar situadas a no menos de un metro. Los combustibles, lubricantes, ácidos, disolventes y productos químicos en general deben ser almacenados en otro sitio.

La provisión de los O-Rings en cajas, dentro de bolsas de polietileno termoselladas, garantizan una buena protección contra la luz, polvo y otros agentes externos.

El hecho de mantener las piezas dentro de su envase original, no solo preserva al material, sino que asegura su rastreabilidad y una adecuada rotación del stock.

NORMAS DE MONTAJE

Verificar que las dimensiones del O-Ring y el compuesto sean las correctas.

Eliminar toda arista viva.

Facilitar la deformación e introducción del O-Ring mediante un chafán de 15/20° Asegurar una correcta limpieza del alojamiento y de los útiles de montaje.

Proveer una adecuada lubricación inicial.

El O-Ring puede ser estirado hasta un 50% de su diámetro interior para facilitar su colocación. En el caso de los O-Rings de menor diámetro pueden requerirse estiramiento aún mayores.

Se deberá evitar el clásico retorcimiento del O-Ring que generalmente se produce al finalizar su montaje dentro de la ranura.

Nunca deberá forzarse su colocación sin haber observado todas las recomendaciones anteriores.

INFORMACION TECNICA

Un O-Ring es el elemento más accesible y eficaz para prevenir la fuga de fluidos bajo distintas condiciones de servicio.

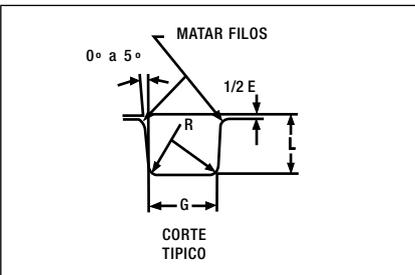
Sus principales ventajas son:

- Puede ser utilizado como sello estático, cuando las piezas no tienen movimiento y también en uso dinámico de vaivén, oscilante o rotativo.
- Permite el sellado en todas las direcciones, radial, axial u oblicua.
- El fluido puede ser líquido o gaseoso.
- Disponible en medidas y tolerancias normalizadas internacionalmente.
- Se dispone de una amplia variedad de dimensiones y compuestos.
- Son de bajo precio relativo.
- En muchos casos permiten su desarme y reutilización.
- Cierran en un amplio rango de presiones, temperaturas y tolerancias.
- Una vez instalados no requieren de ajustes durante su tiempo de vida útil.
- Son de peso reducido y requieren muy poco espacio, permitiendo un diseño muy compacto

DISEÑO DEL ALOJAMIENTO

La acción de sellado del O-Ring se materializa mediante la deformación de su sección "W", obtenida a través de un correcto diseño de su alojamiento.

Las dimensiones de ranura "L" y "G" pueden obtenerse de la tabla de diseño.



Para uso estático, el aplastamiento varía del 12% al 25%.

En uso dinámico la deformación debe ser del 8% al 20%

En alojamientos existentes, la cota "L" debe garantizar una deformación de la sección "W", no inferior a 0.25 mm en valor absoluto.

La terminación superficial del alojamiento debe ser de 32 *M*inches para superficies estáticas y de 16 *M*inches para superficies dinámicas

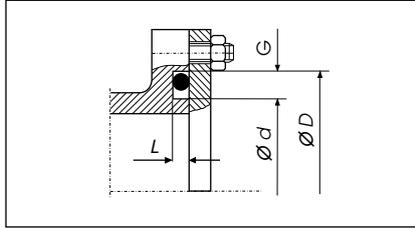
TABLA DE DISEÑO				
Secc. "W"	Dimensiones de Alojamiento			
	Profundidad "L"		Ancho "G" ± 0.1	Radio "R"
	Estático	Dinámico		
1.78	1.25	1.40	2.5	0.1
	1.35	1.45		
2.62	2.05	2.25	3.7	0.1
	2.15	2.30		
3.53	2.80	3.05	4.9	0.2
	2.95	3.10		
5.33	4.30	4.65	7.3	0.5
	4.50	4.75		
6.99	5.75	6.00	9.7	0.5
	5.95	6.10		

Para la correcta selección del O-Ring conviene observar las siguientes recomendaciones:

Sello de brida- Deformación axial ó frontal

En caso de presión interna, el diámetro exterior del O-Ring "D.E", deberá respaldarse sobre el diámetro de ranura "D".

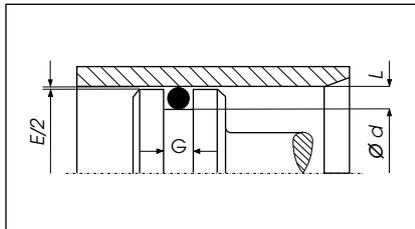
Si la presión es externa, el diámetro interior del O-Ring deberá estar en contacto con el diámetro de ranura "d".



Sello de pistón- Deformación radial

El diámetro interior del O-Ring "D.I", deberá ser igual o menor a "d".

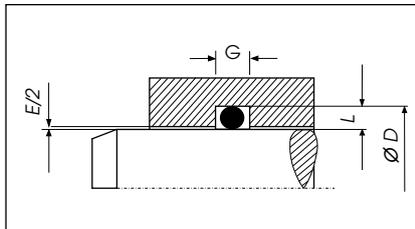
Estiramiento máximo: 7%.



Sello de vástago- Deformación radial

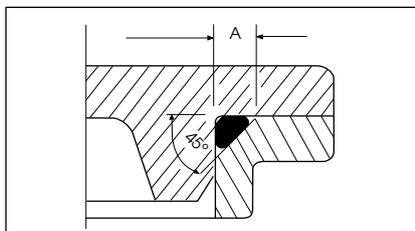
Se deberá elegir un O-Ring cuyo diámetro exterior "D.E", sea igual o mayor que "D".

Discrepancia máxima: 3 %



Sellado en diagonal

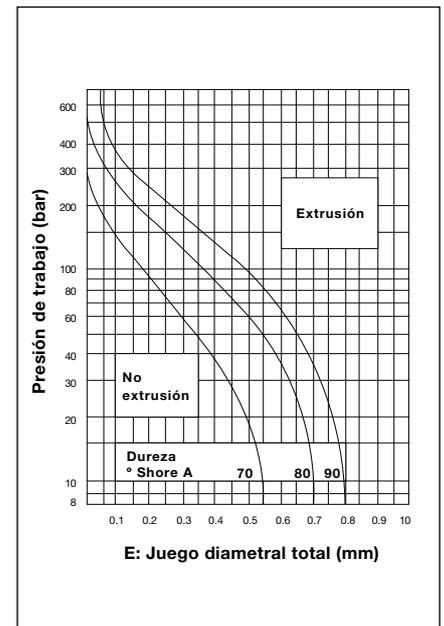
Se materializa con la deformación del O-Ring a través de un alojamiento a 45°. La longitud del chafán "A", debe ser un 30/ 35% superior a la sección "W".



EXTRUSION

Es el daño que experimenta el O-Ring sometido a elevadas presiones y/o huelgos considerables.

Para predecir este fallo puede recurrirse a la utilización del gráfico donde se delimita las zona de trabajo de los distintos compuestos en función de la dureza, presión y holgura "E", del alojamiento.



ALMACENAMIENTO

Para una mejor retención de las propiedades físicas originales de los productos de caucho, conviene observar las siguientes recomendaciones:

El almacén debe ser fresco, seco, sin polvo ni corrientes de aire.

Deberá evitarse la proximidad de tubos fluorescentes y toda fuente de luz emisora de rayos ultravioleta.

Los motores y tableros electricos son considerados perjudiciales por ser potenciales generadores de ozono.

La temperatura ideal debería estar comprendida entre -10°C y +20°C con una humedad óptima del 65%.

Las fuentes de calor deben ser indirectas y estar situadas a no menos de un metro. Los combustibles, lubricantes, ácidos, disolventes y productos químicos en general deben ser almacenados en otro sitio.

La provisión de los O-Rings en cajas, dentro de bolsas de polietileno termoselladas, garantizan una buena protección contra la luz, polvo y otros agentes externos.

El hecho de mantener las piezas dentro de su envase original, no solo preserva al material, sino que asegura su rastreabilidad y una adecuada rotación del stock.

NORMAS DE MONTAJE

Verificar que las dimensiones del O-Ring y el compuesto sean las correctas.

Eliminar toda arista viva.

Facilitar la deformación e introducción del O-Ring mediante un chafán de 15/20° Asegurar una correcta limpieza del alojamiento y de los útiles de montaje.

Proveer una adecuada lubricación inicial.

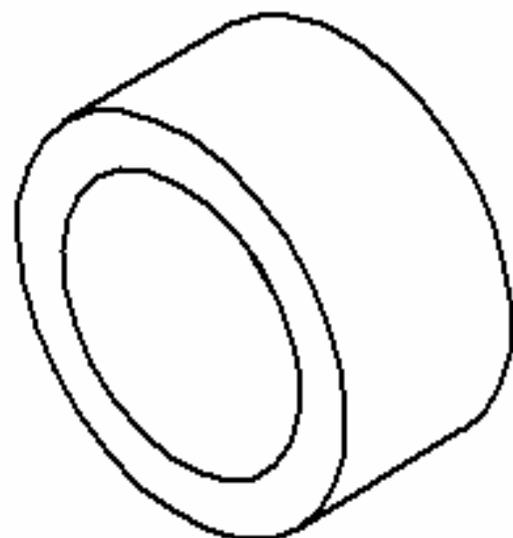
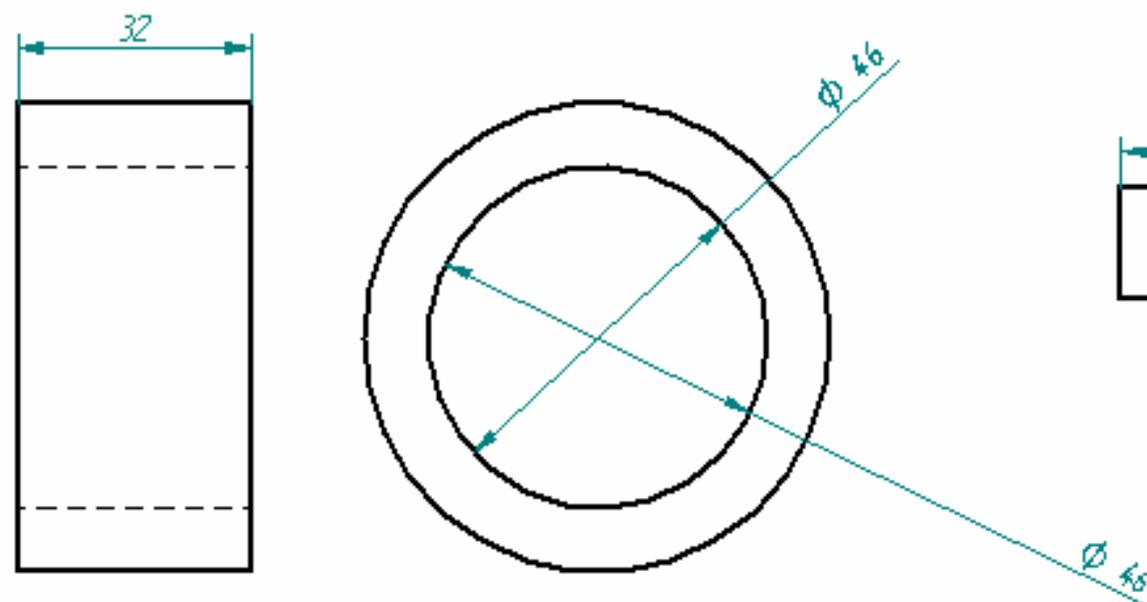
El O-Ring puede ser estirado hasta un 50% de su diámetro interior para facilitar su colocación. En el caso de los O-Rings de menor diámetro pueden requerirse estiramiento aún mayores.

Se deberá evitar el clásico retorcimiento del O-Ring que generalmente se produce al finalizar su montaje dentro de la ranura.

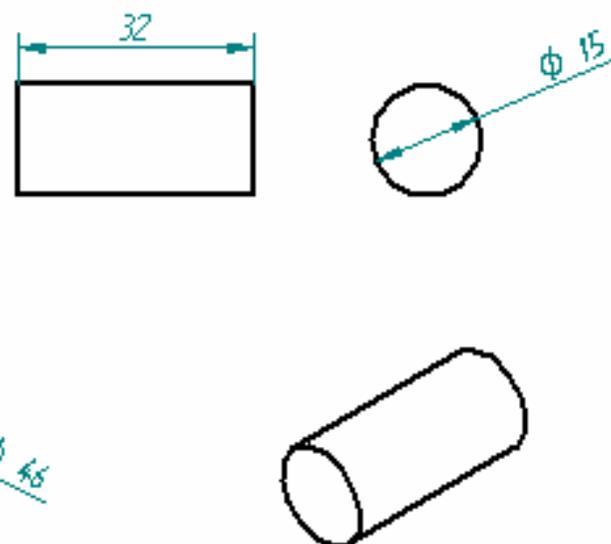
Nunca deberá forzarse su colocación sin haber observado todas las recomendaciones anteriores.

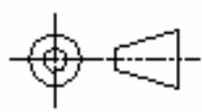
ANEXO G Planos

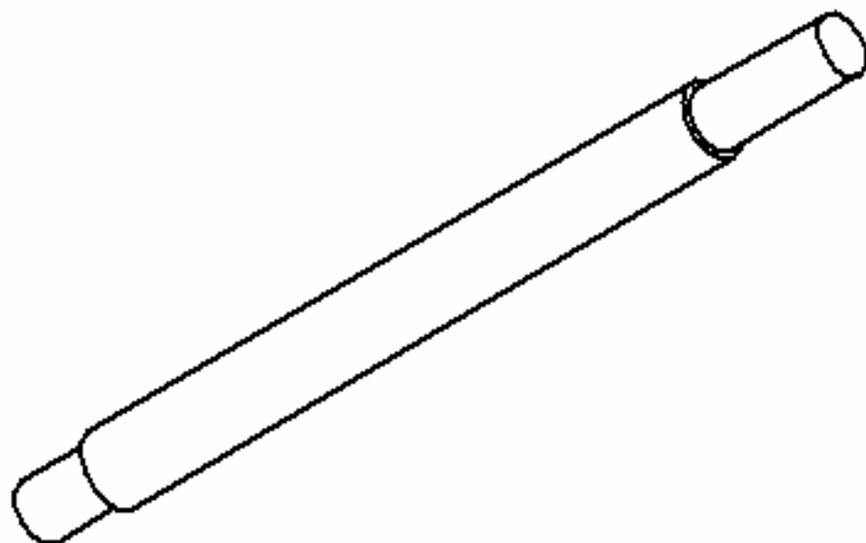
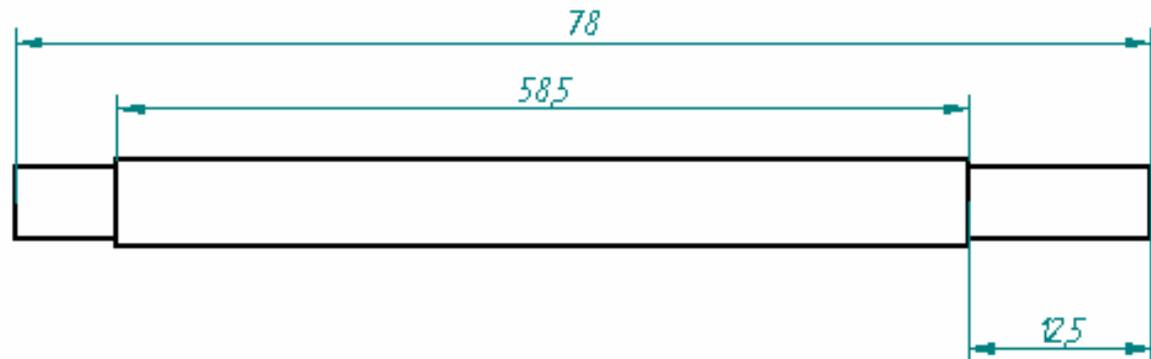
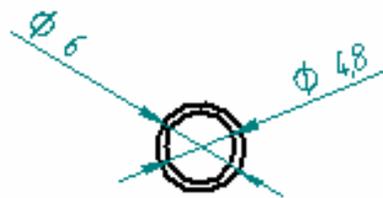
Imán Externo

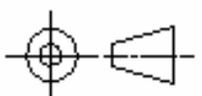


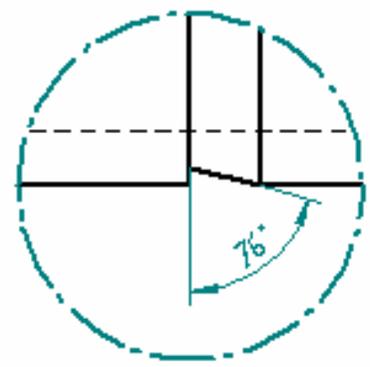
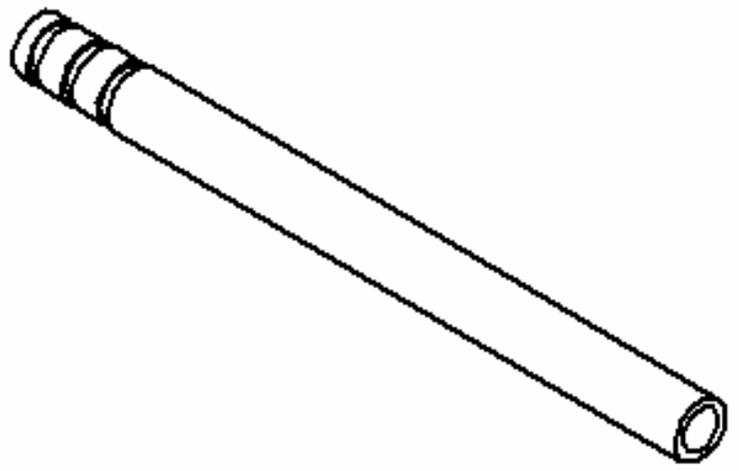
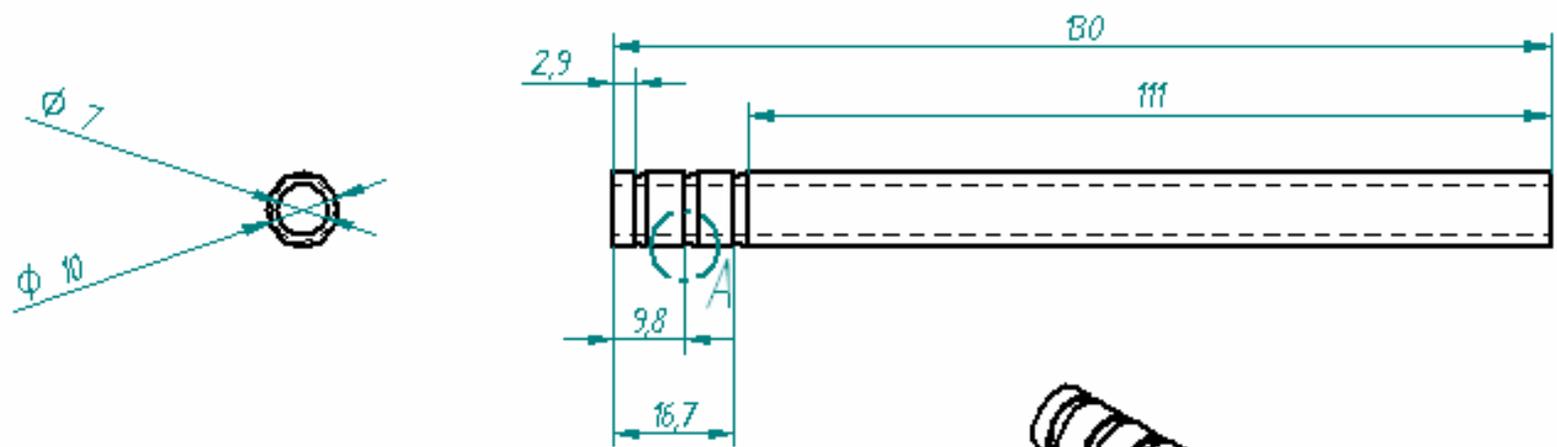
Imán Interno



UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA Sede Bogotá		DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MAGNETRÓN DESBALANCEADO PARA DEPOSITAR RECUBRIMIENTOS DE G-N	
	 Todos los elementos tienen una tolerancia de $\pm 5\%$	Plano <i>Imán externo e interno</i>	
		Dibuja: Arley Amaya Avila	A4
		Fecha: 25 - 05 - 07	Escala: 1:1

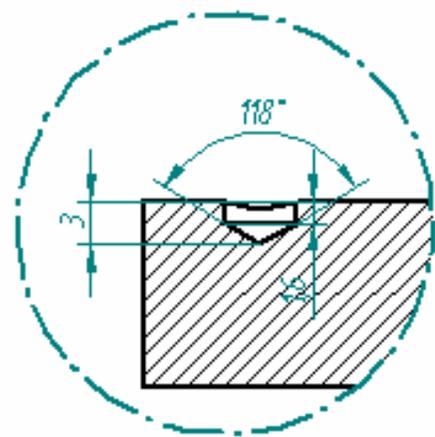


UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA Sede Bogotá		DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MAGNETRÓN DESBALANCEADO PARA DEPOSITAR RECUBRIMIENTOS DE CrN	
 <p>Todos los elementos tienen una tolerancia de $\pm 5\%$</p>			Plano: <i>Contacto electrico</i>
	Dibujo: Arley Amaya Avila		№ 4
	Fecha: 25 - 05 - 07	Escala 2 : 1	

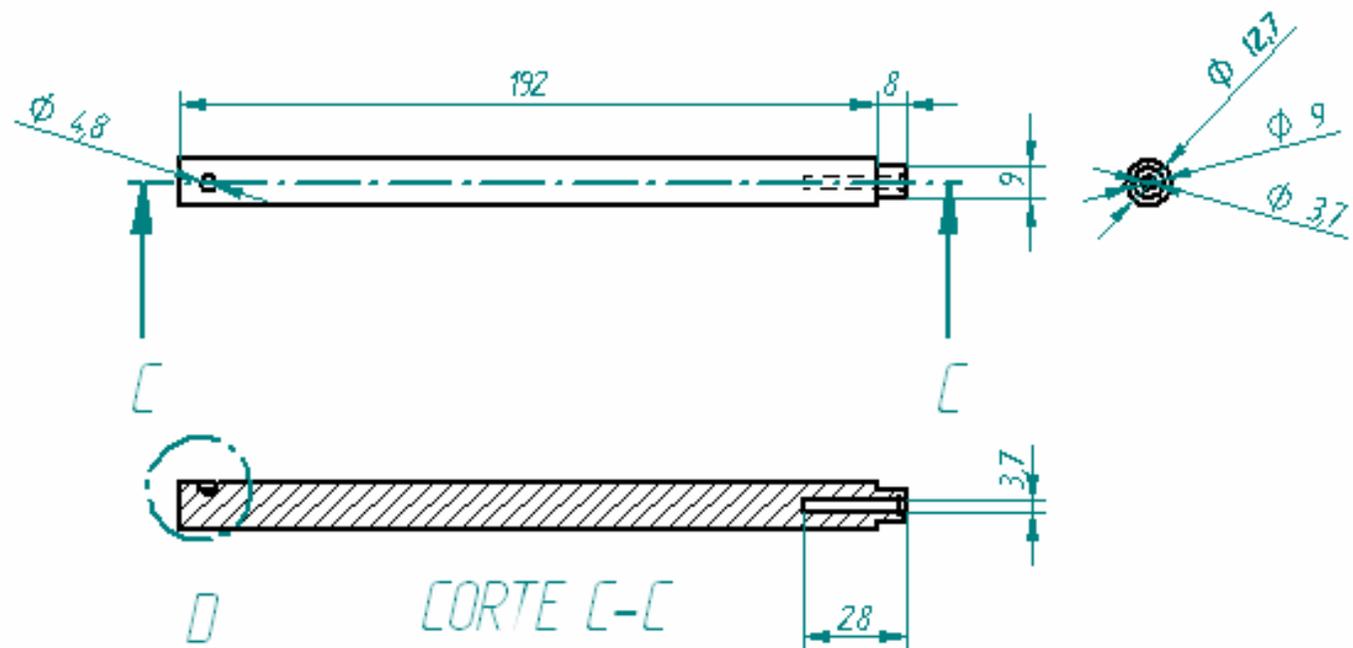


DETALLE A

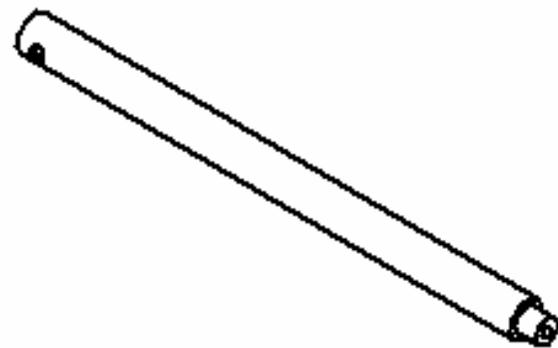
UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA Sede Bogotá		DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MAGNETRÓN DESBALANCEADO PARA DEPOSITAR RECUBRIMIENTOS DE CrN	
 <p>Todos los elementos fieren una tolerancia de = 5%</p>	Plano: <i>Tubos</i>		
	Dibujo: <i>Arley Amaya Avila</i>		A4
	Fecha: <i>25 - 05 - 07</i>	Escala <i>1 : 1</i>	



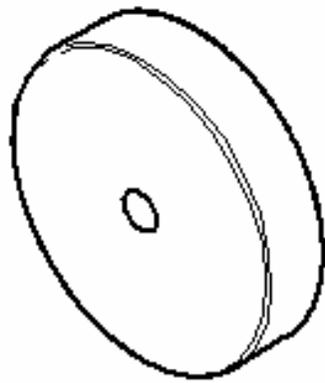
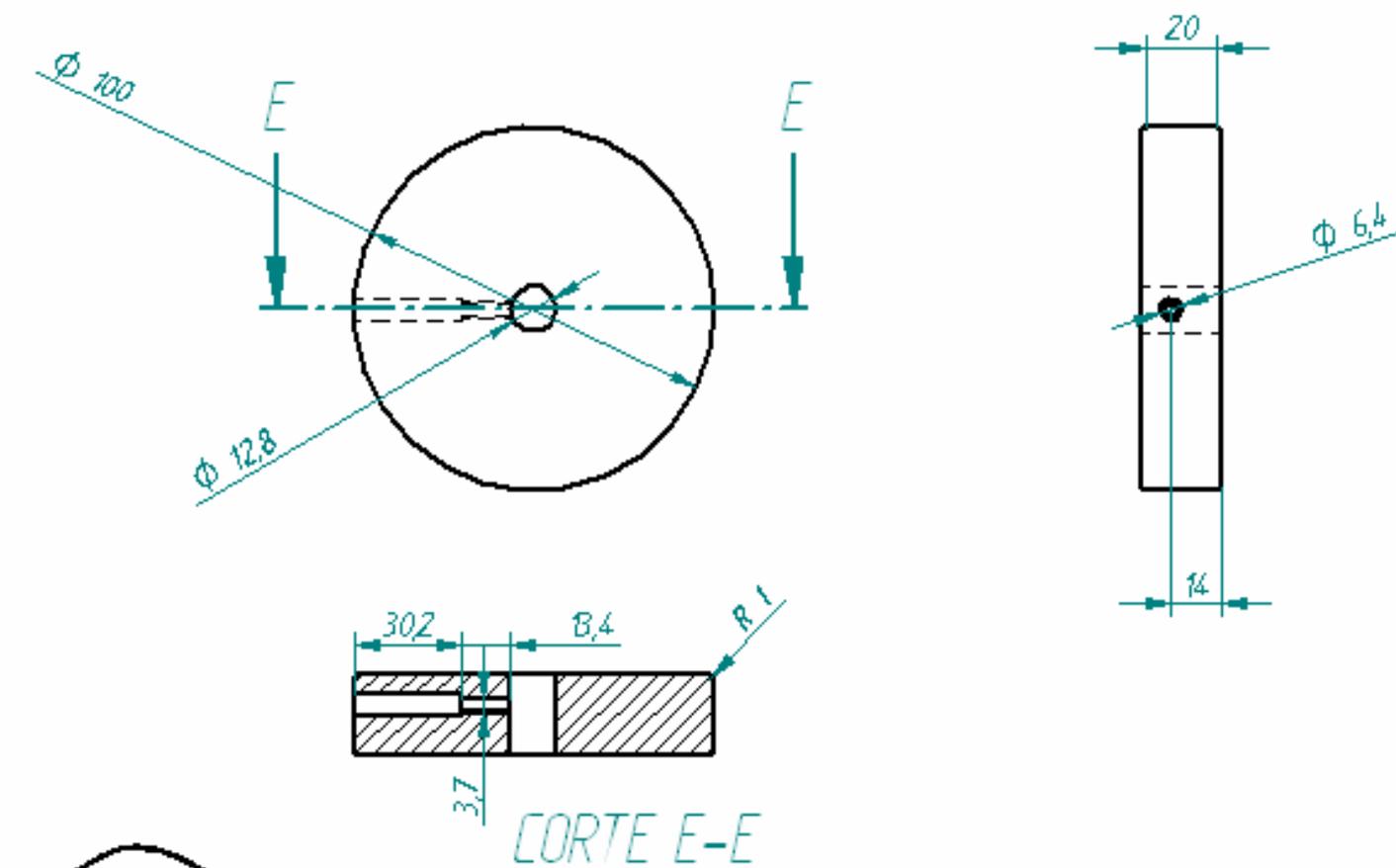
DETALLE D



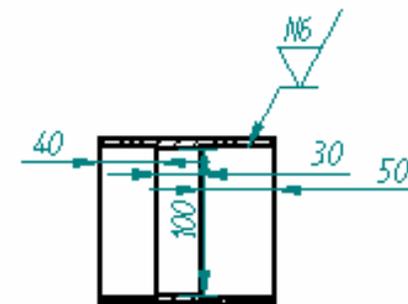
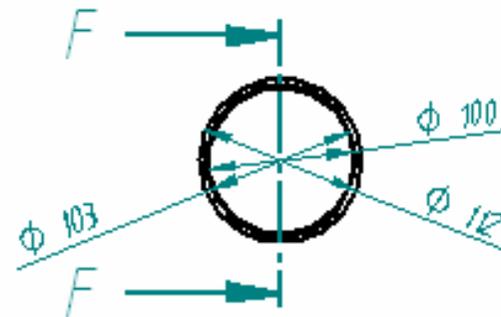
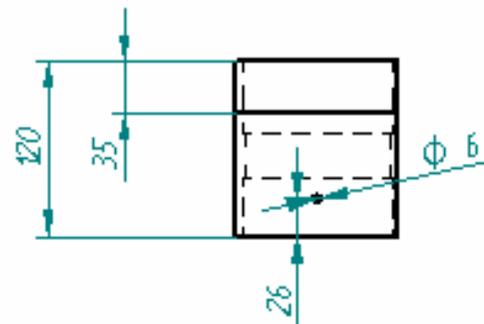
CORTE C-C



UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA Sede Bogotá		DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MAGNETRÓN DESBALANCEADO PARA DEPOSITAR RECUBRIMIENTOS DE CrN	
 <p>Todos los elementos tienen una tolerancia de $\pm 5\%$</p>	Plano: Eje		
	Dibujo: Arley Amaya Avila		A4
	Fecha: 25 - 05 - 07	Escala: 1 : 2	



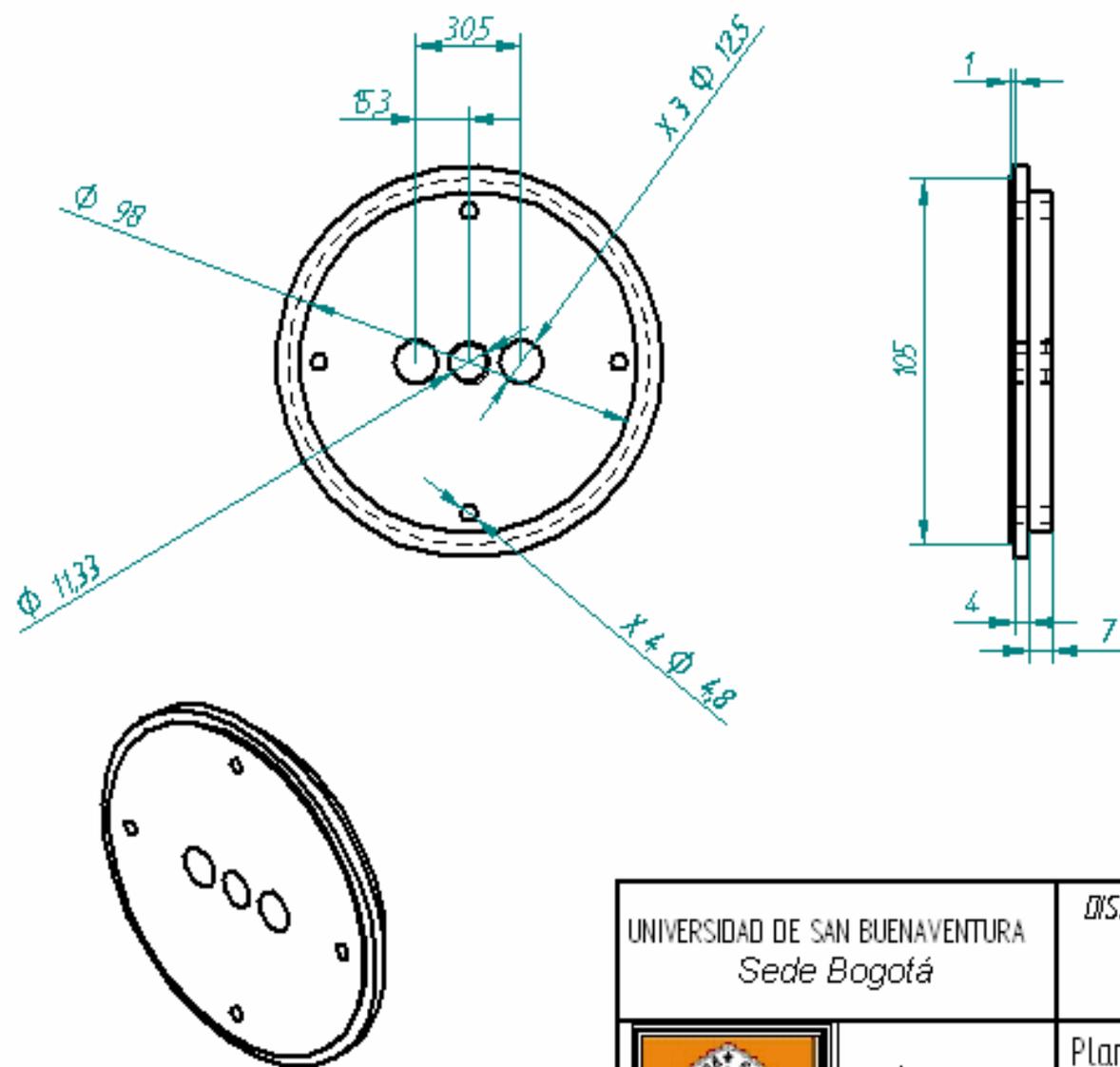
UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA Sede Bogotá		DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MAGNETRÓN DESBALANCEADO PARA DEPOSITAR RECUBRIMIENTOS DE CrN	
 <p>Todos los elementos tienen una tolerancia de $\pm 5\%$</p>	Plano: Manija		
	Dibujo: Arley Amaya Avila		A4
	Fecha: 25 - 05 - 07	Escala 1 : 2	



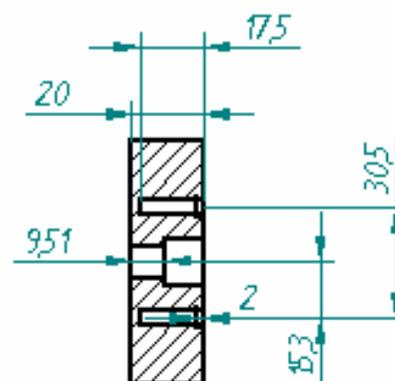
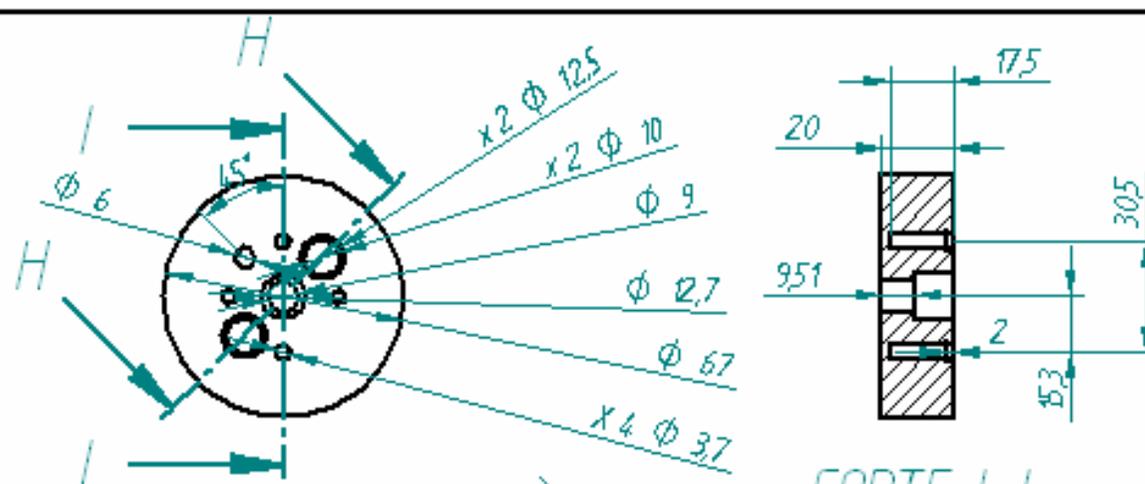
CORTE F-F



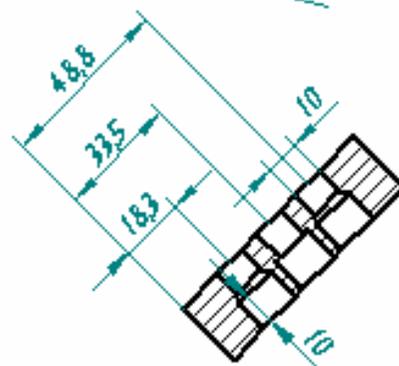
UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA Sede Bogotá		DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MAGNETRÓN DESBALANCEADO PARA DEPOSITAR RECUBRIMIENTOS DE CrN	
 <p>Todos los elementos tienen una tolerancia de = 5%</p>	Plano: <i>Carcaza</i>		
	Dibujo: Arley Amaya Avila		A4
	Fecha: 25 - 05 - 07	Escala 1 : 5	



UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA Sede Bogotá		DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MAGNETRÓN DESBALANCEADO PARA DEPOSITAR RECUBRIMIENTOS DE CnN	
 <p>Todos los elementos tienen una tolerancia de = 5%</p>	Plano: <i>Tapa</i>		
	Dibujo: <i>Arley Amaya Avila</i>		A4
	Fecha: <i>25 - 05 - 07</i>	Escala: <i>1 : 2</i>	



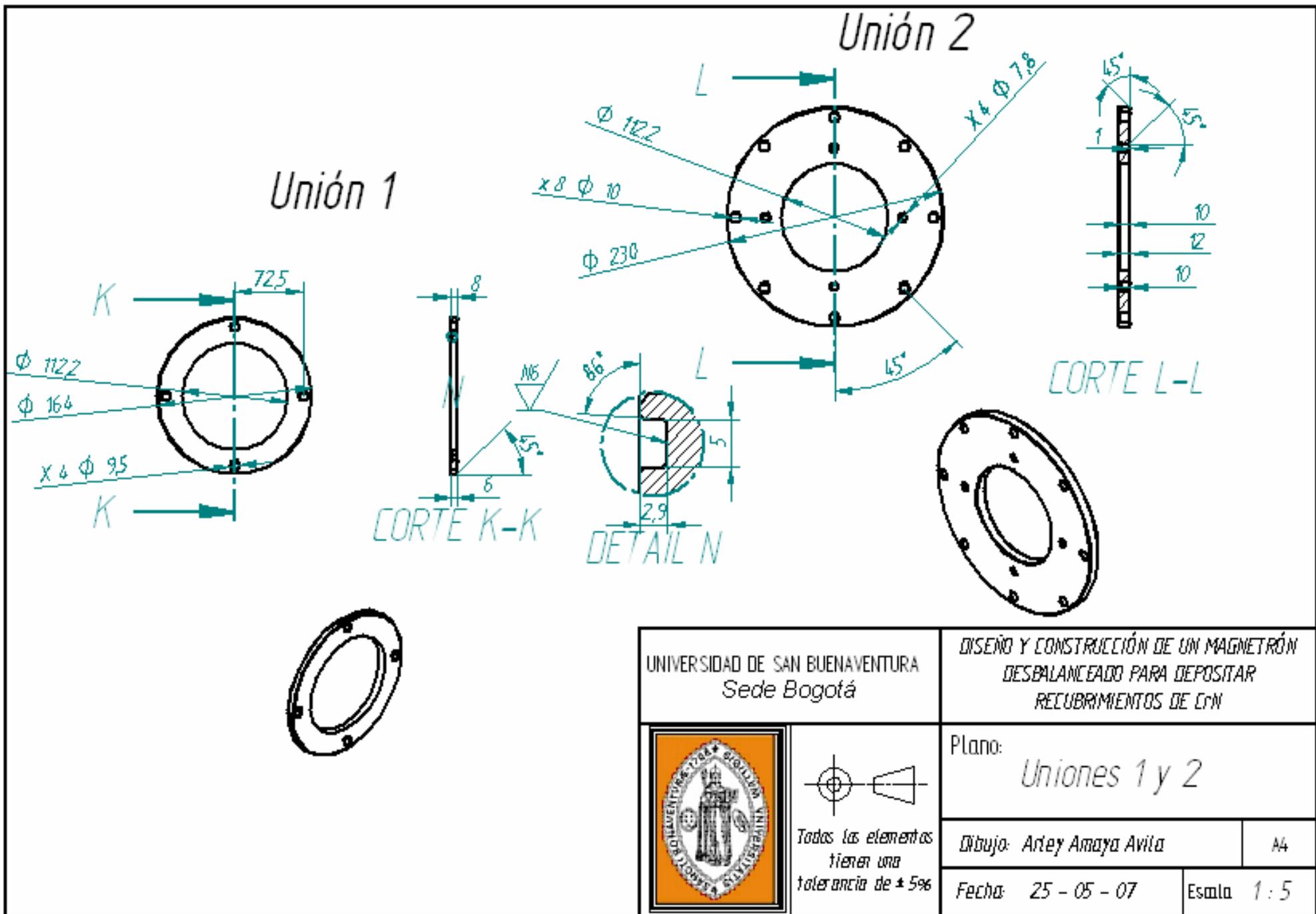
CORTE I-I



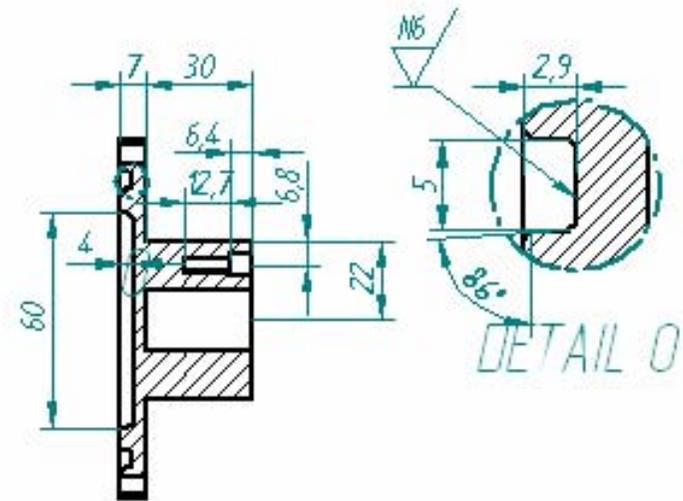
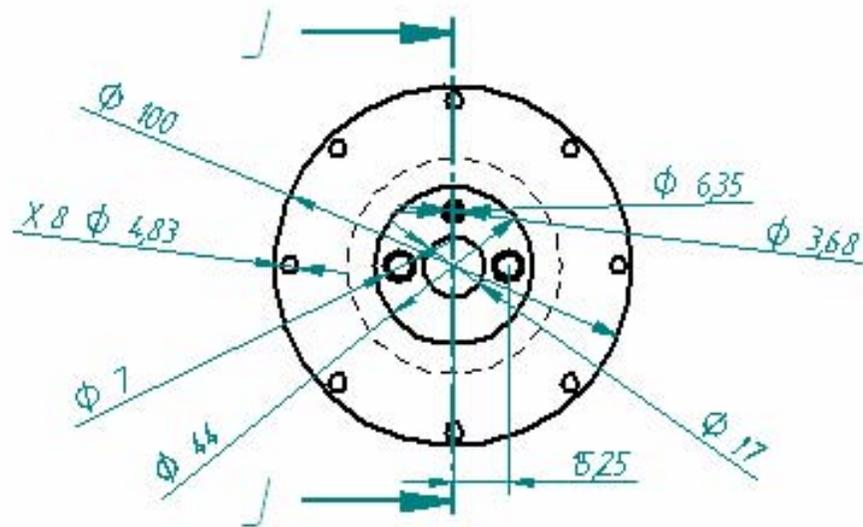
CORTE H-H



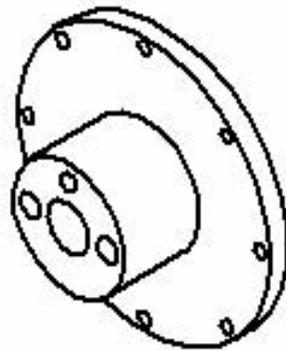
UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA Sede Bogotá		DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MAGNETRÓN DESBALANCEADO PARA DEPOSITAR RECUBRIMIENTOS DE CrN	
 <p>Todos los elementos tienen una tolerancia de $\pm 5\%$</p>	Plano: Aislante 1		
	Dibujo: Arley Amaya Avila		A4
	Fecha: 25 - 05 - 07	Escala 1 : 2	



UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA Sede Bogotá		DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MAGNETRÓN DESBALANCEADO PARA DEPOSITAR RECUBRIMIENTOS DE CrN	
 <p>Todos los elementos tienen una tolerancia de $\pm 5\%$</p>	Plano: <i>Uniones 1 y 2</i>		
	Dibujo: Arley Amaya Avila		A4
	Fecha: 25 - 05 - 07	Escala 1 : 5	

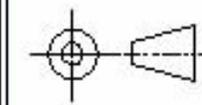


CORTE J-J



UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA
Sede Bogotá

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MAGNETRÓN
DESBALANCEADO PARA DEPOSITAR
RECUBRIMIENTOS DE CrN



Todos los elementos
tienen una
tolerancia de $\pm 5\%$

Plano:

Camara de refrigeración

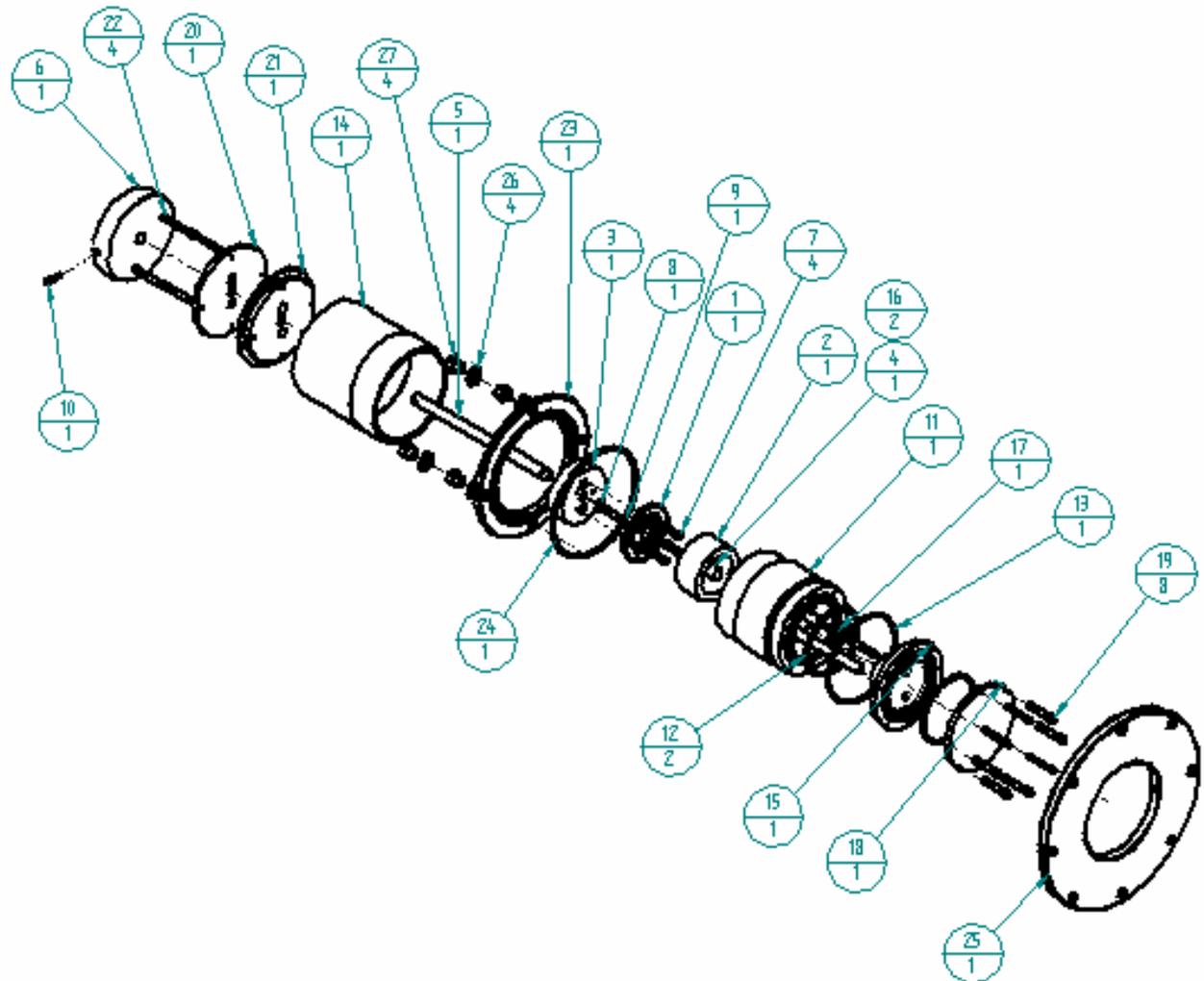
Dibujo: Arley Amaya Avila

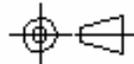
A4

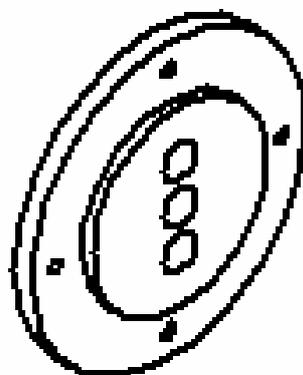
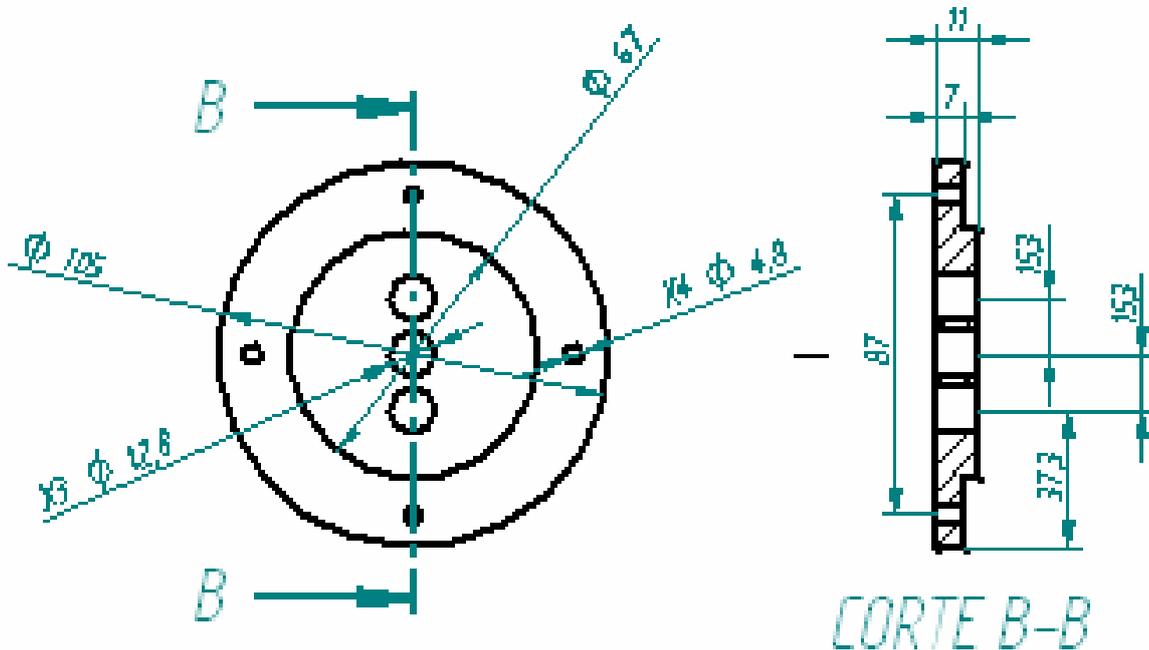
Fecha: 25 - 05 - 07

Escala 1:2

Numero pieza	Nombre	Material	Cantidad
1	Porta imanes	Acero 1020	1
2	Iman externo	Neodimio	1
3	Aislante 1	Nylon 6	1
4	Iman interno	Neodimio	1
5	Eje	Acero inox. 304	1
6	Manijo	Nylon 6	1
7	Tornillo avellan 1"	Acero inox. 304	4
8	Arandela 3/16"	Acero inox. 304	1
9	Tornillo allen 1"x3/16"	Acero inox. 304	1
10	Esparrago 1" x3/16	Acero inox. 304	1
11	Aislante con juntas	Nylon 6	1
12	O Ring 2-238	Caucho	2
13	O Ring 2-240	Caucho	1
14	Carcasa	Acero inox. 304	1
15	Camara de refrigeración	Acero inox. 304	1
16	Tubo 10mm	Acero inox. 304	2
17	Contacto electrico	Acero inox. 304	1
18	Blanco	Cromo	1
19	Tornillo allen 1 1/4"x3/16"	Acero inox. 304	8
20	Aislante topo	Nylon 6	1
21	Topo	Acero inox. 304	1
22	Tornillo allen 1 1/2"x3/16"	Acero inox. 304	4
23	Union o carcasa	Acero inox. 304	1
24	O Ring 2-248	Caucho	1
25	Union o camara de vacio	Acero inox. 304	1
26	Arandela 3/8"	Acero inox. 304	4
27	Tornillo 3/8"x3/8"	Acero inox. 304	4

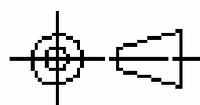


UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA Sede Bogotá		DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MAGNETRÓN DESBALANCEADO PARA DEPOSITAR RECUBRIMIENTOS DE CrN	
		Plano: ENSAMBLE	
		Dibaja: Arley Anaya Ariza	
		Fecha: 25 - 05 - 07	
Toda los elementos tienen una tolerancia de ± 5%		13	Escala 15



UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA
Sede Bogotá

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MAGNETRÓN
DESBALANCEADO PARA DEPOSITAR
RECUBRIMIENTOS DE CrN



Todos los elementos
tienen una
tolerancia de $\pm 5\%$

Plano:

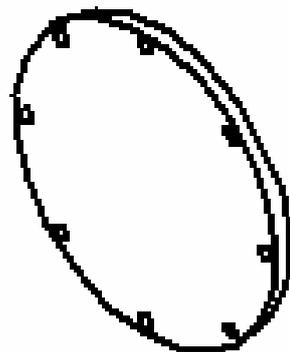
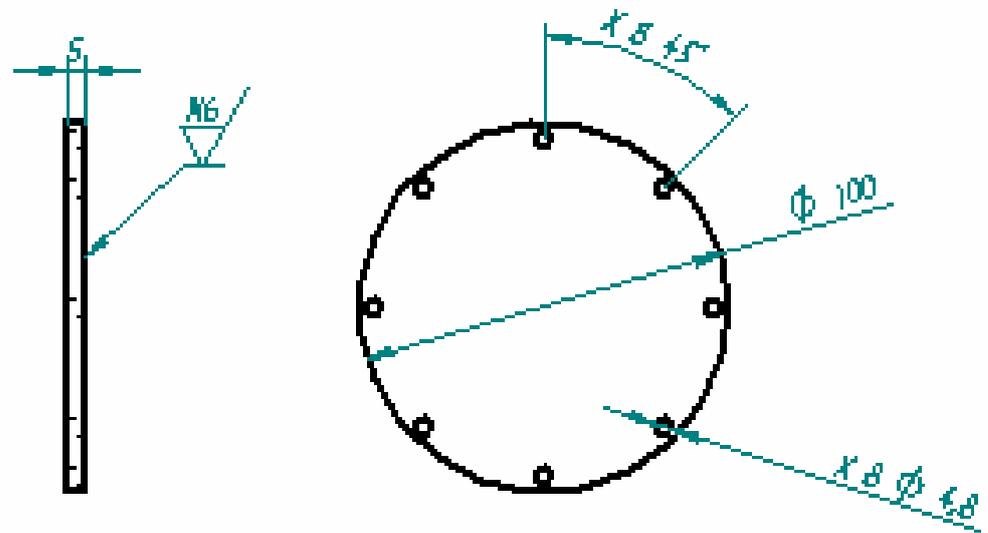
Aislante # 3

Dibaja: Arley Anaya Ariza

Nº

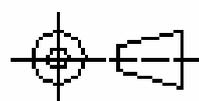
Fecha: 25 - 05 - 07

Escala 1:2



UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA
Sede Bogotá

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MAGNETRÓN
DESBALANCEADO PARA DEPOSITAR
RECUBRIMIENTOS DE CrN



Todos los elementos
tienen una
tolerancia de $\pm 5\%$

Plano:

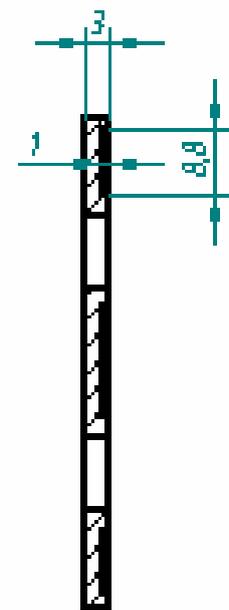
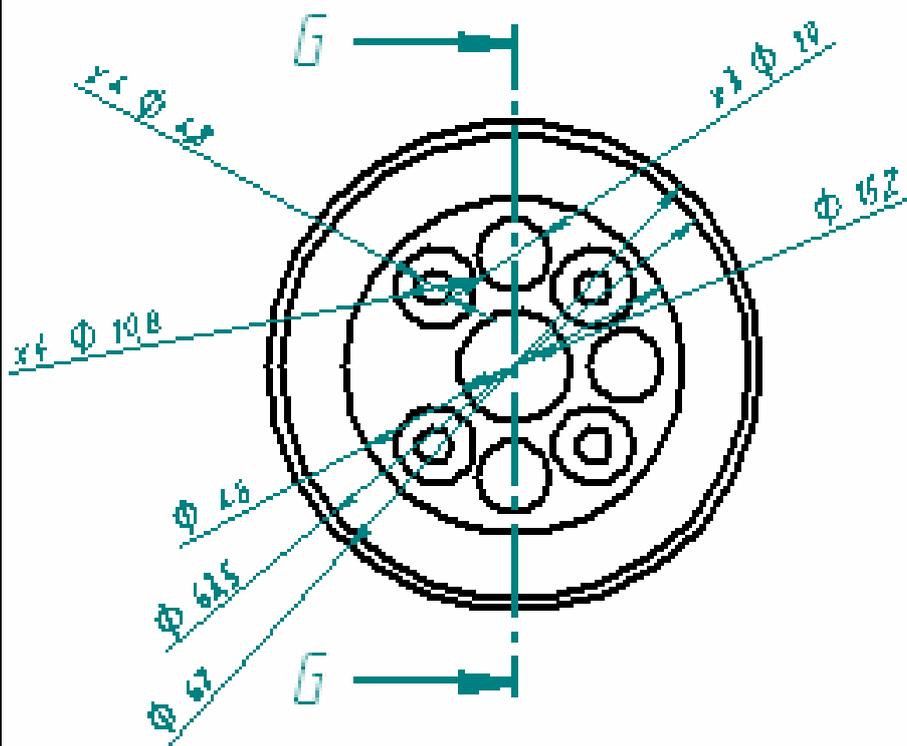
Blanco

Dibaja: Arley Anaya Ariza

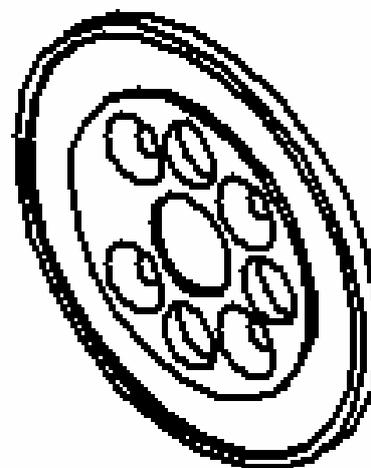
N

Fecha: 25 - 05 - 07

Escala 1:2

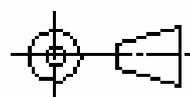


CORTE G-G



UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA
Sede Bogotá

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MAGNETRÓN
DESBALANCEADO PARA DEPOSITAR
REUBRIMENTOS DE CrN



Todos los elementos
hechos en
tolerancia de $\pm 5\%$

Plano:

Porta Imanes

Dibaja: Arley Anaya Arta

Nº

Fecha: 25 - 05 - 07

Escala 1:1

ANEXO H Tablas campo magnético medido.

COMPONENTE AXIAL

a\δ	0,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0	10,5	11,0	11,5	12,0
0,0	-445	-208	76	172	209	213	200	180	162	143	124	110	97	84	74	66	59	53	47	42	36	33	29	27	24
0,5	-311	-117	107	189	219	217	201	183	161	143	125	109	96	84	74	66	59	53	47	42	36	33	29	27	24
1,0	-21	122	216	242	248	229	207	183	161	141	123	107	92	84	73	66	58	53	47	42	36	33	29	27	24
1,5	296	346	334	307	272	241	210	184	158	139	120	105	88	81	72	64	57	51	46	41	36	32	29	26	24
2,0	627	585	442	357	296	250	208	179	154	134	116	101	84	78	70	62	55	50	45	40	35	32	28	26	23
2,5	816	674	484	368	291	242	202	172	146	126	109	96	78	74	66	59	52	48	43	38	34	30	27	25	23
3,0	717	595	440	333	270	222	189	157	136	117	101	89	71	69	62	55	49	45	41	37	32	29	26	24	22
3,5	465	413	340	275	230	191	161	139	120	105	92	81	65	64	57	51	46	43	39	35	31	38	25	23	21
4,0	248	234	228	205	179	153	136	117	104	93	83	73	58	59	52	47	43	40	37	33	29	27	24	22	20
4,5	91	117	141	137	133	120	108	97	88	79	72	64	51	53	47	43	39	37	35	31	27	25	23	21	19
5,0	0	54	79	89	90	90	84	78	71	67	61	56	43	46	42	39	35	34	33	29	25	23	21	20	18
5,5	0	12	37	53	59	63	62	60	57	53	50	47	37	40	38	35	32	31	30	26	23	21	20	18	17
6,0	0	7	12	28	38	41	44	45	45	43	41	39	32	34	33	30	28	28	27	24	20	19	18	17	15
6,5	0	-18	-3	11	20	28	31	33	34	34	33	32	25	30	29	27	25	25	25	22	19	18	17	15	14
7,0	0	-25	-11	0	10	16	21	24	25	26	27	26	21	25	24	23	22	22	22	20	17	16	15	14	13
7,5	0	-26	-16	-6	3	9	12	15	18	19	21	20	17	21	21	20	19	19	20	17	15	14	14	13	12
8,0	0	-26	-18	-10	-2	3	7	10	12	14	16	16	13	17	17	16	16	17	17	15	13	13	12	12	11
8,5	0	0	-18	-12	-6	0	3	5	8	10	11	13	11	14	14	14	14	14	15	13	12	11	11	11	10
9,0	0	0	-18	-13	-8	-4	0	2	5	7	8	10	8	11	11	11	11	12	12	11	10	10	10	10	9
9,5	0	0	-18	-13	-9	-5	-3	0	2	4	6	7	6	9	9	9	10	10	11	10	9	9	9	8	8
10,0	0	0	-18	-13	-9	-6	-4	-1	0	2	4	5	4	6	7	7	8	9	9	9	8	8	7	7	7
10,5	0	0	0	0	0	-7	-5	-3	-1	1	2	3	3	5	6	6	7	7	8	7	7	7	7	7	7
11,0	0	0	0	0	0	0	-5	-4	-2	0	1	2	2	3	4	4	5	6	6	6	5	6	6	6	6
11,5	0	0	0	0	0	0	0	-4	-3	-1	0	1	1	3	3	3	4	5	5	5	5	5	5	5	5
12,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-3	-2	0	0	2	2	2	3	4	4	4	4	4	4	4	4
12,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2	-1	0	0	1	1	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4
13,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-3	-2	0	0	0	1	1	2	2	2	2	2	3	3	3	3
13,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-3	-2	-1	0	0	0	1	2	2	2	2	2	3	3	3	3

COMPONENTE RADIAL

a\δ	0,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0	10,5	11,0	11,5	12,0	
0,0	0	25	22	22	20	19	15	14	12	10	9	8	8	7	7	6	6	6	5	5	4	4	4	4	4	
0,5	182	96	52	26	14	9	4	3	4	3	3	2	2	5	5	5	4	4	4	4	3	3	3	3	3	
1,0	284	133	57	23	7	-4	-8	-7	-7	-5	-4	-3	-3	2	2	3	2	3	3	3	2	2	2	2	2	
1,5	278	104	33	-2	13	-20	-21	-19	-16	-14	-12	-10	-7	-4	-3	-2	-2	-1	0	1	2	2	2	1	1	
2,0	129	18	-23	-44	-45	-41	-35	-31	-26	-23	-19	-15	-13	-10	-8	-6	-5	-4	-3	-1	2	2	1	1	0	
2,5	129	-108	-89	-90	-73	-60	-51	-42	-36	-30	-25	-20	-17	-14	-12	-9	-8	-6	-5	-3	-2	-1	-1	-1	-1	
3,0	-80	-199	-151	-126	-102	-80	-66	-53	-45	-37	-30	-26	-21	-18	-15	-12	-10	-9	-7	-6	-5	-4	-3	-3	-2	
3,5	-299	-274	-191	-151	-118	-93	-76	-61	-51	-43	-35	-29	-25	-21	-17	-15	-12	-10	-9	-7	-6	-5	-4	-4	-3	
4,0	-394	-288	-205	-162	-128	-101	-83	-67	-55	-47	-39	-33	-27	-23	-19	-17	-14	-12	-10	-9	-7	-6	-5	-5	-4	
4,5	-381	-255	-195	-158	-127	-104	-85	-70	-59	-49	-40	-34	-29	-25	-21	-18	-15	-12	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-5	
5,0	0	-219	-179	-146	-120	-99	-84	-71	-58	-50	-41	-35	-31	-26	-22	-19	-16	-12	-9	-9	-9	-8	-7	-6	-5	
5,5	0	-180	-153	-131	-112	-92	-80	-67	-55	-49	-41	-35	-31	-26	-26	-18	-17	-14	-11	-10	-10	-8	-7	-6	-6	
6,0	0	-148	-131	-113	-99	-84	-74	-64	-52	-47	-40	-35	-31	-26	-29	-17	-17	-15	-13	-12	-10	-9	-7	-7	-6	
6,5	0	-121	-108	-96	-85	-76	-66	-59	-48	-45	-39	-34	-29	-26	-26	-18	-17	-15	-13	-12	-10	-9	-8	-7	-6	
7,0	0	-98	-89	-83	-74	-67	-59	-54	-43	-42	-36	-32	-28	-25	-22	-19	-17	-15	-13	-12	-10	-9	-8	-7	-6	
7,5	0	-79	-75	-7	-64	-59	-53	-48	-39	-39	-34	-30	-27	-24	-21	-19	-17	-15	-13	-12	-10	-9	-8	-7	-6	
8,0	0	-65	-61	-59	-56	-51	-47	-44	-35	-35	-31	-28	-25	-22	-20	-18	-16	-15	-13	-12	-10	-9	-8	-7	-6	
8,5	0	0	-52	-49	-48	-44	-41	-39	-31	-32	-28	-26	-23	-21	-19	-17	-16	-14	-13	-11	-10	-9	-8	-7	-6	
9,0	0	0	-43	-42	-40	-38	-36	-34	-28	-29	-26	-23	-22	-20	-18	-16	-15	-14	-12	-11	-9	-9	-8	-7	-6	
9,5	0	0	-35	-34	-35	-32	-32	-30	-25	-26	-23	-22	-20	-18	-17	-15	-14	-13	-12	-10	-9	-8	-8	-7	-6	
10,0	0	0	-29	-30	-30	28	-28	-26	-22	-23	-21	-19	-18	-16	-15	-14	-13	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-6	
10,5	0	0	0	0	0	-24	-24	-23	-20	-20	-19	-18	-16	-15	-14	-13	-12	-11	-10	-9	-9	-8	-7	-6	-6	
11,0	0	0	0	0	0	0	-21	-20	-17	-18	-17	-16	-15	-14	-13	-12	-11	-10	-9	-9	-8	-8	-7	-7	-6	
11,5	0	0	0	0	0	0	0	-18	-15	-17	-15	-14	-13	-13	-12	-11	-11	-10	-9	-8	-8	-7	-7	-6	-6	
12,0	0	0	0	0	0	0	0	0	-13	-15	-13	-13	-12	-11	-11	-10	-10	-9	-8	-8	-7	-7	-6	-6	-5	
12,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-13	-12	-11	-11	-10	-10	-9	-9	-8	-8	-7	-7	-6	-6	-5	-5	
13,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-12	-11	-10	-10	-9	-9	-8	-8	-8	-7	-7	-6	-6	-5	-5	-4	
13,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-10	-9	-9	-9	8	8	7	7	7	7	7	7	6	1	-4	4	4