CENTRO DE INGENIERIA Y DESARROLLO

EQUIPO PARA SINTERIZADO DE POLVOS METÁLICOS-CERÁMICOS FINOS POR ARCO ELÉCTRICO SAE-TR

TESIS

005459

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE

DOCTOR EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

EN LA ESPECIALIDAD DE DISEÑO MECÁNICO

PRESENTA

M. I. JOSÉ ALFREDO MANZO PRECIADO

DIRECTOR DE TESIS

DR. SEBASTIÁN DÍAZ DE LA TORRE

CIENCIA Y TECNOLOGIA

QUERÉTARO, QRO. FEBRERO DE 2008.

CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Director de Posgrado
PICYT – CIDESI
Querétaro

El abajo firmante, miembro del Comité Tutorial del alumno **JOSÉ ALFREDO MANZO PRECIADO**, una vez leída y revisada la Tesis titulada "**EQUIPO PARA SINTERIZADO DE POLVOS METÁLICOS-CERÁMICOS FINOS POR ARCO ELÉCTRICO SAE-TR**", acepta que la referida tesis revisada y corregida sea presentada por el alumno para aspirar al grado de DOCTOR en Ciencia y Tecnología en la opción terminal de Diseño Mecánico durante el Examen de Grado correspondiente.

Y para que así conste firma la presente a los 15 días del mes de febrero del año dos mil ocho.

Tutor Académico

Dr. Sebastián Díaz de la Torre

CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Director de Posgrado
PICYT – CIDESI
Querétaro

Los abajo firmantes, miembros del Jurado del Examen de Grado del alumno **JOSÉ ALFREDO MANZO PRECIADO**, una vez leída y revisada la Tesis titulada **"EQUIPO PARA SINTERIZADO DE POLVOS METÁLICOS-CERÁMICOS FINOS POR ARCO ELÉCTRICO SAE-TR"**, aceptamos que la referida tesis revisada y corregida sea presentada por el alumno para aspirar al grado de DOCTOR en Ciencia y Tecnología en la opción terminal de **Diseño Mecánico** durante el Examen de Grado correspondiente.

Y para que así conste firmamos la presente a los 15 días del mes de febrero del año dos mil ocho.

Dr. Enrique Rocha Rangel
Presidente

Dr. Carlos Rubio González
Secretario

Dr. Roberto Martínez Sánchez
Vocal

Dr. Luis del Llano Vizcaya
Vocal

Dr. Sebastián Díaz de la Torre
Vocal

RESUMEN

El presente trabajo fue parte integral de un proyecto técnico-científico apoyado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACYT México, a través del Fondo de Tecnologías Precompetitivas (No.G500-284/2000) enfocado al diseño y fabricación de un equipo de sinterizado y templado rápido insitu, para el densificado de polvos finos metálicos-cerámicos-cermets y compósitos (aleaciones especiales). El proyecto se desarrolló con la colaboración activa de profesores investigadores y alumnos asociados al **CIDESI**, **CIMAV-Chihuahua** y **CIITEC del IPN**. Tanto el diseño como su fabricación han derivado en una patente, que a la fecha ha pasado su primer "examen de forma" ante el Instituto Mexicano de la Propiedad Intelectual IMPI y en breve culminará su clasificación "en trámite".

El equipo incorpora mejoras tecnológicas y el rediseño optimizado, basándose en los aparatos disponibles comercialmente, y resultando altamente efectivo en cuanto a costos de construcción y versatilidad de operación. El sistema desarrollado se ha denominado equipo de "**Sinterizado por Arco Eléctrico y Templado Rápido, *SAE-TR***". Este opera aprovechando el efecto "Joule" de calentamiento que ocurre al paso de corriente eléctrica en un circuito. Otra innovación en el horno de sinterizado lo representa el sistema anexo para generar las bajas temperaturas (templado) que se logran al usar aire frío y otros gases inertes (nitrógeno, argón). No obstante, también es posible hacer sinterizado de polvos con el equipo SAE-TR en condiciones de alto vacío.

El equipo SAE-TR involucra la descarga de una alta densidad de corriente directa DC (desde 30 a 3,000Amp) y voltaje controlado (desde 5 a 14 V). La corriente es suministrada en forma de pulsos eléctricos directamente sobre de los polvos precursores a sinterizar, los cuales a su vez están en un contenedor de grafito sujeto a una carga axial del orden de 50 y extrapolable hasta 100MPa. El flujo de corriente por unidad de tiempo genera el efecto *Joule* de calentamiento, logrando alcanzar temperaturas cercanas a los 2000°C. Velocidades de calentamiento tan rápidas como 600°C/min permiten conducir a la fabricación de materiales especiales y novedosos.

El equipo SAE-TR resulta conveniente para la fabricación de materiales cerámicos estructurales y/o metálicos avanzados eliminando y manipulando la porosidad que existe entre las partículas de polvos precursores debidamente preparados (cuerpos en verde), además de permitir el control de la microestructura final de los nuevos materiales. Estos incluyen por ejemplo, materiales volumétricos en estado nanométrico, aquellos fuera del equilibrio termodinámico, soluciones sólidas, intermetálicos, etc. Las velocidades de enfriamiento alcanzadas por el equipo (convección forzada) están alrededor de los 200°C /min.

En este trabajo de tesis se describen los cálculos de diseño, termodinámicos y mecánicos seguidos en la consecución de la fabricación del equipo. Se presentan los primeros resultados obtenidos de los especimenes desarrollados.

ABSTRACT

The present work was an important part of a scientific-technical project sponsored by the National Council of Science and Technology of Mexico CONACYT, throughout the project No.G500-284/2000. The project was focused to the design and fabrication of a sintering device integrating an insitu-cooling system, convenient for consolidating fine metallic-ceramic-cermets and composites (special alloys). This project was carried out with active collaboration of academic/researchers and students associated to **CIDESI**, **CIMAV-Chihuahua** and **CIITEC-IPN**. Both design and fabrication of the sintering device have lead to a patent submission. This pendant patent has already passed its first "form-examination", according to the Mexican Patent Institute IMPI, and the authors are expecting its final approval by the end of this year.

The constructed sintering-device incorporates substantial electronic and mechanical innovations as compared to commercially available and similar equipments. Based on both sintering literature and experienced professors long working on plasma sintering, a cost effective device called "***Sinterizado por Arco Eléctrico y Templado Rápido, SAE-TR***" has been fabricated. This equipment works taking advantage of the Joule heating effect, which takes place once a certain amount of current goes through a circuit. The uniqueness of SAE-TR is related to its fast quenching system adapted, as to work out the compacting specimen with inert cold gases (nitrogen, argon). It is also possible to conduct sintering experiments in high vacuum conditions. SAE-TR involves a high density DC-electric discharge (from 30 to 3,000Amp) and controlled voltage (from 5 to 14V). A current flow is supplied directly into the powder to be sintered throughout controlled pulses intervals. A maximum applied load of 100MPa can also be delivered directly on the powder. Temperature attained in the powder dies set can be as high as 2000°C in few minutes. Heating rates such as 600°C/min allow us to synthesize novel materials.

In this thesis work it is described the design calculations, as well as those thermodynamics and mechanics followed in the SAE-TR fabrication. Some experimental sintering results are presented in this work.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a dios por la vida y por permitirme realizar un objetivo en compañía de mi familia.

A mis abuelos y a mis padres les agradezco por la humildad que siempre han tenido y por inculcarme con sus ejemplos los buenos principios morales.

A mis hermanos que desgraciadamente los últimos años no he podido estar cerca de ellos les agradezco el cariño que siempre han mostrado para con migo y mi familia.

A mi esposa Piedad y a mis hijos Alfonso, Juan y Alfredo les agradezco por el apoyo que siempre me han brindado y quiero decirles que son el motor de mi vida y son ustedes principalmente el porque del ser de mi vida.

Por el desarrollo de este proyecto doy mis agradecimientos al CONACYT por haber apoyado económicamente por medio del Fondo de Tecnologías Precompetitivas (FTP) No. de Proyecto G500-280/2000, que si no hubiera sido por este apoyo el proyecto no se hubiera culminado satisfactoriamente.

A CIDESI le agradezco por el apoyo de la infraestructura y por permitirme aprender con el desarrollo de diferentes proyectos.

A los representantes de la Dirección de Investigación y Posgrado de CIDESI les agradezco los apoyos económicos y laborales que fueron fundamentales para culminar con un objetivo en mi vida.

Le agradezco al Dr. Sebastián Díaz de la Torre por su apoyo incondicional para poder desarrollar este proyecto, y por todos los consejos tan valiosos que como tutor académico y persona honesta me dio.

Al Ing. Celso Eduardo Cruz González, al M.C. J. Antonio Banderas Hernández y Obed Arnoldo Chimal Valencia les agradezco por su apoyo técnico en pruebas destructivas y de difracción de RX de los materiales sinterizados

Siempre viviré agradecido de mis amigos que de alguna u otra forma colaboraron por pequeño que fue el apoyo en el desarrollo de este proyecto. No doy nombres porque no quiero omitir a ninguno de ustedes.

[illegible] compañeros de trabajo les agradezco porque en momentos difíciles he pedido [illegible] puntos de vista y siempre me han apoyado cuando he requiero de su ayuda.

CONTENIDO

	página
Listado de Figuras	i
Listado de Tablas	iv
Capítulo 1. INTRODUCCIÓN	4
1.1 Objetivo general	4
1.2 Objetivos específicos	4
1.2.1 Metas	4
1.3 Definición del proyecto	5
1.4 Justificación	5
1.5 Antecedentes y estado del arte	6
Capítulo 2. DISEÑO DEL EQUIPO	8
Sistemas componentes del equipo SAE-TR	8
2.1 Diseño mecánico de los diferentes sistemas	8
2.2 Sistema de control general PLC	10
2.3 Sistema de alto vacío	12
2.4 Sistema hidráulico de presurización uniaxial	13
2.5 Sistema eléctrico de alta potencia	19
2.6 Sistema de enfriamiento	26
2.7 Sistema de control de temperatura	32
2.8 Sistema de templado	33
2.9 Sistema colector de datos	34
2.10 Sistema de estructura principal	63
Capítulo 3. FABRICACIÓN DEL EQUIPO	72
3.1 Fabricación / adquisición de los diferentes componentes	72
3.2 Ensamble de partes	75

Capítulo 4. PRUEBAS PRELIMINARES CON EL EQUIPO 79

4.1 Reporte – Comportamiento del equipo en las primeras pruebas 79

4.1.1 Mecánico 80

4.1.2 Energético 81

4.1.3 Económico 81

4.2 Fallas repetitivas 81

Capítulo 5. PRIMEROS MATERIALES FABRICADOS CON EL EQUIPO 83

5.1 Sinterización de polvos de Cobre (Cu) 83

5.1.1 Caracterización de polvo y pastillas de Cobre 83

5.2 Sinterización de polvos de Níquel (Ni) 87

5.2.1 Caracterización de polvo y pastilla de Níquel 87

5.3 Sinterización de polvos de Alúmina (Al_2O_3) 90

5.3.1 Caracterización de polvos y pastillas de Alúmina 90

Capítulo 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Diseño del equipo SAE-TR 96

6.2 Fabricación del equipo SAE-TR 97

6.3 Pruebas preliminares usando un prototipo del equipo SAE 98

6.4 Materiales fabricados con el equipo 99

6.5 Estudiantes graduados con participación en este trabajo 100

CONCLUSIONES 102

Impacto del proyecto de tesis 103

Tecnológico y científico 103

Recomendaciones para trabajos posteriores 104

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 105

Apéndices

Listado de Figuras

Número	Descripción	Página
Fig. 2.1	Diagrama de pulsos de la corriente eléctrica para el sistema SAE-TR.	10
Fig. 2.2	Corte transversal del homo/cámara de sinterizado SAE-TR.	12
Fig. 2.3	Bomba de alto vacío seleccionada.	13
Fig. 2.4	Circuito hidráulico del equipo SAE-TR.	19
Fig. 2.5	Diagrama de bloque de la fuente de pulsos.	20
Fig. 2.6a	Vista frontal y lateral del transformador de potencia para SAE-TR.	21
Fig. 2.6b	Vista frontal del gabinete del transformador de potencia.	21
Fig. 2.7	Vista lateral simplificada de la cámara de sinterizado SAE-TR.	27
Fig. 2.8	Esquema representativo de la cámara de sinterizado SAE-TR.	28
Fig. 2.9	Descripción de algunos valores de la cámara de sinterizado.	29
Fig. 2.10	Fotografía del termómetro infrarrojo.	31
Fig. 2.11	Diagrama de interconexión para controlar la temp. en el SAE-TR.	32
Fig. 2.12	Circuito diseñado para realizar el templado del SAE-TR.	33
Fig. 2.13	Anemómetro para medir el flujo del aire.	34
Fig. 2.13a	Equipo de Sinterizado por SAE-TR.	36
Fig. 2.14.	Panel de control para la máquina de sinterizado SAE-TR.	37
Fig. 2.15.	Tarjeta MP400.	38
Fig. 2.16.	Potenciómetro regulador de voltaje para la tarjeta MP400.	38
Fig. 2.17	Pirómetro infrarrojo Raytek.	40
Fig. 2.18	Acondicionador de señal de Weidmüller.	41
Fig. 2.19	DAQ de National Instruments AT-MIO-16E-2.	42
Fig. 2.20	Relación de la Temp. respecto al Voltaje para el Sensor de TI.	44
Fig. 2.21	Sensor TI, ubicado en dirección a la matriz de grafito.	46
Fig. 2.22	Respuesta al escalón de entrada de 0.5 Volts.	47
Fig. 2.23	Respuesta al escalón de entrada de 1.0 Volts.	47
Fig. 2.24	Respuesta al escalón de entrada de 1.5 Volts.	48
Fig. 2.25	Modelo base para el diseño del PID.	49

Fig. 2.26	Comparación del sistema real con el simulado.	50
Fig. 2.27	Comparación del sist. real con el simulado en el plano Z y S.	53
Fig. 2.28	Comparaciones de los sistemas de 1er y 2do orden.	54
Fig. 2.29	Respuestas de los sistemas de 1er y 2do orden.	55
Fig. 2.30	Diagrama de bloques del control PID.	56
Fig. 2.31	Respuesta de nuestro sistema a un setpoint de 420°C.	57
Fig. 2.32	Respuesta del PID, al simular un setpoint de 420°C.	58
Fig. 2.33	Respuesta de nuestro sistema a un setpoint de 420°C. Utilizando el doble de los parámetros Kp, Ti, y Td.	59
Fig. 2.34	Respuesta del PID, al simular un setpoint de 420°C. Utilizando el doble de los parámetros Kp, Ti, y Td.	60
Fig. 2.35	Respuesta de nuestro sistema a un setpoint de 420°C. Utilizando los valores de $P = 0.5, I = 0.001, D = 50$.	61
Fig. 2.36	Respuesta del PID, al simular un setpoint de 420°C, utilizando los valores de $P = 0.5, I = 0.001, D = 50$.	62
Fig. 2.37	Diagrama de cuerpo libre para análisis de cargas.	63
Fig. 2.38	Viga simplemente apoyada para análisis de cargas.	63
Fig. 2.39	Sección de viga a la izquierda de P.	64
Fig. 2.40	Sección de la viga a la derecha de P.	65
Fig. 2.41	Diagrama de fuerza cortante.	65
Fig. 2.42	Diagrama de momento flexionante.	66
Fig. 2.43	Medidas de la placa base para el horno/cámara de SAE-TR.	66
Fig. 2.44	Estructura principal de la máquina de sinterizado SAE-TR.	68
Fig. 2.45	Estructura analizada con ANSYS mostrando la malla.	68
Fig. 2.46	Restricciones de desplazamiento en las placas de estudio.	69
Fig. 2.47	Aplicación de la carga sobre las placas SAE-TR.	69
Fig. 2.48	Esfuerzos de Von Mises en una vista isométrica.	70
Fig. 2.49	Simulación de la def. en la placa de la estructura SAE-TR.	70
Fig. 3.1	Fotografía de columnas maquinadas para el horno.	72
Fig. 3.2	Fotografía de placa manufacturada para el horno SAE-TR	73
Fig. 3.3	Esquema del interior de la cámara de sinterizado/horno SAE-TR.	73

Fig. 3.4	Cilindro con tapas para el horno de sinterizado SAE-TR.	74
Fig. 3.5	Mirilla del horno, a través de la cual se monitora la temperatura de la matriz, con el termómetro de infrarrojo.	74
Fig. 3.6	Ensamble del horno de sinterizado.	75
Fig. 3.7	Ensamble del horno a su base.	76
Fig. 3.8	Ensamble del sistema de sinterizado SAE-TR.	78
Fig. 3.9	Sistema hidráulico y de enfriamiento del equipo SAE-TR.	78
Fig. 4.1	Tarjeta de control para pulsos eléctricos.	79
Fig. 4.2	Placa que sostiene el estudiante con una masa de 1000 kg.	80
Fig. 5.1	Primeros materiales sinterizados usando el equipo SAE-TR.	82
Fig. 5.2	Patrón de difracción de rayos-X del polvo original de cobre.	83
Fig. 5.3	Patrón de difracción de rayos-X de la pastilla CU-1 de cobre sinterizada por SAE-TR.	84
Fig. 5.4	Microestructura observada en la pastilla CU-1 de Cu sinterizada a 700°C/8min (3min hold) y 50 MPa.	85
Fig. 5.5	Patrón de difracción de rayos-X de la pastilla CU-2 de cobre sinterizada por SAE-TR. Las condiciones fueron 750°C/8min (3min hold) y 50 MPa.	85
Fig. 5.6	Microestructura observada en la pastilla CU-2 de Cu sinterizada a 750°C/8min (3min hold) y 50 MPa.	86
Fig. 5.8	Patrón de difracción de rayos-X del polvo original de níquel.	87
Fig. 5.9	Patrón de difracción de rayos-X de la pastilla NI-1 de níquel sinterizada por SAE-TR. Las condiciones fueron 750°C/9min (2min hold), y 50 MPa.	88
Fig. 5.10	Microestructura observada en la pastilla NI-1 de Ni sinterizada a 750°C/9min (2min hold), y 50 MPa.	88
Fig. 5.11	Patrones de difracción de rayos-X de polvos de alúmina y pastillas sinterizadas por SAE-TR.	91
Fig. 5.12	Patrón de difracción de rayos-X de la pastilla BA-3 de alúmina sinterizada por SAE-TR. Las condiciones fueron 1700°C/9min (0min hold) y 50 MPa.	92

Fig. 5.13	Tamaño de grano de la pastilla alúmina BA-3 sinterizada a 1700°C/9min.	93
Fig. 5.14	Patrón de difracción de rayos-X de la pastilla TM-2 de alúmina sinterizada por SAE-TR. Las condiciones fueron 1500°C/5min (0min hold) y 50 MPa.	94
Fig. 5.15	Tamaño de grano de la pastilla alúmina TM-2 sinterizada a 1500°C/5min.	95
Fig. 6.1	Prototipo del sistema de sinterizado SAE.	99

Listado de Tablas

Tabla 2.1	Propiedades mecánicas del acero para placas.	67
Tabla 5.1	Características de los polvos precursores de alúmina y resultados de las piezas sinterizadas.	90
Tabla 6.1	Detalle de los alumnos que participaron en el presente trabajo y que se graduaron desarrollando un tema derivado del presente proyecto.	101

Apéndice

A Planos de manufactura

B Diagrama eléctrico

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

Con el desarrollo de la tecnología en la Ciencia de los Materiales y derivado de la demanda por productos novedosos más confiables que exhiban propiedades específicas, tales como las físicas, químicas, eléctricas, electromagnéticas y/o mecánicas se entiende hoy en día la necesidad de manipular las microestructuras de los mismos a un nivel sub- o nano-micrométrico. El estado meta-estable de los materiales es un estado de agregación de la materia tal en que se burla temporalmente la termodinámica de equilibrio de los mismos. Es precisamente éste estado el que ofrece una gama de propiedades antes nunca explotada; a saber, inmiscibles, soluciones sólidas substitucionales e intersticiales, compuestos intermetálicos, materiales cuya microestructura presenta tamaño de grano del orden nanométrico o sub-micrométrico, materiales sólidos amorfos (sin cristalinidad de largo alcance), materiales funcionales FGM, entre otros, son motivo de una creciente demanda tanto industrial como académica.

En el campo de la *Ciencia de Materiales e Ingeniería* es ampliamente conocido que las propiedades físicas, químicas, eléctricas, electromagnéticas y/o mecánicas con que se cuenta en determinado material están en función tanto del tipo, naturaleza de su microestructura y arreglo atómico cristalino con que este haya sido procesado (propiedades intrínsecas), además de otros factores extrínsecos no menos importantes tales como el acabado superficial y volumétrico conferidos (porosidad abierta y cerrada) durante su procesamiento.

Tradicionalmente en la elaboración de materiales especiales se ha buscado la manipulación tanto de la composición química, tipo de microestructura y optimización del proceso de fabricación buscando inducir mejores propiedades al producto final. Dependiendo de la aplicación final del material este puede requerirse altamente densificado o bien presentando una porosidad controlada. La industria aeroespacial, la

electrónica-magnética, metal-mecánica, y varias más demandan continuamente nuevos materiales con una microestructura y acabado perfectamente predeterminados. Con tales propósitos, existe actualmente un amplio número de técnicas y tecnologías universalmente reconocidas y aceptadas.

Algunas de las tecnologías tradicionales más ampliamente utilizadas para compactar, sinterizar o densificar cuerpos metálicos, cerámicos, cermets, o compósitos considerados como materiales altamente densificados son el prensado isostático en caliente HIP (hot isostatic pressing), el prensado en caliente HP (hot pressing), sinterizado por microondas MS (microwave sintering), incluyendo el sinterizado convencional que consiste de calentar los cuerpos "en verde" al horno sin aplicación de presión (en inglés conocido como pressure less sintering PLS). Sin embargo, con excepción de MS las técnicas anteriores distan mucho de ofrecer un control preciso de la microestructura final en los materiales y por tanto de sus propiedades. Una nueva ruta para solventar las limitantes de los métodos anteriores es el sinterizado de las partículas mediante la generación de un plasma, tal como el que se forma entre los electrodos del proceso de soldadura. La tecnología anterior puede ser referida como "sinterizado por arco eléctrico SAE", de la cual han sido propuestas varias versiones.

A pesar de que los orígenes de la técnica de sinterizado por arco eléctrico se remontan a la década de los 20's en los EUA [1], otros investigadores patentaron versiones similares del proceso de sinterizado por arco eléctrico [2-4], la firma japonesa Sumitomo Coal Mining Co. SMC, logró patentar y poner disponible comercialmente su equipo denominado *spark plasma sintering SPS* a principios de los 90's [5]. Las capacidades y tipo de equipos disponibles actualmente han venido en aumento en la medida en que los materiales así producidos han encontrado gran aceptación en el sector industrial, así como en varios centros de investigación. Por su parte, en algunas ciudades de los EUA se ha venido desarrollando la técnica de sinterizado por arco eléctrico bajo el nombre de sinterizado por plasma activado (*plasma activated sintering PAS*) [6], ó bien sinterizado por corriente eléctrica pulsada (*pulse electric current sintering PECS*) [7].

A pesar de que los principios de operación y mecanismos de sinterizado por arco eléctrico-plasma son muy similares, la diferencia en los nombres, parece radicar en la manera en que la energía eléctrica es suministrada en los polvos precursores. Las áreas más importantes en que la tecnología SPS ha demostrado excelentes resultados incluyen el sinterizado por plasma en aleaciones metálicas, cerámicos, intermetálicos, materiales funcionales (FGM) [8], cerámicos reforzados con fibras (FRC), compósitos de matriz cerámica (CMC) y metálica (MMC), y materiales nano-cristalinos. *Spark plasma reaction sintering* (SPRS) [9] es otra línea que ha tomado gran interés en los últimos años en el área del sinterizado.

1.1 Objetivo General

Diseñar y construir un equipo de sinterizado de polvos SPS-modificado, denominado SAE-TR (Sinterizado por Arco Eléctrico y Templado Rápido) para realizar investigación y desarrollo tecnológico en el campo de los materiales cerámicos, metálicos avanzados y materiales compuestos, con propiedades únicas y dimensiones para uso comercial a precios industriales accesibles.

1.2 Objetivos Específicos

1. Fabricar un equipo de sinterizado de polvos SAE-TR.
2. Formación de capital humano calificado (2 ingenieros y 1 doctor).
3. Generación de conocimiento y tecnología en el área de cerámicos y metálicos.
4. Participación en 1 congreso internacional.
5. Una publicación en revista internacional.
6. Desarrollo de una patente derivada de la fabricación y diseño del equipo SAE-TR.

1.2.1 Metas

- Revisión bibliográfica.

  Análisis de las diferentes alternativas para obtener información en general de los diferentes tipos de sinterizado existentes internacionalmente.

  Analizar las diversas variables posibles y realizar un control completo en las variables del equipo.
- Juntas de planeación con el personal de apoyo sobre de la estrategia a seguir.
- Reuniones periódicas para conocer los diferentes sistemas mínimos necesarios para realizar un buen equipo de sinterizado.
- Diseño conceptual de la máquina.
- Adquisición de las piezas que conformaran la máquina.
- Pruebas preliminares para determinar el funcionamiento del equipo adquirido.
- Ensamble de la máquina SAE-TR y desarrollo del programa cerebro del equipo.
- Pruebas y ajustes preliminares del funcionamiento.

- Pruebas y ajustes finales del funcionamiento.
- Difusión de los logros obtenidos.
- Aplicación de este nuevo proceso de sinterizado a diversos materiales y sistemas de aleación.
- Escritura de tesis, patente y artículos que divulguen los resultados obtenidos.

1.3 Definición del proyecto

Tomando como base los puntos de vista de investigadores con amplia experiencia en el área del sinterizado de materiales compuestos y usando datos técnicos y científicos recolectados de la bibliografía, se definió el presente proyecto con la finalidad de satisfacer la necesidad de desarrollar investigación en el campo del sinterizado y crear nuevos materiales útiles para la industria y academia. De tal forma se integró un plan estratégico con el conjunto de equipos y dispositivos adecuados.

1.4 Justificación

El presente proyecto resulta vital dentro del Plan Nacional de Desarrollo, toda vez que permite el reforzamiento de la Red Nacional de Nano-tecnología; a la cual están integrados profesores/investigadores y alumnos del CIDESI, CIMAV y CIITEC-IPN, entre otras personas de centros dedicados a apoyar la modernización tecnológica. Este trabajo marcará el **desarrollo de capacidades internas, grupos profesionales altamente calificados y líneas de investigación hasta ahora poco exploradas.** Además de resultar en la formación de capital humano mexicano calificado se introduce en México un equipo novedoso de compactado de polvos metálicos-cerámicos. Con la fabricación de dicho equipo se podrán ofrecer nuevas perspectivas de aprovechamiento de los recursos naturales, al darles un mayor valor agregado, impulsando con ello a la industria mexicana hacia un crecimiento tecnológico indispensable en este siglo.

1.5 Antecedentes y estado del arte

El desarrollo más acelerado de los materiales cerámicos tuvo lugar en el oriente hace miles de años. Mediante la eficiente transformación de sus recursos naturales, China por ejemplo logro pasar de un estado de necesidad a otro de arte mediante la perfección de sus procesos de preparación y tratamiento de sus recursos minerales. Con ello se trascendió al pasar de la fabricación de utensilios domésticos y rudimentarios hasta exquisitas piezas artísticas de reconocimiento universal. Similarmente otros países comenzaron y continuaron con la perfección de las técnicas hasta lograr ubicar a los productos cerámicos como materiales insustituibles en tareas en las que se requieren de muy altas temperaturas con propiedades antifricción. La fundición casi empírica del bronce seguida por las épocas del hierro fundido, esta última aproximadamente por el año 1800, y la de los plásticos modificaron la historia de los materiales retrasando el avance de los cerámicos. Más de 100 años hubo que pasar para que se descubriera que los materiales cerámicos podían ser preparados de tal forma que ofrecieran una estructura tan fuerte como la observada en ciertas aleaciones metálicas. Aunado a este descubrimiento con aquellos en donde se ha logrado unir cerámicos con metales (cermets y compósitos) se abre una nueva gama de aplicación, desarrollo e investigación de los cerámicos que crece internacionalmente y que sin duda habrá que retomar desde ahora en México.

El grado de sinterizado o densificado final con que resulta un producto cerámico y/o metálico es una variable durante el procesamiento que marca indiscutiblemente sus propiedades finales, ya sean mecánicas, químicas, físicas, ópticas, electromagnéticas, u otras; es decir, su potencialidad de aplicación comercial. Los métodos actuales y más comunes de sinterizado presentan limitantes importantes; tales como: largos tiempos de sinterizado (~ 2 horas), operación costosa y los productos muestran cierto porcentaje de porosidad remanente. En contraste, la técnica rápida de densificación de polvos asistida por plasma ha sido reconocida como una ruta alternativa para satisfacer los requerimientos de un excelente sinterizado difícilmente obtenidas por otros métodos de compactación, resultando conveniente no sólo para la sinterización de metales y aleaciones, sino también para la obtención de piezas finales con un alto grado de

densificación de materiales cerámicos. Además de lograr una porosidad reducida, factores tales como un tamaño de grano fino (sub o nano-métrico), la retención de fases metaestables con propiedades únicas, así como la homogeneidad de la estructura final del material resultan como consecuencia de esta técnica.

Por otro lado, su capacidad homogénea de calentamiento y enfriamiento, así como las altas cargas axiales aplicadas, provocan que se puedan obtener estructuras novedosas, haciendo de este relativamente nuevo proceso de sinterización una herramienta poderosa con un potencial importante para la investigación aplicada. Esta tecnología, sin embargo requiere de mayor trabajo para aplicaciones semi-industriales con tamaños de piezas tan grandes como un pistón automotriz.

El sinterizado o densificado final de los materiales cerámicos o metálicos es uno de los aspectos más importantes, ya que éste definirá las posibles propiedades mecánicas, químicas, magnéticas ópticas, etc., que tendrá el material en elaboración; y por ende, su potencialidad en investigación o aplicación comercial.

Capítulo 2

DISEÑO DEL EQUIPO

A continuación se enlistan y describen los ocho sistemas principales que conforman el equipo de sinterizado SAE-TR.

Sistemas Componentes del Equipo de Sinterizado

- Sistema de control general PLC
- Sistema de alto vacío, controlador de atmósfera
- Sistema hidráulico de presurización uniaxial
- Sistema eléctrico de alta potencia
- Sistema de control de temperatura
- Sistema de enfriamiento
- Sistema de templado
- Sistema colector de datos

2.1 Diseño mecánico de los diferentes sistemas

Cada uno de los sistemas arriba enlistados resulta necesario para el eficiente funcionamiento del proceso de sinterizado por arco y templado. Todos estos sistemas que integran la máquina están controlados y coordinados por el sistema de control o cerebro electrónico (PLC Controlador Lógico Programable) que tiene almacenadas operaciones unitarias e instrucciones que se programan según la necesidad del trabajo. El PLC es operado por medio de un sistema digital o analógico cuyas instrucciones completan el ciclo del proceso. Con el sistema hidráulico de presión se realiza la compresión de los polvos de trabajo por medio de un actuador hidráulico. El prensado se realiza en la cámara del horno (espacio referido como la cámara de sinterizado o de vacío) y se puede mantener durante todo el intervalo de sinterizado desarrollando alto vacío en la cámara, el cual es realizado por el sistema correspondiente. El equipo SAE-TR ha sido fabricado para ser versátil por lo que también es posible que se haga alto vacío e inyectar posteriormente una carga de gas inerte (nitrógeno o argón) para

sinterizar probetas o materiales bajo esas atmósferas. Posterior a los pasos anteriores se aplica una descarga eléctrica en un rango eléctrico aproximadamente de (100-3000 Amp DC) por medio del sistema eléctrico de potencia y en forma pulsada. Durante el intervalo de sinterizado actúa el sistema de enfriamiento (reciclado de agua a presión) para controlar la temperatura en las paredes del horno y poder ser operada sin el riesgo de generar gradientes de temperatura en el proceso (evitando daño al equipo), buscando evitar posibles quemaduras al operador. Finalmente y dependiendo tanto del tipo de tratamiento térmico de sinterizado deseado así como de la naturaleza del material a densificar se podrá practicar o no, un enfriamiento rápido de la muestra o pieza de trabajo activando el sistema de templado correspondiente, siempre que se haya despresurizado con aire atmosférico (purgando) la cámara de sinterizado.

Cabe mencionar que con objeto de certificar una calidad óptima del equipo SAE-TR, así como una adecuada seguridad de operación, fue imperativo la adquisición comercial de partes mecánicas, eléctricas y electromagnéticas, tales como por ejemplo los dispositivos necesarios para programar y asegurar la cantidad de corriente suficiente para la inducción de un buen arco eléctrico, controladores de vacío, termómetros digitalizados operados por infrarrojo para mantener buen monitoreo de temperatura, y dispositivos controladores del tiempo de descarga de corriente, entre otros. Es importante también mencionar que la máquina necesita de diversos componentes de ensamblaje para una vida útil más larga y buen funcionamiento, como por ejemplo: elementos manufacturados, estructuras, prensa, acoplamientos mecánicos fabricados en SNC (Sistemas Numéricos de Control), mangueras de alta presión, tubos reforzados, alambre y cables de calibre variado, y una cantidad importante de tornillos-tuercas, codos, acoples y terminales. Es decir, se ha dispuesto de todo este equipo para poder garantizar un producto de calidad que cumpla con las normas internacionales de calidad.

En el presente capítulo se describen los detalles técnicos involucrados en la conformación de cada uno de los sistemas.

2.2 Sistema de control general PLC

La tarjeta de sincronización PLC (Controlador Lógico Programable) toma la señal del transformador secundario TR2 (delta) el cual está conectado a una línea de 220V CA a través de diversos interruptores (ITM2, ITM1). La tarjeta de sincronización efectúa la cuenta cada 2.7mS (cruce por cero) y la envía a la entrada del PLC (contador on-off).

PLC:

El PLC recibe la señal de la tarjeta de sincronización y el estado ON-OFF de la salida depende de las cuentas programadas como se muestra en la Figura 2.1.:

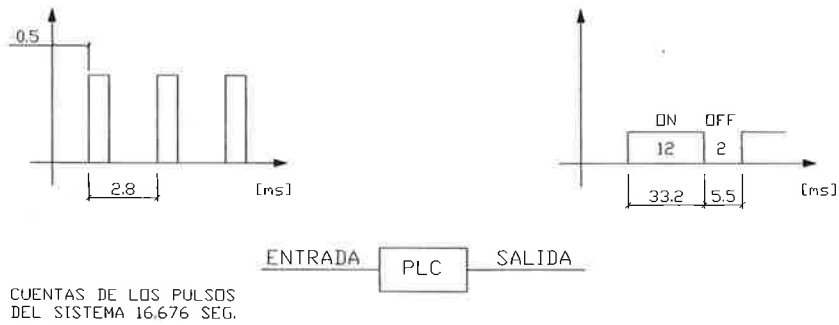


Fig. 2.1 Diagrama de pulsos de la corriente eléctrica para el sistema SAE-TR.

Etapa de regulación Tarjeta MP400

La tarjeta MP400 se alimenta con un voltaje de 110V CA del secundario del transformador TR2, recibe la salida del PLC (cuenta encendido y apagado de pulsos) y realiza las siguientes funciones:

- Inhibe la salida de disparo de los tiristores de acuerdo con la señal programada del PLC ON-OFF.
- Regula la corriente de salida por medio de un controlador PI (Proporcional + integral).
- Ajusta la corriente de salida.
- Ejecuta un encendido suave (Soft start).

Tarjeta de retroalimentación TC

La tarjeta de retroalimentación rectifica con un puente hexa-fásico el voltaje suministrado por los TC's y cuenta con una resistencia de carga SHUNT de alta precisión, la relación es de 100:5 para cada TC. Además de realizar un ajuste fino en esta tarjeta, esta señal entra de la tarjeta MP400 en el lazo de control de corriente (señal proporcional a la salida de este).

Tarjeta de interfase

La tarjeta de interfase recibe un voltaje rectificado de la tarjeta de retroalimentación. Este voltaje es almacenado en un capacitor con el objetivo de suministrar una señal continua a la entrada de retroalimentación de la tarjeta MP400 para la regulación. Es decir, la tarjeta regula de forma continua.

2.2.1 Lógica de operación.

El sistema es controlado por el PLC que contiene la programación de las secuencias del sistema en que sus entradas y salidas son acopladas a través de contactos secos y relevadores a los dispositivos del sistema. La tensión de operación es de 24V y se obtiene de la fuente de FR.

Como filosofía de operación existe una lógica de desexcitación alambrada (relees) que actúan directamente sobre el módulo MP400 por medio de contactos normalmente abiertos, asegurando la desexcitación de los tiristores aún si el PLC fallara.

Características del PLC:

GE FANUC MOD. IC200VDR010, alimentación 24 VCD y un modulo de extensión IC200VEX012, páginas 6-8 a 6-12, con 16 entradas digitales y 12 salidas digitales el primero; con 8 entradas digitales y 6 salidas digitales el segundo.

2.3 Sistema de alto vacío, controlador de atmósfera

De la bibliografía correspondiente y de la experiencia tomada de diferentes investigadores especialistas en el proceso de sinterizado se llego a la conclusión de que un valor suficiente y necesario para hacer vacío en el horno, y realizar mejores sinterizados es de $1X10^{-4}$ Torr. En base a este valor se seleccionó el equipo que satisface las características necesarias descritas anteriormente. A continuación se muestra la Figura 2.2 que muestra un corte transversal del horno de sinterizado.

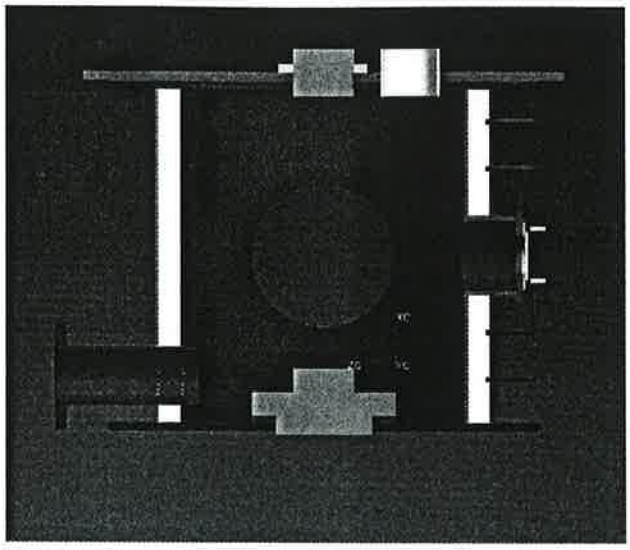


Fig. 2.2 Corte transversal del horno/cámara de sinterizado SAE-TR.

El volumen del horno/cámara de sinterizado es de 0.19 m^3, que equivale a 190 litros. El tiempo monitoreado para realizar un alto vacío en ésta cámara es de 1 min. En base a las características anteriores, se estableció que el modelo FE-1397 de la firma FELISA tiene las propiedades suficientes para cumplir con los parámetros necesarios de desplazamiento y de alto vacío, los cuales se determinan a partir de gráficas desarrolladas por la misma firma. Para este modelo la capacidad es de 500 L/min., y $1x10^{-4}$ Torr, respectivamente.

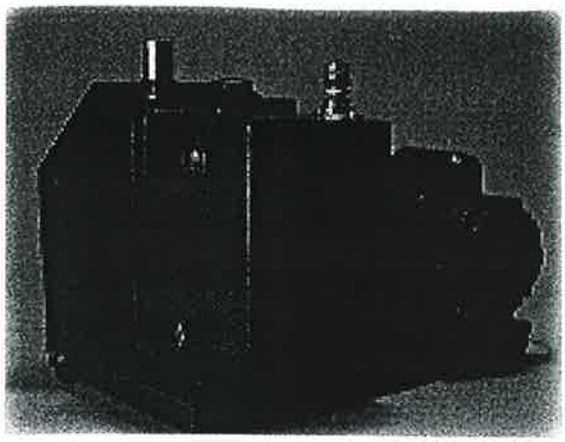


Fig. 2.3 Bomba de alto vacío seleccionada.

2.4 Sistema hidráulico de presurización uniaxial

En este análisis se determina la presión del sistema hidráulico y potencia requerida por el motor para generar la carga necesaria para mantener prensada la matriz de dados del equipo SAE-TR. Las características dimensiónales y de presión a manejar son presiones en el interior de la matriz de 50 y 100 MPa, con dimensiones internas de la matriz de 100 y 50 mm de diámetro y una velocidad de vástago constante de 35 mm/seg.

2.4.1 Análisis para matriz de 2 pulgadas de diámetro y presión interna de 50 MPa.

Para encontrar la presión que existe en el sistema durante estas condiciones primero, se requiere determinar la Fuerza (F) que se necesita aplicar en la matriz para alcanzar la Presión (P dentro de matriz) de 50 MPa, la cual se deduce mediante el despeje que se observa en la formula siguiente:

$$P = \frac{F}{A} \Rightarrow F = P \times A \qquad 2.1$$

Para la cual, se necesita conocer el Área (A) de la zona donde se aplica la fuerza (en la muestra). Esta se establece del diámetro de trabajo, es decir 5cm y mediante la formula:

$$A = \frac{\pi}{4} (D)^2 \qquad 2.2$$

Quedando de la siguiente manera:

$$A = \frac{\pi}{4} (2 \quad pu\lg)^2 = 3.141 \quad pu\lg^2 \Leftrightarrow 0.002027 \quad m^2 \qquad 2.3$$

al sustituir en la Ec. 2.1 queda:

$$F = (50{,}000{,}000 \quad Pa) \times (0.002027 \quad m^2) = 101{,}341.49 \quad N \qquad 2.4$$

$$F = 101.34 \quad KN \Leftrightarrow 10{,}330.42 \quad kg$$

Con el dato de la fuerza (F) que se aplica para alcanzar la presión (P en la muestra) de 50 MPa y un diámetro en la matriz de 5 cm., se calcula la presión en el pistón y/o el sistema hidráulico, cuando el diámetro del pistón es de 8 pulgadas. Para ello se usará nuevamente la Ec. 2.2 para determinar el área trasversal del pistón. Mediante la Ec. 2.1 se conocerá la presión en el pistón y en el sistema hidráulico con un área de:

$$A = \frac{\pi}{4} (8 \quad pu\lg)^2 = 50.26 \quad pu\lg^2 \Leftrightarrow 0.03243 \quad m^2 \qquad 2.5$$

y por lo tanto una presión del sistema de:

$$P = \frac{(101.34 \quad KN)}{(0.03243 \quad m^2)} = 3.125 \quad MPa \qquad 2.6$$

$$P = 3.125 \quad MPa \Leftrightarrow 31.85 \quad \frac{kg}{cm^2} \Leftrightarrow 453.24 \quad PSI$$

Una vez conocidas tanto la presión del sistema y el área transversal del pistón, se tiene una velocidad (V) de 35 mm/seg para calcular el caudal (Q) del sistema mediante la ecuación:

$$Q = A \times V \qquad 2.7$$

Así con el área del pistón, obtenida de la operación 2.5 y con la velocidad de 35 mm/seg se obtiene:

$$Q = \left(0.0324 \quad m^2\right) \times \left(0.035 \quad \frac{m}{seg}\right) = 0.001134 \quad \frac{m^3}{seg} \qquad 2.8$$

$$Q = 0.001134 \quad \frac{m^3}{seg} \Leftrightarrow 68.04 \quad \frac{lts}{\min} \Leftrightarrow 17.97 \quad \frac{gal}{\min}$$

Conocidas la presión y el caudal del sistema se calcula la potencia en unidades de HP que se requiere en la bomba, con las condiciones ya mencionadas de presión y dimensiones dentro de la matriz, todo esto mediante la siguiente ecuación:

$$HP = \frac{P \times Q}{450} \qquad 2.9$$

Nota: Para esta Ecuación se necesita que las unidades de la presión estén expresadas en kg/cm^2 y las unidades del caudal en lt/ min.

Ahora, se sustituyen los valores obtenidos en las operaciones 2.6 y 2.8 para conocer el valor de la potencia en unidades de HP.

$$HP = \frac{\left(31.85 \quad \frac{kg}{cm^2}\right) \times \left(68.04 \quad \frac{lts}{\min}\right)}{450} = 4.81 \quad HP \qquad 2.10$$

2.4.2 Análisis para matriz de 5 cm de diámetro y presión interna de 100 MPa.

Para encontrar la presión que existe en el sistema con las condiciones enunciadas en este punto, y siguiendo el mismo procedimiento que el análisis anterior, determinando primero la Fuerza (F) necesaria en la matriz pero ahora para alcanzar una Presión (P en la muestra) de 100 MPa. Ya que se trata del mismo diámetro de 5 cm en la matriz, obtenemos el mismo valor del área transversal que se obtiene de la ecuación 2.2.

$$A = \frac{\pi}{4}\left(2 \quad pu\lg\right)^2 = 3.141 \quad pu\lg^2 \Leftrightarrow 0.002027 \quad m^2 \qquad 2.11$$

y al sustituir la presión de 100 MPa en la Ec. 2.1:

$$F = \left(100{,}000{,}000 \quad Pa\right) \times \left(0.002027 \quad m^2\right) = 202{,}700 \quad N \qquad 2.12$$

$$F = 202.7 \quad KN \Leftrightarrow 20{,}662.59 \quad kg*$$

Teniendo el dato de la fuerza (F) aplicada en la matriz para alcanzar la presión (P en la muestra) de 100 MPa se procede a calcular la presión en el pistón y del sistema hidráulico. Ya que se trata del mismo pistón de 8 pulgadas de diámetro usado para el anterior análisis, y usando nuevamente la Ec. 2.2 se determina el área trasversal del pistón:

$$A = \frac{\pi}{4}\left(8 \quad pu\lg\right)^2 = 50.26 \quad pu\lg^2 \Leftrightarrow 0.03243 \quad m^2 \qquad 2.13$$

Mediante la Ec. 2.1 se obtiene la presión en el pistón y en el sistema hidráulico:

$$P = \frac{\left(202.7 \quad KN\right)}{\left(0.03243 \quad m^2\right)} = 6.25 \quad MPa \qquad 2.14$$

$$P = 6.25 \quad MPa \Leftrightarrow 63.71 \frac{kg}{cm^2} \Leftrightarrow 906.56 \quad PSI$$

Conociendo la presión del sistema y tratándose del mismo pistón se tiene que es la misma área transversal y considerando la misma velocidad (V) de 35 mm/seg por lo tanto, el caudal (Q) del sistema es el mismo.

$$Q = 0.001134 \frac{m^3}{seg} \Leftrightarrow 68.04 \frac{lts}{\min} \Leftrightarrow 17.97 \frac{gal}{\min} \qquad 2.15$$

Una vez conocidas la presión y el caudal del sistema, se obtiene la potencia en unidades de HP que se requiere en la bomba con las condiciones ya mencionadas de presión y dimensiones dentro de la matriz. Mediante la ecuación 1.9 sustituyendo los valores obtenidos anteriormente se tiene:

$$HP = \frac{\left(63.71 \frac{kg}{cm^2}\right) \times \left(68.04 \frac{lts}{\min}\right)}{450} = 9.63 \quad HP \qquad 2.16$$

2.4.3 Análisis para matriz de 10 cm de diámetro y presión interna de 50 MPa.

Similar a los cálculos anteriores se procede a encontrar la presión que existe en el sistema, pero ahora se trata de una matriz con un diámetro de 10 cm aplicando una Presión (P en la muestra) de 50 MPa. Desarrollando el mismo procedimiento anterior se reporta:

$$HP = \frac{\left(127.42 \frac{kg}{cm^2}\right) \times \left(68.04 \frac{lts}{\min}\right)}{450} = 19.26 \quad HP \qquad 2.17$$

2.4.4 Análisis para matriz de 10 cm de diámetro y presión interna de 100 MPa.

De la misma forma que se ha mostrado antes, solo se presentan los resultados:

$$HP = \frac{\left(254.84 \ \frac{kg}{cm^2}\right) \times \left(68.04 \ \frac{lts}{\min}\right)}{450} = 38.53 \ HP \qquad 2.18$$

2.4.5 Circuito hidráulico del sistema SAE-TR.

En el apartado anterior se determinó que la fuerza necesaria en el actuador hidráulico, para que exista una presión de 50 MPa en la muestra de la matriz de 10cm de diámetro, es necesaria una potencia de 20 HP. Por tal motivo, a continuación en la Figura 2.4 se representa el circuito hidráulico que se diseñó, con características y para poder realizar un buen proceso de compactación para obtener un sinterizado con propiedades que al empresario o investigador le convengan.

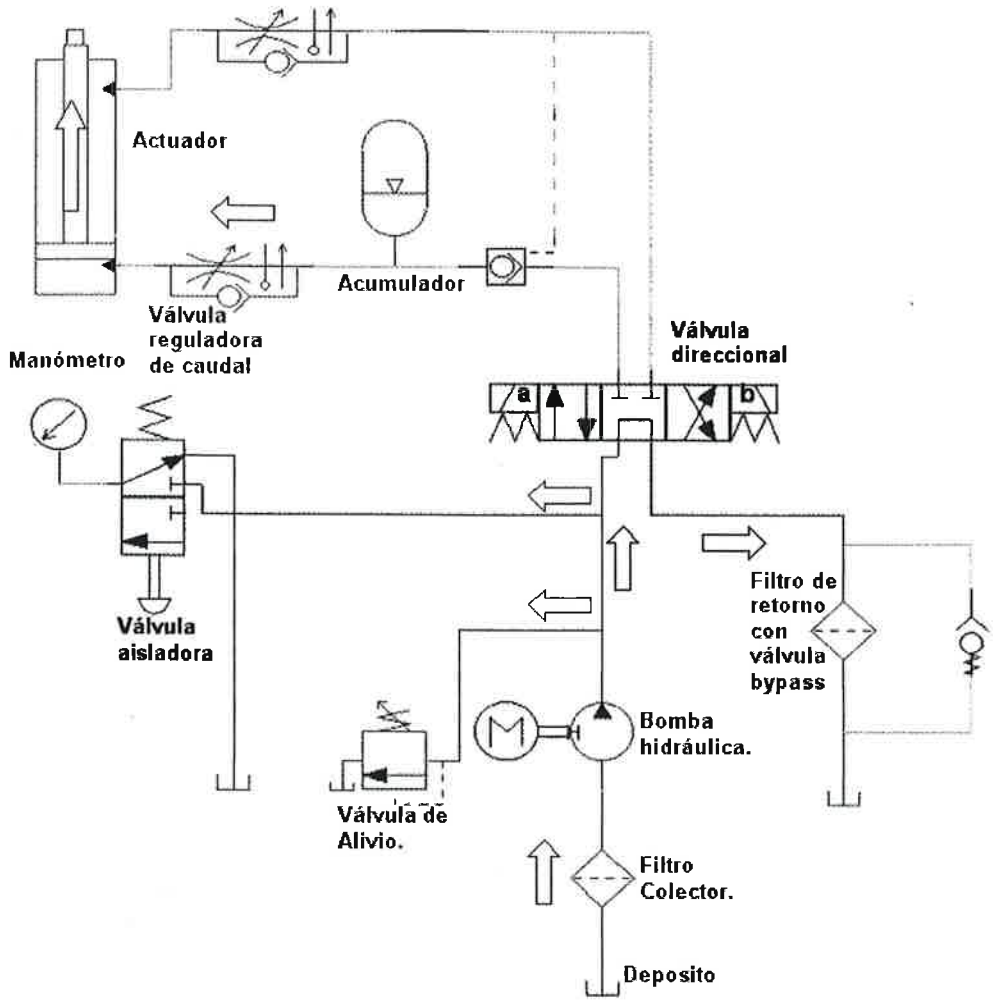


Fig. 2.4 Circuito hidráulico del equipo SAE-TR.

2.5 Sistema eléctrico de alta potencia

La alimentación se realiza a través de una línea de 220V CA trifásica. El equipo es un sistema totalmente automático. El sistema incluye una fuente de CD que cuenta con un lazo de control de corriente con control Proporcional + Integral (PI) retroalimentados. Esta fuente es un sistema que opera con 220V CA, 60Hz trifásica, y un amplio rango de operación. A la salida proporciona voltaje de CD el cual integra un limitador de corriente que le protege contra cortos circuitos o exceso de demanda de corriente. La fuente entrega corriente pulsada con un voltaje de salida de 8V CD a una corriente de 3000Amps pico y puede ajustarse si es necesario para otras corrientes menores.

2.5.1 Principio de Operación

El equipo esta conformado como una fuente de DC la cual consta de una etapa de potencia, a un transformador trifásico de 220: 8V, un puente hexafásico de 3000 Amp., y una resistencia shunt de 4000 Amp., con 60mv. Cuenta con un controlador de impulsos el cual regula el ángulo de disparo de los tirisores de acuerdo a la referencia enviada por el lazo de control de corriente a través de la MP400, las entradas y salidas digitales se encuentran en un PLC (alarmas).

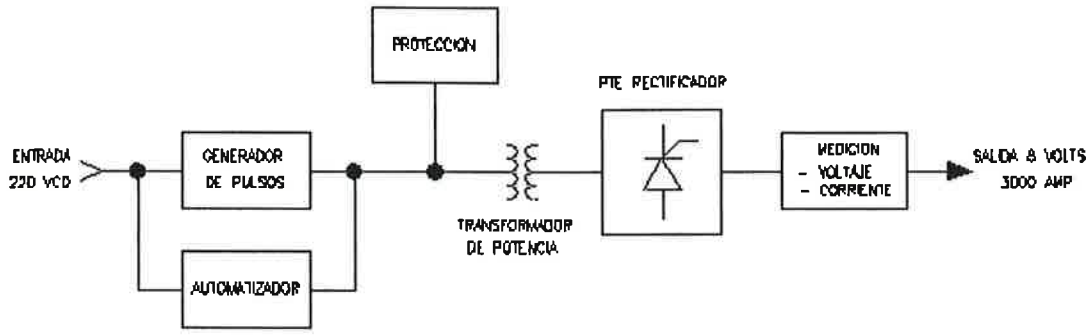


Fig. 2.5 Diagrama de bloque de la fuente de pulsos.

2.5.2 Alimentación de VCA

La alimentación se realiza a través de una línea de 220V CA trifásica por lo que es muy importante que antes de conectar el equipo, se verifique la posición de las fases.

El sistema esta configurado para operar con alimentación de 220V CA-60Hz trifásica, la alimentación queda seguro por el breaker ITMG. Así se asegura que el sistema quede protegido para cualquier sobrecarga o corto circuito que pudiera presentarse en la línea.

2.5.3 Salida de VCD

La trayectoria del voltaje de salida se forma a través de la conversión de VCA a VCD que realiza el puente rectificador hexafásico de onda completa. El puente recibe los pulsos de la tarjeta de control para el encendido de los tiristores de acuerdo al ángulo de fase que resulta de la demanda de corriente establecida.

El censado de corriente se realiza por medio de un shunt de corriente (SNT), el cual entrega un valor al amperímetro digital proporcional a la corriente de salida. El número de pulsos de encendido y de apagado se programa desde el panel de datos.

2.5.4 Partes del sistema

Las partes eléctricas, electrónicas y mecánicas que conforman este equipo han sido estrictamente seleccionadas para asegurar su calidad y buen funcionamiento. Se ha tomado en cuenta que dichos componentes sean lo más actual en tecnología para asegurar una mayor vida útil al equipo.

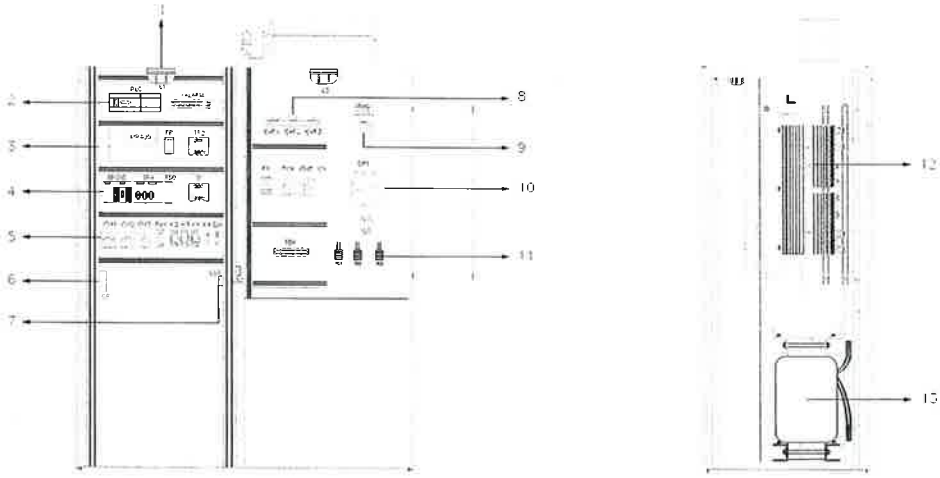


Fig. 2.6a Vista frontal y lateral del transformador de potencia para el SAE-TR.

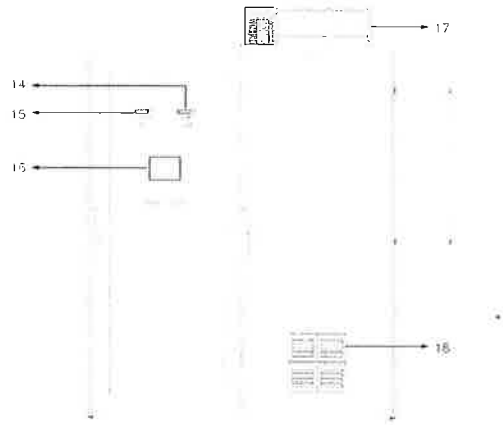


Fig. 2.6b Vista frontal del gabinete del transformador de potencia

NOTA: Para mayor detalle consultar los planos mecánicos en el **Apéndice**.

Lista de partes del transformador de potencia

1. Lámpara de iluminación de gabinete
2. Sección de protección y alarmas
3. Sección control de pulsos
4. Sección sincronía de pulso
5. Sección de interruptores
6. Contacto 127
7. Apagador luz interior
8. Banco de capacitores
9. Interruptor general
10. Contactor principal
11. TC
12. Puente rectificador exafásico
13. Transformador de potencia
14. Medidor de voltaje
15. Medidor de corriente
16. Data panel
17. Extractor
18. Ventilas

2.5.5 Instalación

En la instalación de la fuente se requiere extremar precauciones tanto en la manipulación de los gabinetes como en la puesta en marcha para evitar daños físicos a los componentes eléctricos, electrónicos y mecánicos.

El equipo debe ser colocado en posición vertical. Se recomienda que los costados del gabinete estén libres, para permitir el flujo de aire frío. Este no deberá ser localizado en áreas sujetas a calentamiento excesivo o escurrimiento de algún líquido. No es recomendable mantener el equipo sujeto a golpes o vibraciones.

2.5.6 Precauciones

Antes de instalar el equipo se debe verificar lo siguiente:

El voltaje en la acometida debe ser de 220VCA-60Hz trifásica.

El lugar o área en donde se coloque el equipo deberá estar ventilado.

Que no exista humedad o posible escurrimiento de algún líquido.

2.5.7 Revise los siguientes puntos:

1) Que no existan faltantes o componentes dañados tales como: Fusibles, tarjetas, tornillos de apriete.
2) Que no existan conexiones flojas.
3) Alimentación VCA y VCD, verificar que los interruptores de paso estén en posición OFF.

2.5.8 Procedimiento de Instalación

1) Antes de que se conecte la alimentación verificar que los interruptores estén en posición OFF.
2) Conectar la acometida de entrada del interruptor ITM-1, 3 ,5.
3) Sin encender los interruptores verificar que los galvanómetros no marquen voltaje o corriente.
4) Se recomienda que la alimentación se realice con cable calibre # 1/0 AWG.
5) Asegurar de conectar el gabinete a tierra física.
6) Poner en ON el interruptor ITMG para energizar el sistema.
7) Realizar la secuencia de encendido de la siguiente manera: a) ITM1, b) ITM3, c) ITM2, d) ITM4.
8) Llevando a cabo de manera ordenada los puntos anteriores el equipo deberá funcionar sin ningún problema. En caso de tener algún problema durante la operación de la fuente consultar la tabla de fallas anexo a este manuscrito.

2.5.9 Operación

General

La fuente para la máquina de sinterizado está diseñada para que funcione con alimentación de 220V CA-60Hz trifásica y mantenga una salida 8V CD con máximo de corriente a 3000Amp.

Capacidad de salida

El equipo tiene la capacidad de entregar una corriente hasta de 3000Amp. La cual puede ser ajustada en un rango menor de acuerdo a la capacidad que se requiera a través de una señal de 5V.

Advertencia: Un ajuste mayor que 3000Amp puede provocarle daños severos al equipo, debido a una sobrecarga.

Etapa de Potencia

La acometida de 220V CA es conectada a un termo magnético ITMG (protección de sobre corriente) y a su vez se conecta a un contactor CPT que alimenta a un transformador trifásico de tipo seco TR1 en el primario. El secundario del transformador TR1 está protegido con un elemento térmico que indica una señal de falla al PLC (al llegar 125°C). El secundario del transformador TR1, suministra al rectificador PT la corriente alterna para la rectificación hexafásica para un voltaje de VCD.

El termo magnético CPT tiene contactos auxiliares que indican la posición al PLC además de contar con una bobina de accesamiento que este comandada por el PLC que cuenta con circuitos RC de protección para cada fase S1, S2, S3 (snubber), eliminando transitorios causados por el transformador.

El modulo de potencia PT esta formado por un puente de 6 tiristores montados en una configuración de puente gaertz o B6C, protegidos con elementos térmicos por cada tiristor calibrado a 125°C. Si la temperatura excede este valor el interruptor envía una señal de falla al PLC. Los Tiristores están montados en 9 disipadores de aluminio

anodizado. El gabinete esta diseñado para funcionar también como un ducto de aire y que mantenga la temperatura baja de esta sección de potencia, a través de dos ventiladores VT. Estos accionan un interruptor de flujo de aire que a falta de este (interruptor de mercurio) indica una señal de falla al PLC. Este ventilador no gira si el orden de las fases no es correcto.

Especificaciones Técnicas

Eléctricas

Conceptos	Valores
Tensión de alimentación	220V CA trifásica, 60Hz
Tensión de salida	8 VCD
Corriente de salida	3000 Amp.
Potencia de salida	24 KVA
Factor de potencia de la carga	Variable
Sobrecarga máxima	10%
Tecnología	Electrónica, control y electrónico de potencia.
Tipo de fuente	Pulsada

Protecciones

En alimentación	Termomagnéticos
En salida contra cortos circuitos	Electrónica y termomagnético. Relevador de sobrecorriente.
En electrónica.	Fusible y termomagnético.

Ambientales

Conceptos	Valores
Rango de temperatura ambiente de operación	De 0° a + 50°C.
Temperatura de almacenamiento	De –20° a 75°C.
Humedad permitida	95% HR no condensable

Mecánicas

Gabinete de potencia

Conceptos	Valores
Gabinete	Metálico
Lámina	Calibre # 18
Acabado	Polyester-epoxi Texturizado
Dimensiones	3000 x 800 x 800 mm.
Peso	Kg.
Sistema de enfriamiento	Extracción
Sellado en puerta	Neopreno
Anclaje	Atornillable

Gabinete de control

Conceptos	Valores
Gabinete	Metálico con puerta de cristal
Lámina	Calibre # 18
Acabado	Polyester-epoxi Texturizado
Dimensiones	2000 x 800 x 800 mm.
Peso	Kg.
Sistema de enfriamiento	Extracción
Sellado en puerta	Neopreno
Anclaje	Atornillable

2.6 Sistema de enfriamiento

Análisis térmico para el sistema de enfriamiento.

El objetivo de éste análisis es encontrar el flujo volumétrico de agua requerido para realizar el enfriamiento en las paredes del horno y evitar sobrecalentamiento en las placas. Lo anterior es para evitar cambios en la microestructura de las placas del horno y evitar daños considerables.

En la Figura 2.7 se muestran las partes principales de las que está constituida la cámara de sinterización.

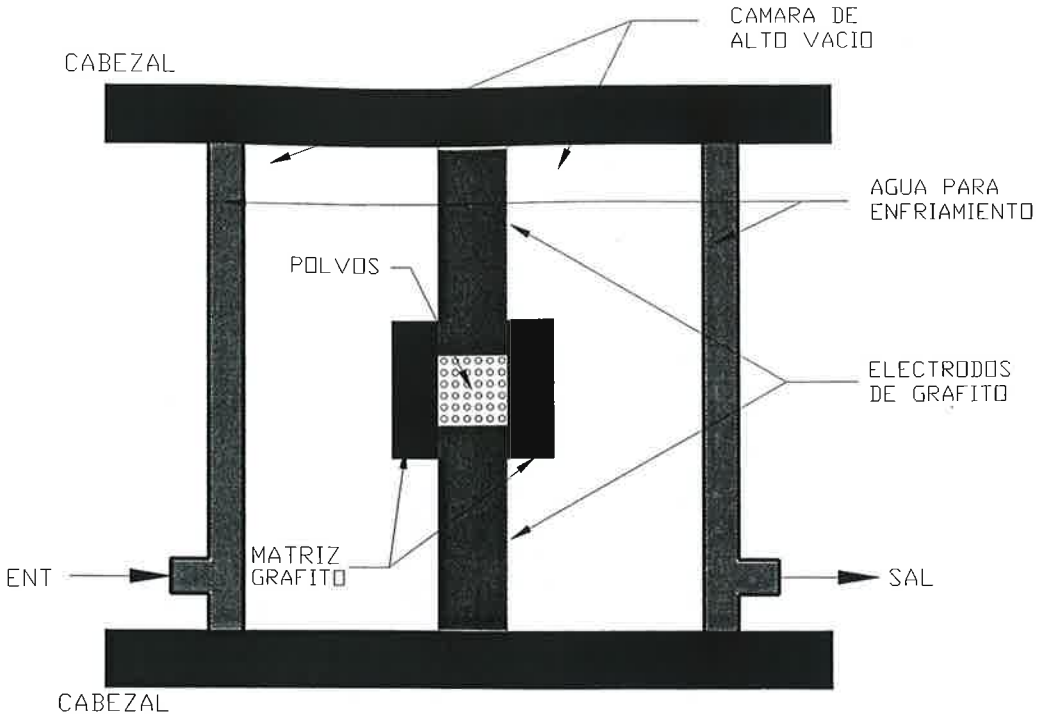


Fig. 2.7 Vista lateral simplificada de la cámara de sinterizado SAE-TR.

En la Figura 2.8 se describen algunas medidas importantes para el análisis del modelo. La matriz/dado que se encuentra en el centro de la Figura 2.8 es un cilindro de grafito diámetro exterior de 12.7cm y una altura de 5cm. A esta matriz se le suministra corriente CD, con una potencia eléctrica de P = 30 k W. La matriz está dentro del horno cilíndrico, que tiene las siguientes dimensiones; diámetro interno de 60cm y de diámetro externo 70cm, con una altura de 50cm; tal como se muestra en la Figura 2.8.

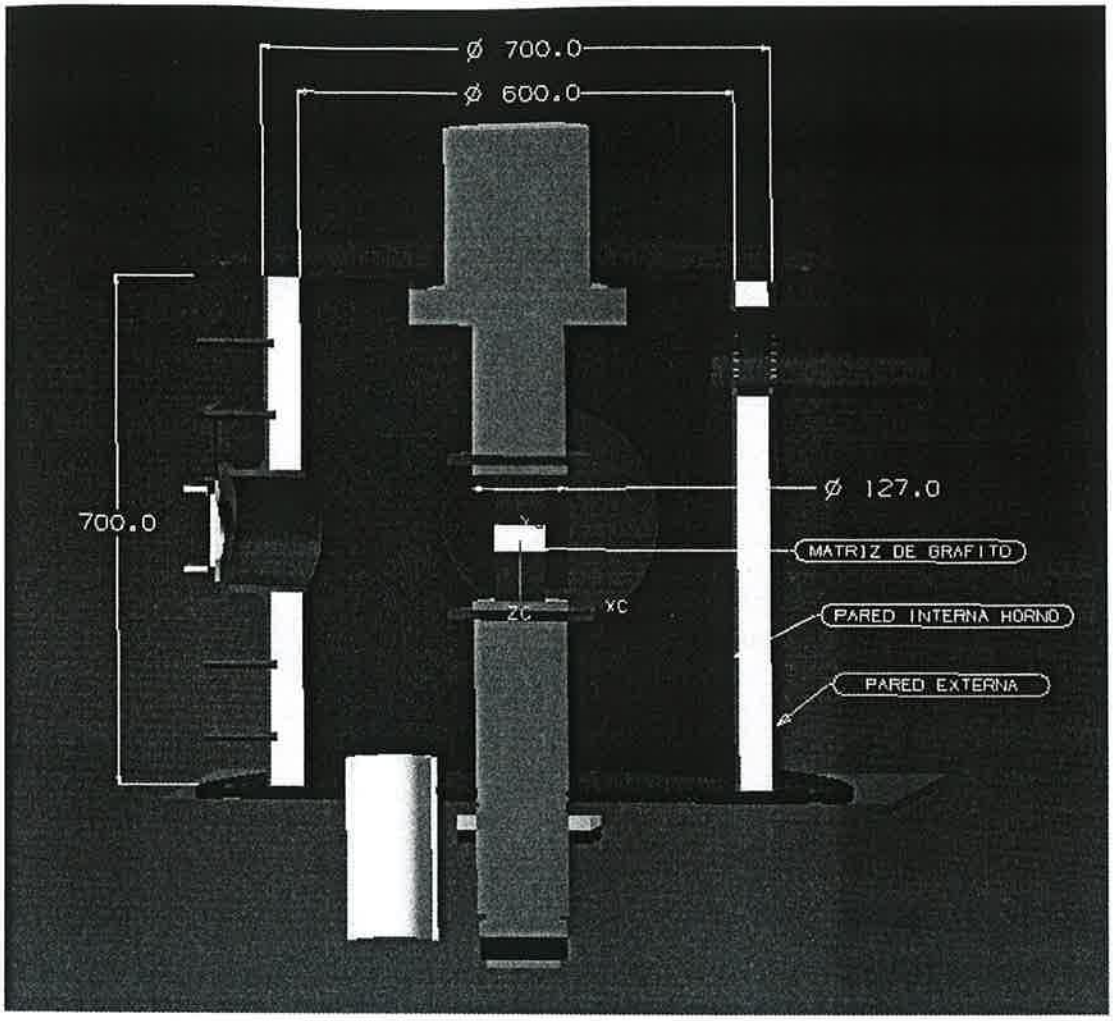


Fig. 2.8 Esquema representativo de la cámara de sinterizado SAE-TR.

En el esquema de la Figura 2.9 se muestran los datos de diseño usados para encontrar el flujo másico del sistema de enfriamiento del horno para sinterizado.

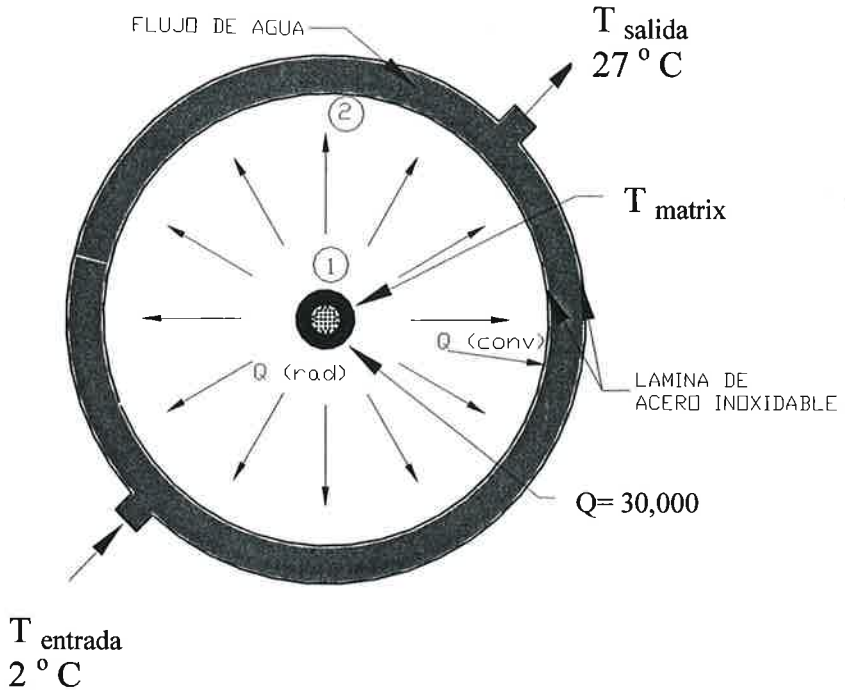


Fig. 2.9 Descripción de algunos valores de la cámara de sinterizado.

De acuerdo a las geometrías que se manejan en el proceso de sinterizado, es posible determinar el flujo de calor que existe entre la cápsula, que contiene la muestra, y la chaqueta que la cubre, por medio de la siguiente ecuación:

$$q_{1\text{-}2} = A_1 \sigma F_{1\text{-}2}\left(T_1^4 - T_2^4\right) \qquad 2.19$$

Donde:

- A_1 Área de la superficie radiante (cápsula), 0.0113 m^2
- $F_{1\text{-}2}$ Factor de vista entre las superficie que intercambian calor (en este caso $F_{1\text{-}2} = 1$)
- σ Constante de Stefan-Boltzman, 5.669×10^{-11} $kW/m^2\text{-}K^4$
- T_1 Temperatura de la superficie radiante 2773 K.

Las unidades de la ecuación de Stefan-Boltzman son las siguientes:

$$q_{1\text{-}2} = A_1 \sigma F_{1\text{-}2}\left(T_1^4 - T_2^4\right)$$

$q_{1\text{-}2} = m^2\ (W/m^2\text{-}^oK^4)\ ^oK^4 \Rightarrow W$

El calor que se suministra a la matriz es: q = 30 kW. La temperatura de la pared interior de la chaqueta se encuentra sustituyendo los valores en la ec. 2.19:

$\underline{T_2 = 1873\ K = 1600\ °C}$

T_2 es la temperatura que tendrá el horno en la pared interna y si no consideramos el sistema de enfriamiento podemos tener variación de las propiedades mecánicas en la placa del horno.

- Para evaluar la cantidad de calor que emitirá la superficie de la matriz, se puede aplicar la siguiente ecuación:

$$E_1 = A_1 \varepsilon_1\ \sigma\ T_1^4 \qquad 2.20$$

Donde:

E_1 es el potencial de emisividad de la superficie que se encuentra a la temperatura T_1

ε_1 es la emisividad de la superficie radiante (para el grafito, $\varepsilon_1 = 0.54$)

Las unidades de la ecuación de emisividad son las siguientes:

$$E_1 = A_1 \varepsilon_1\ \sigma\ T_1^4$$

$q_{1\text{-}2} = m^2\ (W/m^2\text{-}^oK^4)\ ^oK^4 \Rightarrow W$

Sustituyendo los valores en la ec. 2.20 obtenemos:

$\underline{E_1 = 20.45\ kW}$

Esta cantidad representa el calor que emitiría la cápsula hacia la chaqueta de enfriamiento.

- Considerando que el flujo de agua tendrá una carga de 30 kW (potencia en la cápsula), se puede aplicar la siguiente ecuación para evaluar el flujo másico de agua:

$$q = \dot{m}\, c_p \Delta T = \dot{m}\, c_p (T_{sal} - T_{ent}) \qquad 2.21$$

Despejando el flujo másico de la ecuación 2.21 obtenemos la ecuación 2.22:

$$\boxed{\dot{m} = \frac{q}{c_p (T_{sal} - T_{ent})}} \qquad 2.22$$

Si el gradiente (diferencial) de temperatura ΔT es mayor, el flujo másico se reduce para remover el mismo flujo de calor. Esto es, si ΔT = 27-2= 25, el flujo másico se encuentra sustituyendo los valores correspondientes en la ecuación 2.22, para obtener:

$$\boxed{\dot{m} = \frac{30000}{4185.5(27-2)}}$$

$$\dot{m} = 0.287 \text{ kg/seg}$$

y las unidades del flujo másico se muestran en la ecuación 2.23:

$$\boxed{\dot{m} = \frac{\frac{J}{seg}}{\frac{J}{Kg\ ^{o}C}(^{o}C)} \Rightarrow \frac{kg}{seg}}$$

de tablas de conversión se conoce que :

$$1\frac{m^3}{seg} = 1.585 \text{ X } 10^4 \frac{\text{gal}}{\text{min}}$$

Aplicando una simple regla de tres obtenemos que el flujo volumétrico es:

$$\dot{V} = 2.86\text{x}10^{-4}\ m^3/s = 4.432 \text{ gal/min.}$$

Esta cantidad representa el flujo volumétrico de agua que manejará la bomba y que será enfriado en el banco de hielo.

2.7 Sistema de control de temperatura

El sistema para controlar la temperatura en la matriz/dados está diseñado por un circuito electrónico de lazo cerrado, el cual funciona de la siguiente manera. Para detectar la temperatura se seleccionó un pirómetro infrarrojo con enfoque variable con rango de 600°C a 3000°C.

Fig. 2.10 Fotografía del termómetro infrarrojo.

Dicho equipo está conectado a una tarjeta analógica controlada por el software Lab Windows, el cual detecta la temperatura para mandarle la señal al PLC. De esta forma se indica si tiene que incrementar la corriente eléctrica, minimizarla o de lo contrario mantenerla constante.

A continuación se presenta un esquema de como se encuentran conectados entre si los diferentes sistemas que controlan la temperatura de la matriz de grafito.

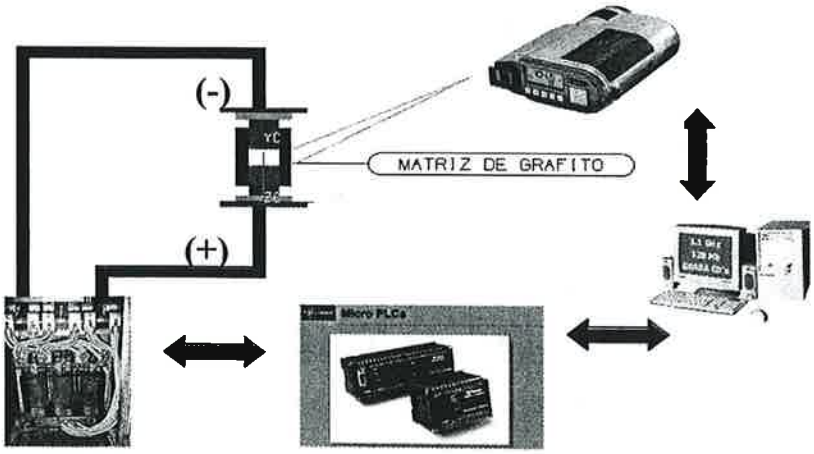


Fig. 2.11 Diagrama de interconexión para controlar la temperatura en el SAE-TR.

2.8 Sistema de templado

En base a la experiencia y en la literatura se calculó el sistema de enfriamiento o templado con aire. La Fig. 2.12 muestra el diagrama de templado.

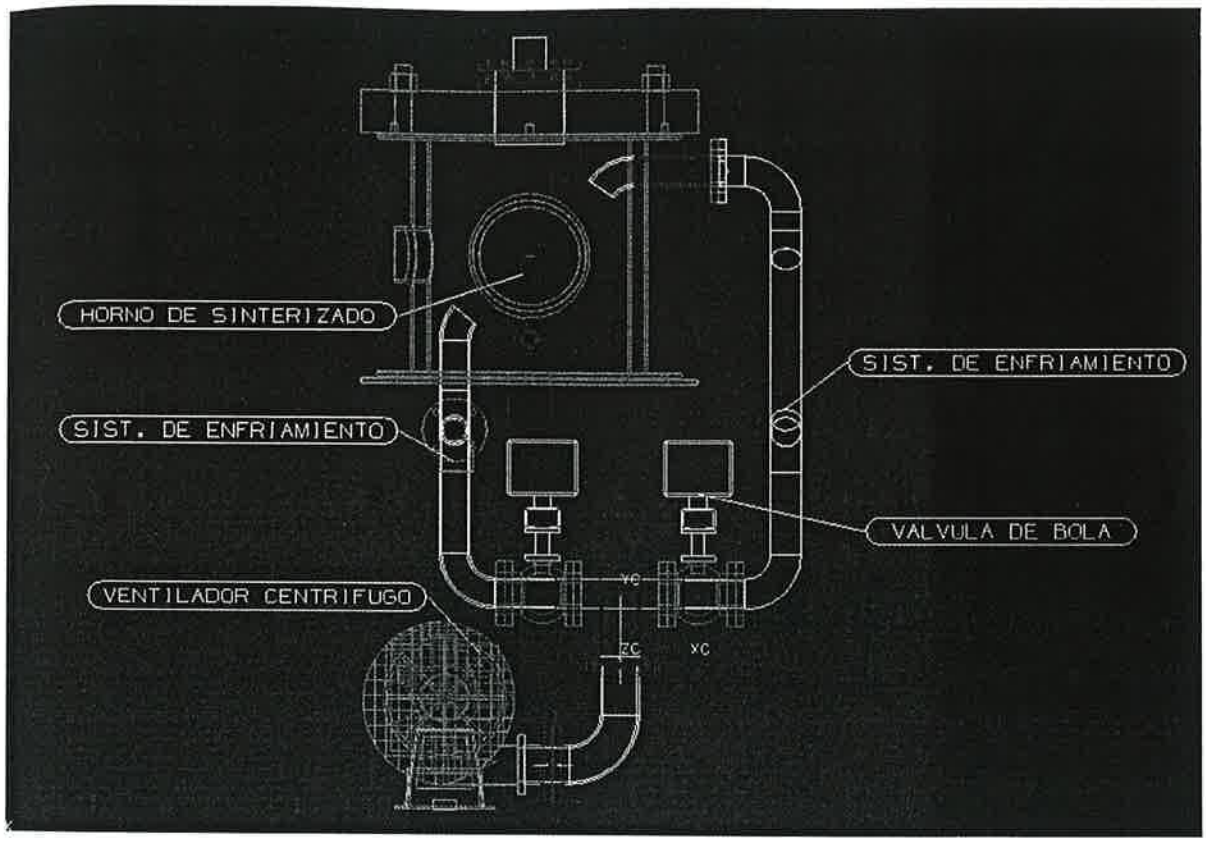


Fig. 2.12 Circuito diseñado para realizar el templado del SAE-TR.

El sistema de templado está conformado por conductos de acero, válvulas bola especiales para soportar altas temperaturas y alto vacío, y un ventilador centrifugo controlado por un variador de frecuencia, tal como se muestra en la Figura 2.12.

Existen diferentes tipos de templado, pero en este caso se realizará el templado por tiro forzado de aire atmosférico provocando un enfriamiento en el cual no llegue el flujo del aire directo a la pieza si no en forma tangencial para evitar cambios bruscos de temperatura y provocar fractura tanto de la matriz como en la propia pieza a templar.

ANEMÓMETRO

El Anemómetro de Bolsillo Kestrel es un pequeño dispositivo portátil electrónico de aspas giratorias que utiliza cojinetes de alta precisión montados en rubí y un impulsor de bajo peso para proporcionar mediciones exactas del viento o del flujo de aire incluso a bajas velocidades.

Fig. 2.13 Anemómetro para medir el flujo del aire.

2.9 Sistema colector de datos

La automatización de los procesos industriales es una tendencia actual que la industria está demandando actualmente; la utilización de estos sistemas automáticos se refleja en una mejora en la producción.

Dada la relevancia de la automatización para la industria, se plantea automatizar el control de temperatura de una máquina de Sinterizado, la cual utiliza grandes cantidades de corriente para calentar un horno y crear nuevos materiales. Esta corriente actualmente es suministrada por el usuario mediante una perilla, el problema aquí es que este control no tiene exactitud y muchas veces se suministra más corriente de la necesaria, esto equivale a más temperatura provocando que las piezas que están dentro del horno se dañen.

El principal beneficio de la realización de este sistema es que se tendrá un control de gran exactitud sobre la temperatura de la muestra, además de que ya no será necesaria la presencia del operador de la perilla, ni tampoco de alguien que tome las lecturas manualmente, pues todo será enviado y documentado a una computadora.

La importancia en la realización de este proyecto es que existen investigadores que están trabajando en la obtención de nuevos materiales cerámicos y metálicos. Este equipo forma parte de un proyecto de investigación apoyado por CONACYT y es encabezado por el Dr. Sebastián Díaz, el desarrollo de este proyecto contribuye de manera significativa con sus investigaciones ya que les brinda la posibilidad de tener un control mas exacto sobre los experimentos que realizan.

La implementación de un control de temperatura automático para una máquina de sinterizado por chispa por medio de un sistema PID (Proporcional, Integral y Derivativo) basado en el software LabVIEW.

Consta de los siguientes partes:

Caracterizar los sensores de temperatura.

Obtener la respuesta de la máquina de sinterizado a una entrada escalón.

Diseñar el control PID.

Simular el control PID.

Hacer pruebas prácticas de funcionamiento en la máquina.

Dependiendo del tipo de horno y del material a sinterizar, existen dos opciones:

Para el desarrollo de este proyecto se tiene una máquina de sinterizado por chispa, el cual se muestra en la Figura 2.13a.

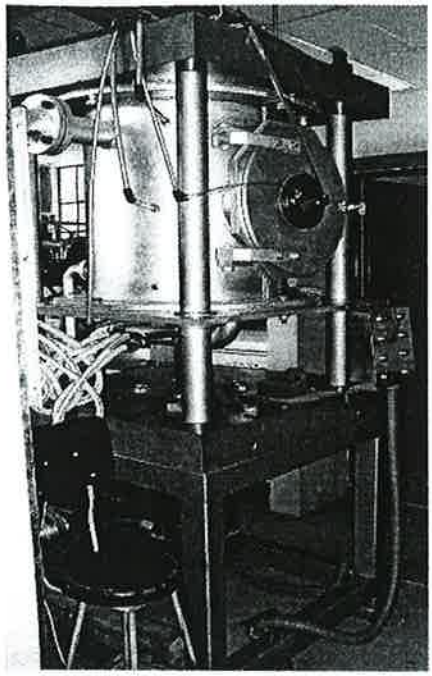


Fig. 2.13a Equipo de Sinterizado por SAE-TR.

Se cuenta además con un panel de control para máquina de sinterizado por arco eléctrico, el cual se observa en la Figura 2.14, éste está diseñado para que funcione con alimentación de 220VCA-60Hz trifásica y mantenga una salida 8VCD con máximo de corriente a 3000Amp.

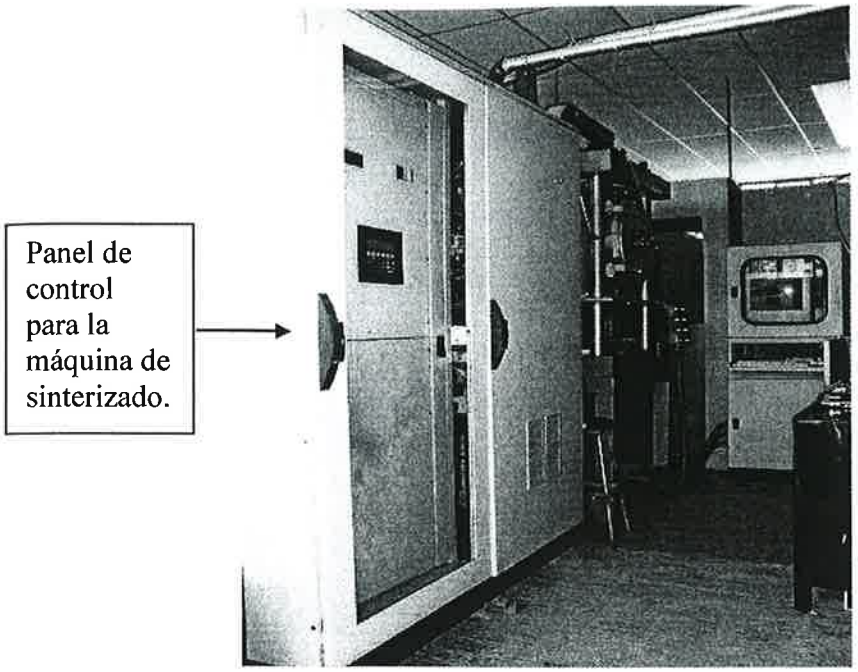


Fig. 2.14. Panel de control para la máquina de sinterizado SAE-TR.

Este panel esta conformado por una fuente de DC la cual consta de una etapa de potencia, con un transformador trifásico de 220:8 V y un puente hexafásico de 3000 Amperes, una resistencia shunt de 4000 Amperes 60mv. Cuenta con un controlador de impulsos el cual regula el ángulo de disparo de los tiristores de acuerdo a la referencia enviada por el lazo de control de corriente a través una tarjeta de regulación (MP400), las entradas y salidas digitales se encuentran en un PLC.

La responsable de la etapa de regulación es la tarjeta MP400, la que se alimenta con un voltaje de 110VCA del secundario del transformador, recibe la salida del PLC y realiza las siguientes funciones:

- Inhibe la salida de disparo de los tiristores de acuerdo con la señal programada del PLC On -Off.
- Ajusta la corriente de salida a los electrodos del horno.
- Encendido suave.

En la Figura 2.15 se muestra se muestra la tarjeta MP400. Ésta acepta un rango de voltaje de entrada de 0 a 5 Volts.

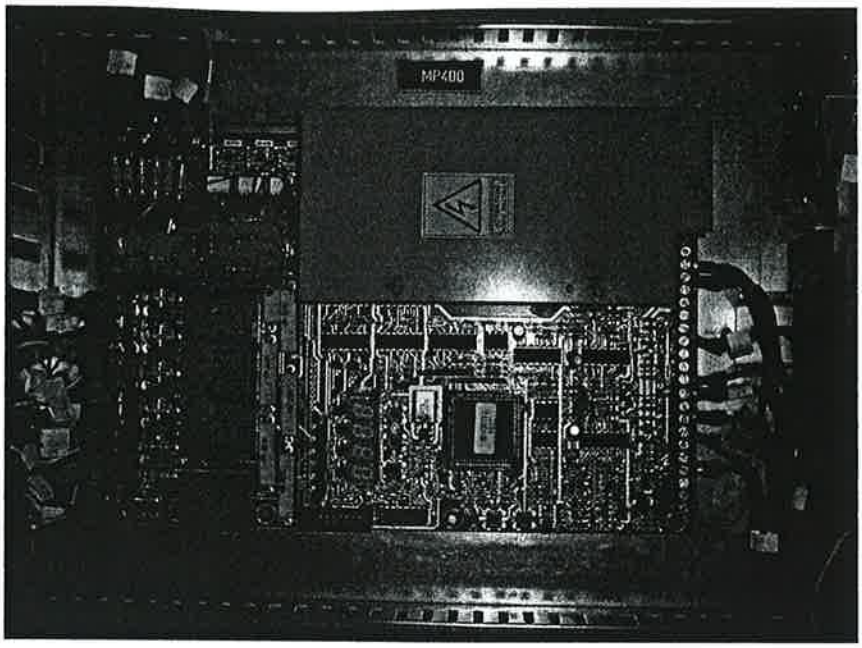


Fig. 2.15. Tarjeta MP400.

El voltaje es suministrado a la MP400 por medio de un potenciómetro que se muestra en la Figura 2.16, cuyo rango de valor que entrega varía de 0 a 5 Volts. Éste se encarga del control de la temperatura, sin embargo cuando se diseñe el PID, esta perilla será reemplazada.

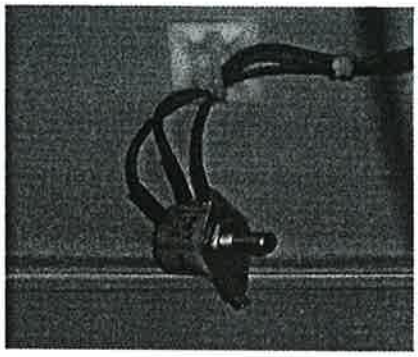


Fig. 2.16. Potenciómetro regulador de voltaje para la tarjeta MP400.

Dentro del proceso de sinterización existen varios componentes importantes uno de ellos son los sensores de temperatura, en este diseño se utilizaron pirómetros (dispositivo capaz de medir la temperatura sin contacto superficial), por tal motivo a continuación se describen algunos tipos de sensores y las características principales de cada uno de ellos:

Sensores

El término sensor se refiere a un elemento que produce una señal relacionada con la cantidad que se está midiendo. Por ejemplo, en el caso de un elemento para medir temperatura mediante resistencia eléctrica, la cantidad que se mide es la temperatura y el sensor transforma una entrada de temperatura en un cambio de resistencia.

Clasificación de sensores

Los sensores se pueden clasificar de diferentes maneras considerando, su utilidad, principio, tipo de señal que entregan, etc. En la Tabla siguiente son listados varios tipos de sensores clasificados por su objetivo de medición.

Sensores de rotación y desplazamiento.

Sensor	Características
Codificadores ópticos (Encoders).	Usados para medir posición rotatoria absoluta o incremental.
Sensores de efecto Hall.	No requieren de un contacto físico para la medición.
Sensor capacitivo.	Usados para medir nivel de liquido, detectar presencia, etc.
Giroscopio.	Medir velocidades angulares.
Acelerómetro.	Cambio de velocidad.
Sensores piezoeléctricos.	Para medir fuerza.
Sensores de contacto.	Interruptor.

Sensores de proximidad.

Sensor	Características
Inductivos, efecto Hall, fotoeléctrico, capacitivo.	Robustos y no requieren contacto físico.

Sensores de materiales especiales.

Sensor	Características
Fibra óptica	Usados como sensores de fuerza, nivel de liquido, temperatura, etc.
Piezoeléctricos	Usados como sensores de fuerza, aceleración, etc.

Micro y nano sensores.

Sensor	Características
Sensor CCD para cámara	Tamaño pequeño y alta resolución en imágenes.
Sensor micro ultrasónico	Usado para detectar fallas en tuberías pequeñas.

Sensores de temperatura.

Sensor	Características
Termopares	Son de bajo costo y son usados para medir altas temperaturas.
Termistor	Alta sensibilidad en rangos de temperatura superior a 100°C.
RTD (Resistor Temperatura Detector)	Respuesta lineal y alta sensibilidad.
Infrarrojo o pirómetros	Sensor de no contacto, usado para altas temperaturas.

Para este proyecto se utilizó un pirómetro de la marca Raytek, Figura 2.17, para medir una matriz de grafito, que contiene polvos metálicos. Una vez que ésta dentro del horno, es posible medir la temperatura apuntando el haz láser del pirómetro hacia la matriz.

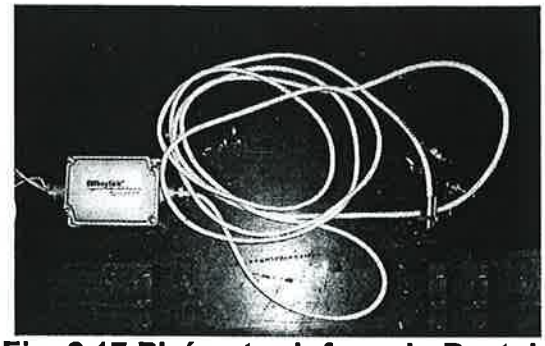


Fig. 2.17 Pirómetro infrarrojo Raytek.

Este pirómetro opera en un rango de de medición de 0 - 600°C, y ofrece una salida de 4 - 20mA, y se alimenta con un rango de 12 - 24VDC.

Transductor

Un transductor es un dispositivo que convierte una señal de un tipo de energía en otra. La base es sencilla, se puede obtener la misma información de cualquier secuencia similar de oscilaciones, ya sean ondas sonoras (aire vibrando), vibraciones mecánicas de un sólido, corrientes y voltajes alternos en circuitos eléctricos, vibraciones de ondas electromagnéticas radiadas en el espacio en forma de ondas de radio o las marcas permanentes grabadas en un disco o una cinta magnética.

Acondicionador de señal

Cambia la escala de una señal a la salida de un transductor para que pueda ser de utilidad, Estos pueden ser de voltaje a voltaje, de voltaje a corriente, de corriente a voltaje, y de corriente a corriente.

Para el pirómetro que se tiene se utilizará un acondicionador de señal de la marca Weidmüller, que convierte la señal de salida del sensor Raytek de 4 -20mA a una señal de 0-10Volts y se alimenta con 110/120 VAC. Éste acondicionador de señal se muestra en la Figura 2.18

Acondicionador de señal, para el pirómetro

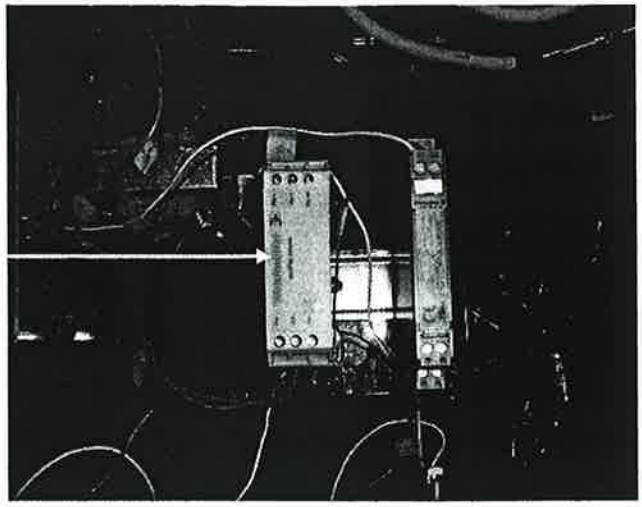


Fig. 2.18 Acondicionador de señal de Weidmüller.

Tarjetas de adquisición de datos

La tarjeta DAQ son dispositivos que permiten la entrada y salida de datos de la computadora a otros aparatos donde se conectan sensores y actuadotes para interactuar con el mundo real. Los datos que entran y salen pueden ser señales digitales o análogas simplemente conteos de pulsos digitales tanto de entrada como de salida. Las tarjetas se comportan como si fueran un puerto más en la computadora, y poseen todo un protocolo y sistema de manejo, por lo que entender cada tarjeta, como es su funcionamiento, al igual que otro instrumento o cualquier instrumento requiere de tiempo y cuidado.

Para realizar la adquisición se cuenta con una DAQ de National Instruments AT-MIO-16E-2, Figura 2.19, que opera en un rango de 0 – 10Volts. Estos datos llegan a un programa comercial, denominado LabVIEW, que realiza un muestreo cada 0.5 segundos, de los datos que proviene de la DAQ, y esta su vez los recibe del acondicionador de señal que está conectado al pirómetro.

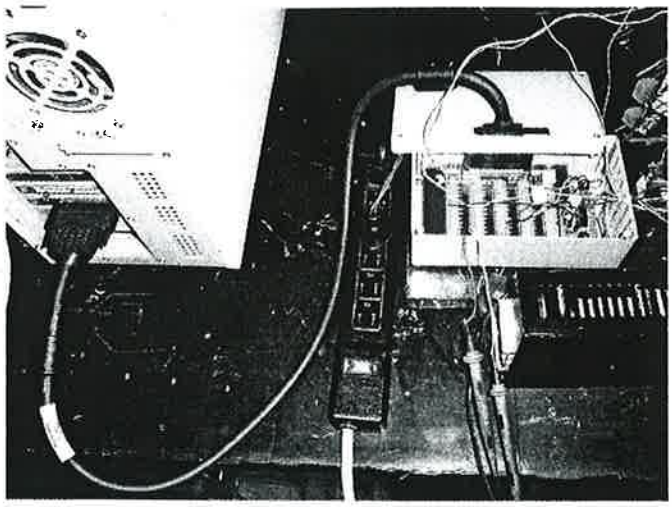


Fig.2.19 DAQ de National Instruments AT-MIO-16E-2, conectada a la comp.

Controladores industriales

Un controlador automático compara el valor real de la salida de una planta con la entrada de referencia (valor deseado), determina el error, y produce una señal de control que reducirá el error a cero, o a un valor muy pequeño. La forma como el controlador automático produce la señal de control, se denomina *acción de control.*

Clasificación de controladores industriales:

Los controladores industriales, se pueden clasificar de acuerdo con sus acciones de control, de la siguiente forma:

- Controladores de dos posiciones, o intermitentes (encendido-apagado)
- Controladores proporcionales

- Controladores integrales
- Controladores proporcional-integral
- Controladores proporcional-derivativo
- Controladores proporcional-integral-derivativo

Controladores proporcional-integral-derivativo

El controlador PID (Proporcional, Integral y Derivativo) es un controlador realimentado cuyo propósito es hacer que el error en estado estacionario, entre la señal de referencia y la señal de salida de la planta, sea cero de manera asintótica en el tiempo, lo que se logra mediante el uso de la acción integral. Además el controlador tiene la capacidad de anticipar el futuro a través de la acción derivativa que tiene un efecto predictivo sobre la salida del proceso.

Los controladores PID son suficientes para resolver el problema de control de muchas aplicaciones en la industria, particularmente cuando la dinámica del proceso lo permite (en general los procesos que pueden ser descritos por dinámicas de primer y segundo orden), y los requerimientos de desempeño son modestos (generalmente limitados a especificaciones del comportamiento del error en estado estacionario y una rápida respuesta a cambios en la señal de referencia).

La ecuación del control PID es la siguiente:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i}\int_0^t e(t)dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \qquad 2.24$$

Y la función de transferencia es:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p\left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right) \qquad 2.25$$

Donde K_p =es la ganancia proporcional, T_i =es el tiempo integral, y T_d =es el tiempo derivativo.

Una vez obtenidos estos parámetros, se podrá obtener el PID, en el programa de LabVIEW.

PROCEDIMIENTO

Caracterización del sensor de temperatura infrarrojo.

El sensor de temperatura utilizado para el SAE-TR tiene un rango de medición de 0 a 600°C. Para determinar la relación que describía los cambios en la temperatura con respecto al voltaje, era necesario obtener la ecuación del sensor, por tal motivo, se realizó una prueba. Se introdujo un cubo de acero dentro de una mufla de laboratorio, se colocó el sensor de temperatura en un orificio de escape de la mufla, para medir su temperatura con el sensor infrarrojo; se elevó gradualmente la temperatura desde los 36°C hasta los 520°C. Cada incremento de temperatura de medio grado se registró con su respectiva equivalencia en voltaje, en un rango de 0 a 10Volts. Al graficar los datos obtenidos, se encontró que el sensor tiene un comportamiento semejante al de una recta, como se muestra en la Figura 2.20.

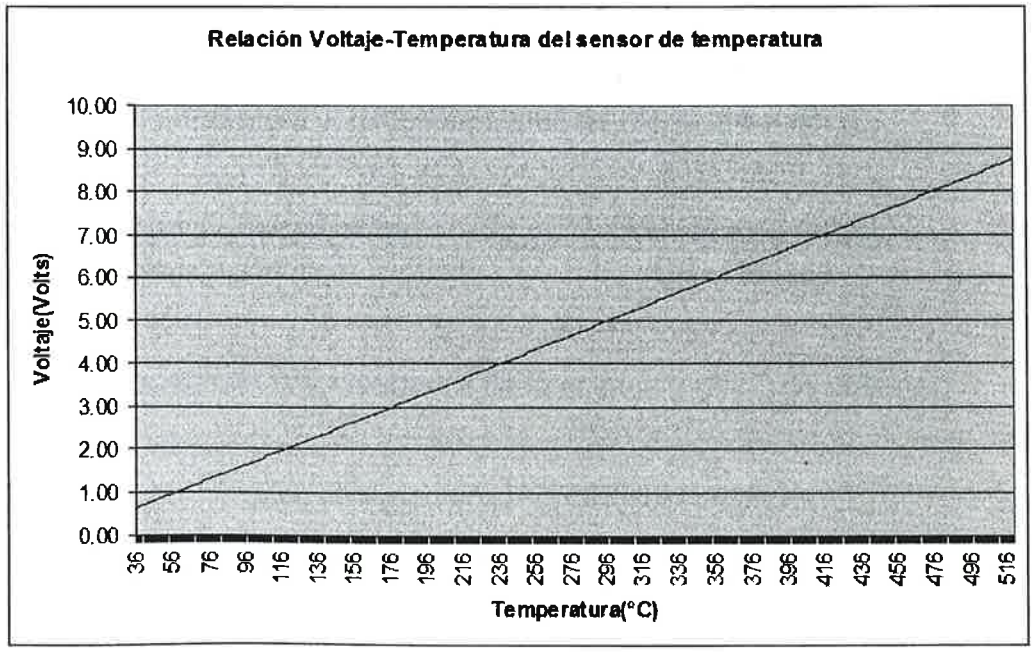


Fig. 2.20. Relación de la Temperatura respecto al Voltaje para el Sensor de temperatura infrarrojo.

De la gráfica de la Figura 2.20, se obtuvo la pendiente de la siguiente forma. Cuando se tienen dos puntos cualesquiera (x_1, y_1) y (x_2, y_2), la pendiente queda determinada por el cociente entre la diferencia de las ordenadas de dos puntos de ella y la diferencia de las abscisas de los mismos puntos.

$$m = \frac{(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)} \qquad 2.26$$

Al tomar los valores de los extremos de la temperatura (520°C y 36°C) con su respectivo valor de voltaje (8.8410Volts y 0.7554 Volts), la ecuación queda de la siguiente manera:

$$m = \frac{(Temperatura_2 - Temperatura_1)}{(Voltaje_2 - Voltaje_1)} = \frac{(520-36)}{(8.8410-.7554)} = \frac{484}{8.0856} = 59.85$$

Sustituyendo la pendiente, el valor máximo de temperatura y voltaje en la ecuación (2.26) se obtiene la relación correcta entre voltaje y temperatura. Este procedimiento se explica a continuación:

Conociendo la pendiente, ésta se sustituyó en la ecuación de la línea recta junto con el valor máximo de temperatura y voltaje es capaz de medir el sensor.

$$m = \frac{(Temperatura_2 - Temperatura_1)}{(Voltaje_2 - Voltaje_1)} \quad \therefore \quad 59.85 = \frac{(600 - Temperatura_1)}{(10 - Voltaje_1)} \qquad 2.27$$

Despejando la temperatura de la ecuación (2.27) se obtiene:

$$(600 - Temperatura_1) = 59.85(10 - Voltaje_1)$$

$$-Temperatura_1 = 59.85(10 - Voltaje_1) - 600$$

$$-Temperatura_1 = 598.5 - 59.85 \times (Voltaje_1) - 600$$

$$Temperatura_1 = -598.5 + 59.85 \times (Voltaje_1) + 600$$

$$Temperatura = (59.598) \times (Voltaje) + 1.4$$

Ésta ecuación se introdujo en el programa LabVIEW, por lo que éste nos dará la relación correcta entre voltaje y temperatura.

Obtención de la respuesta del equipo SAE-TR a una entrada escalón

Para determinar la respuesta de la máquina, se introdujo una matriz de grafito dentro del horno de sinterizado. Después se colocó el sensor de temperatura infrarrojo, para medir la temperatura de la matriz, tal y como se muestra en la Figura 2.21.

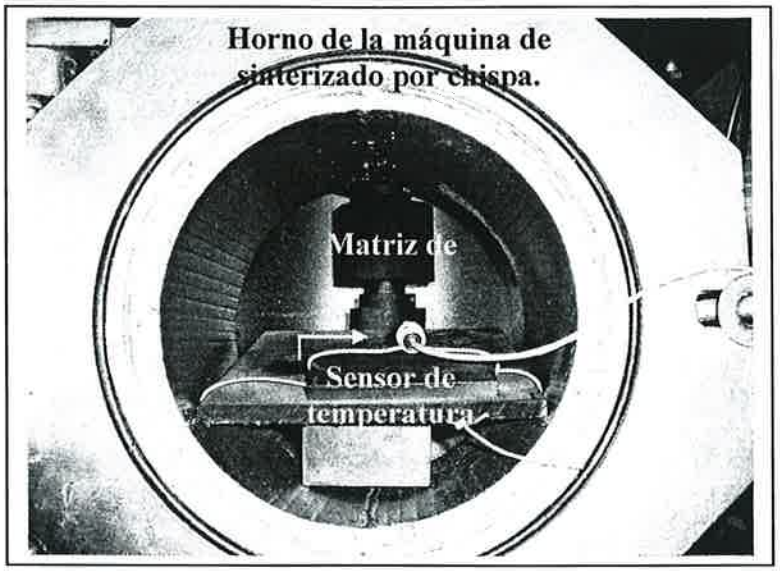


Fig.2.21. Sensor de TI, ubicado en dirección a la matriz de grafito.

Primero se aplicó una entrada escalón de 0.5Volts durante una hora, la temperatura que se alcanzó en este tiempo fue de 138°C como se muestra en la Figura 2.22.

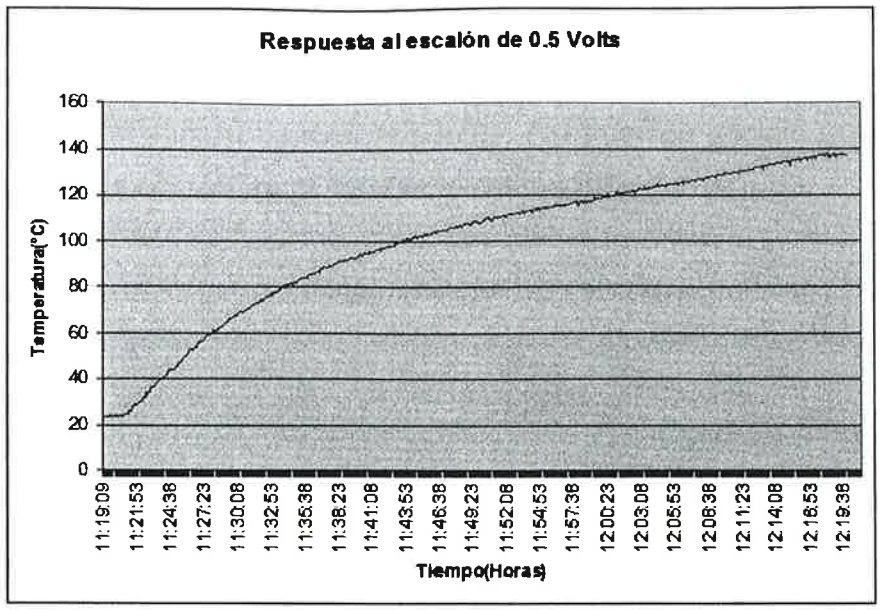


Fig. 2.22 Respuesta al escalón de entrada de 0.5 Volts.

Después se aplicó una entrada escalón de 1.0Volts durante una hora, la temperatura que se alcanzó en este tiempo fue de 258°C como se muestra en la Figura 2.23.

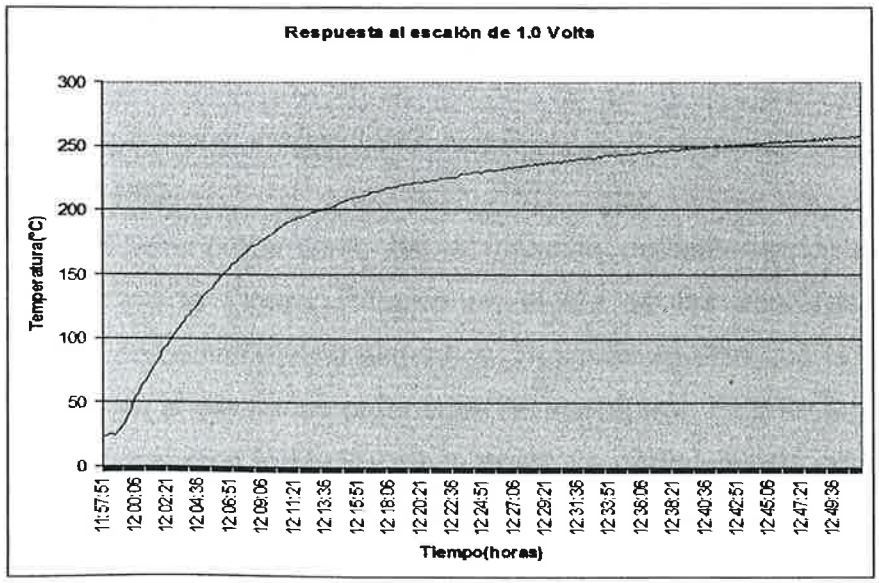


Fig. 2.23 Respuesta al escalón de entrada de 1.0 Volts.

Por ultimo se aplicó una entrada escalón de 1.5Volts durante una hora, y se alcanzó la temperatura máxima de 447°C tal y como se muestra en la Figura 2.24. Cabe señalar que aunque el sensor tiene un rango de 0 a 600Volts, éste mismo tiene una temperatura de operación ambiental no más de 50°C. En esta parte del experimento, el sensor estaba cerca de ese rango de temperatura, por lo que un incremento más en el voltaje, dañaría el sensor. Así pues se decidió que los 1.5Volts, fueran nuestro voltaje escalón para diseñar el control PID.

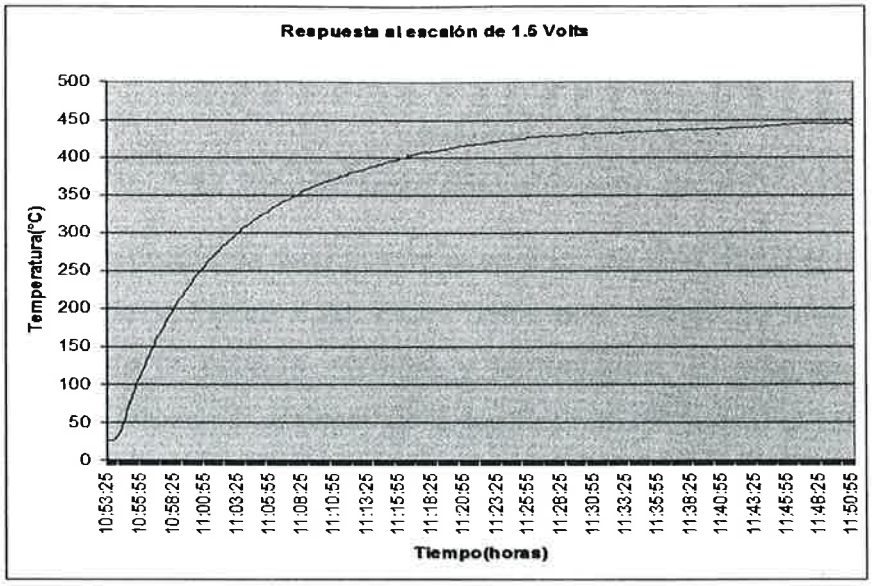


Fig. 2.24 Respuesta al escalón de entrada de 1.5 Volts.

Diseño del Control PID

Una vez obtenido el comportamiento de la máquina de sinterizado, se procedió a modificar la gráfica de la Figura. Primero en el eje de las abscisas (tiempo), las unidades de tiempo se convirtieron a segundos. Después se hizo que la gráfica tuviera una referencia de 0, en el eje de las ordenadas (temperatura). Esto se logró restando el valor de menor temperatura a todas las mediciones. La gráfica quedó como se muestra en la Figura 2.25, y fue el modelo base en el diseño del PID.

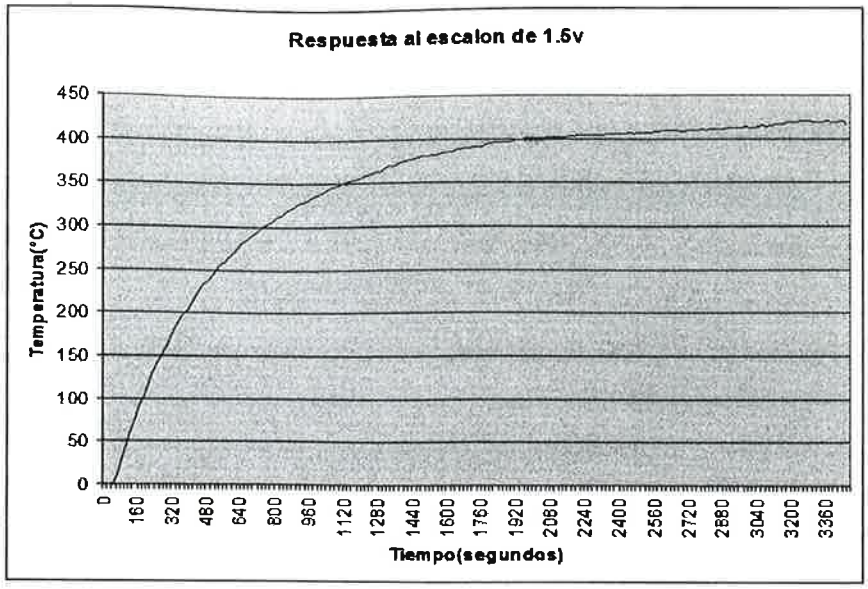


Fig. 2.25. Modelo base para el diseño del PID.

Después se utilizo un programa de mínimos cuadrados en MATHLAB el cual importa los datos de la grafica de la Figura 2.20. Estos datos son: tiempo de muestreo (cada 20 segundos), voltaje de la entrada escalón, y temperatura. El programa genera tres vectores con ésta información; al observar la forma de la respuesta del sistema real, se aproximó ésta a un sistema de segundo orden mediante el programa, el cual generó la matriz Z. Dicha matriz contiene los coeficientes [b_0, a_1, b_1, a_2, b_2] de la siguiente función:

$$F(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} \qquad 2.28$$

Cuyos valores respectivos son [0.2933, -1.4534, -0.7206, 0.4758, 5.4331], con los cuales se buscará el modelo de la planta en Z.

$$F(z) = \frac{0.2933 - .7206 z^{-1} + 5.4331 z^{-2}}{1 - 1.4534 z^{-1} + .4758 z^{-2}} \qquad 2.29$$

En la Figura 2.26 se muestran las gráficas del sistema real (verde) y el sistema simulado (rojo).

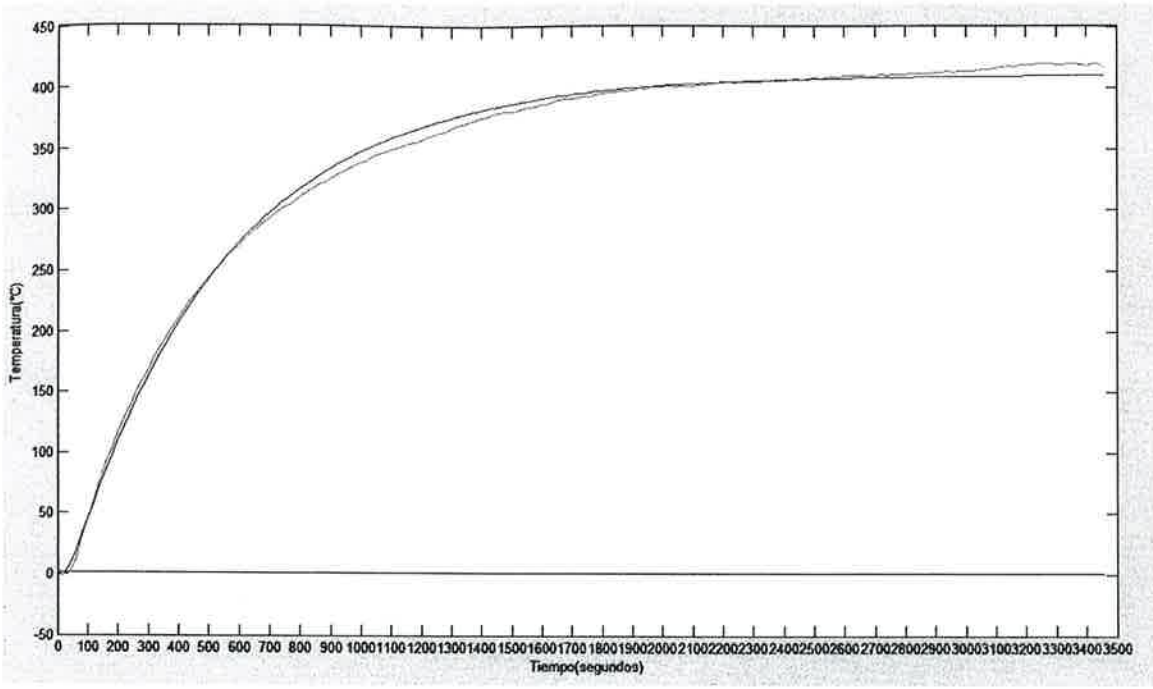


Fig. 2.26. Comparación del sistema real con el simulado.

A partir de los coeficientes de la matriz se pudo diseñar nuestro sistema en Z de la forma:

$$F(z) = \frac{z^{-(p+1)}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} \qquad 2.30$$

Sustituimos los valores de nuestra matriz Z tomando para el numerador b_2, y para el denominador a_1, y a_2 de la siguiente manera.

$$F(z) = \frac{5.4331 z^{-2}}{1 - 1.4654 z^{-1} + .4758 z^{-2}}$$

De ésta ecuación se puede obtener su equivalencia en S.

$$F(s) = \frac{K_2 e^{-\theta s}}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} \qquad 2.31$$

A partir de a_1, y a_2 se obtuvo A_1 y A_2 de la siguiente manera:

$$a_1 = -(A_1 + A_2) \ldots \text{Ecuación} \qquad 2.32$$

$$a_2 = A_1 \times A_2 \ldots\ldots \text{Ecuación} \qquad 2.32$$

De la ecuación 22.32 tenemos:

$$a_2 = A_1 \times A_2 \;\therefore\; A_2 = \frac{a_2}{A_1}$$

Retomando la ecuación 2.32:

$$a_1 = -A_1 - A_2$$

Multiplicando la ecuación anterior por $\frac{1}{A_2}$

$$\frac{a_1}{A_2} = -\frac{A_1}{A_2} - \frac{A_2}{A_2}$$

$$\frac{a_1}{A_2} = -\frac{A_1}{A_2} - 1$$

Igualando con cero y sustituyendo A_2 obtenemos la ec. 2.33

$$\frac{a_1 A_1}{a_2} + \frac{A_1 A_1}{a_2} + 1 = 0 \qquad 2.33$$

Sustituyendo los valores de a_1, y a_2

$$\frac{A_1^2}{.4758} - \frac{1.4564 A_1}{.4758} + 1 = 0$$

$$2.1017 A_1^2 - 3.0609 A_1 + 1 = 0$$

Al resolver el sistema de ecuaciones simultaneas se obtuvo los valores de A_1 = 0.4948 y A_2 = 0.9616

Para obtener los tiempos T_1 y T_2 en base a las ecs. 2.34 y 2.35, siendo el tiempo de muestreo T_s=20 segundos.

$$T_1 = \frac{-T_s}{Ln(\mathrm{A}_1)} = \frac{-20}{Ln(.4948)} = 28.48seg \qquad 2.34$$

$$T_2 = \frac{-T_s}{Ln(\mathrm{A}_2)} = \frac{-20}{Ln(.9616)} = 510.76seg \qquad 2.35$$

Para obtener K:

$$K = \frac{K_2(T_1 - T_2)}{T_s(\mathrm{A}_1 - \mathrm{A}_2)} = \frac{5.4331(28.48 - 510.76)}{20(.4948 - .9616)} = 280.503 \qquad 2.36$$

Para obtener θ:

Si el numerador es $z^{-(p+1)} = 5.4331z^{-2} \therefore -(p+1) = -2$

$$(p+1) = 2$$

$$p = 2 - 1 = 1$$

$$\theta = p \times T_s = 1 \times 20 = 20$$

Sustituimos los valores, para obtener la ecuación de nuestro sistema en S

$$F(s) = \frac{280e^{-20s}}{(28.48+1)(510.76s+1)} \qquad 2.37$$

Después se introdujo ésta nueva ecuación en el programa de mínimos cuadrados en MATHLAB y verificamos si era similar. En la Figura 2.27 se muestra las gráficas del sistema real (verde), el sistema simulado en el plano Z (Rojo), y el sistema simulado en el plano S (violeta). Como se aprecia en la Figura 2.27, las curvas son similares, por lo tanto para el diseño del PID se tomó la ecuación en S, debido a que es más sencillo sintonizarlo.

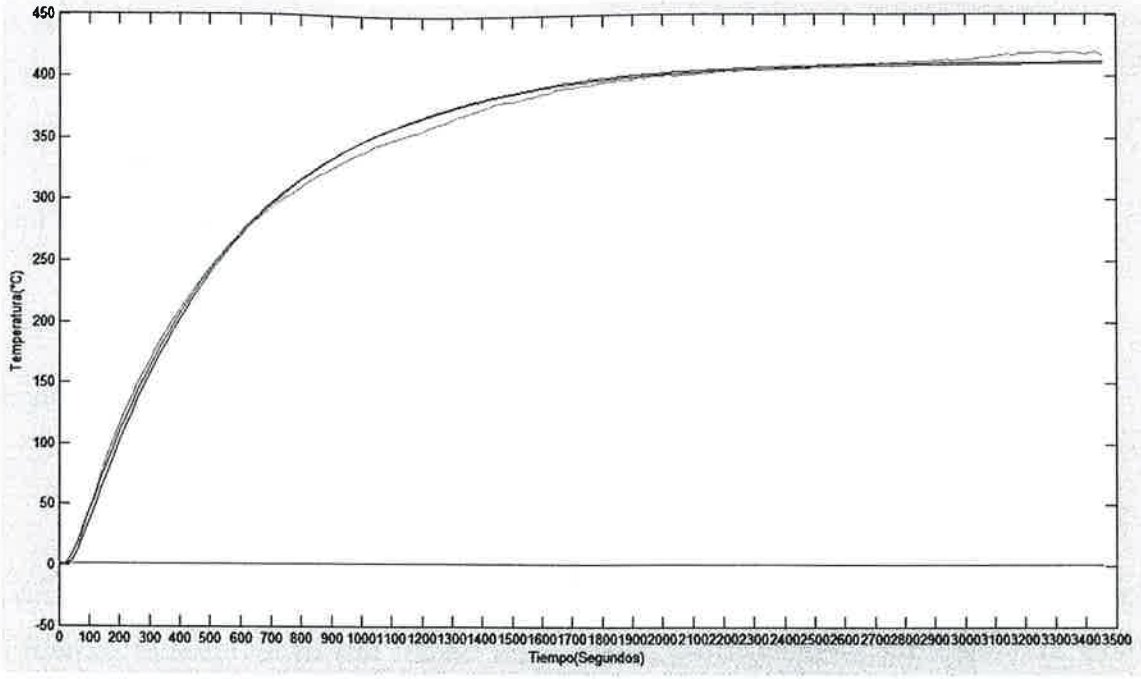


Fig. 2.27. Comparación del sist real con el simulado en el plano Z y en el plano S.

La ecuación de segundo orden:

$$F(s) = \frac{280e^{-20s}}{(28.48+1)(510.76s+1)} \qquad 2.38$$

Fue posible aproximarla a una de primer orden:

$$F(s) = \frac{Ke^{-\theta s}}{(T_1 s+1)} \qquad 2.39$$

Primero se tomaron los valores de la gráfica en los tiempos donde la curva tiene el 28.4 y el 63.2 de la respuesta, y se sustituyó en las siguientes ecuaciones:

$$T_1 + \theta = t_{0.632} \qquad 2.40$$

$$\frac{T_1}{3} + \theta = t_{0.284} \qquad 2.41$$

El 28.4 de la respuesta es 119°C, con un tiempo de 220 segundos. El 63.2 de la respuesta es 265°C, con un tiempo de 560 segundos.

Al sustituir los valores anteriores:

$$T_1 + \theta = 560$$
$$\frac{T_1}{3} + \theta = 220$$

Despejando el sistema de ecuaciones simultáneas se obtuvo:

$$\theta = 50$$
$$T_1 = 510$$

Sustituyendo los valores en la ecuación de primer orden.

$$F(s) = \frac{280e^{-50s}}{(510+1)} \qquad 2.42$$

En el programa Simulink, la función de transferencia de segundo orden, y la de primer orden fueron representadas por medio de bloques, para observar su respuesta, como se ve en la Figura 17.

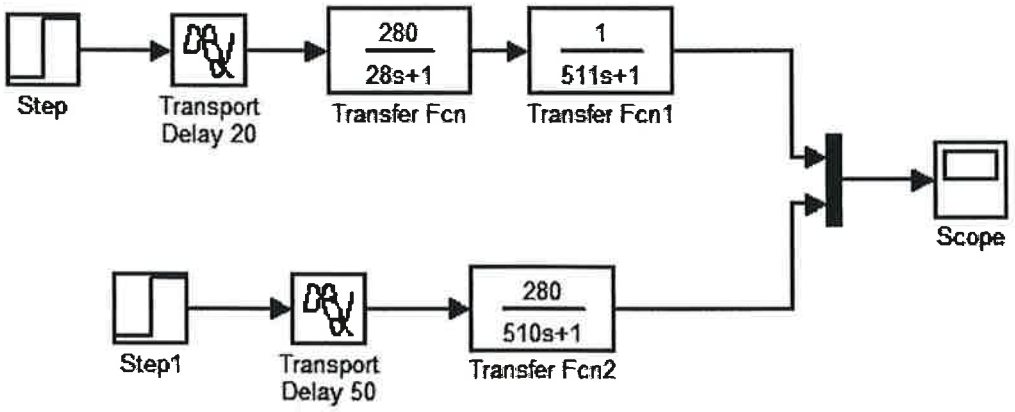


Fig. 2.28. Comparaciones de los sistemas de primer orden y de segundo orden.

Al graficar la función de segundo orden (amarillo) junto con la función de primer orden (púrpura) se observó que son casi idénticas como se ve en la Figura 2.29.

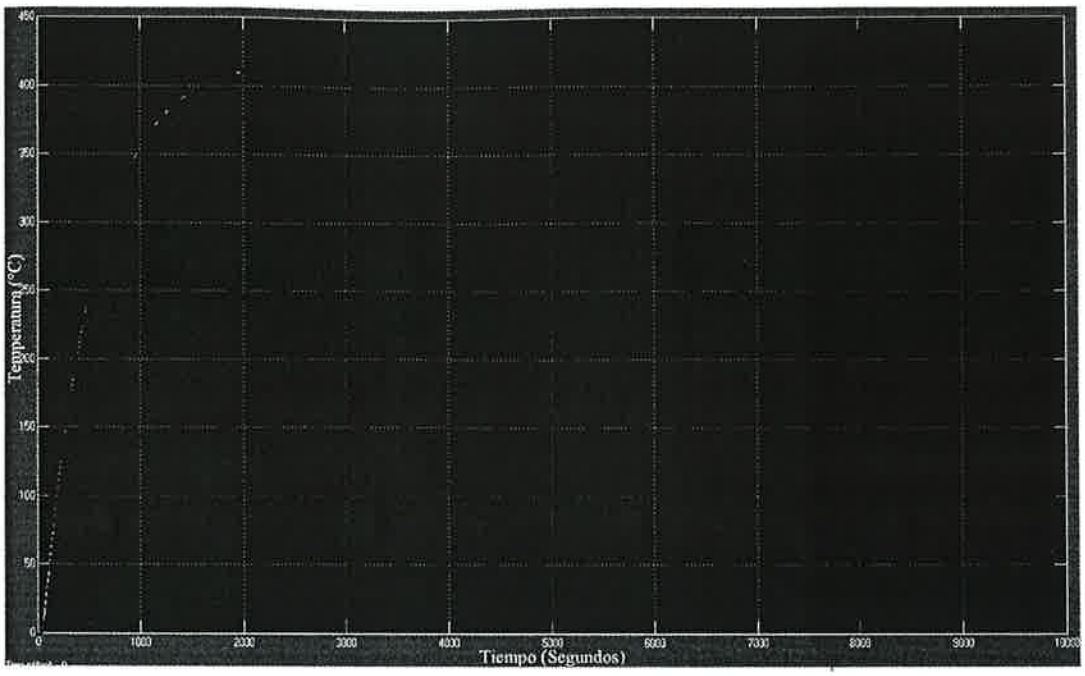


Fig. 2.29. Respuestas de los sistemas de primer orden y de segundo orden.

De la ecuación de primer orden ec. 2.42:

$$F(s) = \frac{280e^{-50s}}{(510+1)} \qquad 2.42$$

Se obtuvo:

θ=50

T_1=510

Con estas variables se puede obtener los parámetros Kp, Ti, y Td, los cuales son utilizados para encontrar el PID.

$$Kp = \frac{1.2T}{\theta} = \frac{1.2(510)}{50} = 12.24 \qquad 2.43$$

$$Ti = 2\theta = 2(50) = 100 \qquad 2.44$$

$$Td = .5\theta = .5(50) = 25 \qquad 2.45$$

Con estos parámetros se procedió a calcular el PID

$$P = Kp = 12.24$$
$$I = \frac{Kp}{Ti} = \frac{12.24}{100} = .1224$$
$$D = KpTd = (12.24) \times (25) = 306$$

Simulación del PID

Con los parámetros del PID, en el programa Simulink, se representó por medio de bloques la función de transferencia que simula el sistema. Éste consta de una entrada escalón que es nuestro setpoint para la temperatura deseada, una ganancia de (1/60) para convertir la temperatura en voltaje, un sumador de voltaje contra voltaje, el controlador PID, una restricción de 0-5 Volts que es el rango que la MP400 acepta, la función de transferencia de segundo orden la cual retorna un valor de temperatura cuando ésta recibe un voltaje, una segunda ganancia de (1/60) que convierte la temperatura que viene de la función de orden dos a un valor de voltaje para retroalimentar el sumador y poder comparar voltaje contra voltaje. Este diagrama se muestra en la Figura 2.30:

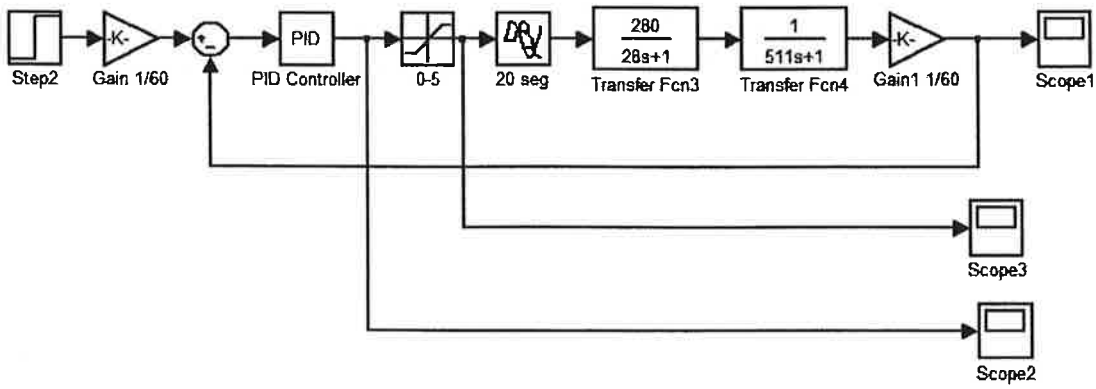


Fig. 2.30. Diagrama de bloques del control PID.

Para nuestra simulación, los valores P, I, y D se multiplicaron por (1/60) para incluirse en la función de transferencia.

$$P = 12.24 \times \frac{1}{60} = .204$$

$$I = .1224 \times \frac{1}{60} = .00204$$

$$D = 306 \times \frac{1}{60} = 5.1$$

Al simular un valor de setpoint de 420°C, que equivalen a 7Volts, el sistema se hizo estable después de los 4000 segundos como se ve en la Figura 2.31.

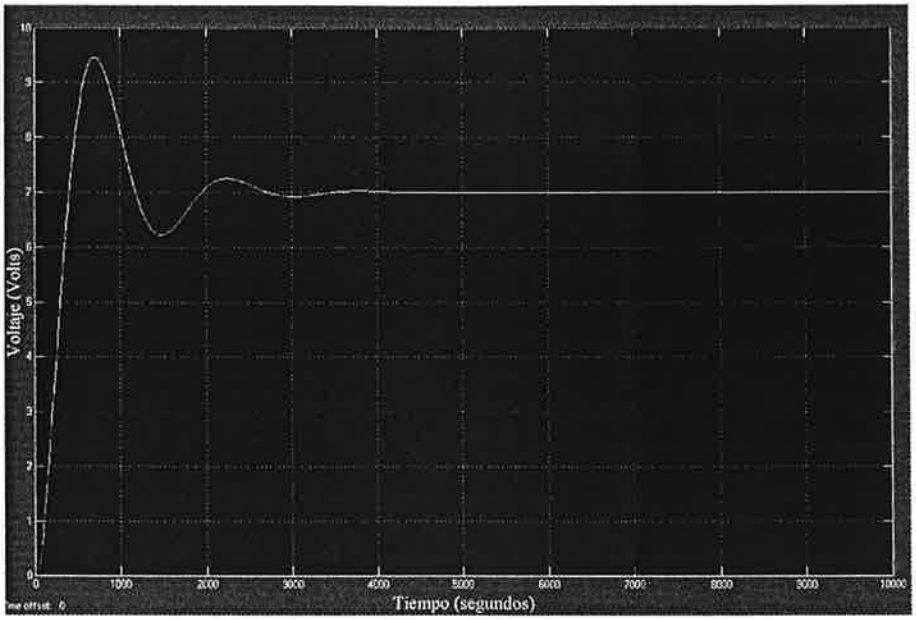


Fig. 2.31. Respuesta de nuestro sistema a un setpoint de 420°C.

La respuesta del PID para estabilizar el sistema se muestra en la Figura 2.32.

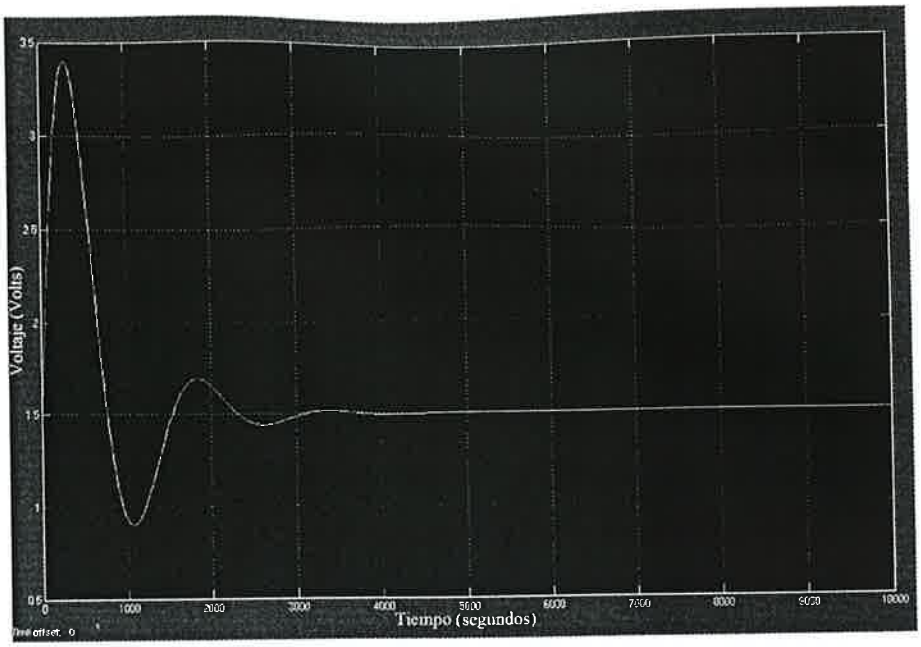


Fig. 2.32. Respuesta del PID, al simular un setpoint de 420°C.

El diseño anterior aunque funciona, tiene muchos sobresaltos indeseables, entonces es necesario tener otros valores de referencia y poder ajustar nuestro PID, por lo tanto se duplico el valor de los parámetros Kp, Ti, y Td.

$$Kp = 12.24 \times 2 = 24.48$$
$$Ti = 100 \times 2 = 200$$
$$Td = 25 \times 2 = 50$$

Una vez obtenidos esos parámetros se procedió a calcular el PID.

$$P = Kp = 24.48$$
$$I = \frac{Kp}{Ti} = \frac{24.48}{200} = .1224$$
$$D = KpTd = (24.48) \times (50) = 1224$$

Para nuestra simulación los valores P, I, y D se multiplicaron por (1/60) para incluirse en la función de transferencia.

$$P = 24.48 \times \frac{1}{60} = .408$$

$$I = .1224 \times \frac{1}{60} = .00204$$

$$D = 1224 \times \frac{1}{60} = 20.4$$

Al simular de nuevo un valor de setpoint de 420°C, que equivalen a 7Volts, el sistema se hizo estable después de los 2000 segundos, como se ve en la Figura 17. Este nuevo diseño funciono mejor que el anterior, por que tiene menos sobresaltos y su estabilización es más rápida, como se muestra en la Figura 2.33.

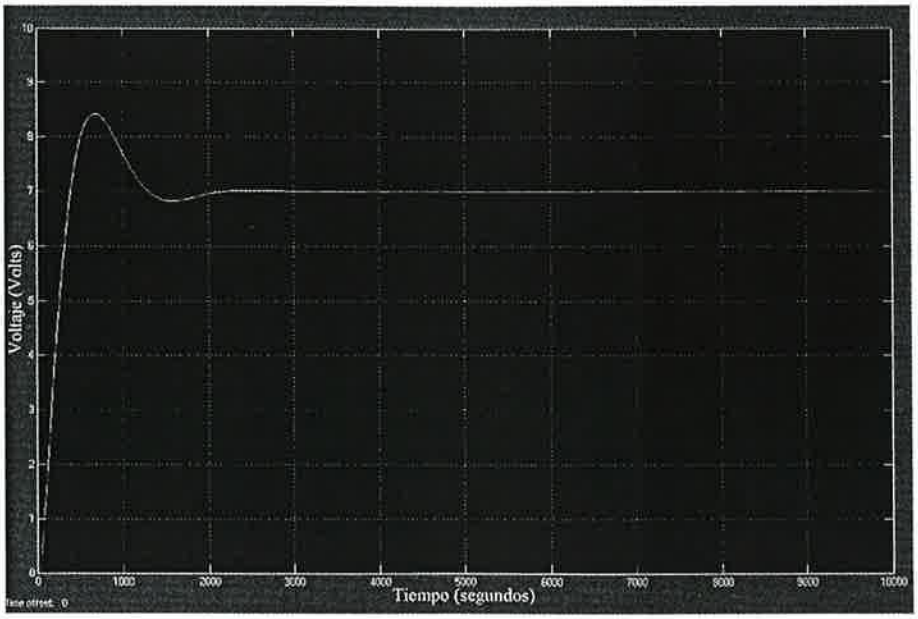


Fig. 2.33 Respuesta de nuestro sistema a un setpoint de 420°C. Utilizando el doble de los parámetros Kp, Ti, y Td.

La respuesta del PID para estabilizar el nuevo sistema se muestra en la Figura 2.34.

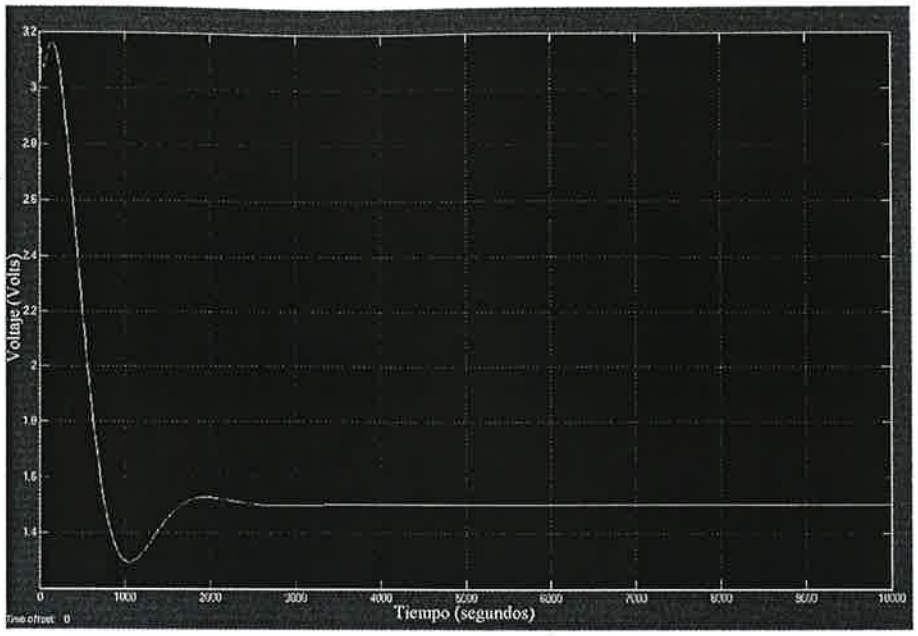


Fig. 2.34. Respuesta del PID, al simular un setpoint de420°C, utilizando el doble de los parámetros Kp, Ti, y Td.

En las simulaciones anteriores, se observó que los parámetros $P = .408, I = .00204, D = 20.4$ hacen que el sistema responda mas rápido y mejor, pero para una sintonía fina, se realizaron ajustes en los parámetros PID con el fin de tener una mejor respuesta. Al variar éstos parámetros, se obtuvieron los valores con los cuales, se puede hacer una sintonización mas eficiente estos valores son:

$$P = 0.5$$
$$I = 0.001$$
$$D = 50$$

Al simular de nuevo un valor de setpoint de 420°C, que equivalen a 7Volts, el sistema se hizo estable después de los 2000 segundos igual que en la simulación anterior, pero en ésta la respuesta tiene menos sobresaltos como se ve en la Figura 2.35.

De esta forma se simuló satisfactoriamente el PID. Al introducir estos parámetros en el programa de LabVIEW se obtiene el control automático de lazo cerrado.

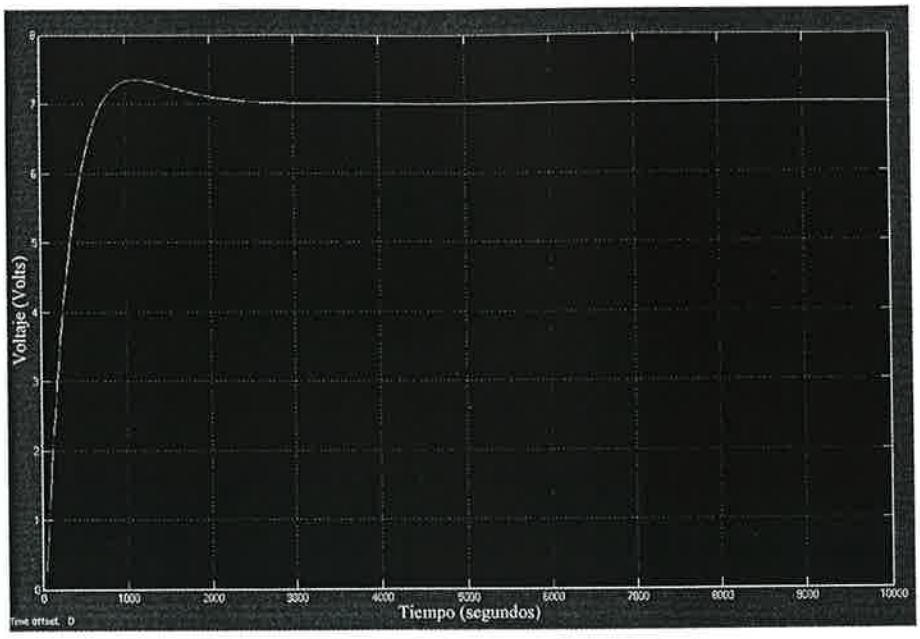


Fig. 2.35. Respuesta de nuestro sistema a un setpoint de 420°C. Utilizando los valores de $P = 0.5, I = 0.001, D = 50$.

En ésta simulación se observa como la respuesta del PID, es mas eficiente que en las opciones anteriores tal como se muestra en la Figura 2.36.

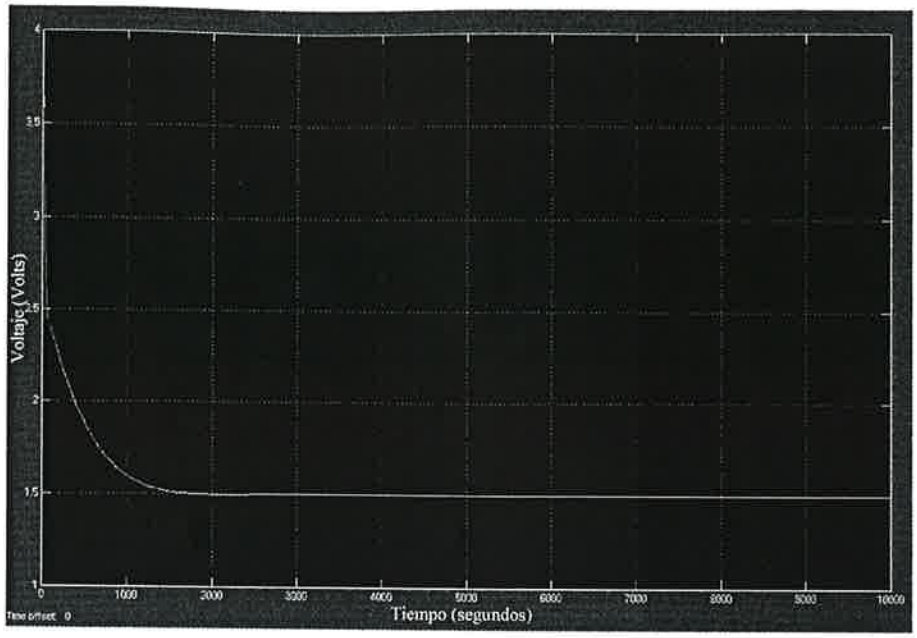


Fig. 2.36. Respuesta del PID, al simular un setpoint de 420°C, utilizando los valores de $P = 0.5, I = 0.001, D = 50$.

2.10 Cálculo de la placa principal al aplicar la carga P.

El diagrama de momento flector y de la fuerza cortante los consideraremos para determinar los esfuerzos máximos en la placa, para posteriormente compararlos con los resultados analizados por elemento finito con el software ANSYS [12-13]. Para determinar el esfuerzo máximo en la placa primero se calcula el esfuerzo flexionante [10-11] y el momento de inercia correspondiente a la viga. Dicho análisis se describe a continuación. En la Figura 2.37 se muestra el diagrama de cuerpo libre de la carga y las reacciones que conforman el sistema de la estructura de la máquina de sinterizado.

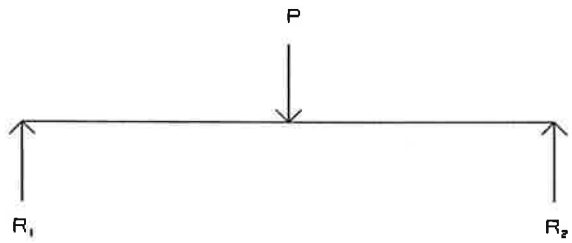


Fig. 2.37 Diagrama de cuerpo libre para análisis de cargas.

El valor de la carga P es de 50 Ton. Como las reacciones son simétricas el valor de $R_1 = R_2 = P/2$. Considerando la viga simplemente apoyada representando el comportamiento de placa de la estructura principal de la máquina de sinterizado, tal como se muestra en la Figura 2.38.

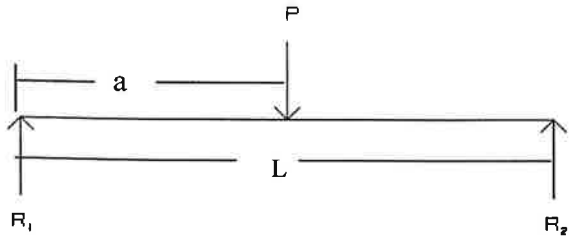


Fig. 2.38 Viga simplemente apoyada para análisis de cargas.

En base a la Figura 2.39 realizamos suma de momentos en R_1, considerando ahora los momentos en el sentido contrario como positivo obtenemos.

$$\sum M_1 = 0 \qquad Pa - R_2 L = 0 \Rightarrow R_2 = Pa / L \qquad 2.47$$

Tomando una sección mn de la viga a la izquierda de P, como se muestra en la Figura 2.39 para: $0 < x < a$

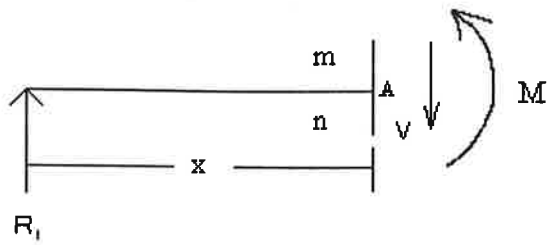


Fig. 2.39 Sección de viga a la izquierda de P.

Haciendo suma de fuerzas en "y" se obtiene:

$$\sum F_y = 0 \qquad R_1 - V = 0 \Rightarrow R_1 = V \qquad 2.48$$

Realizando suma de momentos en A, y considerando los momentos en el sentido contrario como positivo, obtenemos.

$$\sum M_A = 0 \qquad R_1 x - M = 0 \Rightarrow M = R_1 x \qquad 2.49$$

pero como sabemos que $R_1 = P / 2$, y sustituyendo R_1 en la ecuación 2.49 obtenemos:

$$M = P x / 2 \qquad 2.50$$

Ahora considerando una sección mn de la viga a la derecha de P, como se muestra en la Figura siguiente:

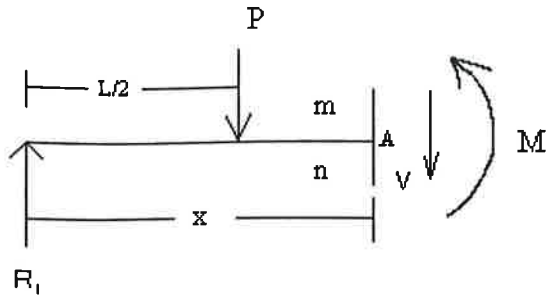


Fig. 2.40 Sección de viga a la derecha de P.

Tomando una sección mn de la viga a la derecha de P, como se muestra en la Figura 2.40, para: $L/2 < x < L$ 2.51

Realizando suma de fuerzas en "y" se obtiene:

$$\sum F_y = 0 \qquad R_1 - P - V = 0 \quad \Rightarrow \quad V = R_1 - P = P/2 - P = -P/2 \qquad 2.52$$

Realizamos suma de momentos en A, y considerando los momentos en el sentido contrario como positivo y obtenemos.

$$\sum M_A = 0 \qquad R_1 x - P(x - L/2) - M = 0 \quad \Rightarrow \qquad 2.53$$

$$M = R_1 x - P(x - L/2) \qquad 2.53$$

Graficando la ecuación 2.48 se obtiene el diagrama de esfuerzo cortante para 0<X<L/2, y graficando la ecuación 2.52 obtenemos el diagrama para 0<X<L, como se muestra en la Figura 2.41.

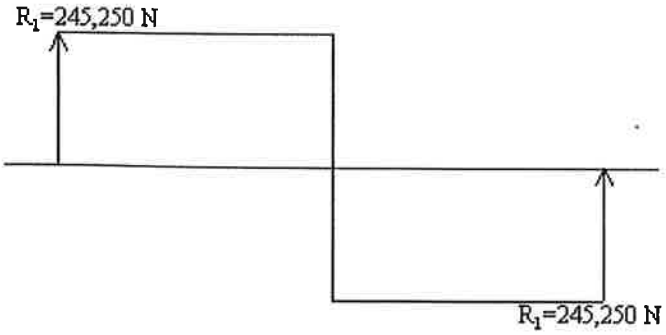


Fig. 2.41 Diagrama de fuerza cortante.

De la misma manera que el diagrama de fuerza cortante, graficamos las ecuaciones 2.49 y 2.53 para obtener el diagrama de momento flexionante como se muestra en la Figura 2.42.

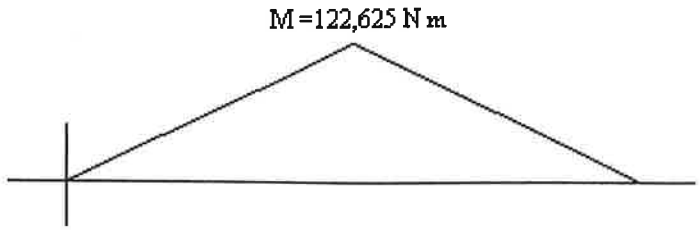


Fig. 2.42 Diagrama de momento flexionante.

Ya determinado el diagrama de momentos, se observa que el momento flexionante máximo de es M = 122,625.00 Nm. Con este valor se determina **el esfuerzo por flexión** (Γ) de la placa aplicando la siguiente formula:

$$\Gamma = \frac{M_C}{I} \qquad 2.55$$

En la Figura 2.43 se representan las medidas de la placa a calcular.

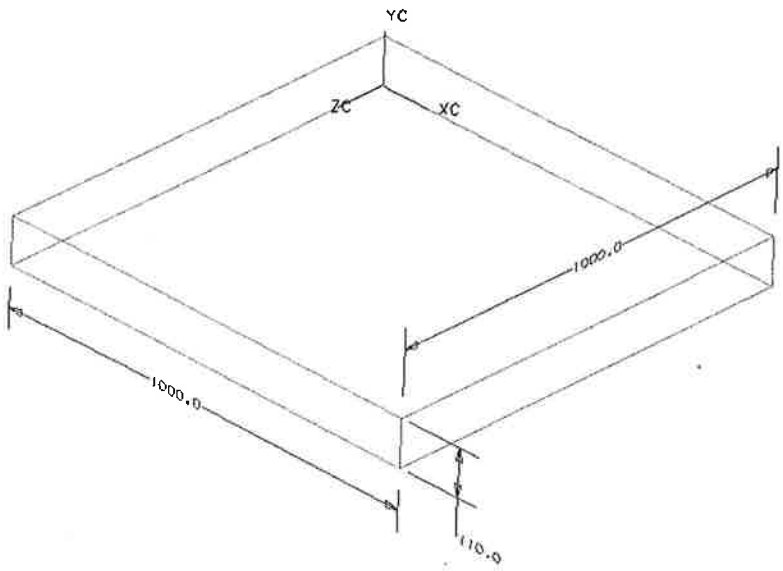


Fig. 2.43 Medidas de la placa base para el horno/cámara de SAE-TR.

El momento de inercia de una placa se determina por medio de la siguiente formula:

$$I = \frac{bh^3}{12} \qquad 2.56$$

basándonos en las medidas de la placa Fig. 2.43 se tiene que la base b= 1m y la altura h= 0.11 m, sustituyendo los valores en la ec. 2.56 obtenemos.

$$I = \frac{bh^3}{12} = \frac{(1)(0.11)^3}{12} = 1.1X10^{-4} m^4 \qquad 2.57$$

Después de calcular el momento flexionante, el momento de inercia y sabiendo que c=0.55 m (distancia al eje neutro), pasamos a sustituir los valores en la fórmula del esfuerzo por flexión que se representa en la ec. 2.55 y obtenemos el siguiente valor:

$$\Gamma = \frac{M_C}{I} = \frac{(122{,}625)(0.55)}{1.1X10^{-4}} = 60.8MP_a$$

Análisis de la estructura por elemento finito ANSYS

Ahora se analiza la placa por elemento finito [12-13]. Partiendo de las características reales de la estructura, presentamos en la Fig.2.44 el esquema representativo de las diferentes partes y placas de que consta la misma.

En la Tabla 2.1 se muestran las propiedades mecánicas del material calculado para conformar las placas principales de la estructura del horno.

Tabla 2.1. Propiedades mecánicas del acero para placas.

Propiedades	Acero (AISI 1018)	
E (N/m^2)	$2 X 10^{11}$	
Poisson	0.26	
ρ (kg / m^3)	7,850	
Propiedades mecánicas	S. I.	Inglés
Esfuerzo último	413 MPa	59,000 PSI
Esfuerzo de cadencia	224 MPa	32,510 PSI

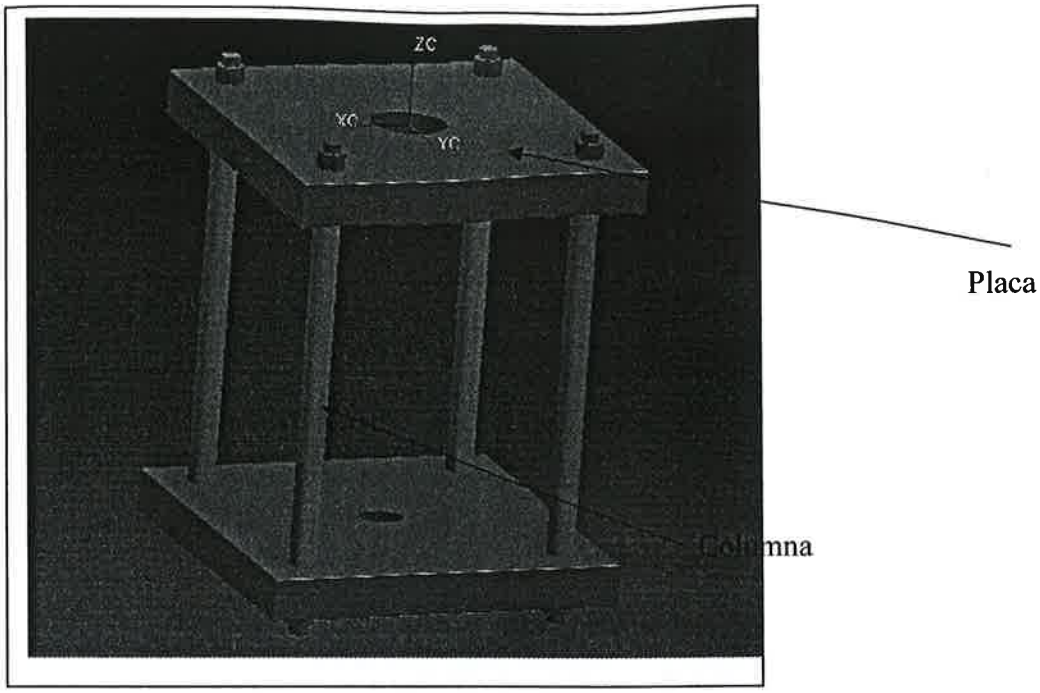


Fig. 2.44 Estructura principal de la máquina de sinterizado SAE-TR.

Tipos de elementos

La estructura del horno fue modelada con elementos tipo solid185. En la Figura 2.45 se muestran los elementos analizados con el software ANSYS tal como quedo la malla en la estructura.

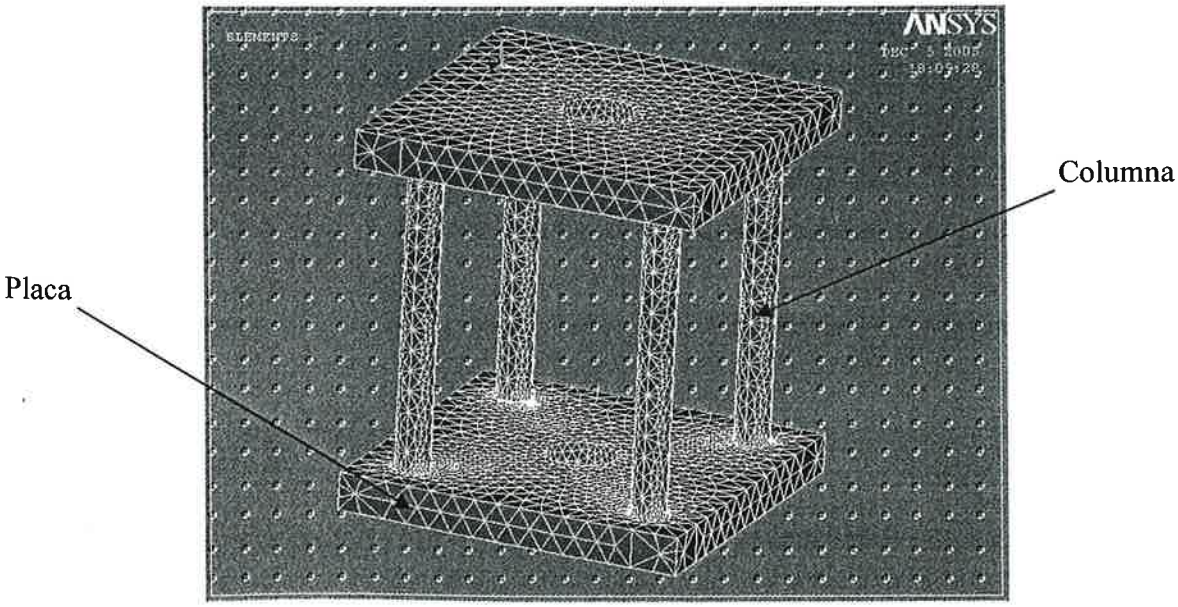


Fig. 2.45 Estructura analizada con ANSYS mostrando la malla.

Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera (Figura 2.46), que se aplicaron a la estructura fueron restringidas a las esquinas de la placa en el plano "XY" y en dos de las esquinas se restringió en "Z".

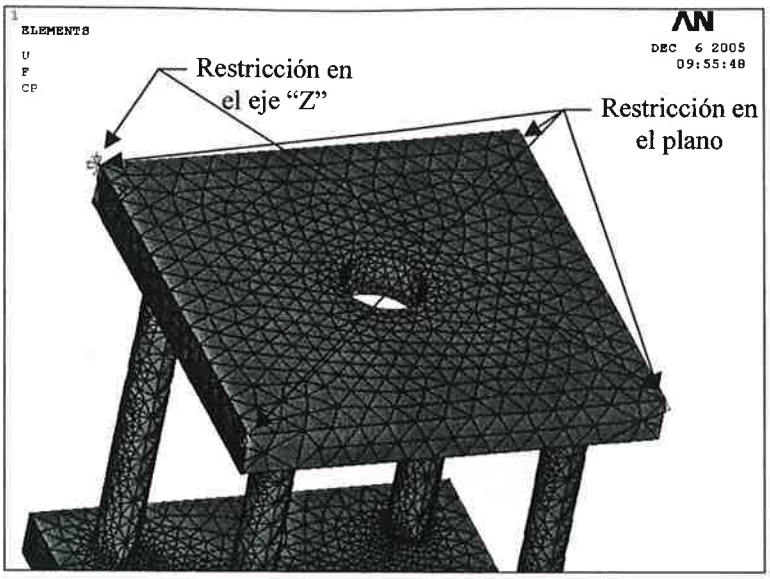


Fig. 2.46 Restricciones de desplazamiento en las placas de estudio.

En la Figura 2.47 se muestra la carga aplicada simétricamente a la estructura.

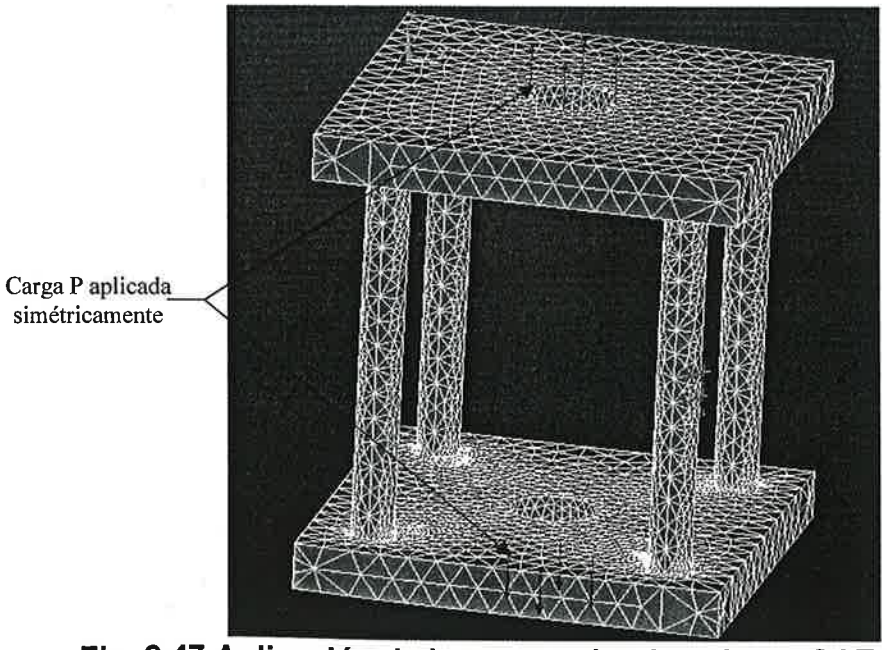


Fig. 2.47 Aplicación de la carga sobre las placas SAE-TR.

Resultados del análisis por elemento finito con el software ANSYS

En el análisis se consideró una carga de 490,500N, aplicada en forma simétrica en cuatro puntos equidistantes en el centro de la estructura. La figura siguiente muestra los esfuerzos generados por la carga aplicada a la estructura de la máquina.

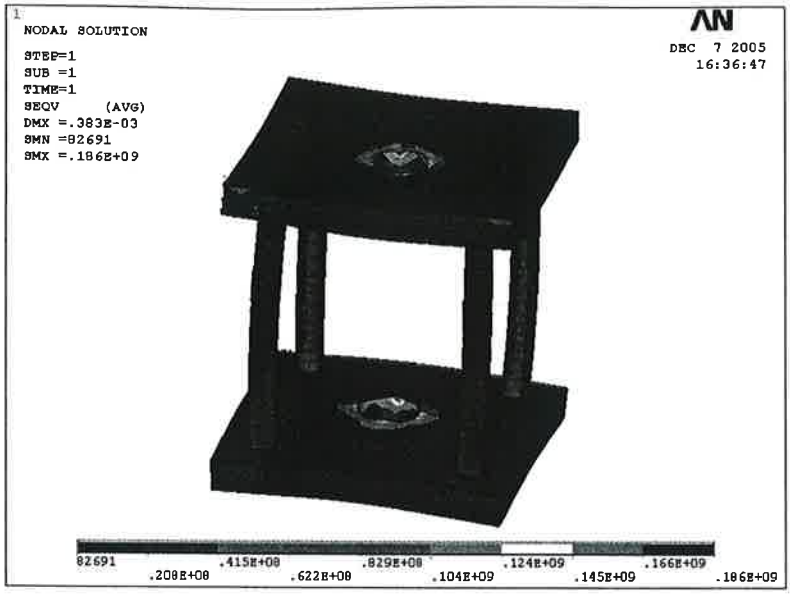


Fig. 2.48 Esfuerzos de Von Mises en una vista isométrica.

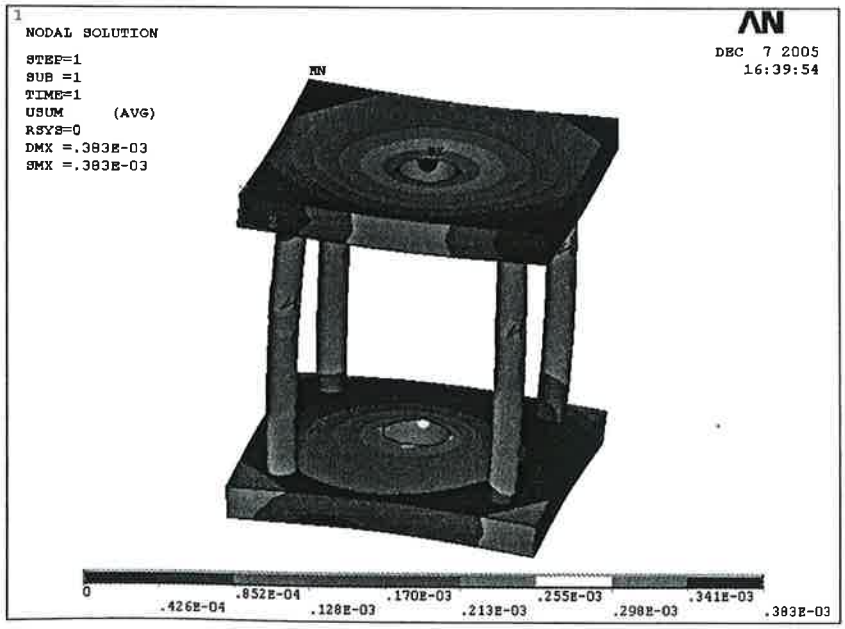


Fig. 2.49 Simulación de la def. en la placa de la estructura SAE-TR.

La Figura 2.49 muestra las deformaciones inducidas a la estructura, realizadas con el software ANSYS.

Conclusiones del análisis:

Teóricamente, el esfuerzo de flexión determinado arroja un valor de σ = 60 MPa, mientras que por el análisis estático por elemento finito se obtuvo el valor del esfuerzo máximo de Von Mises de σ = 124 MPa, que es inferior a la resistencia por fluencia del material, y que es de σ_0 = 224 MPa. Por lo que no existe riesgo de falla por resistencia en la estructura principal de la máquina de sinterizado.

Capítulo 3

FABRICACIÓN DEL EQUIPO SAE-TR

3.1 Fabricación y adquisición de los diferentes componentes

En este capítulo se describe la fabricación y ensamble de los componentes mecánicos más críticos de la máquina de sinterizado. La herramienta de apoyo para el desarrollo del presente capítulo fue CAD [14-16].

- **Columnas de soporte de placas (diseñadas en el capítulo anterior).**

Las columnas fueron fabricadas en acero AISI 1018 con un diámetro de 75 mm y una longitud de 1000 mm, las cuales tienen un peso de 338.6 N. En la Figura 3.1 se muestran las piezas maquinadas.

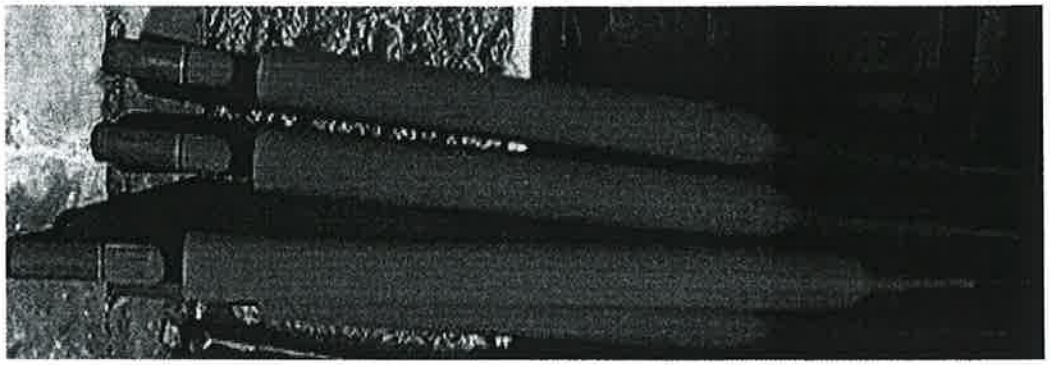


Fig. 3.1 Fotografía de columnas maquinadas para el horno.

- **Placas de la estructura principal que soporta al horno.**

Las placas son uno de los elementos más críticos de la estructura, por el tipo de carga que soporta y por las características mecánicas que tiene que cumplir. El material de la placa es acero AISI 1018 con un peso de 9773.8 N. La Figura 3.2 ilustra la placa inferior ya manufacturada.

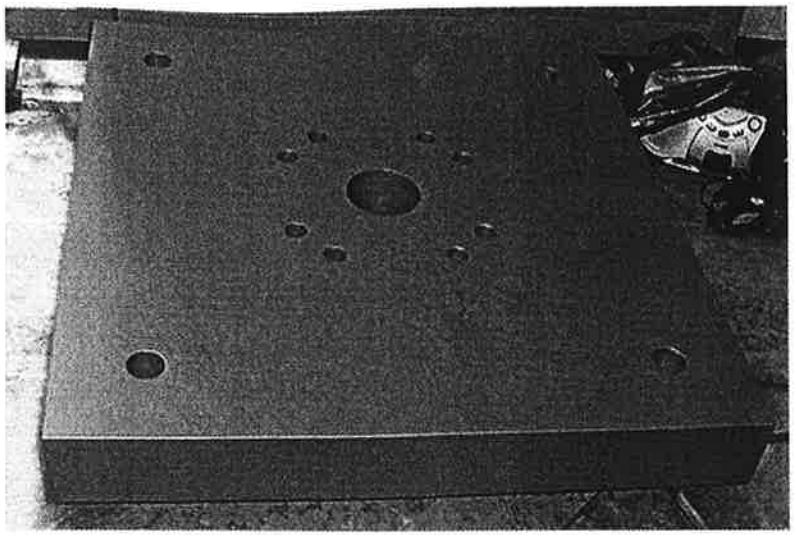


Fig. 3.2 Fotografía de placa manufacturada para el horno SAE-TR.

- **Horno de sinterizado.**

La cámara de sinterizado, o también referida como el horno tiene múltiples funciones que cumplir, por ejemplo cierta capacidad de soportar un alto vacío, soportar el calentamiento de sus paredes, pero que los cambios en sus propiedades mecánicas no sean críticos y así logre realizar una buena transferencia de calor. En la Figura 3.3 se muestra un esquema de la manera en que se encuentra diseñado el interior del horno. Esta cuenta con mamparas para obligar que el flujo de agua recorra una mayor superficie de la pared del horno y de esta manera se logre extraer el calor de la placa del horno.

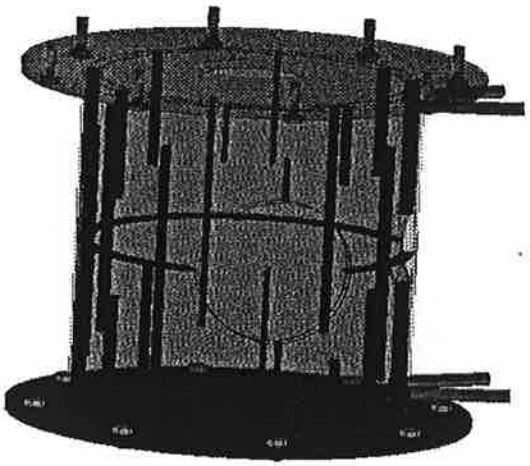


Fig. 3.3 Esquema del interior de la cámara de sinterizado/horno SAE-TR.

En la Figura 3.4 se muestra una fotografía del horno ya unido a las tapas y manufacturadas.

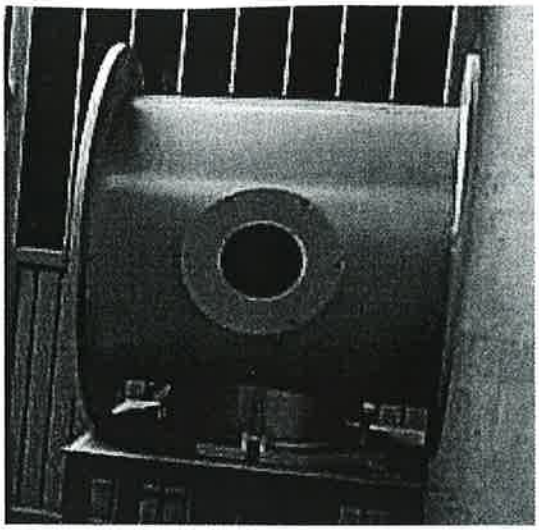


Fig. 3.4 Cilindro con tapas soldadas para armar el horno de sinterizado SAE-TR.

- Mirillas

Las mirillas tienen principalmente una doble función; la capacidad de soportar el calor por radiación generada por la matriz y la de poder detectar a través de la lente con un termómetro infrarrojo la temperatura de la matriz, donde se encuentra el material sinterizado. La Figura 3.5 muestra una mirilla construida.

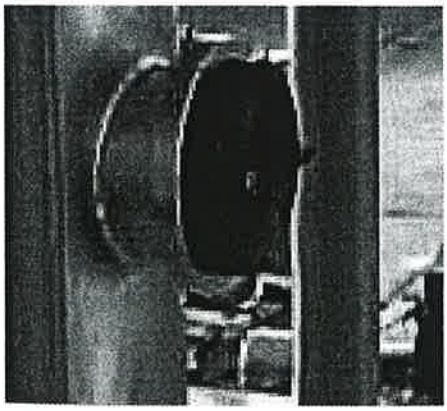


Fig. 3.5 Mirilla del horno ya manufacturada, a través de la cual se hará monitoreo de la temperatura de la matriz, mediante el termómetro de infrarrojo.

3.2 Ensamble de partes

En la Figura 3.6 se presenta el acoplamiento del horno de sinterizado, las columnas y las placas soporte. Además se visualizan un empaque de teflón y un empaque de grafito laminar colocados entre la placa superior y el horno.

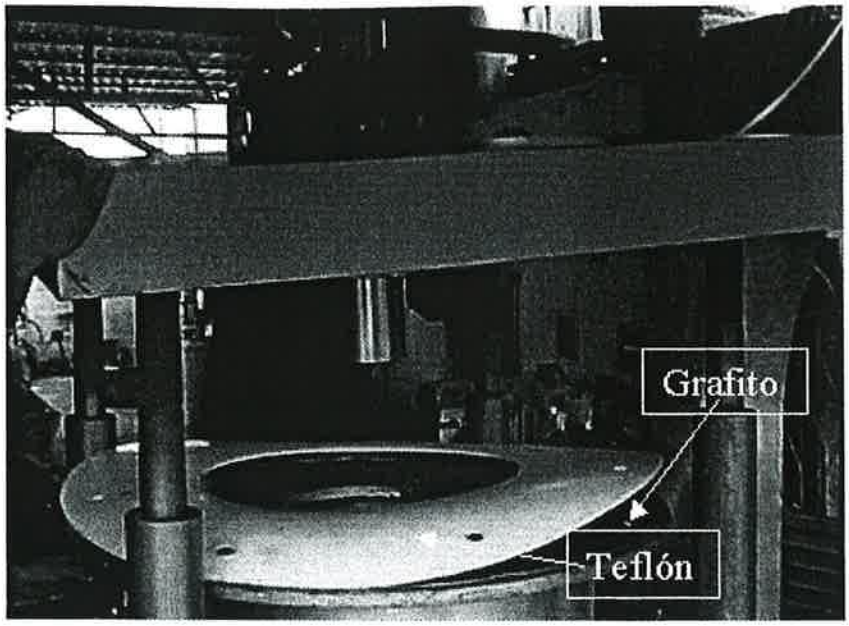


Fig. 3.6 Ensamble del horno de sinterizado.

La Figura 3.7 muestra el ensamble del horno a la estructura principal y la base.

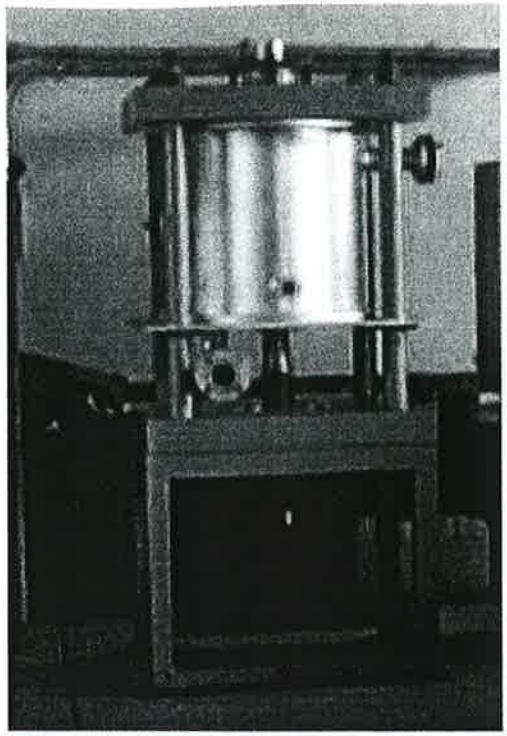


Fig. 3.7 Ensamble del horno a su base.

En la Figura 3.8 se muestra el ensamble general de la máquina de sinterizado, la estructura principal, el horno, así como el sistema de alto vacío y su transformador eléctrico.

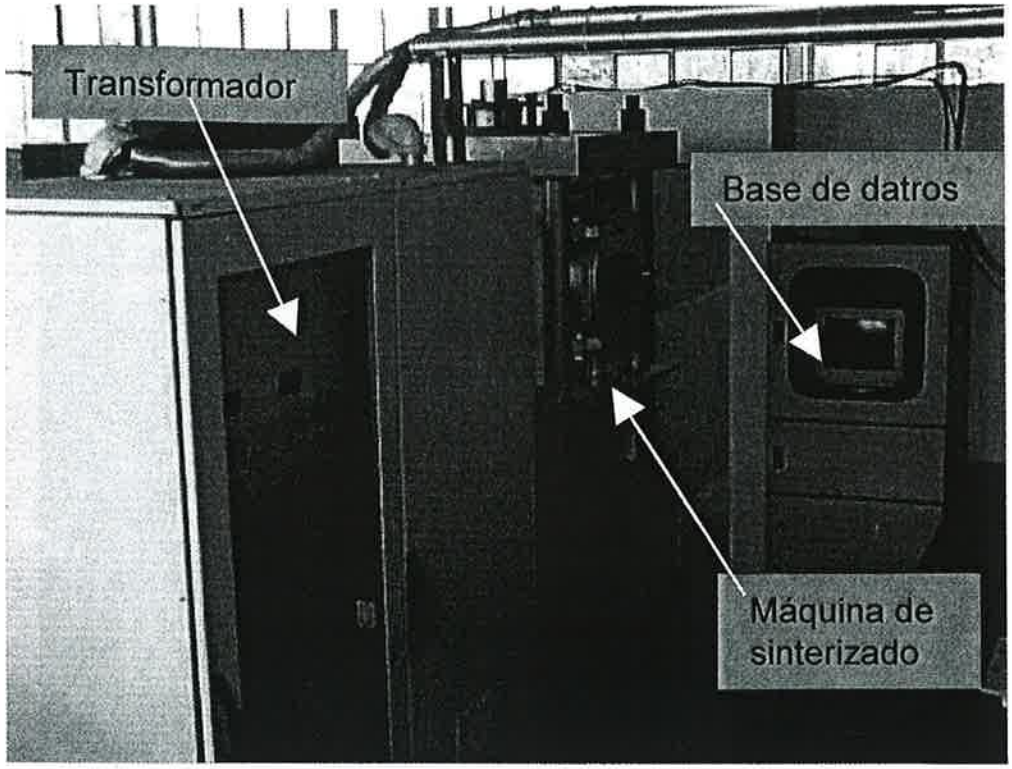


Fig. 3.8 Ensamble del sistema de sinterizado SAE-TR y demás componentes.

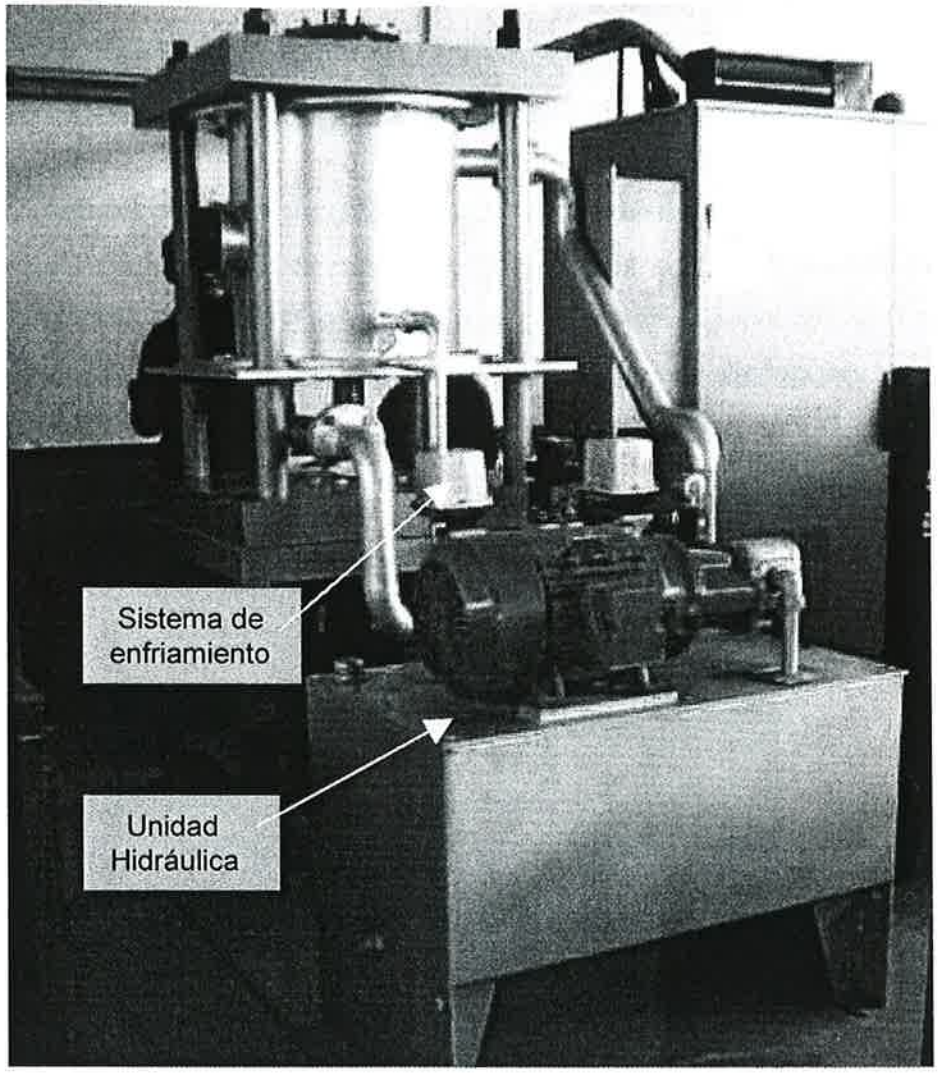


Fig. 3.9 Sistema hidráulico y de enfriamiento del equipo SAE-TR (parte posterior).

En la Figura 3.9 se muestran el sistema hidráulico y el sistema de enfriamiento ensamblados para conformar el equipo de sinterizado SAE-TR.

Capítulo 4

PRUEBAS PRELIMINARES CON EL EQUIPO

4.1 Reporte - Comportamiento del equipo en las primeras pruebas

En todo diseño mecánico siempre existen problemas técnicos al momento de realizar las primeras pruebas del equipo desarrollado y aún más complejo cuando el nuevo diseño cuenta con varios sistemas acoplados que conforman el prototipo. Un problema que demandó mas trabajo en las primeras pruebas fue centralizado en las tarjetas electrónicas, donde principalmente se enfrentaron detalles serios con el control de la temperatura por manejar altas densidades de corriente.

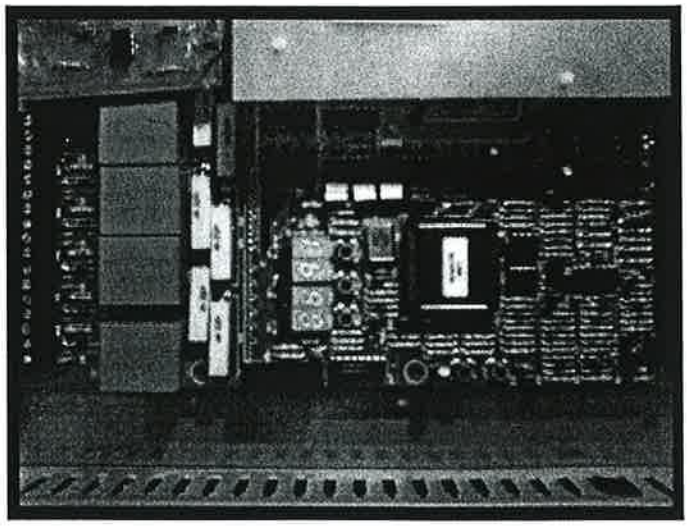


Fig. 4.1 Vista del panel de la tarjeta de control para manipular los pulsos eléctricos.

Un problema serio ocurrió en la tarjeta denominada MP400, Figura 4.1. Dicha tarjeta tiene un costo aproximado de $ 35,000.00. Cierta ocasión fue necesario quitar la tarjeta para arreglar un falso contacto, y a la hora de montarse no se tuvo el cuidado de aislar el área adecuadamente, por lo que el espacio que se dejó entre la tarjeta y la tierra (lámina a tierra) fue de 2 o 3 mm, dañando inevitablemente dicha tarjeta. Al momento de realizar el trabajo, y por efecto de la propia temperatura de las tarjetas de control

algunas láminas sufrieron dilatación y contracción. Esto obligó a que la tarjeta tuviera contacto con la lámina a tierra e inmediatamente hubo calentamiento excesivo en la tarjeta dañando algunos otros circuitos de la misma. Por consecuencia, se tuvo que realizar el cambio y además del gasto. Con esto se provocaron retrasos de trabajo, que en algunos casos se extendieron por mucho tiempo dado que las tarjetas o equipos dañados son surtidos del extranjero, tardando hasta dos meses para reposición.

4.1.1 Mecánico

Uno de los principales problemas mecánicos enfrentados al momento de hacer el montaje de algunas placas de la estructura, las cuales tienen un peso de 1000 Kg aproximadamente, es lograr hacer un movimiento preciso y controlado de dicho elemento ya sea de traslación o rotación. La situación se complica al momento de montar las placas a las barras como lo muestra la Figura 4.2.

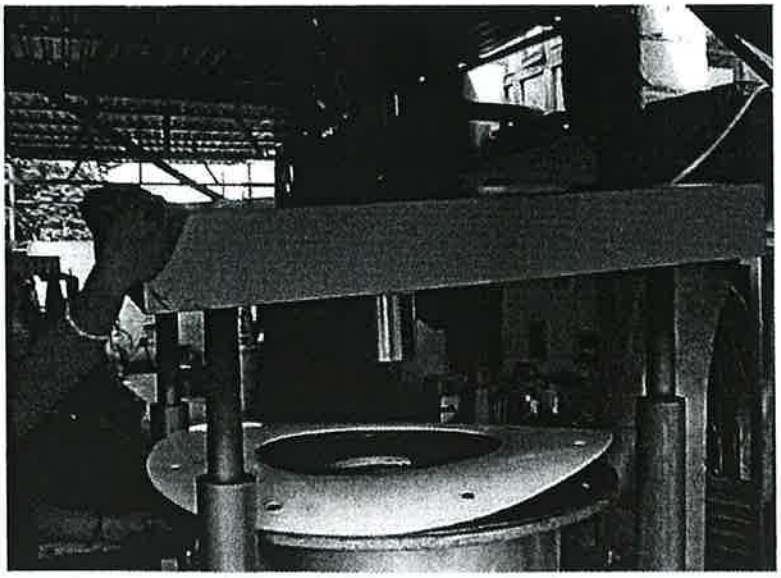


Fig. 4.2 Montaje de placas y columnas. La placa que sostiene el estudiante tiene una masa de 1000kg.

Los problemas de ensamble se agudizan cuando no se permiten tolerancias a los orificios. Si estos quedan poco cerrados complica el trabajo de montaje.

4.1.2 Energético

Un factor importante en el aspecto energético-eléctrico es que se tiene que valorar la carga en KVA que usará la máquina. Para saber si el transformador de la subestación al que se conectará, posee la capacidad suficiente para soportar la carga del nuevo sistema a conectar.

4.1.3 Económico

Un proyecto de diseño mecánico donde se involucra la adquisición de varios sistemas electromecánicos costosos demanda un gran compromiso y responsabilidad por parte de los ingenieros y administradores. Errores en los cálculos de diseño para la selección de los equipos complementarios, tales como bombas, tarjetas electrónicas, controladores, reguladores, por citar algunos, o bien si algún sistema resulta dañado al momento de realizar las primeras pruebas, típicamente ocurrido en equipos eléctricos donde las garantías de los equipos son muy específicos conllevaría a gastos extras y seguramente a problemas legales. A pesar de que el equipo de ingenieros cuente con amplia experiencia en los sistemas puede suceder un problema de esta índole. Desafortunadamente, el presente proyecto no fue la excepción. Se tuvo un problema con un equipo eléctrico denominado tiristor, el cual fue dañado accidentalmente. Estos factores se tienen que considerar durante la cotización de un sistema que involucra varios componentes eléctricos.

4.2 Fallas repetitivas

Una de las fallas recurrentes en la consecución del presente proyecto fue que a lo largo del mismo se contó con la participación de varios alumnos tesistas, que por motivos de fechas de graduación abandonaban el proyecto una vez que estaban suficientemente capacitados. Lo anterior fue cierto sobretodo con estudiantes de electrónica. Ellos estaban unos meses trabajando con empeño, conocían el proceso y seleccionaban las tarjetas analógicas o digitales y por no llevar bien su bitácora de avances, en muchas ocasiones los alumnos de nuevo ingreso tenían que iniciar desde el principio para volver a retomar el camino. Esto demoró, en parte la culminación del trabajo.

Capítulo 5

PRIMEROS MATERIALES FABRICADOS CON EL EQUIPO SAE-TR

Sin ser el objetivo principal de la presente tesis se realizaron experimentos de sinterizado de polvos finos con la finalidad de comprobar la funcionalidad del equipo SAE-TR. En el presente capítulo se describen algunas características de los materiales seleccionados para probar el desempeño de la máquina SAE-TR. En la Figura 5.1 se muestran algunas de las pastillas obtenidas con los materiales de prueba que fueron sinterizados usando el nuevo equipo.

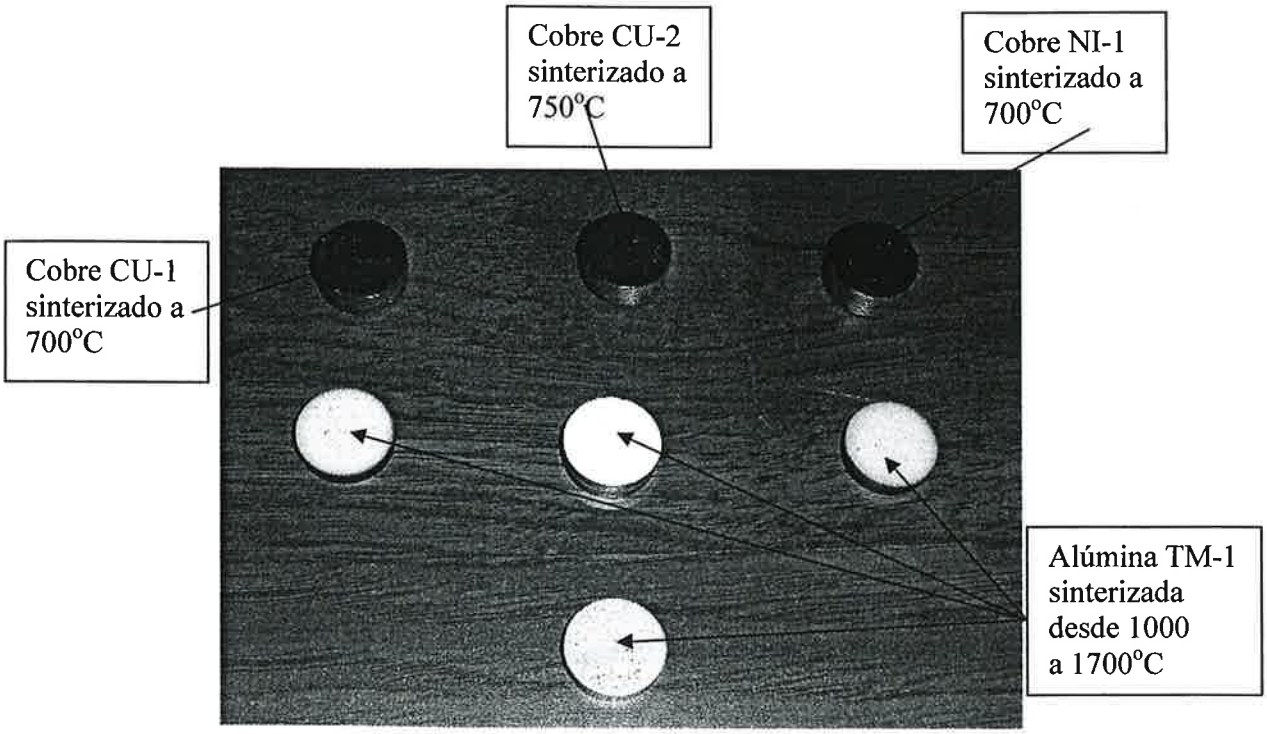


Fig. 5.1 Primeros materiales sinterizados usando el equipo SAE-TR. Los diámetros de las pastillas de Cobre, Níquel y Alúmina son de 20mm, con espesores que van desde 5mm.

A continuación se describen los detalles experimentales seguidos para inducir el compactado/sinterizado de polvos finos de cobre, níquel y dos tipos de alúmina ultra pura y fina.

5.1 Sinterización de polvo de cobre

Caracterización de polvo y pastillas de Cobre

La primera prueba de sinterizado de polvos se desarrolló usando cobre comercial japonés con un tamaño de partícula promedio de 2μm, pureza de 99.99% y densidad de 8.94 g/cm^3. Las condiciones "set point" establecidas en el equipo SAE-TR para lograr el sinterizado fueron: Switch on:off 12:2, máxima corriente de 1000Amp y 2.9V, y 50MPa de carga axial. La pieza sinterizada a 700°C/8min (3min hold), y 50 MPa se codificó con la clave **CU-1**.

Para ser considerado como el polvo de referencia, en la Figura 5.2 se muestra el patrón de difracción de rayos-X del polvo Cu original comercial antes de someterlo al proceso de sinterizado.

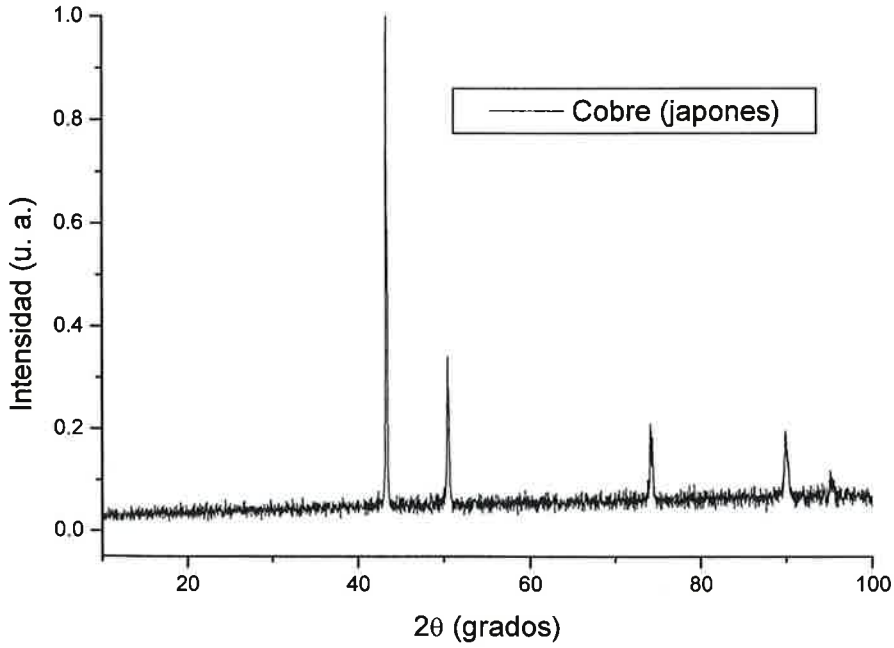


Fig. 5.2 Patrón de difracción de rayos-X del polvo original de cobre.

En la Figura 5.3 se muestra el patrón de difracción de rayos X de la pastilla de cobre **CU-1** una vez sinterizada a 700°C/8min (3min hold), y 50 MPa.

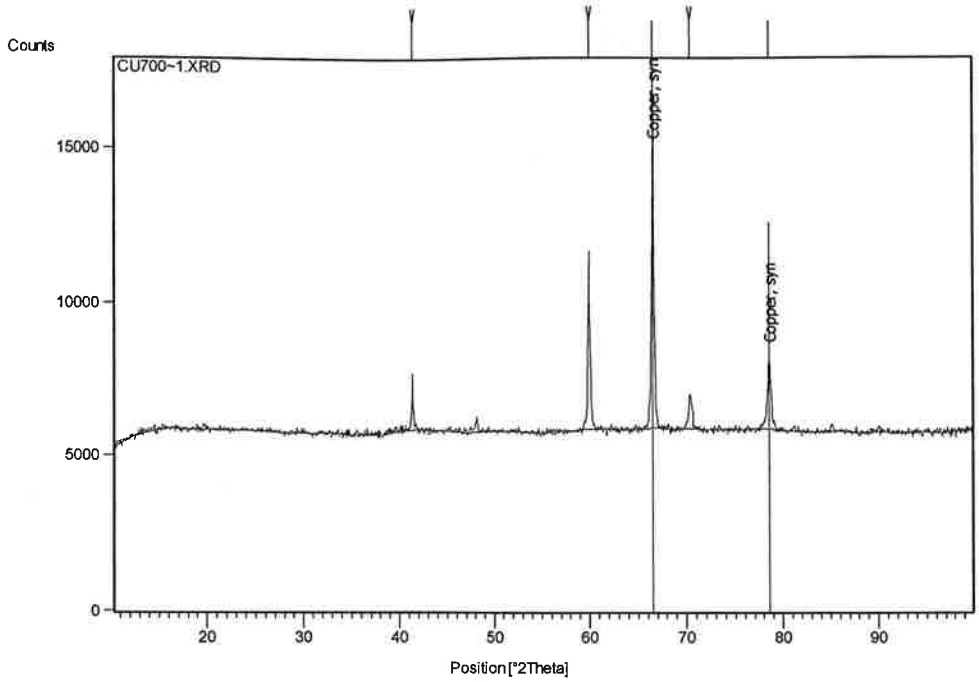


Fig. 5.3 Patrón de difracción de rayos-X de la pastilla CU-1 de cobre sinterizada por SAE-TR. Las condiciones fueron 700°C/8min (3min hold) y 50 MPa.

En la Figura 5.4 se muestra la micrografía del cobre **CU-1** sinterizado por SAE-TR.

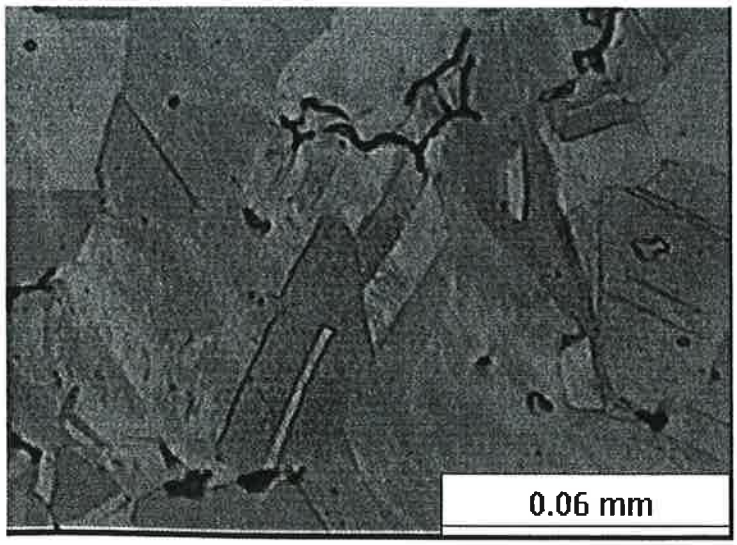


Fig. 5.4 Microestructura observada en la pastilla CU-1 de Cu sinterizada a 700°C/8min (3min hold) y 50 MPa.

La dureza promedio de la pieza **CU-1** sinterizada a 700°C/8min (3min hold) y 50 MPa fue determinada de por lo menos cinco indentaciones usando la escala Vickers HV con una carga de100g. Esta alcanzó un valor de **70.3** HV.

De manera similar que para la pieza CU-1 se realizaron más pruebas usando polvo de cobre para obtener la muestra **CU-2**. De tal forma, para ésta otra prueba se usó el mismo polvo comercial y se fijaron los mismos parámetros en el equipo SAE-TR. La única diferencia fue la temperatura máxima de sinterizado. Es decir, un sinterizado a 750°C/8min (3min hold) y 50 MPa. En la Figura 5.5 se muestra el patrón de difracción por rayos X de la pastilla resultante.

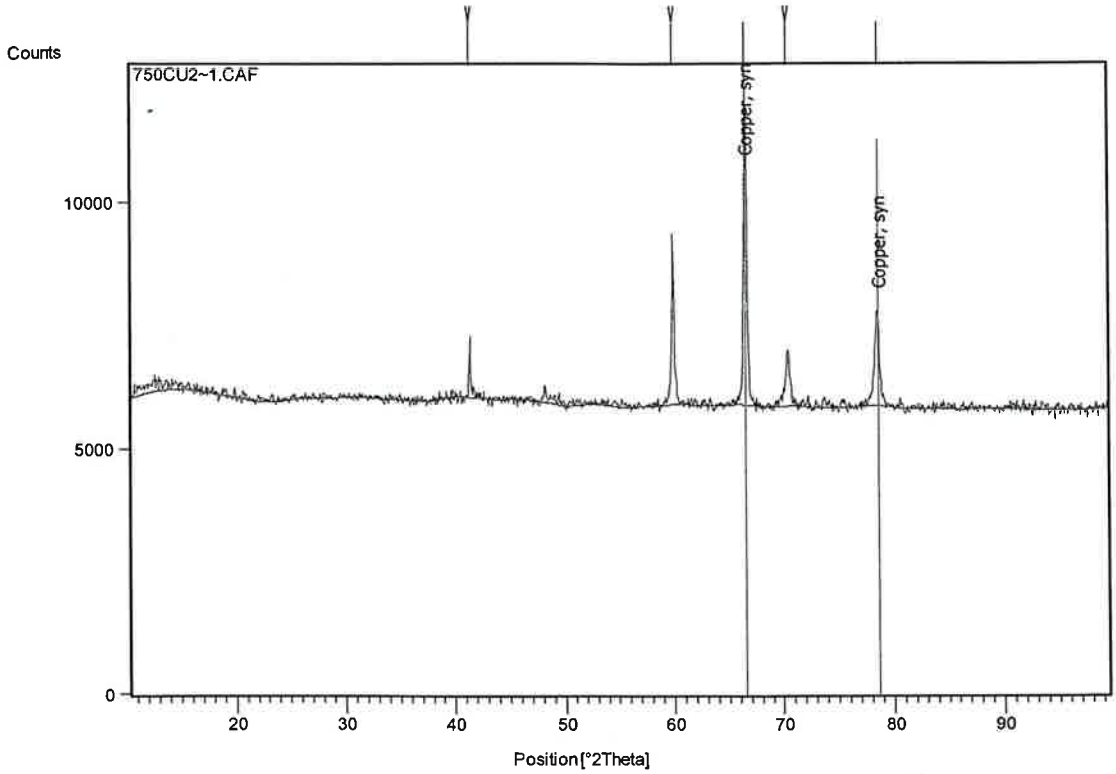


Fig. 5.5 Patrón de difracción de rayos-X de la pastilla CU-2 de cobre sinterizada por SAE-TR. Las condiciones fueron 750°C/8min (3min hold) y 50 MPa.

Las Figuras 5.5 y 5.6 muestran el patrón de difracción de rayos X de la pastilla de cobre CU-2, sinterizada a 750°C/8min (3min hold) y 50 MPa y su microestructura observada con microscopio óptico, respectivamente.

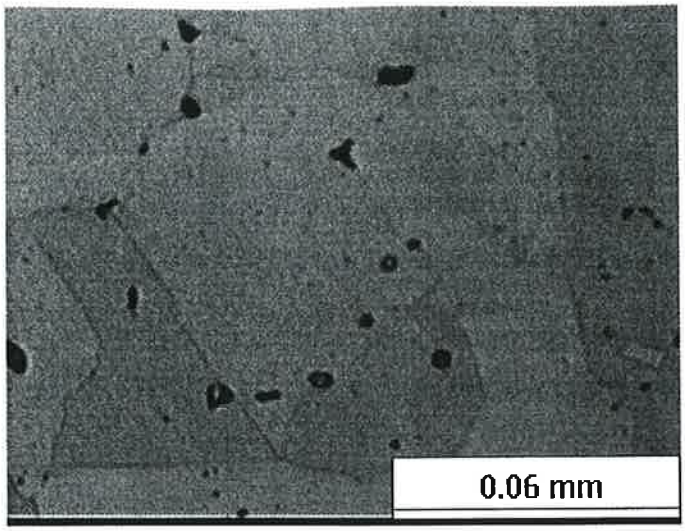


Fig. 5.6 Microestructura observada en la pastilla CU-2 de Cu sinterizada a 750°C/8min (3min hold) y 50 MPa.

La dureza de la pieza **CU-2** sinterizada a 750°C/8min (3min hold) y 50 MPa fue determinada igualmente usando la escala Vickers HV con una carga de100g, arrojando un valor de **73.2** HV.

5.2 Sinterización de polvos de níquel (Ni)

Caracterización de polvo y pastillas de Níquel

Las siguientes pruebas de sinterizado de polvos se desarrollaron usando níquel comercial japonés con un tamaño de partícula promedio de 2μm, pureza de 99.99% y densidad de 8.9 g/cm^3. Las condiciones "set point" establecidas en el equipo SAE-TR para lograr el sinterizado fueron: Switch on:off 12:2, máxima corriente de 1000Amp y 2.9V, y 50MPa de carga axial. La pieza sinterizada a 750°C/9min (2min hold), y 50 MPa se codificó con la clave **NI-1**.

Para ser considerado como el polvo de referencia, en la Figura 5.8 se muestra el patrón de difracción de rayos-X del polvo Ni original comercial antes de someterlo al proceso de sinterizado.

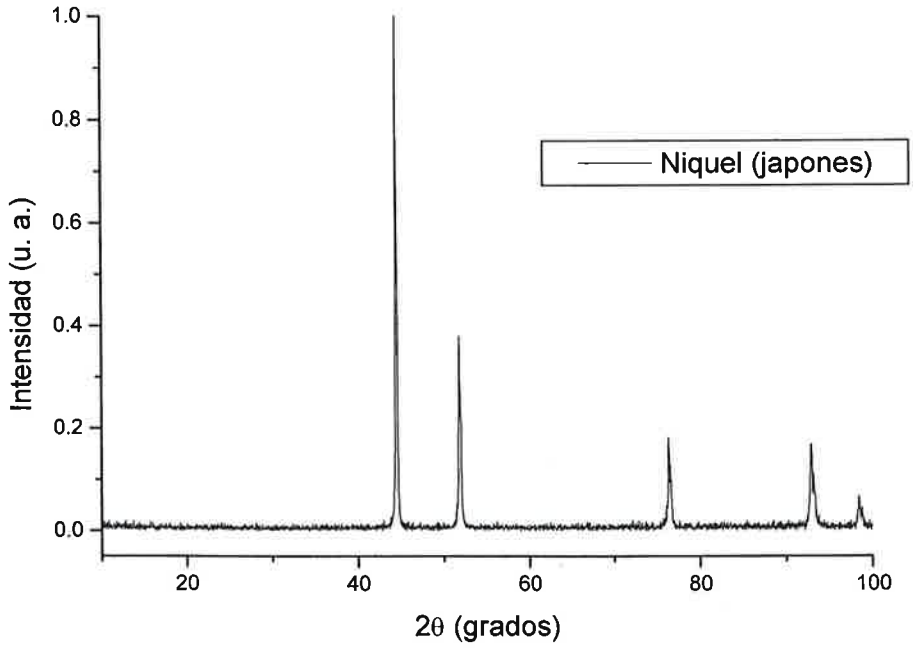


Fig. 5.8 Patrón de difracción de rayos-X del polvo original de níquel.

En la Figura 5.9 se muestra el patrón de difracción de rayos X de la pastilla de níquel **NI-1** una vez sinterizada a 750°C/9min (2min hold), y 50 MPa.

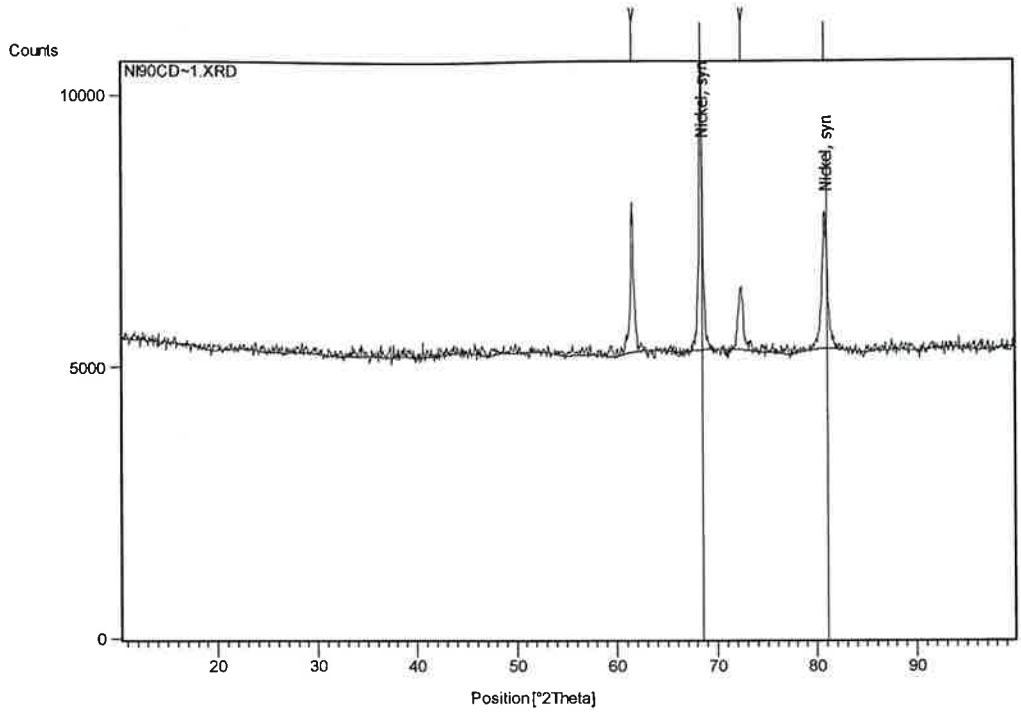


Fig. 5.9 Patrón de difracción de rayos-X de la pastilla NI-1 de níquel sinterizada por SAE-TR. Las condiciones fueron 750°C/9min (2min hold), y 50 MPa.

En la Fig. 5.10 se muestra la micrografía del níquel **NI-1** sinterizado por SAE-TR.

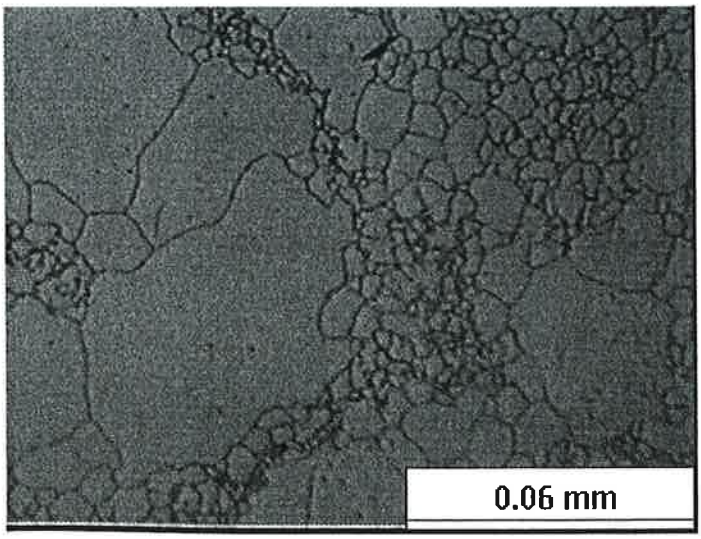


Fig. 5.10 Microestructura observada en la pastilla NI-1 de Ni sinterizada a 750°C/9min (2min hold), y 50 MPa.

La dureza de la pieza **NI-1** sinterizada a 750°C/9min (2min hold), y 50 MPa fue determinada de por lo menos cinco indentaciones usando la escala usando Rockwell HRB con una carga de100g, arrojando un valor de **55.0** HRB.

5.3 Sinterización de polvos de alúmina (Al_2O_3)

Caracterización de polvo y pastillas de Alúmina

Las siguientes pruebas de sinterizado de polvos se desarrollaron usando dos tipos de alúmina comercial; una de fabricación japonesa (Tymicron) y otra rusa (Baikalox) con un tamaño de partícula promedio para ambos tipos de 2μm, purezas de 99.999 y 99.990%, respectivamente. Las densidades de ambos polvos fueron de 3.94 y 3.933 g/cm^3, respectivamente. Las condiciones "set point" establecidas en el equipo SAE-TR para lograr el sinterizado fueron: Switch on:off 12:2, máxima corriente de 5000Amp y 4V, y 50MPa de carga axial.

Las características de los polvos precursores y de las piezas de alúmina sinterizadas, se enlistan en la Tabla siguiente:

Tabla 5.1. Características de los polvos precursores de alúmina y resultados de las piezas sinterizadas.

Marca comercial	Código	Pureza %	Densidad g/cm^3	Tratamiento sinterizado °C/min	Tiempo retención min	Tamaño grano aprox. (micras)	Dureza RHA
Tymicron	TM-1	99.99	3.94	1000°C/10min	5		76
Tymicron	TM-2	99.99	3.94	1500°C/5min	0	6 – 16	84
Baikalox	BA-1	99.99	3.933	1300°C/13min	5		95
Baikalox	BA-2	99.99	3.933	1500°C/15min	5		95
Baikalox	BA-3	99.99	3.933	1700°C/9min	0	20 - 25	Sale rango

Para ser considerados como los polvos de referencia, en la Figura 5.11 se muestran los patrones de difracción de rayos-X de los polvos de alúmina originales y comerciales antes de someterlos al proceso de sinterizado (polvo japonés y ruso). Sólo con fines comparativos se incluyen dos patrones más de alúmina Tymicron sinterizadas a 1150 y 1250°C en 10min cada una (sin tiempo de retención). Zhijian Shen [17] y colaboradores publicaron trabajos de sinterizado de alúmina por SPS. Los resultados presentados aquí guardan cierta correspondencia con sus datos.

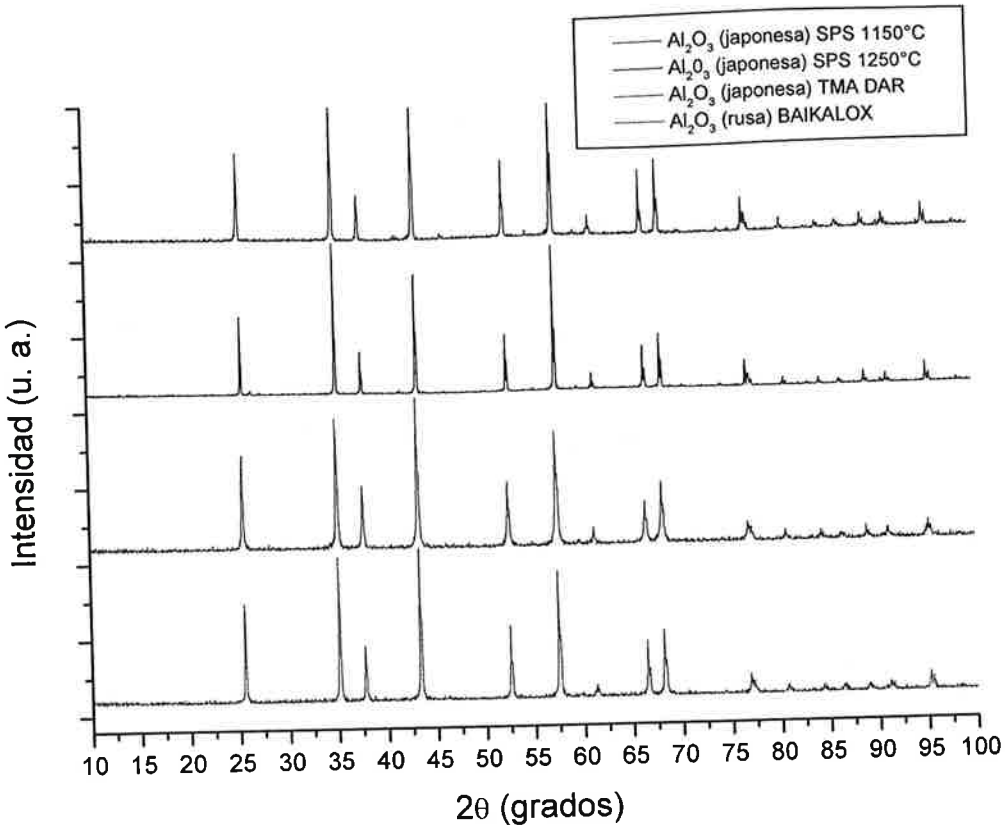


Fig. 5.11 Patrones de difracción de rayos-X de polvos de alúmina y pastillas sinterizadas por SAE-TR. Las condiciones fueron las señaladas en la figura (ver también Tabla 5.1).

En la Figura 5.12 se muestra el patrón de difracción de rayos-X de la pastilla con el código BA-3, sinterizada a 1700°C/9min (0 min hold) y 50 MPa.

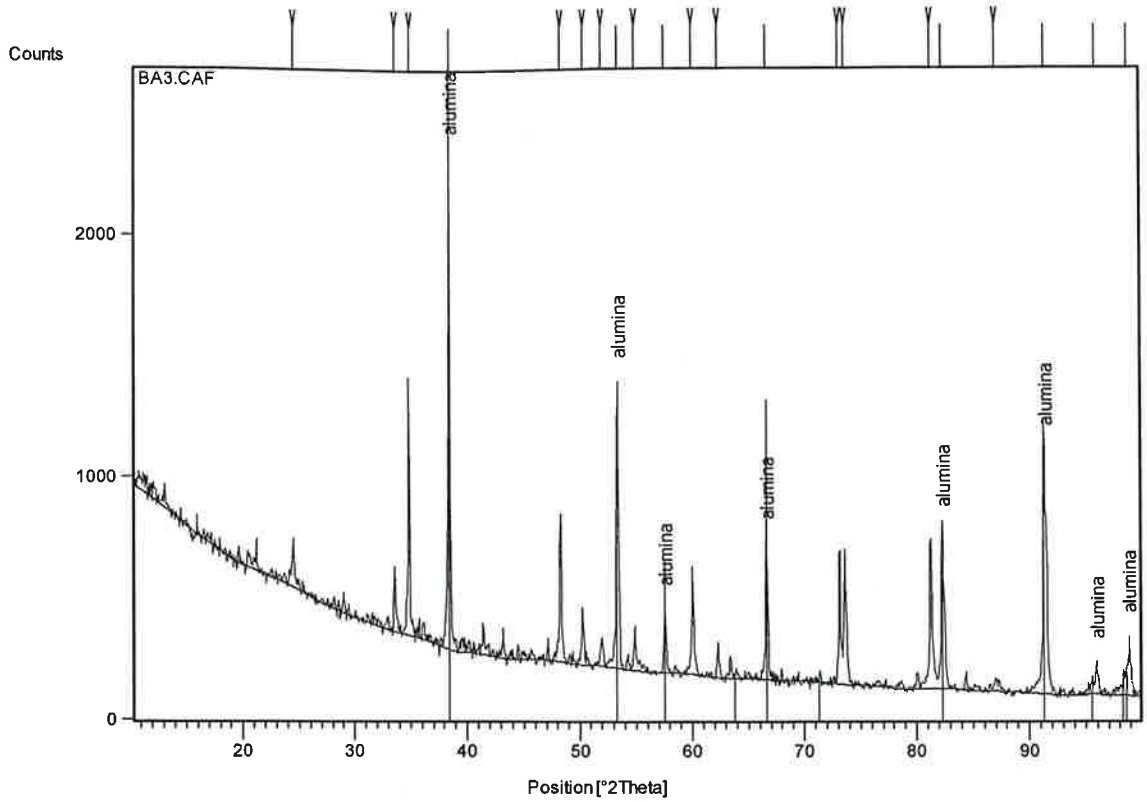


Fig. 5.12 Patrón de difracción de rayos-X de la pastilla BA-3 de alúmina sinterizada por SAE-TR. Las condiciones fueron 1700°C/9min (0min hold) y 50 MPa.

En la Figura 5.13 se muestra la micrografía SEM de la superficie de la pastilla de alúmina rusa con el código BA-3, sinterizada a 1700°C/9min (0 min hold) y 50 MPa. Se observa una superficie irregular, intencionalmente provocada para observar los granos, cuyo tamaño oscilan entre las 20 y 25 micras, aproximadamente. La superficie corrugada con poros abiertos pequeños corresponde a residuos de papel grafito sin remover.

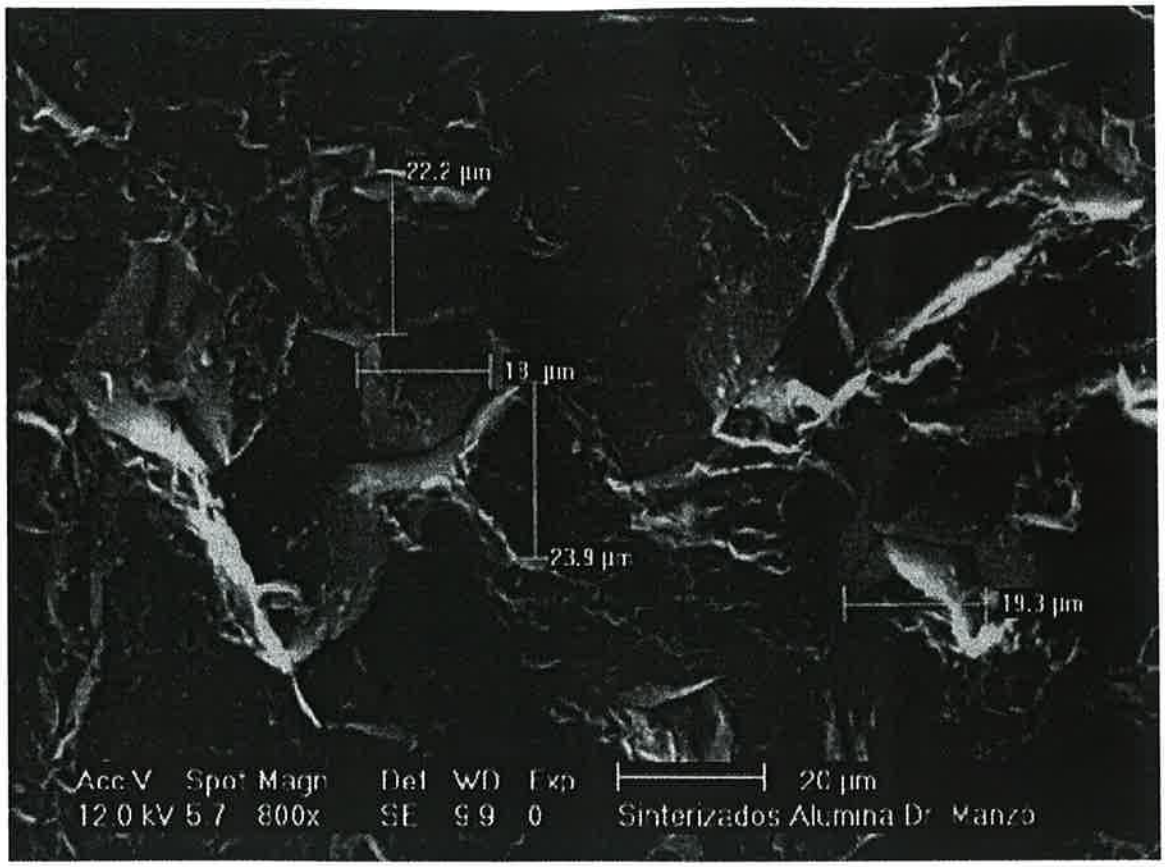


Fig. 5.13 Tamaño de grano de la pastilla alúmina BA-3 sinterizada a 1700°C/9min.

De manera similar que para la muestra **BA-3** se realizaron más pruebas de sinterizado usando polvo de alúmina japonés para obtener la muestra **TM-2**. De tal forma, para ésta otra prueba se usó polvo comercial Tymicron y se fijaron los mismos parámetros en el equipo SAE-TR. La diferencia establecida fue la temperatura máxima de sinterizado. Es decir, un sinterizado a 1500°C/5min (0min hold) y 50 MPa. En la Figura 5.14 se muestra el patrón de difracción por rayos X de la pastilla resultante.

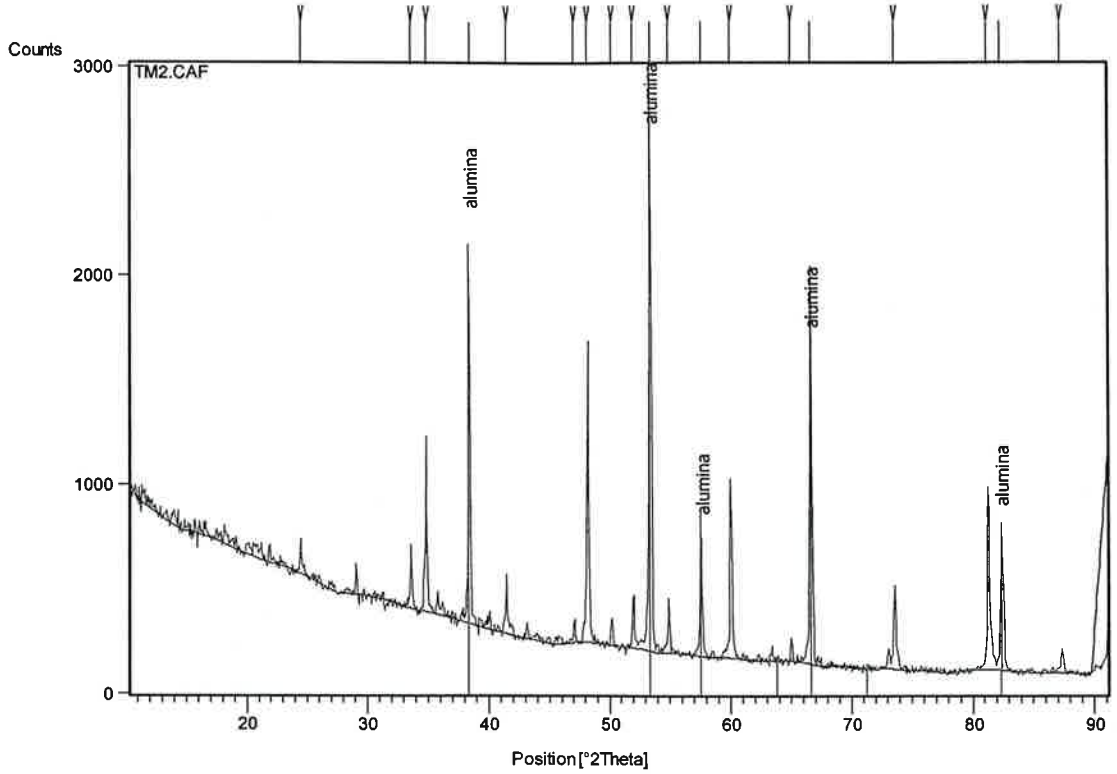


Fig. 5.14 Patrón de difracción de rayos-X de la pastilla TM-2 de alúmina sinterizada por SAE-TR. Las condiciones fueron 1500°C/5min (0min hold) y 50 MPa.

En la Figura 5.15 se muestra la micrografía SEM de la superficie de la pastilla de alúmina japonesa con el código **TM-2**, sinterizada a 1500°C/5min (0 min hold) y 50 MPa. Se observa una superficie irregular, intencionalmente provocada para observar los granos, cuyo tamaño oscilan entre las 6.5 y 16.5 micras, aproximadamente. La superficie corrugada con poros abiertos pequeños corresponde a residuos de papel grafito sin remover.

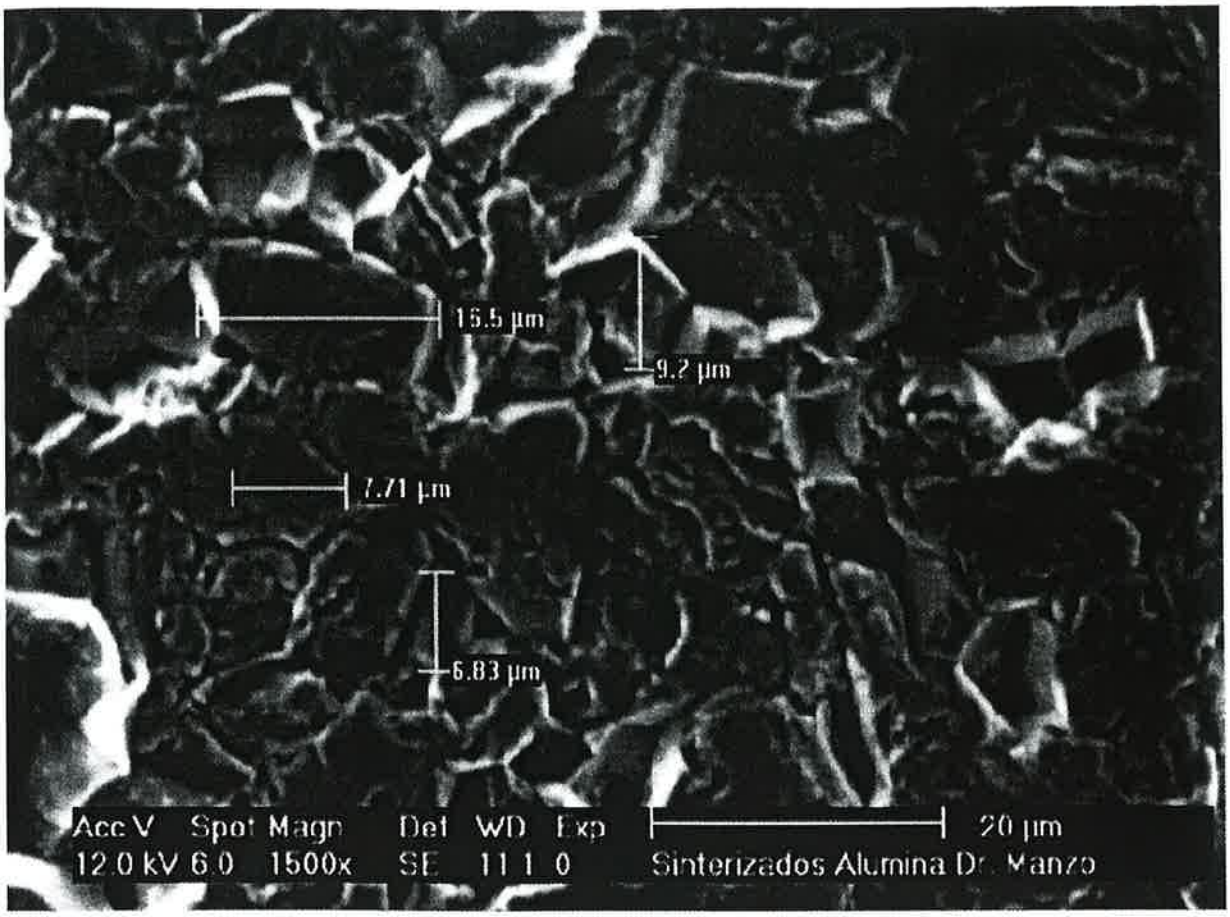


Fig. 5.15 Tamaño de grano de la pastilla alúmina TM-2 sinterizada a 1500°C/5min.

La dureza de las piezas de alúmina sinterizadas fue medida en la escala de Rockwell A con una masa de 60kg, arrojando las lecturas promedio que se enlistan en la Tabla 5.1. Se observa que a mayor temperatura de sinterizado la dureza aumenta. La pieza tratada a 1700°C quedó lo suficientemente densa para que la dureza no se pudiera estimar en la misma escala HRA.

Capítulo 6

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Diseño del equipo SAE-TR

En la conceptualización de los diferentes sistemas que conforman el equipo de Sinterizado por Arco Eléctrico y Templado Rápido SAE-TR se enfrentaron varios problemas. Sobre todo en la determinación de las capacidades requeridas de los diferentes equipos, así como la determinación de aquellas variables que constituyen en conjunto a la máquina de sinterizado. En este punto fue muy importante la experiencia y conocimiento con que, en materia del proceso de sinterizado por arco eléctrico (SPS Spark Plasma Sintering) aportaron los asesores. Los diversos componentes eléctricos y mecánicos que se incorporaron al equipo debieron ser cuidadosamente analizados para poder discernir sobre los rangos de valores que se requerían para poder generar el plasma en el equipo. Si bien es cierto que el diseño del equipo final aún puede optimizarse, es evidente que el equipo SAE-TR cumple perfectamente con los objetivos originales de inducir el sinterizado de polvos cerámicos y metálicos. Probablemente, con fines de mercadotecnia, sería conveniente hacer trabajo de rediseño o afinamiento para disminuir el volumen del equipo en su conjunto. No obstante, la capacidad del equipo no se pone en duda.

En el caso de la **capacidad eléctrica** que requeríamos, se especificó un valor base de temperatura para obtener nuevos materiales de máximo 2500°C. Manipulando este valor a través de cálculos teóricos se encontró (Cáp. 2.5) que la corriente necesaria es de 3000 Amp. Por tal motivo, se adquirió un transformador que genera corriente en un rango de aplicación que va desde 50 hasta 3000 Amp. Lo anterior se logra mediante la generación de pulsos eléctricos on/off CD. Además, se diseñó el sistema con la flexibilidad suficiente para poder variar los tiempos de encendido y apagado en el rango de los milisegundos. Tomando como base está densidad de corriente se fueron diseñando cada uno de los demás componentes de la máquina. Tales como: sensores, bombas de enfriamiento, electrodos, placas de cobre, bomba hidráulica, circuito

hidráulico, bomba de vacío, termopares, termómetros infrarrojos, tarjetas electrónicas y motores eléctricos entre otros.

Los resultados obtenidos con la máquina SAE-TR que se diseñó en éste trabajo, están en completo apego a los gradientes de temperatura para calentamiento y enfriamiento, así como el grado de vacío originalmente esperados.

El hecho de haber diseñado un equipo de sinterizado por arco eléctrico novedoso con posibilidad de inducir templado rápido insitu, basado en los equipos disponibles comercialmente fue un reto enorme que demandó la sinergia de varios ingenieros. El sinterizado por arco eléctrico o también conocido como sinterizado por plasma es una moderna técnica para obtención de piezas con aplicaciones especiales.

6.2 Fabricación del equipo SAE-TR

Para la construcción de la máquina de sinterizado fue necesario pedir apoyo a talleres externos y/o compañías establecidas. Sobretodo, para la fabricación de algunos componentes o piezas que tienen medidas y pesos que están fuera de rango de la infraestructura con que se contaba al momento de la fabricación del equipo en CIDESI. Los sistemas que fueron fabricados fuera de CIDESI son el transformador de potencia eléctrica y la estructura metálica principal.

Uno de los sistemas importantes en la elaboración del equipo de sinterizado, fue el análisis y diseño del sistema de control. Este se realizo utilizando el software Lab View. Así, los estudiantes o pasantes de ingeniería que participaron en el proyecto tenían que capacitarse para conocer el software, funcionamiento y aplicación de los diferentes sensores para posteriormente realizar el acondicionamiento de las señales de las diferentes variables. Con ello se logró el control de los diferentes sistemas que conforman la máquina de sinterizado.

El empleo del grafito laminado facilitó enormemente un mejor empate entre las uniones o juntas metálicas donde se aplica calor a altas temperaturas. El grafito utilizado como empaque evita que entre aire atmosférico a la cámara de vacío.

6.3 Pruebas preliminares usando un prototipo del equipo SAE.

Para comprobar el efecto Joule de calentamiento con el paso de una corriente de energía eléctrica, pero sobretodo de alta corriente y bajo voltaje se diseñó un prototipo pequeño. Con éste se realizaron las pruebas preliminares y se conoció el proceso de sinterizado por arco eléctrico. El prototipo fue elaborado con los siguientes componentes: dos placas de cobre (127 mm de acho x 9.5 mm de espesor) donde se conectaron el polo positivo y negativo del transformador (con capacidad de 300 ~ 500Amp, 16V, con CD), materiales aislantes (colcha cerámica kaowooll, celerón) y una matriz de grafito con polvos de acero inoxidable para sinterizar. Dicho sistema se evaluó usando un pequeño transformador como se muestra en la Figura 6.1.

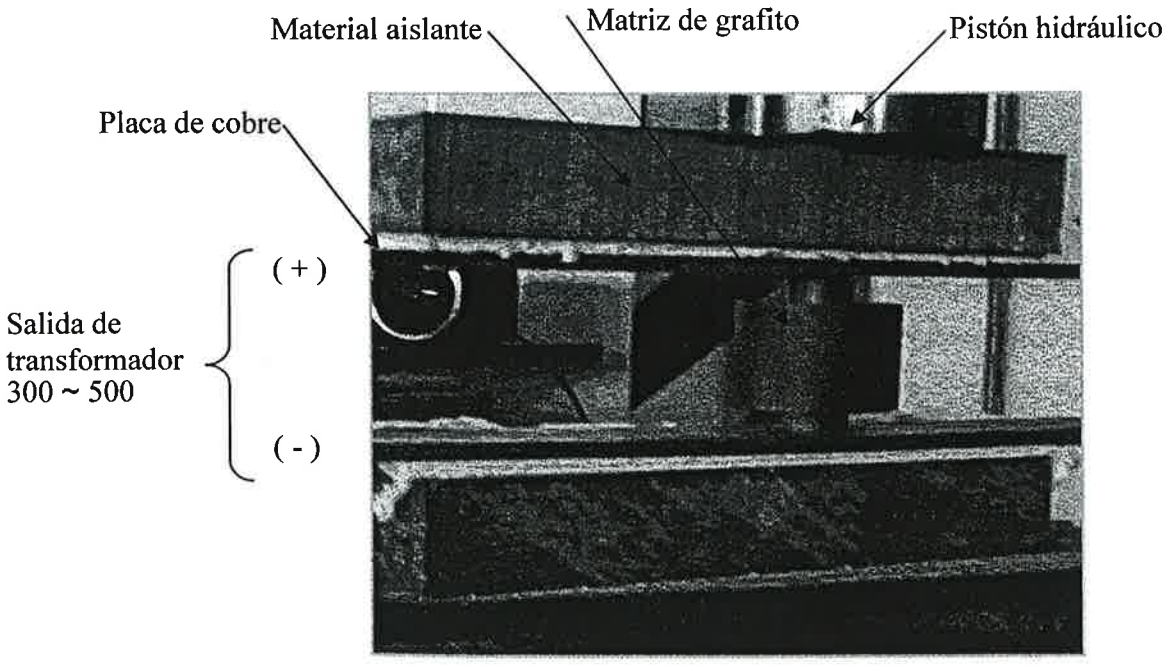


Fig. 6.1 Prototipo del sistema de sinterizado por arco eléctrico SAE.

Posteriormente, una vez que la prueba preliminar mostró resultados favorables se procedió al diseño y construcción del equipo SAE-TR. Con la intención de conocer la magnitud del riesgo al cual podría enfrentarse un usuario del equipo SAE-TR al utilizar el principio del arco eléctrico para sinterizar polvos, las primeras pruebas que se consideraban más críticas y peligrosas (por el uso de una alta densidad de corriente) al momento de probar el transformador de potencia eléctrica fueron conducidas en otro experimento controlado electrónicamente. Lo anterior se planteó también como una medida para verificar si el trasformador soportaría la carga máxima de 3000 Amp. Se condujo la prueba de tal manera en que se fue aumentando gradualmente la carga y se creó un sistema en corto circuito para comprobar el comportamiento del transformador. A continuación se describe como se realizó la prueba.

Las salidas del transformador son placas de cobre de 120 mm de ancho x 9.5 mm de espesor. Los extremos de la placa de cobre se unieron con cables de calibre 4Ø. Posteriormente se fue incrementando el amperaje hasta la máxima potencia diseñada. Se verificó la capacidad del equipo para la cual fue diseñada.

6.4 Materiales preparados usando el equipo SAE-TR

Tal como se presentó en el capítulo 5 los primeros materiales sinterizados con el equipo SAE-TR revelan la posibilidad de reproducir las condiciones experimentales como para inducir las características microestructurales deseadas en los materiales. Es decir, la respuesta que ofrece el equipo SAE-TR se puede considerar constante, dependiendo del set point que se haya establecido para cada corrida de sinterizado. Con ello se pueden manipular parámetros experimentales tales como la presión, temperatura y tiempo en la optimización del tratamiento térmico idóneo para cada tipo de polvo que se desee sinterizar.

Las pastillas sinterizadas de cobre y níquel confirman el alto grado de compactado alcanzado en menos de diez minutos. A reserva de hacer más estudios de caracterización en las pastillas obtenidas y de los primeros análisis realizados en ellas

es posible observar que con tan solo una diferencia de 50°C, en el caso de polvo de cobre sinterizado a 700 y 750°C, la microestructura final muestra tamaño de grano mayor en el segundo caso, y posiblemente por tanto diferencia en ciertas propiedades. Tal es el caso de la dureza, que resultó mayor para el polvo sinterizado a mayor temperatura.

Cuando es necesario que el equipo SAE-TR sea energizado a una mayor temperatura para sinterizar polvos cerámicos, este libera hasta 3,000 Amp sin problema alguno. Las pastillas de alúmina obtenidas fueron procesadas con el fin de observar la respuesta del equipo. Se obtuvieron pastillas de alúmina con 20mm diámetro y 5mm ancho a 1150, 1250, 1300, 1500 y 1700°C en menos de 20min, cada una. El equipo suministro 50MPa de carga axial sin ningún contratiempo. En éste caso la limitante de carga la presentan los dados (matriz) de grafito por su naturaleza frágil. Se practicaron algunos análisis de caracterización a dichas pastillas y se comprueba que es posible manipular el tamaño de grano de éstos cerámicos. Es un hecho que el equipo SAE-TR es una herramienta importante para la síntesis de cerámicos con microestructura y densidad de volumen que se pueden controlar. Habrá de reconocer que mantener el control de la temperatura es una actividad que aún requiere de afinamiento.

6.5 Estudiantes graduados con participación en el presente trabajo

Derivado del trabajo de diseño y fabricación del equipo SAE-TR se generaron actividades paralelas y específicas que demandaron la participación de estudiantes de ingeniería. De tal forma, cada uno de los estudiantes invitados al proyecto se concentró en el desarrollo de lo que más adelante se convertiría en su tema de tesis de licenciatura. Lo anterior se había contemplado desde el inicio del presente proyecto como parte de las metas y/o productos esperados. En la Tabla 6.1 se enlistan los detalles del trabajo de dichos egresados.

Tabla 6.1. Detalle de los alumnos que participaron en el presente trabajo y que se graduaron desarrollando un tema derivado del presente proyecto.

Nombre del alumno	Escuela	Carrera	Tema de tesis	Fecha de examen
Bladis Michael Ruiz Chávez	Instituto Tecnológico de Morelia	Ingeniero Mecánico	Control de temperatura automático para una máquina de sinterizado por chispa	Hace 1 años
Israel Fajardo Gómez	Tecnológico de Acapulco	Ingeniero Eléctrico	Desarrollo de conexiones eléctricas	Hace 2 años
Amaya Vigil Luis Manuel	Instituto Tecnológico de Querétaro	Ingeniero Mecánico	Diseño de prensa hidráulica	Hace 4 años
Olguin Valenzuela	Instituto Tecnológico de Querétaro	Ingeniero Mecánico	Automatización de pirómetros	Hace 2 años
Chino Timoteo Manuel Juan	Instituto Tecnológico de Querétaro	Ingeniero Mecánico	Diseño de sistema hidráulico	Hace 3 años

CONCLUSIONES

Se diseñó y construyó con éxito un equipo electro-mecánico conveniente para la sinterización de polvos metálicos, cerámicos y/o cermets. Dicho sistema se denominó **SAE-TR**, por las siglas que representa el término: Sinterizado por Arco Eléctrico - Templado Rápido.

Derivado del trabajo de diseño y ensamblado del equipo, se obtuvieron los siguientes productos:

- Formación / graduación de cinco estudiantes de licenciatura en Ingeniería Mecánica del Instituto Tecnológico de Morelia, además del doctorado (autor del presente estudio) adscrito al CIDESI. Otra tesis de doctorado de éste mismo centro se derivó del presente estudio y el egresado obtuvo su aprobación en 2008.

- Registro en 2005 ante el Instituto Mexicano de la Propiedad Intelectual de una "Patente en Trámite" que involucra el estudio del sistema SAE-TR .

- Publicación de cuatro trabajos técnicos en Congresos Internacionales referentes al diseño y construcción del equipo SAE-TR.

- Integración de tres centros de investigación y tecnológicos; a saber Centro de Investigación en Materiales Avanzados **CIMAV** de Chihuahua, el Centro de Investigación e Innovación Tecnológica **CIITEC** perteneciente al Instituto Politécnico Nacional en Azcapotzalco D.F., y el Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial **CIDESI** en Querétaro. Dichos centros están integrados en la Red Nacional de Nanotecnología que apoya el CONACYT.

Impacto del proyecto de tesis

Con la culminación del presente proyecto se ha puesto de manifiesto el interés de varios centros de investigación mexicanos, además del CIMAV, CIITEC-IPN y el propio CIDESI. Lo anterior, derivado de la publicidad hecha del mismo durante los diversos eventos de investigación (congresos) [18-20] en los cuales se presentaron resultados de los avances con SAE-TR. El equipo resulta de interés para su explotación con fines académicos e industriales. Investigadores de la Universidad e Reno, en Nevada E.U.A., específicamente la Dra. Olivia Graeve y su colega el Prof. Zuhair Munir (experto mundial reconocido por sus trabajos en materia de sinterizado por Spark Plasma Sintering SPS) han externado su interés por desarrollar nuevos materiales. Se espera que con las capacidades finales con que se diseñó el equipo SAE-TR se obtengan patentes de materiales novedosos, así como la posibilidad de abrir una nueva línea de investigación que en México aún esta en su etapa de desarrollo. La formación de capital humano de alto nivel, tanto en el diseño de equipo como en el área de los materiales será de impacto social importante para el país.

Tecnológico y Científico

A la fecha se cuenta con una patente en trámite, sometida en 2005, en la cual se registró el diseño y construcción del equipo SAE-TR. Al momento de redactar el presente documento se ha acreditado el primer examen de forma de la patente en trámite. Además, se cuenta con dos resúmenes técnicos referentes al equipo, presentados en el XIII Congreso Internacional de Materiales celebrado en Cancún en 2004, y otro en el mismo Congreso pero el XV en 2006. Se presento como trabajo en extenso otro trabajo en el Congreso Internacional de Ingeniería Mecánica, organizado por el Tecnológico de Durango, en la Cd. de Durango en 2002.

Recomendaciones para trabajos posteriores

Se recomienda continuar trabajando en el afinamiento del equipo SAE-TR para el desarrollo de una segunda versión más compacta. Es importante que se optimicen los sistemas para el monitoreo de temperatura, así como para la regulación del sistema hidráulico, el cual deberá aplicar la carga axial con incrementos más finos. El sistema de enfriamiento acoplado al equipo requiere de mayor número de pruebas, hasta encontrar los materiales más adecuados para ser usados como matriz.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A continuación se enlistan una serie de referencias bibliográficas usadas como apoyo para el diseño y construcción de los varios sistemas involucrados en el equipo. También se incluyen los trabajos publicados en Congresos.

1. J. E. Burke, Ceramics and Civilization 1 (1985) p. 315.
2. Inoue, K., (1962) U. S. Patent No. 3241956
3. Inoue, K., (1966) U. S. Patent No. 3250892
4. K. Inoue, US Patent 3,340,052, 1967. y Idem., US Patent 3,656,946. 1972.
5. Tokita, M., (1993) Trends in Advanced SPS Spark Plasma Sintering Systems and Technology. Journal of Society of Powder Technology Japan, Vol. 30 [11] pp. 790-804. y M. TOKITA, Mater Sci, Forum 308 -311 (1999) 83.
6. I. J. Shon and Z.A. Munir. Mater. Sci. Eng. A202 (1995) 256.
7. G. Xie, O. Ohashi, M. Song, K. Mitsuishi and K. Furuya, Appl. Surf. Sci. 241 (2005) 102.
8. NEDO FGM. Proceedings of NEDO International Symposium on Functionally Graded Materials. Miel parque Tokyo, Tokyo Japan. October 21-22, 1999.
9. E.Rocha-R, S.D. de la Torre, M.Umemoto, H. Miyamoto and H. Balmori-R. "Zirconia-Mullite Composites Consolidated by Spark Plasma reaction Sintering from Zircon and Alumina. J. Am. Cer. Soc. 88 (5) (2005) p. 1150.
10. Diseño Mecánico. Shiglei
11. Mecánica de materiales de Ferdinand P. Beer y E. Russell
12. Manual de FEM ANSYS designmodeler
13. Manual de FEM ANSYS work bench
14. Manual de CAD Unigraphics
15. Manual de CAE Unigraphics
16. Manual de CAD Solid Works

17. Zhijian Shen, Mats Johnson, Zhe Zhao and Mats Nygren, Spark Plasma Sintering of Alumina, Journal American Ceram. Soc 85 [8] 1921 – 27 (2002).

18. J. Luis Sánchez Gaytán, J. A. Manzo-Preciado and Iwasa, "Characterization of Al_2O_3 and of Al_2O_3- bodies prepared via centrifugal casting process and pressure less sintering ", XIII International Materials Research Congress, s15-6, August 2004, P. 6.

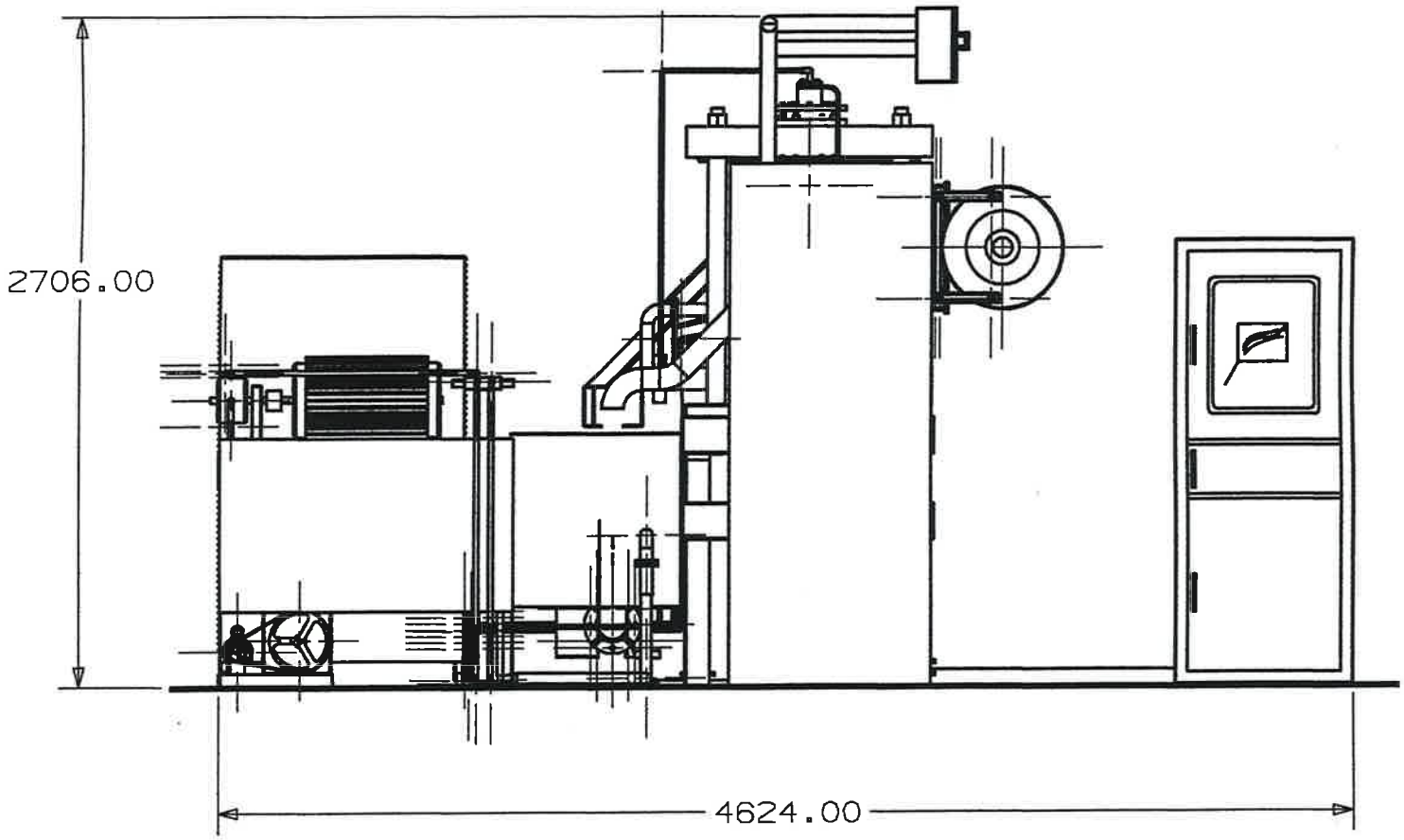
19. J. A. Manzo Preciado, J. L. Sánchez Gaytán, S. D. de Torre., "Construcción de un sistema para sinterizado de polvos cerámicos y metálicos operado bajo el principio del arco electrico y templado rápido", XIII International Materials Research Congress, S15-10, August 2004, P.8

20. J. A. Manzo Preciado, J. Luís Sánchez Gaytán y Sebastián Díaz de la Torre, "Caracterización y propiedades mecánicas de compósitos de Si_3N_4 y WC-Co-Ti sinterizados por SAE-TR". XV International Materials Research Congress, S12-P3. August 2006, p. 8.

21. Z. A. Munir and R. M German, High Temp. Sel 9 (1977) 275.

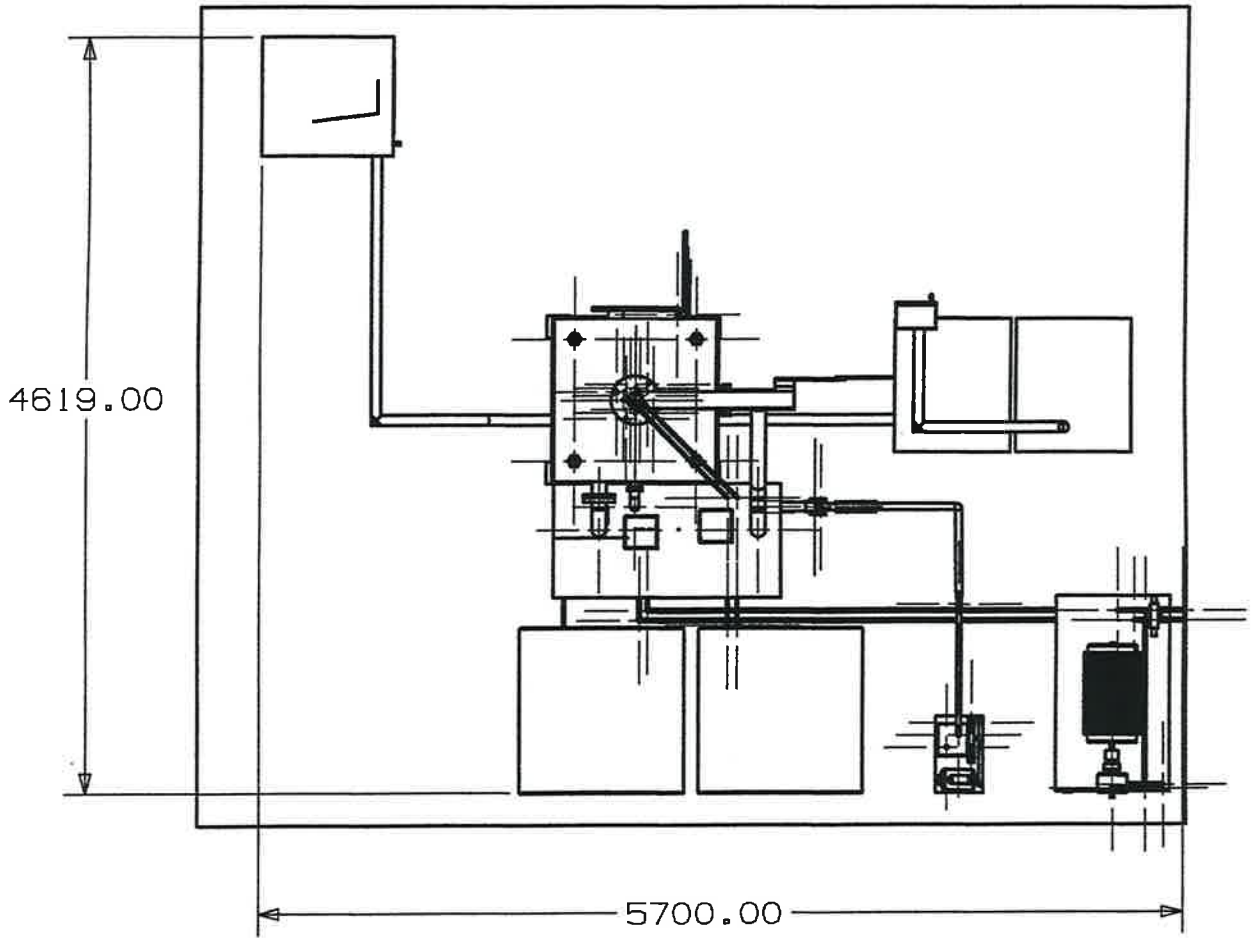
22. V. F. Lenel, Trans. AIME 203 (1955) 158.

23. W. M. Goldberger B. Merkle and D. Boss, Adv, Powder Metall. Particulate Mater 6 (1994) 91.



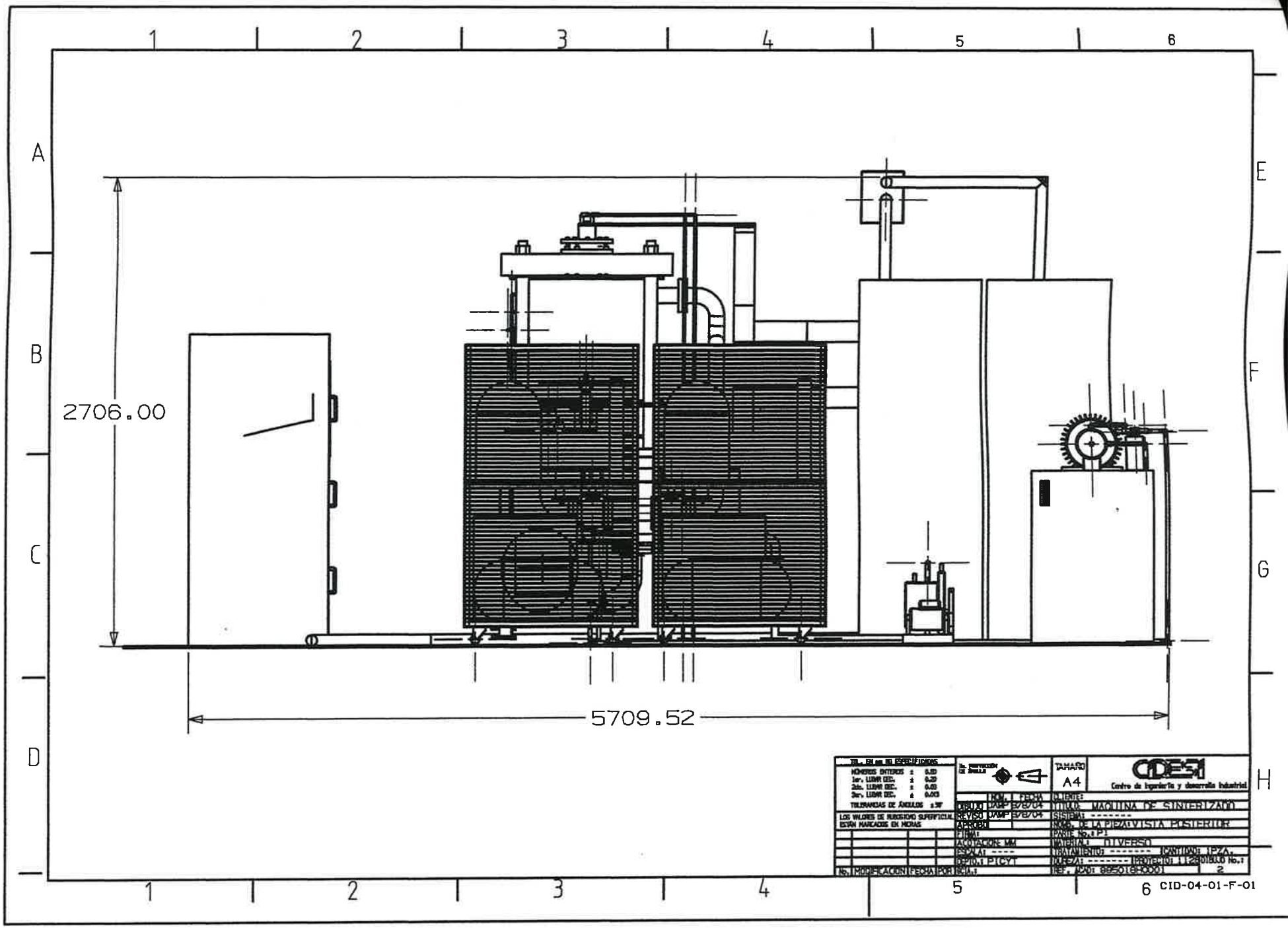
TOL. EN mm NO ESPECIFICADOS	3a. PROYECCIÓN DE ÁNGULO	TAMAÑO A4	CIDESI Centro de Ingeniería y desarrollo Industrial
NÚMEROS ENTEROS ± 0.50			
1er. LUGAR DEC. ± 0.20			
2do. LUGAR DEC. ± 0.05			
3er. LUGAR DEC. ± 0.025			
TOLERANCIAS DE ÁNGULOS ±30'	NOM. / FECHA	CLIENTE:	
LOS VALORES DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL ESTÁN MARCADOS EN MICRAS	DIBUJO JAMP 8/8/04	TÍTULO: MAQUINA DE SINTERIZADO	
	REVISO JAMP 8/8/04	SISTEMA: -------	
	APROBO	NOMB. DE LA PIEZA: VISTA LATERAL IZQUIERDA	
	FIRMA:	PARTE No.: P1	
	ACOTACION: MM	MATERIAL: DIVERSO	
	ESCALA: ----	TRATAMIENTO: -------	CANTIDAD: 1PZA.
	DEPTO.: PICYT	CUBIERTA: -------	PROYECTO: 1128 DIBUJO No.: 2
No. MODIFICACION FECHA POR	OCTA.:	REF. ACAD: 8950(8H0001	

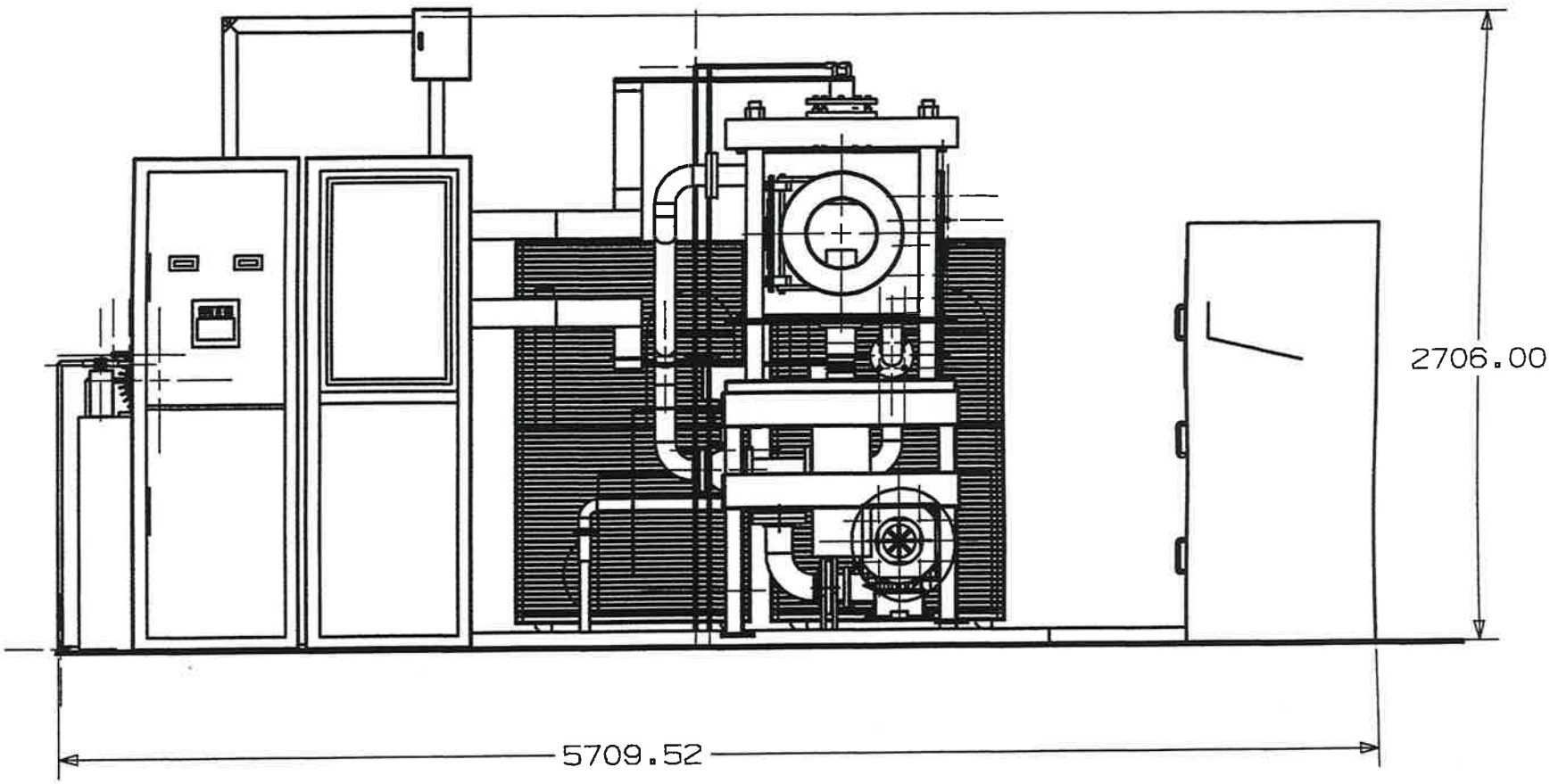
CID-04-01-F-01



TOL. EN mm NO ESPECIFICADAS	3a. PROYECCIÓN DE ÁNGULO	TAMAÑO A4	CIDESI Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial
NÚMEROS ENTEROS ± 0.50			
1er. LUGAR DEC. ± 0.20			
2do. LUGAR DEC. ± 0.03			
3er. LUGAR DEC. ± 0.002			
TOLERANCIAS DE ÁNGULOS ±30'			
LOS VALORES DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL ESTÁN MARCADOS EN MICRAS	NOM. / FECHA	CLIENTE:	
	DIBUJO: DAMP 3/8/04	TÍTULO: MAQUINA DE SINTERIZADO	
	REVISO: DAMP 3/8/04	SISTEMA: -------	
	APROBO:	NOMB. DE LA PIEZA: VISTA SUPERIOR	
	FIRMA:	PARTE No.: P1	
	ACOTACION: MM	MATERIAL: DIVERSO	
	ESCALA: ----	TRATAMIENTO: -------	CANTIDAD: 1PZA.
	DEPTO.: PICYT	DUREZA: ------- PROYECTO: 1128	DIBUJO No.: 2
No. / MODIFICACION / FECHA / POR	DCTA.:	REF. ACAD: 995018H0001	

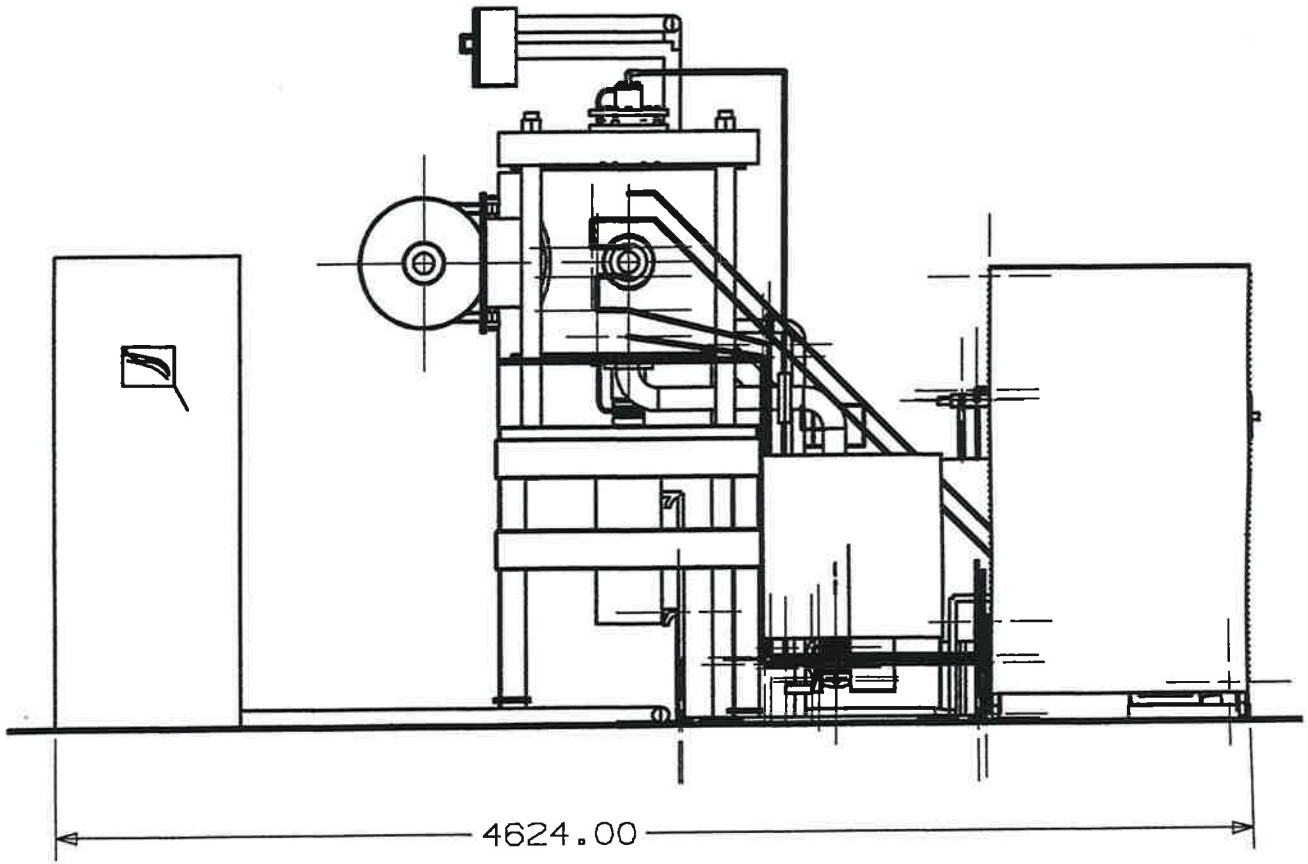
CID-04-01-F-01


2706.00
5709.52
TOL. EN mm NO ESPECIFICADAS
NÚMEROS ENTEROS ± 0.50
1er. LUGAR DEC. ± 0.20
2do. LUGAR DEC. ± 0.03
3er. LUGAR DEC. ± 0.013
TOLERANCIAS DE ÁNGULOS ±30'
LOS VALORES DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL ESTÁN MARCADOS EN MICRAS
No. MODIFICACION FECHA POR
No. PROTECCIÓN DE ÁNGULO
NOM. FECHA
DIBUJO JAMP 8/8/04
REVISO JAMP 8/8/04
APROBO
FIRMA:
ACOTACION: MM
ESCALA: ----
DEPTO.: PICYT
DCIA.:
TAMAÑO A4
CIDESI
Centro de Ingeniería y desarrollo Industrial
CLIENTE:
TITULO: MAQUINA DE SINTERIZADO
SISTEMA: -------
NOMB. DE LA PIEZA: VISTA POSTERIOR
PARTE No.: P1
MATERIAL: DIVERSO
TRATAMIENTO: ------- CANTIDAD: 1PZA.
DUREZA: ------- PROYECTO: 1128 DIBUJO No.: 2
REF. ACAD: 8950180H0001
CID-04-01-F-01



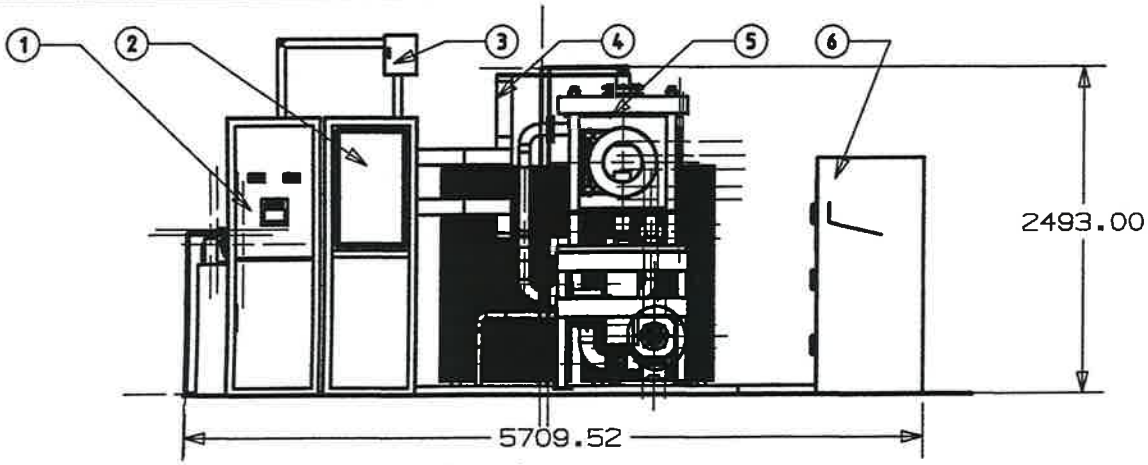
TOL. EN mm NO ESPECIFICADAS	3a. PROYECCION DE ÁNGULO	TAMAÑO A4	CIDESI Centro de Ingeniería y desarrollo Industrial
NÚMEROS ENTEROS ± 0.10			
1er. LUGAR DEC. ± 0.20			
2do. LUGAR DEC. ± 0.05			
3er. LUGAR DEC. ± 0.003			
TOLERANCIAS DE ÁNGULOS ±30'			
LOS VALORES DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL ESTÁN MARCADOS EN MICRAS			
	NOM. / FECHA	CLIENTE:	
	DIBUJO DAMP 8/8/04	TITULO: MAQUINA DE SINTERIZADO	
	REVISO DAMP 8/8/04	SISTEMA: -------	
	APROBO	NOMB. DE LA PIEZA: VISTA FRONTAL	
	FIRMA:	PARTE No.: P1	
	ACOTACION: MM	MATERIAL: DIVERSO	
	ESCALA: ----	TRATAMIENTO: -------	CANTIDAD: 1PZA.
	DEPTO.: PICYT	DUREZA: -------	PROYECTO: 1128 DIBUJO No.: 2
No. MODIFICACION FECHA POR	SCIA.:	REF. ACAD: 8950188-0001	

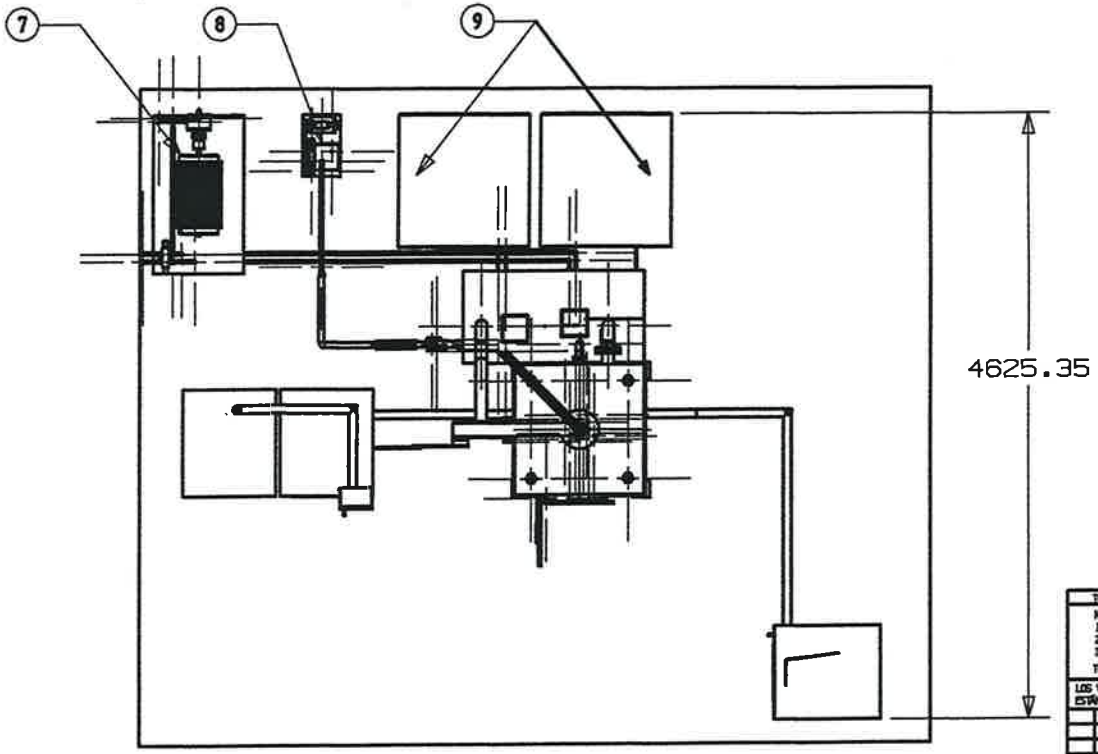
CID-04-01-F-01



TOL. EN mm NO ESPECIFICADOS	3a. PROYECCIÓN DE ÁNGULO	TAMAÑO A4	CIDESI Centro de Ingeniería y desarrollo Industrial
NÚMEROS ENTEROS ± 0.50			
1er. LUGAR DEC. ± 0.20			
2do. LUGAR DEC. ± 0.05			
3er. LUGAR DEC. ± 0.013			
TOLERANCIAS DE ÁNGULOS ±30'			
LOS VALORES DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL ESTÁN MARCADOS EN MICRAS			
	NOM. / FECHA	CLIENTE:	
	DIBUJO: DAMP 8/8/04	TÍTULO: MAQUINA DE SINTERIZADO	
	REVISO: DAMP 8/8/04	SISTEMA: -------	
	APROBO:	NOMB. DE LA PIEZA: VISTA LATERAL DER	
	FIRMA:	PARTE No.: P1	
	ACOTACIÓN: MM	MATERIAL: DIVERSO	
	ESCALA: ----	TRATAMIENTO: -------	CANTIDAD: 1PZA.
	DEPTO.: PICYT	DUREZA: -------	PROYECTO: 1128 DIBUJO No.: 2
No. MODIFICACIÓN FECHA POR	NOTA:	REF. ACAD: 995016H0001	

CID-04-01-F-01





NO.	No. PLANO O MODELO DE PIEZA	DESCRIPCION
1	GABINETE CONTROL	CONTROL DEL TRANSFORMADOR
2	TRANSFORMADOR	TRASF. DE CD. 100-3000 Amp.
3	INTERRUPTOR (No. DE MOD.)	ACOMETIDA A 220 VOLTS C.A.
4	0450053MSE01	PLACAS DE ALIMENTACION ELEC
5	0450053MSE02	ESTRUCT. MAQ. SINTERIZADO
6	GABINETE CONTROL GENERAL	CONTROL PARA BASE DE DATOS
7	UH60PZG39422010	U. HIDRAULICA MCA. PARKER
8	FE-1397	BOMBA DE VACIO MCA. FELISA
9	No. DE MODELO	ENFRI. DE AGUA MCA. COPELAND

TOL. EN mm NO ESPECIFICADAS
NÚMEROS ENTEROS ± 0.50
1er. LUGAR DEC. ± 0.20
2do. LUGAR DEC. ± 0.05
3er. LUGAR DEC. ± 0.010
TOLERANCIAS DE ÁNGULOS ± 30'

LOS VALORES DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL ESTÁN MARCADOS EN MICRAS

3a. PROYECCIÓN DE ÁNGULO

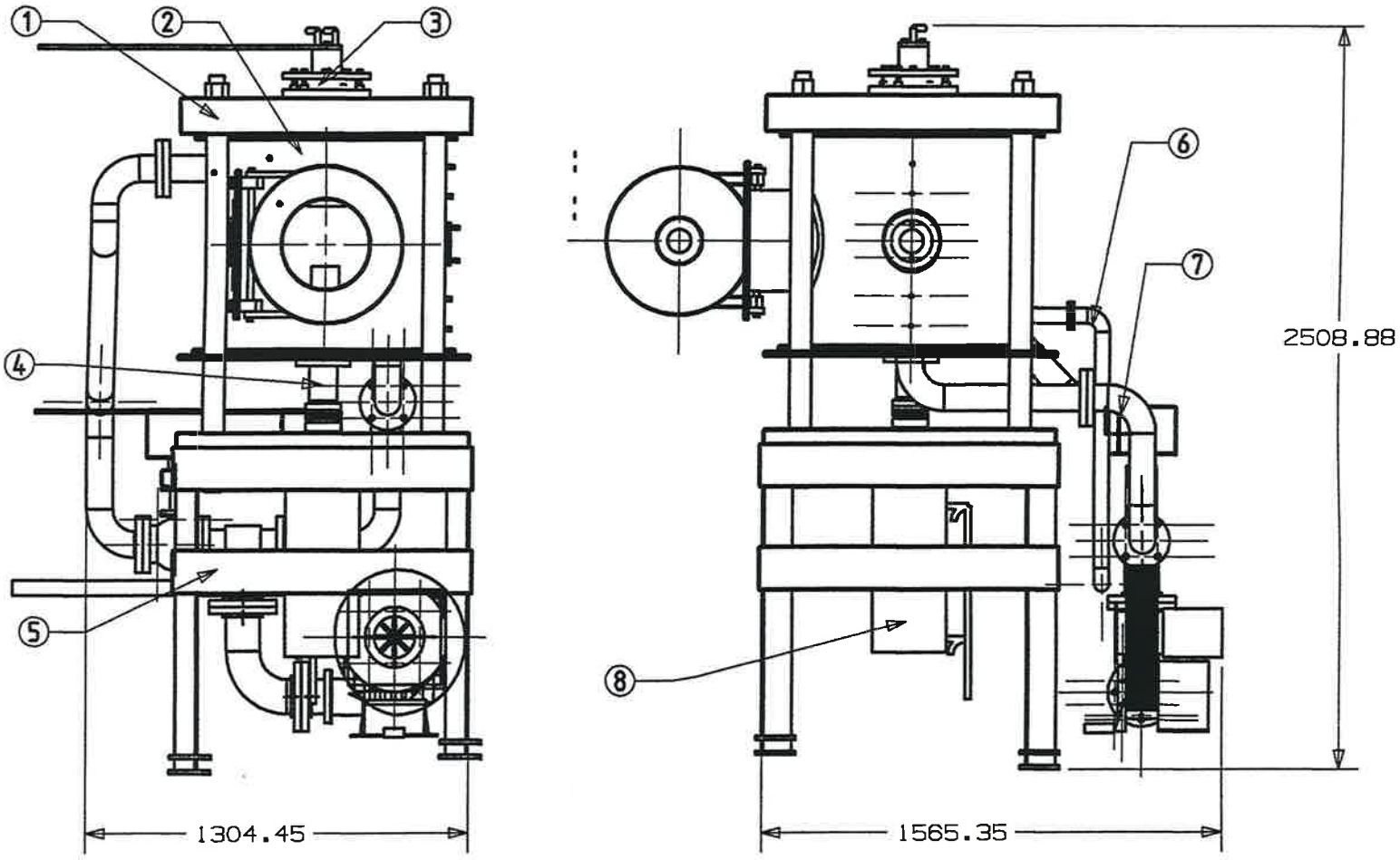
TAMAÑO A4

CIDESI Centro de Ingeniería y desarrollo Industrial

	NOM.	FECHA
DIBUJO	JAMP	8/8/04
REVISO	JAMP	8/8/04
APROBO		
FIRMA:		
ACOTACION: MM		
ESCALA: ----		
DEPTO.: PICYT		
GCIA.:		

CLIENTE:
TITULO: MAQUINA DE SINTERIZADO
SISTEMA: -------
NOMB. DE LA PIEZA: VISTA FRONTAL
PARTE No.: --
MATERIAL: ----------
TRATAMIENTO: ------- CANTIDAD: 1PZA.
DUREZA: ------- PROYECTO: 500553 DIBUJO No.: 1
REF. ACAD: 0450053MSE00

No.	MODIFICACION	FECHA	POR



NO.	No. PLANO O MODELO DE PIEZA	DESCRIPCION
1	0450053MSE02-01	ESTRUCTURA PRINCIPAL
2	0450053MSE02-02	HORNO DE SINTERIZADO
3	0450053MSE02-03	SIST. DE ELECTRODO SUPERIOR
4	0450053MSE02-04	SIST. DE ELECTRODO INFERIOR
5	0450053MSE02-05	BASE DE MAQUINA-SINTERIZADO
6	0450053MSE02-06	CONDUCTO PARA BOMBA VACIO
7	0450053MSE02-07	SISTEMA DE ENFRIAMIENTO
8	MOD. (8CJB3HLT3BAC6)	ACTUADOR HIDRAULICO

TOL. EN mm NO ESPECIFICADAS
NUMEROS ENTEROS : 0.50
1er. LUGAR DEC. : 0.20
2do. LUGAR DEC. : 0.03
3er. LUGAR DEC. : 0.010
TOLERANCIAS DE ÁNGULOS ±30'

LOS VALORES DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL ESTÁN MARCADOS EN MICRAS

No.	MODIFICACION	FECHA	POR

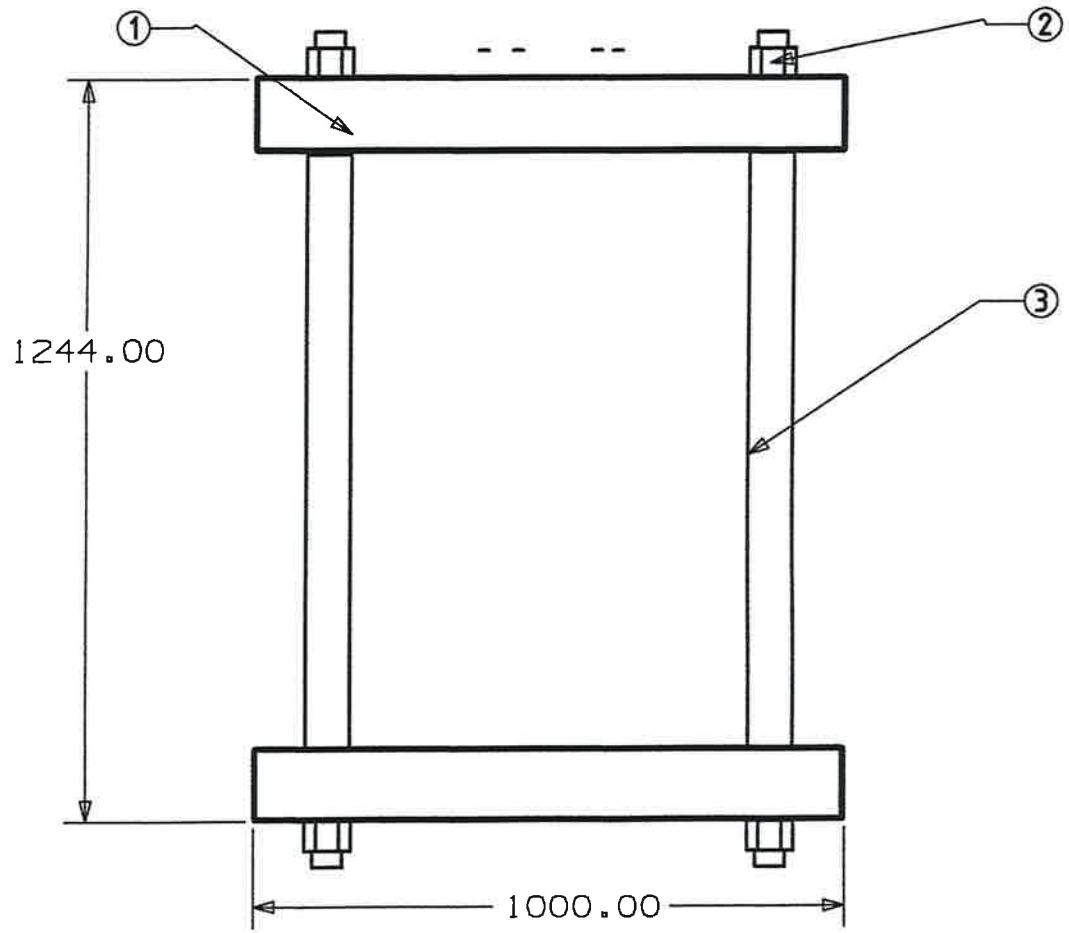
3a. PROYECCION DE ÁNGULO

	NOM.	FECHA
DIBUJO	DAMP	3/8/04
REVISO	DAMP	3/8/04
APROBO		
FIRMA:		
ACOTACION: MM		
ESCALA: ----		
DEPTO.: PICYT		
SCIA.:		

TAMAÑO A4

CIDESI
Centro de Ingeniería y desarrollo Industrial

CLIENTE:
TITULO: MAQUINA DE SINTERIZADO
SISTEMA: -------
NOMB. DE LA PIEZA: VISTA FRONTAL
PARTE No.: --
MATERIAL: ----------
TRATAMIENTO: ------- CANTIDAD: 1PZA.
DUREZA: ------- PROYECTO: 50053 DIBUJO No.: 1
REF. ACAD: 0450053MSE02



NO.	No. PLANO O MODELO DE PIEZA	DESCRIPCION
1	0450053MSE02-01-01	PLACA SUPERIOR
2	0450053MSE02-01-02	TUERCA ESTANDAR
3	0450053MSE02-01-03	PLACA INFERIOR

TOL. EN mm NO ESPECIFICADAS
NÚMEROS ENTEROS ± 0.50
1er. LUGAR DEC. ± 0.20
2do. LUGAR DEC. ± 0.01
3er. LUGAR DEC. ± 0.013
TOLERANCIAS DE ÁNGULOS ±30'

LOS VALORES DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL ESTÁN MARCADOS EN MICRAS

No.	MODIFICACION	FECHA	POR

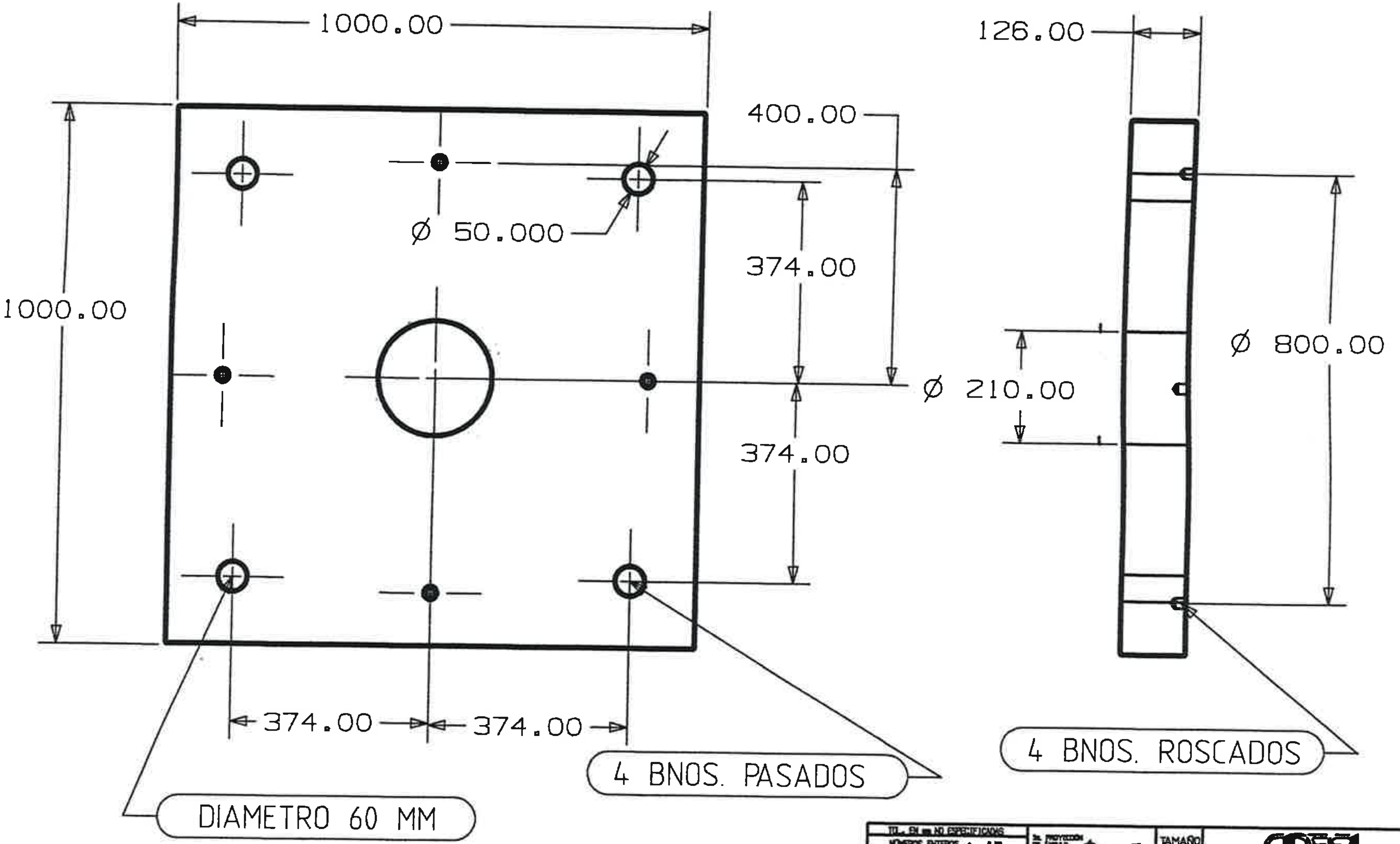
3a. PROYECCIÓN DE ÁNGULO

	NOM.	FECHA
DIBUJO	JAMP	8/8/04
REVISO	JAMP	8/8/04
APROBO		
FIRMA:		
ACOTACION: MM		
ESCALA: ----		
DEPTO.: PICYT		
RCIA.:		

TAMAÑO A4

CIDESI
Centro de Ingeniería y desarrollo Industrial

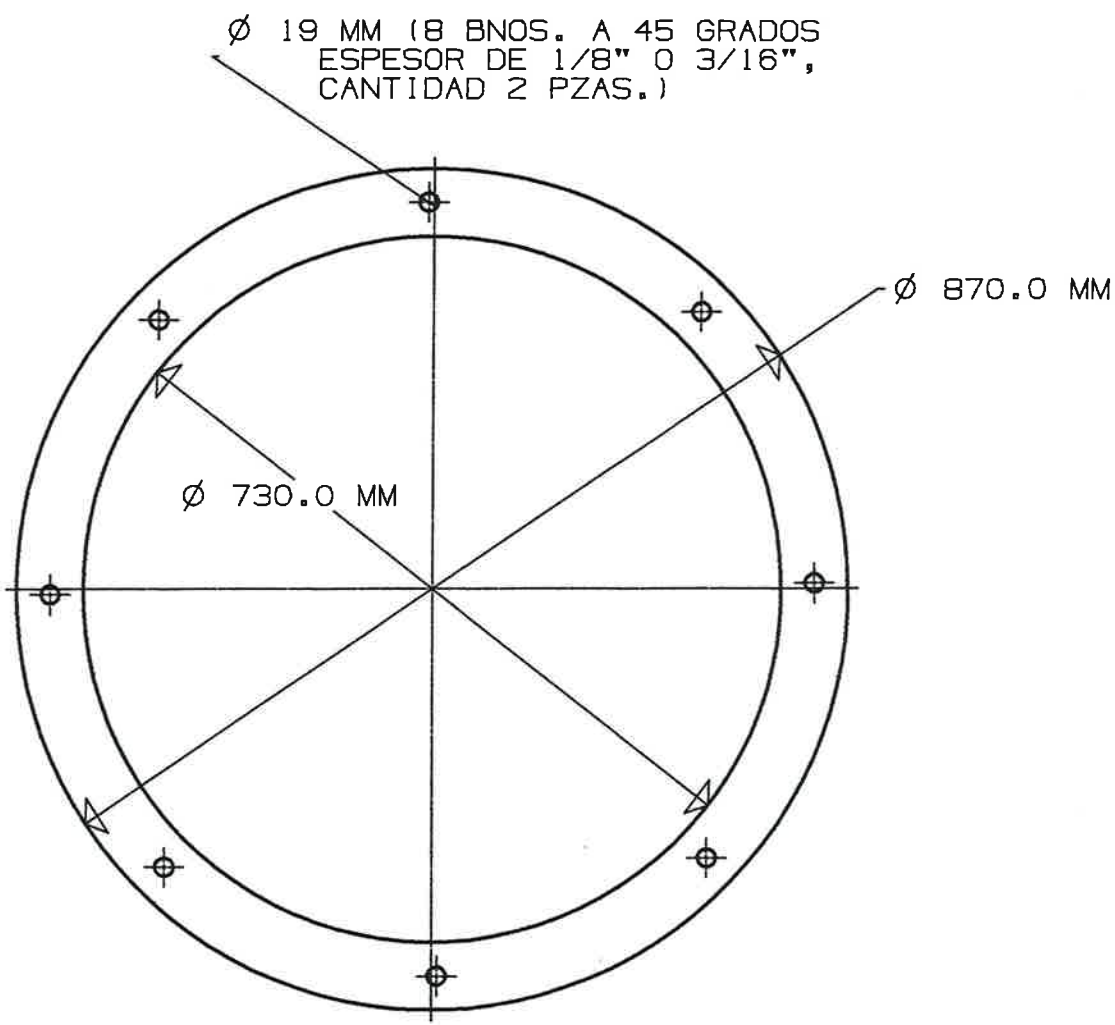
CLIENTE:
TITULO: MAQUINA DE SINTERIZADO
SISTEMA: -------
NOMB. DE LA PIEZA: VISTA FRONTAL
PARTE No.: --
MATERIAL: ----------
TRATAMIENTO: ------- CANTIDAD: 1PZA.
DUREZA: ------- PROYECTO: 500053 DIBUJO No.: 1
REF. ACAD: 0450053MSE02-01



NOTA: MATAR FILOS EN TODA LA PLACA

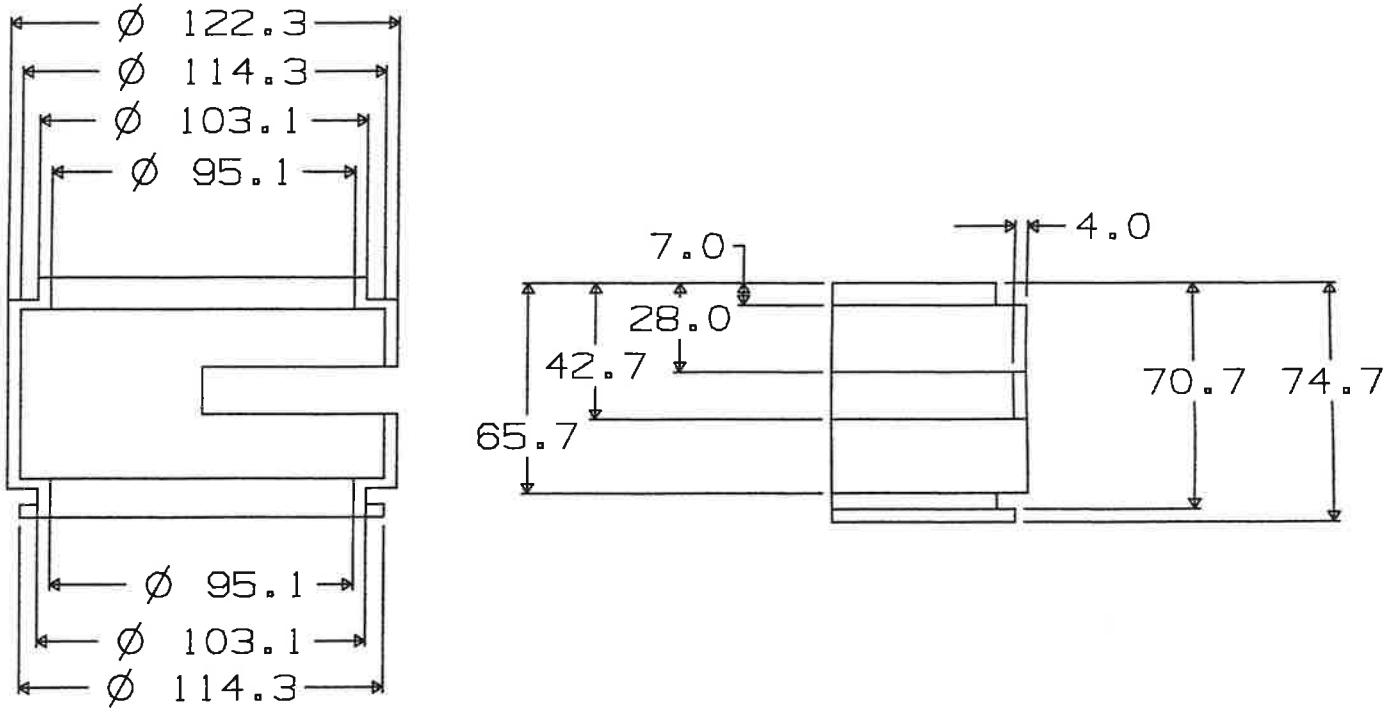
LOS BARRENOS ROSCADOS SON DE 3/4" X 25 MM DE PROFUNDIDAD

TOL. EN mm NO ESPECIFICADAS	3a. PROYECCION DE ANGULO		TAMAÑO A4	CIDESI Centro de Ingeniería y desarrollo Industrial
NÚMEROS ENTEROS ± 0.50		NOM.	FECHA	CLIENTE:
1er. LUGAR DEC. ± 0.20	DIBUJO	JAMP	3/8/04	TITULO: PLACA SUPERIOR
2do. LUGAR DEC. ± 0.05	REVISO	JAMP	3/8/04	SISTEMA: -------
3er. LUGAR DEC. ± 0.013	APROBO			NOMB. DE LA PIEZA: VISTA FRONTAL
TOLERANCIAS DE ANGULOS ±30'	FIRMA:			PARTE No.: --
LOS VALORES DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL ESTÁN MARCADOS EN MICRAS	ACOTACION: MM			MATERIAL: PLACA ACERO AICI 1018
	ESCALA: ----			TRATAMIENTO: ------- CANTIDAD: 1PZA.
	DEPTO.: PICYT			DUREZA: ------- PROYECTO: DIBUJO No.:
No. MODIFICACION FECHA POR	ECIA.:			REF. ACAD: 0450053MS02-01-01 1



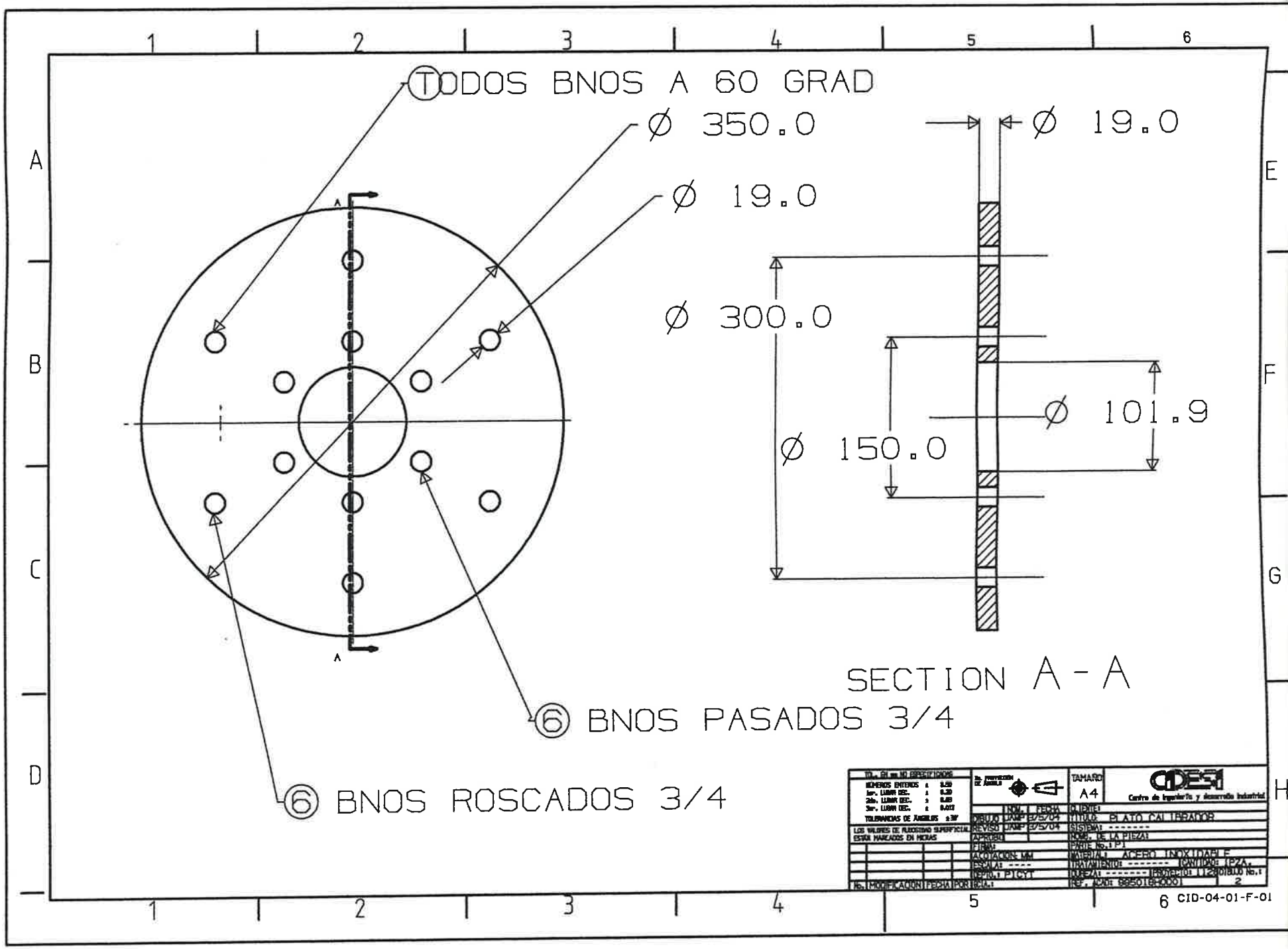
TOL. EN mm NO ESPECIFICADAS		TAMAÑO A4	CIDESI Centro de Ingeniería y desarrollo industrial
NÚMEROS ENTEROS ± 0.50			
1er. LUGAR DEC. ± 0.20			
2do. LUGAR DEC. ± 0.00			
3er. LUGAR DEC. ± 0.000			
TOLERANCIAS DE ÁNGULOS ±30'			
LOS VALORES DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL ESTÁN MARCADOS EN MICRAS			
	NOM. / FECHA	CLIENTE:	
	DIBUJO JAMP 8/5/04	TÍTULO: EMPAQUE DE GRAFITO	
	REVISO JAMP 8/5/04	SISTEMA: -------	
	APROBO	NOMB. DE LA PIEZA:	
	FIRMA:	PARTE No.: P1	
	ACOTACION: MM	MATERIAL: GRAFITO	
	ESCALA: ----	TRATAMIENTO: -------	CANTIDAD: 1PZA.
	DEPTO.: PICYT	DUREZA: -------	PROYECTO: 1128 DIBUJO No.: 2
No. MODIFICACION FECHA POR	SCIA.:	REF. ACAD: 685016H0001	

CID-04-01-F-01

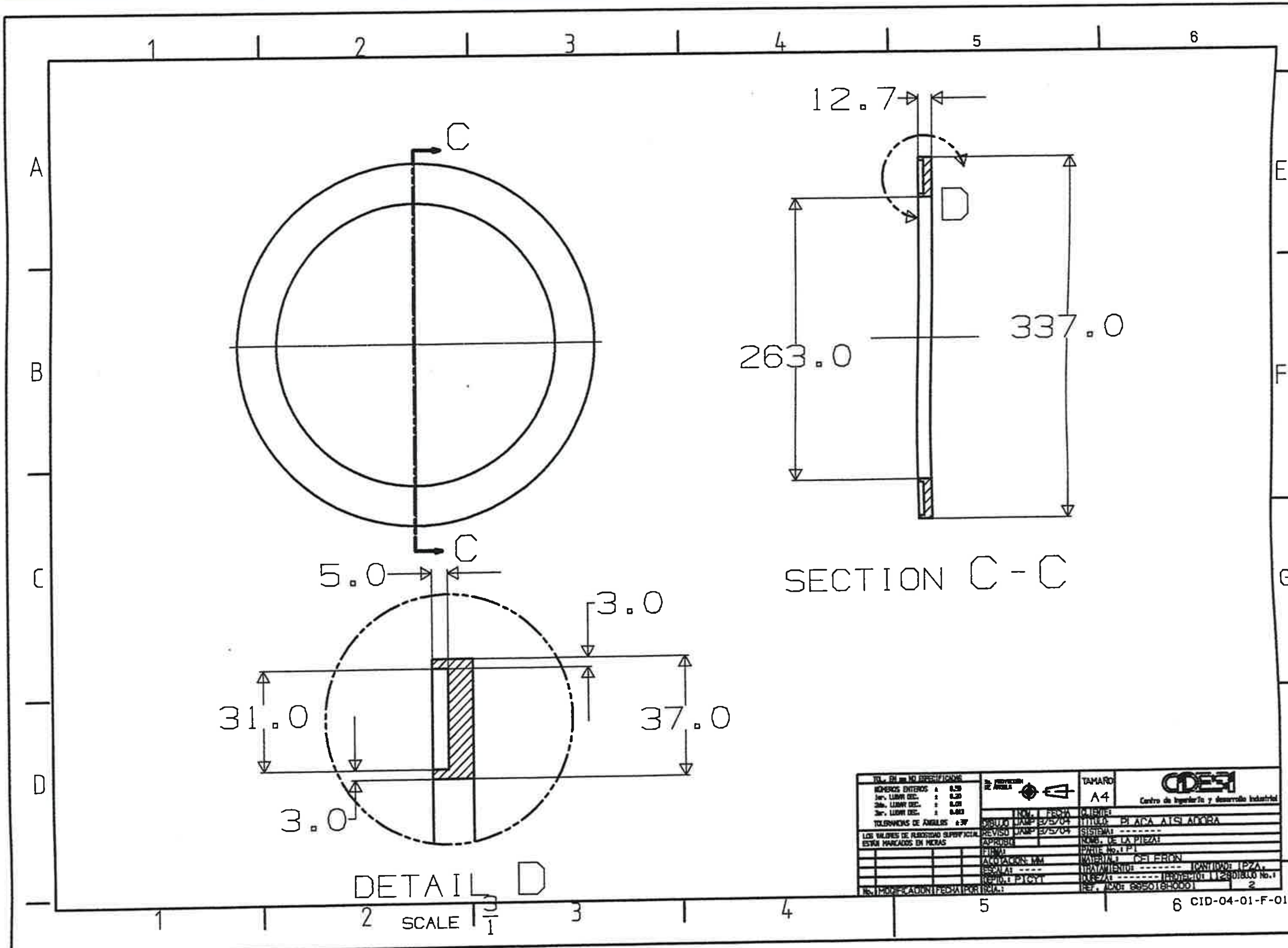


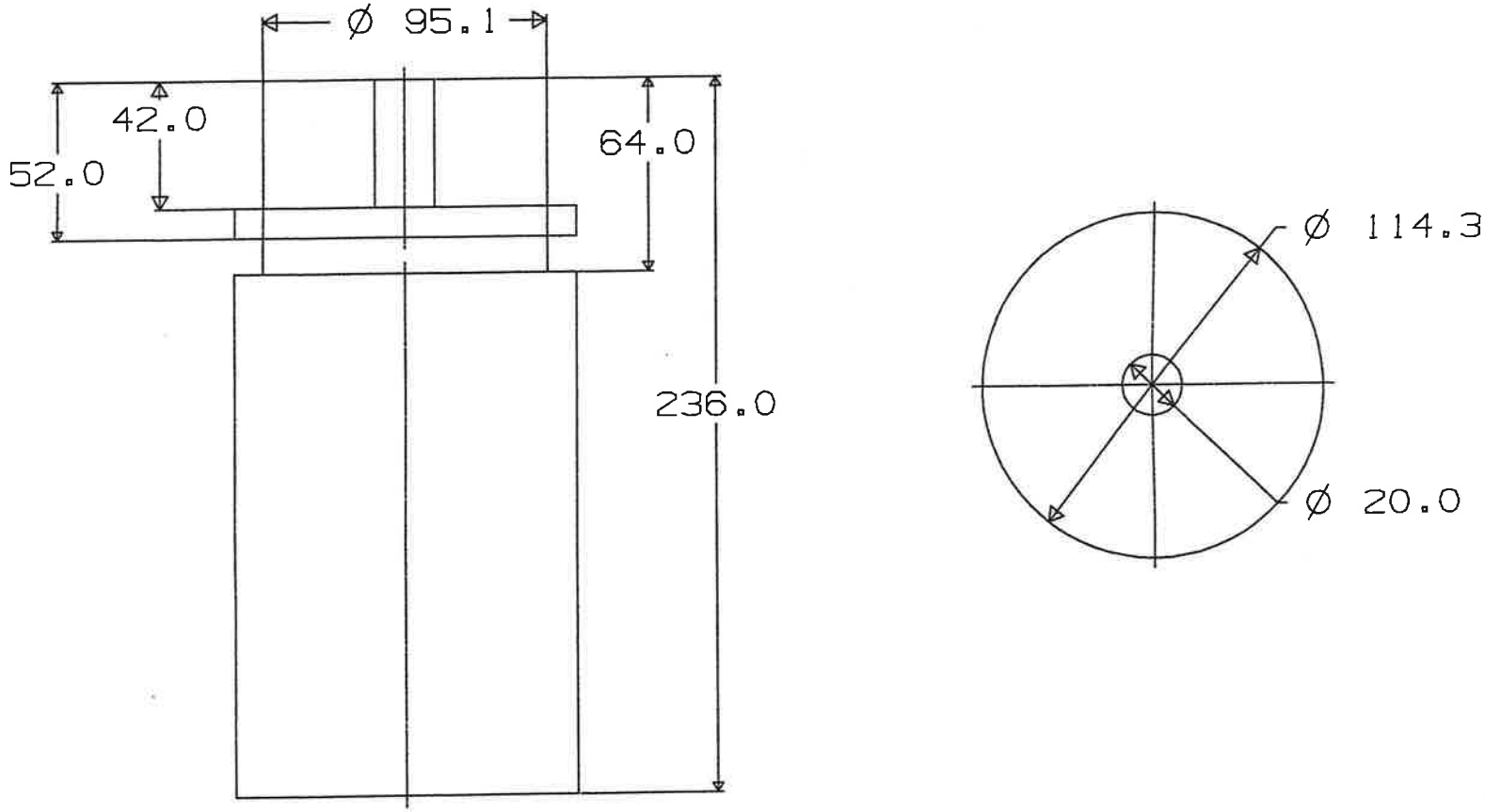
TOL. EN mm NO ESPECIFICADAS	3a. PROYECCION DE ANGULO	TAMAÑO A4	CIDESI Centro de Ingeniería y desarrollo industrial
NÚMEROS ENTEROS ± 0.50			
1er. LUGAR DEC. ± 0.20			
2do. LUGAR DEC. ± 0.08			
3er. LUGAR DEC. ± 0.003			
TOLERANCIAS DE ÁNGULOS ±30'	NOM. / FECHA	CLIENTE:	
LOS VALORES DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL ESTÁN MARCADOS EN MICRAS	DIBUJO JAMP 3/5/04	TÍTULO: CAPUCHA AISLANTE	
	REVISO JAMP 3/5/04	SISTEMA: -------	
	APROBO	NOMB. DE LA PIEZA:	
	FIRMA:	PARTE No.: P1	
	ACOTACION: MM	MATERIAL: CELERON	
	ESCALA: ----	TRATAMIENTO: -------	CANTIDAD: 1PZA.
	DEPTO.: PICYT	DUREZA: -------	PROYECTO: 1128 DIBUJO No.: 2
No. MODIFICACION FECHA POR	RCIA.:	REF. ACAD: 985018-0001	

CID-04-01-F-01



TODOS BNOS A 60 GRAD
Ø 350.0
Ø 19.0
Ø 19.0
Ø 300.0
Ø 150.0
Ø 101.9
SECTION A - A
6 BNOS PASADOS 3/4
6 BNOS ROSCADOS 3/4
TAMAÑO
A4
Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial
TITULO: PLATO CALIBRADOR
SISTEMA: -------
NOMB. DE LA PIEZA:
PARTE No.: P1
MATERIAL: ACERO INOXIDABLE
TRATAMIENTO: -------
CANTIDAD: 1PZA.
DIBUJO JAMP 3/5/04
REVISO JAMP 3/5/04
APROBO
FIRMA:
ACOTACION: MM
ESCALA: ----
DEPTO.: PICYT
CLIENTE:
DIBUJO No.: 2
REF. ACAD: 995018H0001
CID-04-01-F-01

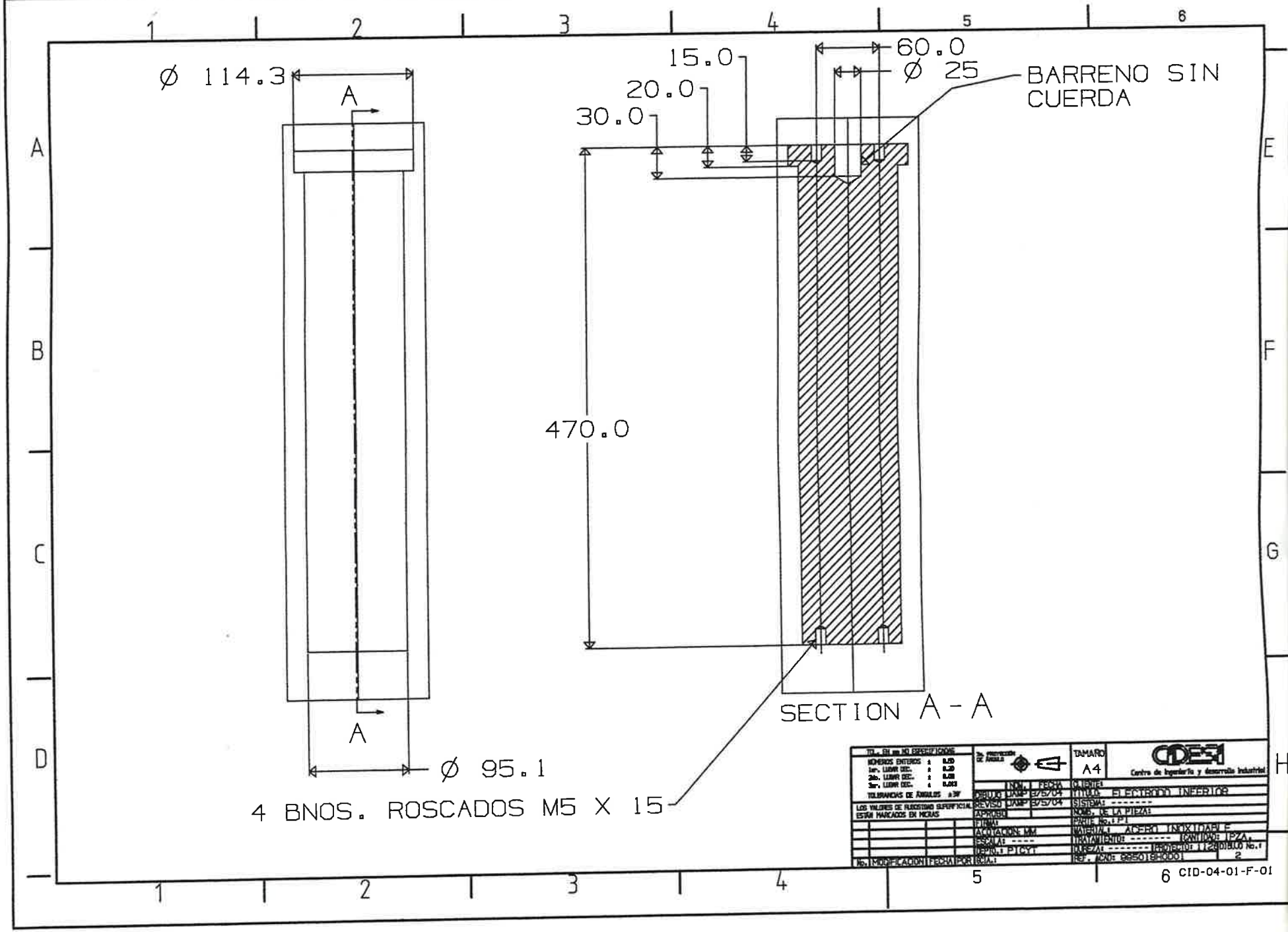

C
C
SECTION C - C
12.7
337.0
263.0
D
5.0
3.0
31.0
37.0
3.0
DETAIL D
SCALE 3/1
TAMAÑO A4
Centro de Ingeniería y desarrollo Industrial
NOM. FECHA
DIBUJO UAMP 3/5/04
REVISO UAMP 3/5/04
APROBO
FIRMA
ACOTACION: MM
ESCALA: ----
DEPTO.: PICYT
CLIENTE:
TITULO: PLACA AISLADORA
SISTEMA: -------
NOMB. DE LA PIEZA:
PARTE No.: P1
MATERIAL: CELERON
TRATAMIENTO: ------- CANTIDAD: 1PZA.
DUREZA: -------
LOS VALORES DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL ESTAN MARCADOS EN MICRAS
No. MODIFICACION FECHA POR
CID-04-01-F-01



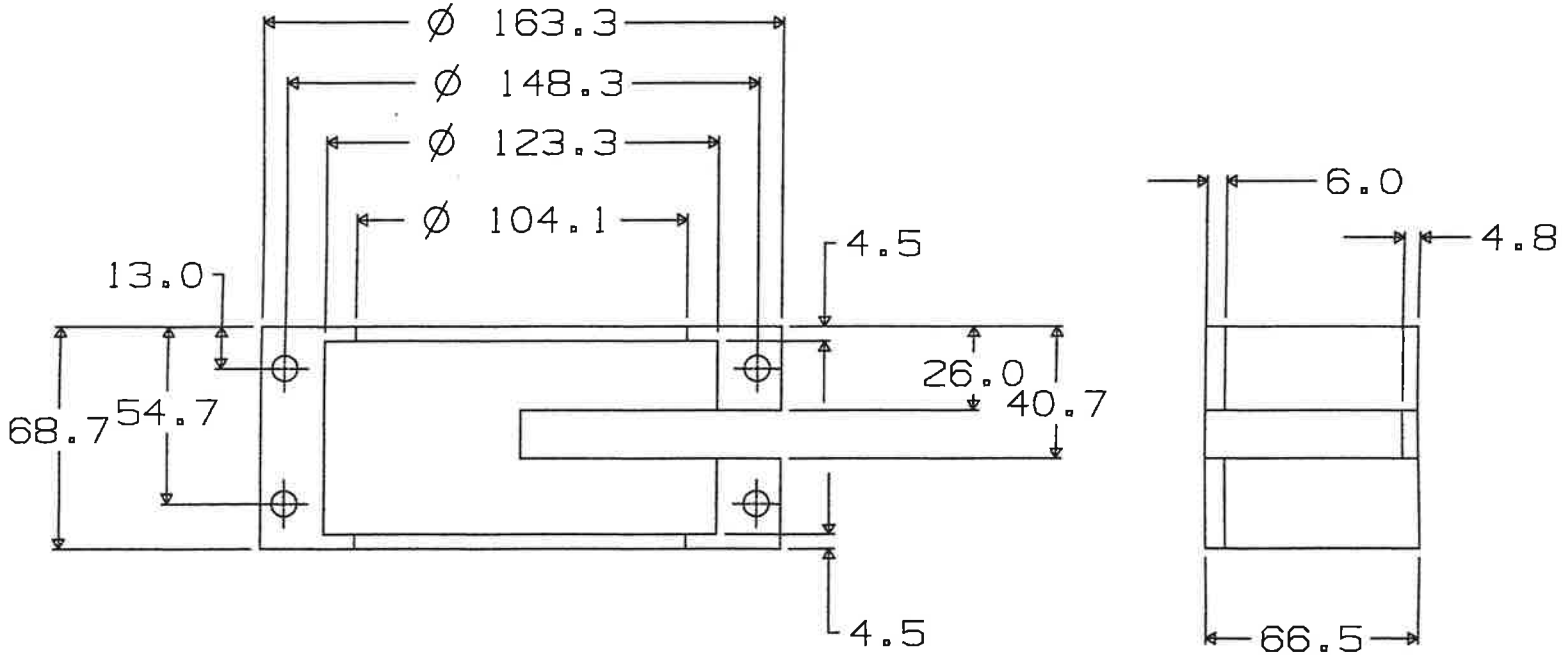
TOL. EN mm NO ESPECIFICADAS	3a. PROYECCIÓN DE ÁNGULO	TAMAÑO A4	CIDESI Centro de Ingeniería y desarrollo industrial
NÚMEROS ENTEROS ± 0.50			
1er. LUGAR DEC. ± 0.20			
2do. LUGAR DEC. ± 0.08			
3er. LUGAR DEC. ± 0.013			
TOLERANCIAS DE ÁNGULOS ±30'			
LOS VALORES DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL ESTÁN MARCADOS EN MICRAS			

	NOM.	FECHA	
DIBUJO	JAMP	3/5/04	CLIENTE:
REVISO	JAMP	3/5/04	TÍTULO: EXTENCION DE VASTAGO
APROBO			SISTEMA: -------
FIRMA:			NOMB. DE LA PIEZA:
ACOTACION: MM			PARTE No.: P1
ESCALA: ----			MATERIAL: ACERO INOXIDABLE
DEPTO.: PICYT			TRATAMIENTO: ------- CANTIDAD: 1PZA.
			DUREZA: ------- PROYECTO: 128 DIBUJO No.: 2
No. MODIFICACION FECHA POR			REF. ACAD: 895018HOD01

CID-04-01-F-01

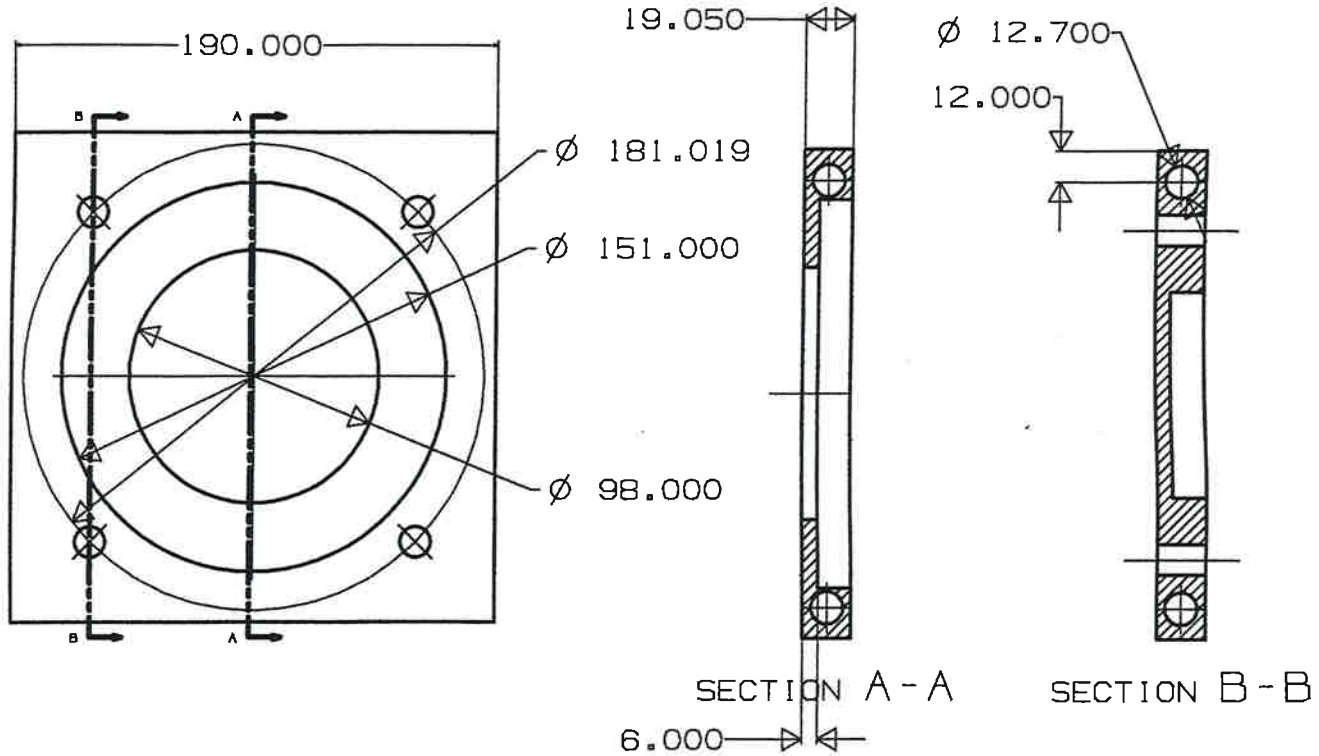


Ø 114.3
A
A
Ø 95.1
4 BNOS. ROSCADOS M5 X 15
15.0
20.0
30.0
470.0
60.0
Ø 25
BARRENO SIN CUERDA
SECTION A - A
TAMAÑO A4
CIDESI
Centro de Ingeniería y desarrollo industrial
TITULO: ELECTRODO INFERIOR
MATERIAL: ACERO INOXIDABLE
CANTIDAD: 1PZA.
DIBUJO No.: 2
CID-04-01-F-01



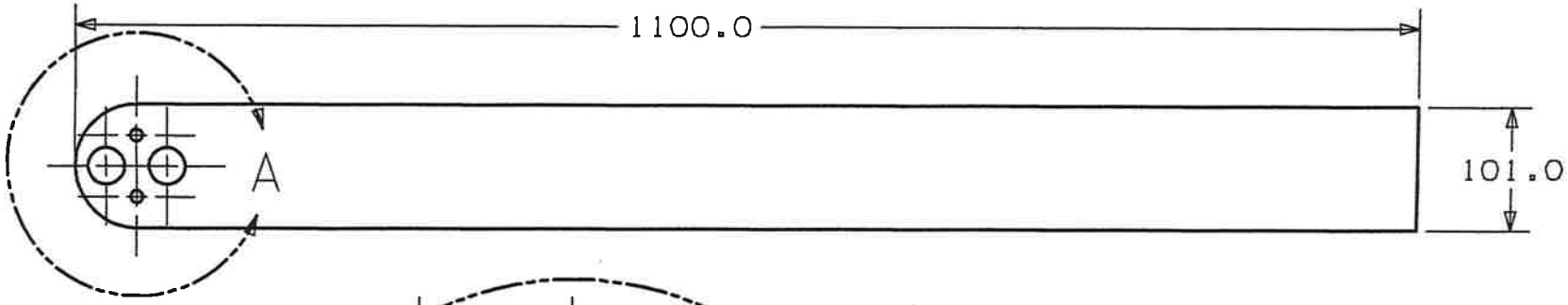
TOL. EN mm NO ESPECIFICADAS NÚMEROS ENTEROS ± 0.50 1er. LUGAR DEC. ± 0.20 2do. LUGAR DEC. ± 0.05 3er. LUGAR DEC. ± 0.013 TOLERANCIAS DE ÁNGULOS ± 30'	2a. PROYECCIÓN DE ÁNGULO	TAMAÑO A4	CIDESI Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial
LOS VALORES DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL ESTÁN MARCADOS EN MICRAS	NOM. / FECHA DIBUJO: JAMP 3/5/04 REVISO: JAMP 3/5/04 APROBO: FIRMA: ACOTACIÓN: MM ESCALA: ---- DEPTO.: PICYT	CLIENTE: TÍTULO: CHAQUETA DE UNIÓN SISTEMA: ------- NOMB. DE LA PIEZA: PARTE No.: P1 MATERIAL: ACERO INOXIDABLE TRATAMIENTO: ------- CANTIDAD: 1PZA. DUREZA: ------- PROYECTO: 1128 DIBUJO No.: 2	
No. MODIFICACIÓN FECHA POR	GCIA.:	REF. ACAD: 8950 18HOD01	

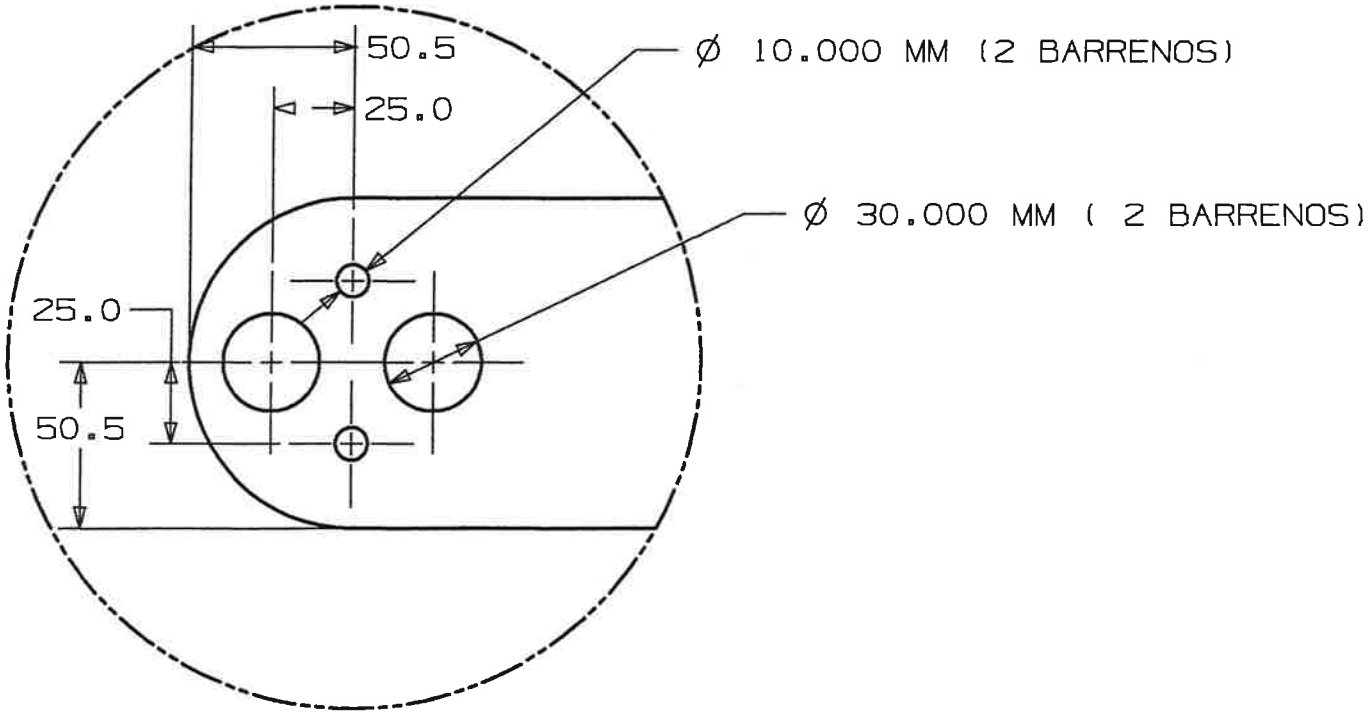
CID-04-01-F-01



TOL. EN mm NO ESPECIFICADAS		TAMAÑO A4	CIDESI Centro de Ingeniería y desarrollo Industrial
NÚMEROS ENTEROS ± 0.50			
1er. LUGAR DEC. ± 0.20			
2do. LUGAR DEC. ± 0.05			
3er. LUGAR DEC. ± 0.013			
TOLERANCIAS DE ÁNGULOS ±30'			
LOS VALORES DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL ESTÁN MARCADOS EN MICRAS			
	NOM. / FECHA	CLIENTE:	
DIBUJO	JAMP 8/5/04	TÍTULO: PLACA GUIA	
REVISO	JAMP 8/5/04	SISTEMA: -------	
APROBO		NOMB. DE LA PIEZA:	
FIRMA:		PARTE No.: P1	
ACOTACION: MM		MATERIAL: ACERO INOXIDABLE	
ESCALA: ----		TRATAMIENTO: -------	CANTIDAD: 1PZA.
DEPTO.: PICYT		DUREZA: -------	PROYECTO: 1128 DIBUJO No.: 2
No. / MODIFICACION / FECHA / POR		REF. ACAD: 885018H0001	

CID-04-01-F-01



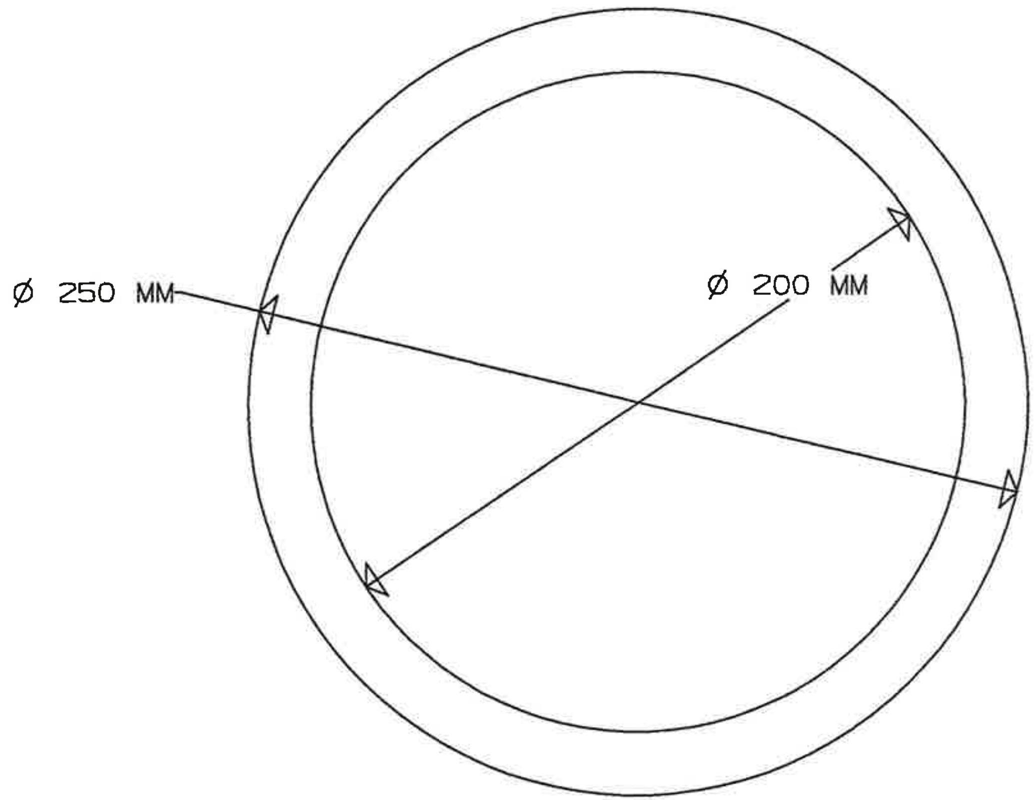


DETAIL A

SCALE $\frac{1}{2}$

NOTA: LOS BARRENOS SON PASADOS Y
EL ESPESOR DEL A PLACA DE COBRE ES DE 12.7 MM

TOL. EN mm NO ESPECIFICADOS	3a. PROYECCIÓN DE ÁNGULO	TAMAÑO A4	CIDESI Centro de Ingeniería y desarrollo Industrial
NÚMEROS ENTEROS ± 0.50			
1er. LUGAR DEC. ± 0.20		NOM. FECHA	CLIENTE:
2do. LUGAR DEC. ± 0.05	DIBUJO JAMP 9/8/04		TÍTULO: PLACA DE COBRE SUPERIOR
3er. LUGAR DEC. ± 0.013	REVISO JAMP 9/8/04		SISTEMA: -------
TOLERANCIAS DE ÁNGULOS ±30'	APROBO		NOM. DE LA PIEZA: VISTA SUPERIOR
LOS VALORES DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL ESTÁN MARCADOS EN MICRAS	FIRMA:		PARTE No.: --
	ACOTACIÓN MM		MATERIAL: PLACA COBRE
	ESCALA: ----		TRATAMIENTO: ------- CANTIDAD: 1PZA.
	DEPTO.: PICYT		DUREZA: ------- PROYECTO: 50053 DIBUJO No.:
No. MODIFICACIÓN FECHA POR			REF. ACAD: C450053-MS02-01-01 1



TOL. EN mm NO ESPECIFICADAS
NÚMEROS ENTEROS ± 0.50
1er. LUGAR DEC. ± 0.20
2do. LUGAR DEC. ± 0.08
3er. LUGAR DEC. ± 0.03
TOLERANCIAS DE ÁNGULOS ± 30'

LOS VALORES DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL ESTÁN MARCADOS EN MICRAS

No.	MODIFICACION	FECHA	POR

3a. PROYECCIÓN DE ÁNGULO

TAMAÑO A4

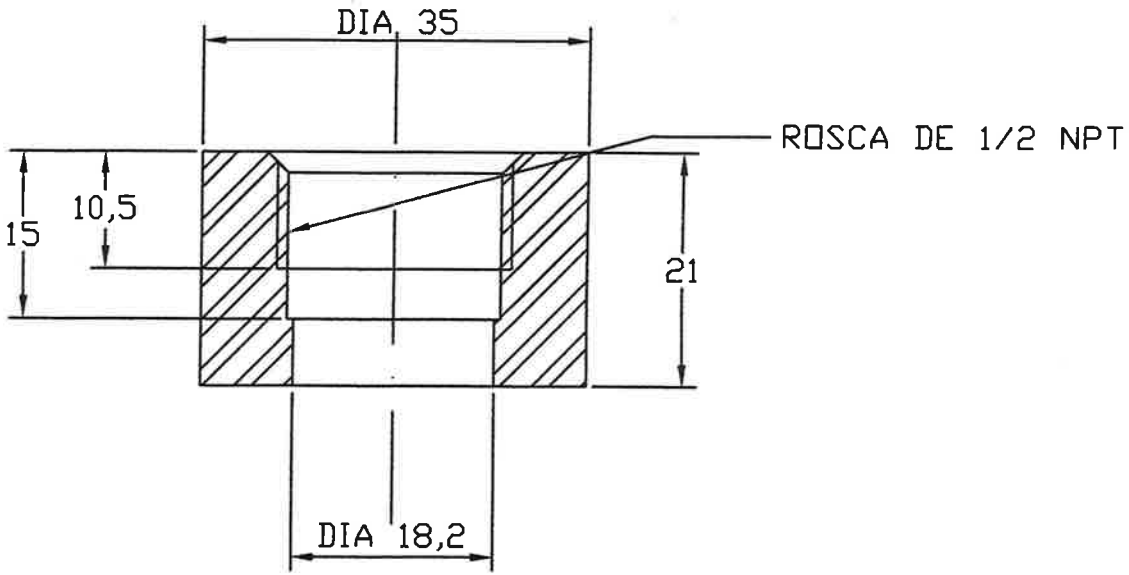
Centro de Ingeniería y desarrollo Industrial

	NOM.	FECHA
DIBUJO	UAMP	3/5/04
REVISO	UAMP	3/5/04
APROBO		

FIRMA:
ACOTACION: MM
ESCALA: ----
DEPTO.: PICYT
CIA.:

CLIENTE:
TITULO: EMPAQUE DE GRAFITO
SISTEMA: --------
NOMB. DE LA PIEZA:
PARTE No.: P1
MATERIAL: GRAFITO
TRATAMIENTO: -------- CANTIDAD: 1PZA.
DUREZA: -------- PROYECTO: 1128
REF. ACAD: 8850 1EHO001
DIBUJO No.: 2

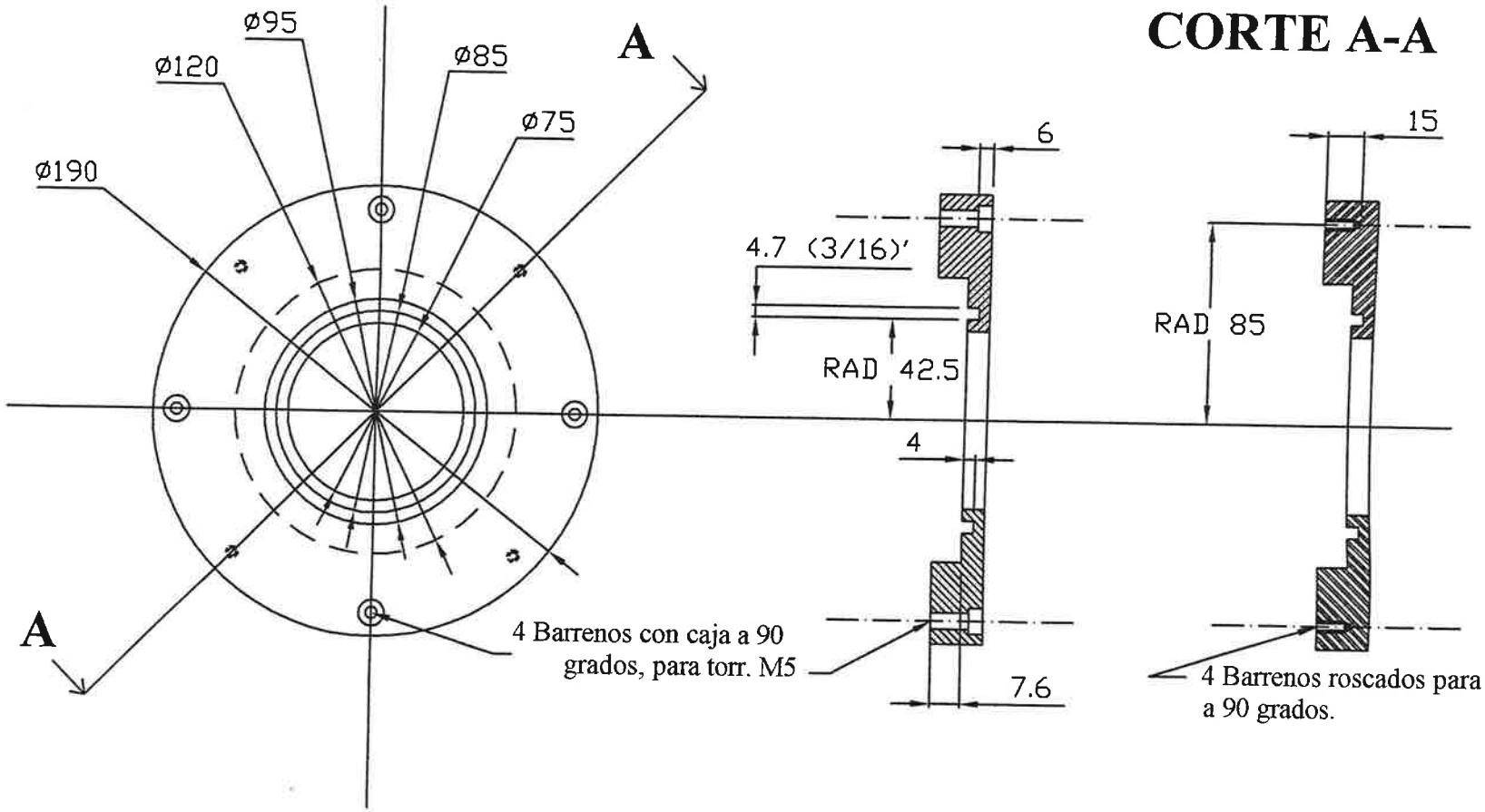
CID-04-01-F-01



TOL. EN mm NO ESPECIFICADAS NÚMEROS ENTEROS ± 0.50 1er. LUGAR DEC. ± 0.20 2do. LUGAR DEC. ± 0.03 3er. LUGAR DEC. ± 0.013 TOLERANCIAS DE ÁNGULOS ±30'	3a. PROYECCIÓN DE ÁNGULO	TAMAÑO A4	CIDESI Centro de Ingeniería y desarrollo Industrial
	NOM. / FECHA	CLIENTE:	
	DIBUJÓ JAMP 3/2/03	TÍTULO:	
LOS VALORES DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL ESTÁN MARCADOS EN MICRAS	REVISÓ JAMP 3/2/03	SISTEMA: -------	
	APROBÓ	NOMB. DE LA PIEZA:	
	FIRMA:	PARTE No.: P1	
	ACOTACIÓN: CM	MATERIAL: ACERO 1018	
	ESCALA: ----	TRATAMIENTO: -------	CANTIDAD: 1PZA.
	DEPTO.: PICYT	DUREZA: ------- / PROYECTO: 1126	DIBUJO No.: 2
No. / MODIFICACIÓN / FECHA / POR	GCIA.:	REF. ACAD: 995018HOD01	

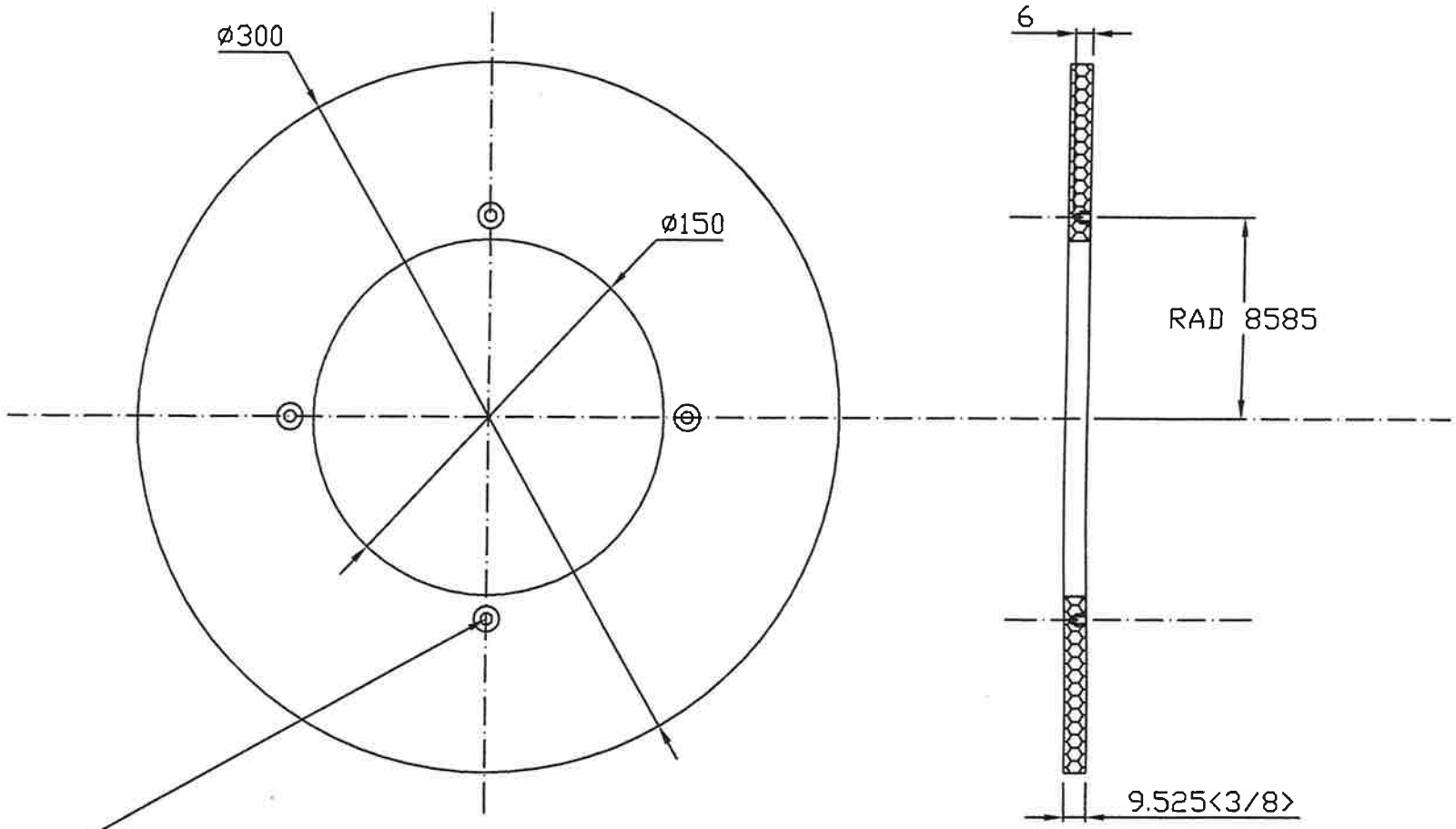
CID-04-01-F-01

CORTE A-A



TOL. EN mm NO ESPECIFICADAS NÚMEROS ENTEROS ± 0.50 1er. LUGAR DEC. ± 0.20 2do. LUGAR DEC. ± 0.03 3er. LUGAR DEC. ± 0.013 TOLERANCIAS DE ÁNGULOS ±30'	3a. PROYECCIÓN DE ÁNGULO	TAMAÑO A4	CIDESI Centro de Ingeniería y desarrollo industrial
	NOM. / FECHA	CLIENTE:	
	DIBUJÓ DAMP 5/2/03	TÍTULO: PLATO SUPERIOR	
LOS VALORES DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL ESTÁN MARCADOS EN MICRAS	REVISÓ DAMP 5/2/03	SISTEMA: ------	
	APROBÓ	NOMB. DE LA PIEZA:	
	FIRMA:	PARTE No.: PT	
	ACOTACIÓN: mm	MATERIAL: ACERO A 36	
	ESCALA: ----	TRATAMIENTO: ------	CANTIDAD: 1PZA.
	DEPTO.: PICYT	DUREZA: ------	PROYECTO: 1126 / DIBUJO No.: 2
No. / MODIFICACIÓN / FECHA / POR	GCIA.:	REF. ACAD: 995018HOD01	

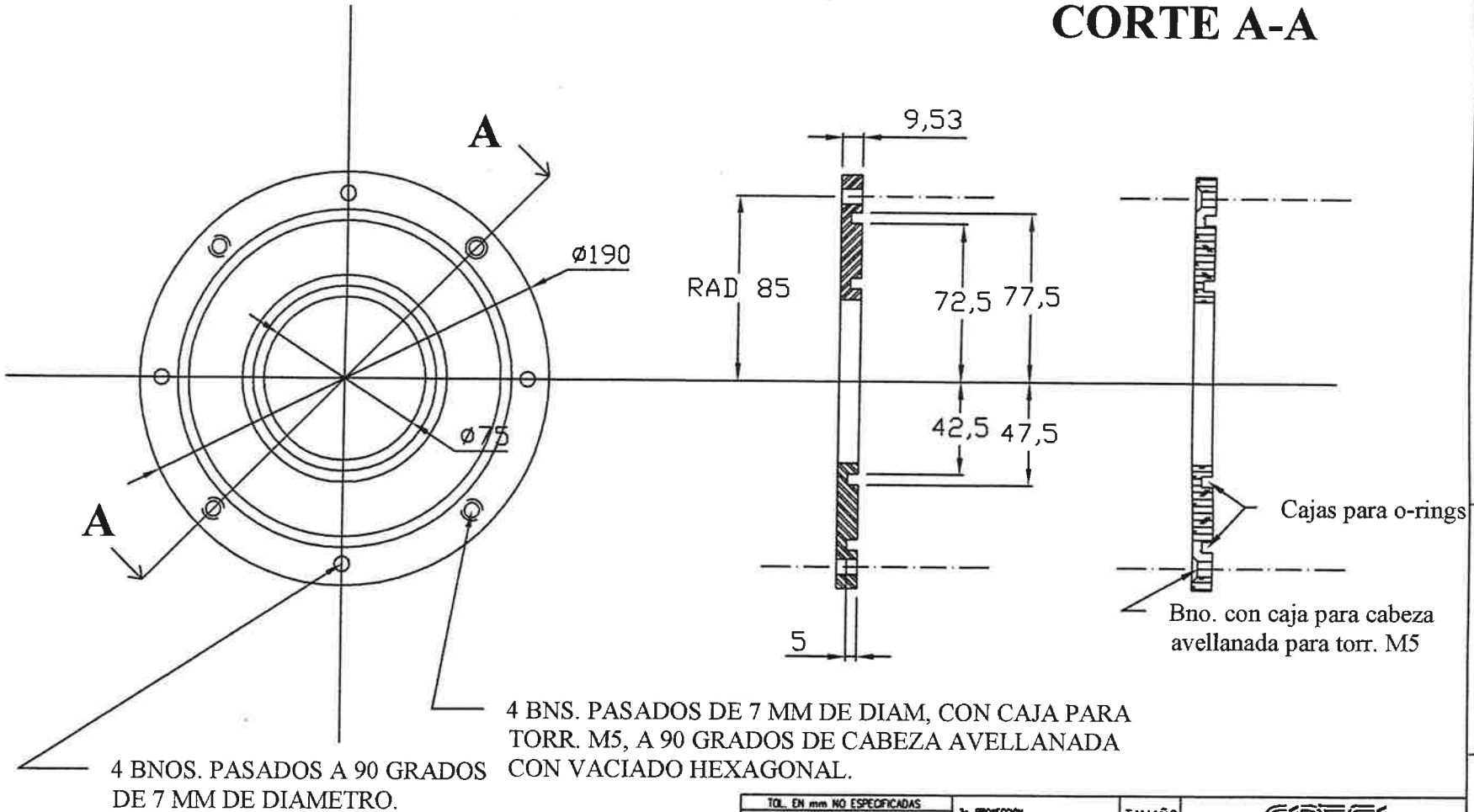
CID-04-01-F-01



TOL. EN mm NO ESPECIFICADAS NÚMEROS ENTEROS ± 0.50 1er. LUGAR DEC. ± 0.20 2do. LUGAR DEC. ± 0.03 3er. LUGAR DEC. ± 0.013 TOLERANCIAS DE ÁNGULOS ±30'	3a. PROYECCIÓN DE ÁNGULO	TAMAÑO A4	CIDESI Centro de Ingeniería y desarrollo Industrial
	NÚM. / FECHA	CLIENTE:	
	DIBUJÓ JARP 372703	TÍTULO: PLATO INFERIOR	
LOS VALORES DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL ESTÁN MARCADOS EN MICRAS	REVISÓ JARP 372703	SISTEMA: ———	
	APROBÓ	NOMB. DE LA PIEZA:	
	FIRMA:	PARTE No.: P1	
	ACOTACIÓN: mm	MATERIAL: ACERO A 36	
	ESCALA: —	TRATAMIENTO: ———	CANTIDAD: 1PZA.
	DEPTO.: PICYT	DUREZA: ———	PROYECTO: 1126 / DIBUJO No.: 2
No. MODIFICACIÓN FECHA POR	GCIA.:	REF. ACAD: 995018HOD01	

CID-04-01-F-01

CORTE A-A



TOL. EN mm NO ESPECIFICADAS			3a. PROYECCIÓN DE ÁNGULO	TAMAÑO A4	CIDESI Centro de Ingeniería y desarrollo Industrial
NÚMEROS ENTEROS ± 0.50					
1er. LUGAR DEC. ± 0.20					
2do. LUGAR DEC. ± 0.03					
3er. LUGAR DEC. ± 0.013					
TOLERANCIAS DE ÁNGULOS ±30'			NOM. / FECHA	CLIENTE:	
LOS VALORES DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL ESTÁN MARCADOS EN MICRAS			DIBUJÓ JAMP 3/2/03	TÍTULO: PLATO INTERMEDIO	
			REVISÓ JAMP 3/2/03	SISTEMA: ------	
			APROBÓ	NOMB. DE LA PIEZA:	
			FIRMA:	PARTE No.: P1	
			ACOTACIÓN: mm	MATERIAL: ACERO A 36	
			ESCALA: ----	TRATAMIENTO: ------	CANTIDAD: 1PZA.
			DEPTO.: PICYT	DUREZA: ------	PROYECTO: 1126 / DIBUJO No.: 2
No.	MODIFICACIÓN	FECHA / POR	GCIA.:	REF. ACAD: 995018HOD01	

CID-04-01-F-01