DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MÓDULO ANALÓGICO PARA SISTEMAS AUTOMÁTICOS DE CONTROL

ERIK JOSÉ VERA MERCADO
JOSÉ RUBIEL CARDENAS VANEGAS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2004

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MÓDULO ANALÓGICO PARA SISTEMAS AUTOMÁTICOS DE CONTROL

ERIK JOSÉ VERA MERCADO

JOSÉ RUBIEL CARDENAS VANEGAS

Documento presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Eléctrico

Director:
JAIME GUILLERMO BARRERO PÈREZ
Mpe.

Codirector:
DANIEL ALFONSO SIERRA BUENO
Ingeniero

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS

ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

BUCARAMANGA

2004

CONTENIDO

Pág.

INTRODUCCIÓN 12

1. DISEÑO DE SISTEMAS DE CONTROL ANALÓGICO 14

1.1 GENERALIDADES DEL DISEÑO DEL CONTROLADOR 14

1.2 GENERALIDADES DE LOS MOTORES CD EN SISTEMAS DE CONTROL 17

1.3 COMPONENTES DE LOS SISTEMAS DE CONTROL 18

1.3.1 Potenciómetros de Control 18

2. VISIÓN GLOBAL DEL SISTEMA 23

2.1 SERVOSISTEMA MODULAR 23

2.2 FUENTE DE ALIMENTACIÓN 23

2.3 UNIDAD ATENUADORA 23

2.4 SERVOAMPLIFICADOR 24

2.5 MOTOR DC 24

2.6 UNIDAD DE CARGA 24

2.7 UNIDAD TACO GENERADORA 24

2.8 UNIDAD PRE - AMPLIFICADORA 25

2.9 UNIDAD DEL AMPLIFICADOR OPERACIONAL 25

2.10 POTENCIÓMETROS DE ENTRADA Y SALIDA 25

3. DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO ELECTRÓNICO DE CADA UNO DE LOS CIRCUITOS 26

3.1 UNIDAD AMPLIFICADORA 26

3.2 UNIDAD ATENUADORA 28

3.3 UNIDAD PREAMPLIFICADORA 29

3.4 SERVOAMPLIFICADOR 31

3.5 AMPLIFICADOR DIFERENCIAL CON RE 35

3.6 GANANCIA DEL AMPLIFICADOR DIFERENCIAL TOMANDO LA SALIDA DE TENSIÓN EN FORMA DIFERENCIAL 37

3.7 SALIDA DE TENSIÓN EN FORMA ASIMETRICA 37

3.8 TENSIÓN DESNIVEL DE ENTRADA 38

3.9 ESPEJO DE CORRIENTE 39

3.10 FUENTE DE PODER 40

3.11 POTENCIÓMETRO DE ENTRADA 42

3.12 AMPLIFICADOR NO INVERSOR 43

3.13 POTENCIÓMETRO DE SALIDA 44

3.14 SEGUIDOR DE TENSIÓN 45

3.15 UNIDAD TACOGENERADORA 46

CONCLUSIONES 48

RECOMENDACIONES 50

APORTES 51

BIBLIOGRAFÍA 52

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1. Compensación en serie o cascada 15

Figura 2. Compensación mediante realimentación. 15

Figura 3 Sistema de control PD en bloques. 16

Figura 4 Sistema de control con el control PI 16

Figura 5. Potenciómetro rotatorio de 10 vueltas 18

Figura 10. Servoamplificador puente tipo H 20

Figura 11. Servo Amplificador TÓTEM – POLE 21

Figura 12. Servoamplificador Tótem – Pole con etapa driver 22

Figura 13. Circuito de la Unidad Amplificadora 26

Figura 14. Circuito electrónico y equivalente del sumador inversor 27

Figura 15. Potenciómetros que conforman la unidad atenuadora 28

Figura 16. Circuito electrónico del pre-amplificadorLa constante de tiempo aplicada por C1 y R3, en la entrada Av4, se diseñó para simular una carga de gran inercia y fricción viscosa, la cual se determina por la constante de tiempo obtenida del paralelo de C1 y R3. 30

Figura 17. Circuito electrónico del servoamplificador 32

Figura 18. Circuito electrónico de un par diferencial. 33

Figura 19. Circuito electrónico del par diferencial

Figura 20. Circuito equivalente de un par diferencial 36

Figura 21. Circuito electrónico de salida de tensión en forma asimétrica 37

Figura 22. Circuito electrónico de la tensión de desnivel de entrada 38

Figura 23. Circuito Electrónico del espejo de corriente 39

Figura 24. Circuito electrónico de una fuente de poder 41

Figura 25. Circuito del potenciómetro de entrada 42

Figura 26. Circuito electrónico del amplificador no inversor 43

Figura 27. Circuito electrónico del potenciómetro de salida. 44

Figura 28 Circuito del seguidor de tensión 45

Figura 29. Circuito electrónico de la unidad tacogeneradora 47

LISTADO DE ANEXOS

Pág.

Anexo A. Diseño Mecánico de las Cajas 53
Anexo B. Potenciómetro de Entrada 74
Anexo C. Potenciómetro de Salida 80
Anexo D. Fuente 86
Anexo E. Preamplificador 92
Anexo F. Servoamplificador 98
Anexo G. Unidad Tacogeneradora 106
Anexo H. Unidad Amplificadora 111
Anexo I. Unidad Atenuadora 113
Anexo J. Mecanismo Completo 115
Anexo K. Otras Partes Mecánicas 116
Anexo L. Diagrama Esquemático y sus Conexiones en el Mecanismo 118

RESUMEN

TITULO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MÓDULO DIDÁCTICO PARA SISTEMAS AUTOMÁTICOS DE CONTROL ANALÓGICO*

AUTORES: ERIK JOSË VERA MERCADO
JOSÉ RUBIEL CARDENAS VANEGAS**

PALABRAS CLAVES: Módulo de Control Analógico, servo sistema modular.

DESCRIPCIÓN: En el presente proyecto se realizó el diseño y construcción de un módulo didáctico para sistemas automáticos de control analógico, involucrando dentro del plan de trabajo una serie de etapas que garantizan el desarrollo del servosistema modular, así: análisis previo de cada uno de los circuitos esquemáticos del módulo de referencia; rediseño de los circuitos esquemáticos a emplear; elaboración de piezas mecánicas; elaboración de los circuitos impresos; energización de la tarjetas y prueba de las salidas; y finalmente la integración de los circuitos en las carcasas.

El módulo de control analógico consta de un servosistema modular, que comprende una fuente dedicada de potencia, un servo amplificador, dos motores, una unidad taco generadora con engranajes reductores, otra serie de transductores y módulos, que combinados forman sistemas de control DC, AC, o híbridos. Conjunto diseñado con el objetivo de realizar prácticas didácticas de laboratorio relacionadas con las técnicas de control en lazo cerrado.

Todo lo anterior permitió el desarrollo del módulo didáctico de control analógico superando inconvenientes relacionados con falta de precisión como las soldaduras utilizadas en las tarjetas electrónicas, ausencia de mano de obra calificada, asesoría de expertos en utilización de materiales, tener presentes las soluciones simples como ideas potenciales y que los modelos matemáticos que representan la teoría del control clásico se originan a través de la experimentación con modelos físicos y no de forma contraria.

Finalmente, en el módulo didáctico se pueden desarrollar satisfactoriamente practicas de hardware como obtención de la constante del tacogenerador y aplicar carga al motor; control de velocidad del motor y control de posición del motor. De igual forma se hace explicita la recomendación para implementar prácticas adicionales de laboratorio con este módulo analógico.

---

* Trabajo de Grado.

** Facultad de Ingeniería Físico Mecanica, er, JAIME GUILLERMO BARRERO PÉREZ

SUMMARY

TITLE: I design and Construction o a Didactic Module for Automatic Systems of Analogical Control.*

AUTHOR: ERIK JOSË VERA MERCADO
JOSÉ RUBIEL CARDENAS VANEGAS**

WORDS KEY: Module of Analogical Control, servo system to modulate.

DESCRIPTION: Presently project was carried out the design and construction of a didactic module for automatic systems of analogical control, involving this way inside the work plan a series of stages that you/they guarantee the development of the servosistema to modulate,: previous analysis of each one of the schematic circuits of the reference module; I redraw from the schematic circuits to use; elaboration of mechanical pieces; elaboration of the printed circuits; energización of the cards and test of the exits; and finally the integration of the circuits in the carcasas.

The module of analogical control consists of a servosistema to modulate that understands a dedicated source of power, a servo amplifier, two motors, a generating unit taco with engagements reducers, another series of transducers and modules that combined they form control systems AD, AC, or hybrid. Group designed with the objective of carrying out practical didactic of laboratory related with the control techniques in closed knot.

All the above-mentioned allowed the development of the didactic module of analogical control overcoming inconveniences related with lack of precision like the weldings used in the electronic cards, absence of qualified manpower, experts' consultantship in use of materials, to have present the simple solutions as ideas potentials and that the mathematical models that represent the theory of the classic control originate through the experimentation with physical models and not in a contrary way.

Finally, in the didactic module they can be developed satisfactorily you practice of hardware like obtaining of the constant of the tacogenerador and to apply load to the motor; control of speed of the motor and control of position of the motor. Of equal it forms it becomes explicit the recommendation to implement practical additional of laboratory with this analogical module.

---

* Work the Grade.

** Ability of Engineering Physical Mechanics. Magister, JAIME GUILLERMO BARRERO PÉREZ

INTRODUCCIÓN

Es indudable que el consumo generalizado de tecnología extranjera tiene a países del tercer mundo, como Colombia, en un estado de dependencia productiva y tecnológica, pues en diferentes campos, incluido el de la ingeniería, es necesario importar desde las más pequeñas piezas hasta grandes maquinarias desarrolladas en los países industrializados; productos, que en muchos casos no se constituyen en soluciones viables por el contexto económico y social del medio colombiano, por las necesidades de producción y por los elevados costos que implica su sostenimiento, funcionamiento y mantenimiento. Por esta razón se plantea la realización de proyectos que impliquen la transferencia de tecnología teniendo en cuenta rediseños acorde a los propios recursos y a las necesidades particulares de cada empresa.

Otro aspecto relevante es la necesidad de implementar estrategias de aprendizaje, como el diseño de prácticas de laboratorios que reflejen la teoría de sistemas de control analógico, para que permitan el desarrollo de capacidades en los futuros ingenieros electrónicos y eléctricos. Se propone entonces el diseño y construcción de un Módulo Didáctico para Sistemas de Control Analógico que pueda ser utilizado en el Laboratorio de Control de la Universidad Industrial de Santander.

La construcción de este sistema se considera como apto para un proyecto de grado por contemplar procesos propios de un egresado en ingeniería eléctrica como son: la definición de alternativas para la construcción del sistema; la selección de la mejor opción, de acuerdo con las condiciones tecnológicas del medio Santandereano; la resolución de problemas ingenieriles (implícitos en este tipo de proyectos) y el montaje y

funcionamiento del Módulo Didáctico para Sistemas de Control Analógico. A su vez, es una propuesta interesante ya que cubre los requerimientos actuales de la institución, sin necesidad de comprar en la casa comercial Feedback en Inglaterra e importar un segundo sistema.

Es así como en el presente documento se presenta en primera medida algunas generalidades del diseño de controladores y motores DC, seguido de la visión general del sistema implementado que se complementa con la descripción textual y gráfica del desarrollo del módulo de control analógico, donde se incluyen los circuitos impresos, la parte final presenta las fotografías del módulo final y su esquema de funcionamiento.

1. DISEÑO DE SISTEMAS DE CONTROL ANALÓGICO

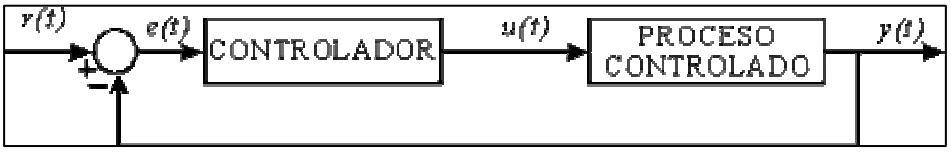
1.1 GENERALIDADES DEL DISEÑO DEL CONTROLADOR

Normalmente en un proceso de diseño la tendencia general es la escogencia del controlador más simple, que a su vez, cumpla con todas las especificaciones del sistema. Sin embargo, a la hora de decidirse por un controlador específico, es necesario acudir tanto a la experiencia del diseñador como a la intuición, ya que el diseño por ser una actividad creativa que tiene como propósito establecer diversas cualidades que inevitablemente convierten la ciencia en un arte.

Un sistema de control analógico es aquel que involucra diferentes configuraciones electrónicas, para establecer una norma de comparación por verificación de los resultados de una acción o medición. El diseño de los sistemas de control involucra tres etapas a saber: especificar el diseño del sistema (el qué y el cómo hace una tarea un sistema), determinar la configuración electrónica de estabilización del sistema, que por lo general son coeficientes de una o más funciones de transferencia que componen el controlador y finalmente, establecer la ganancia para alcanzar los objetivos del diseño.

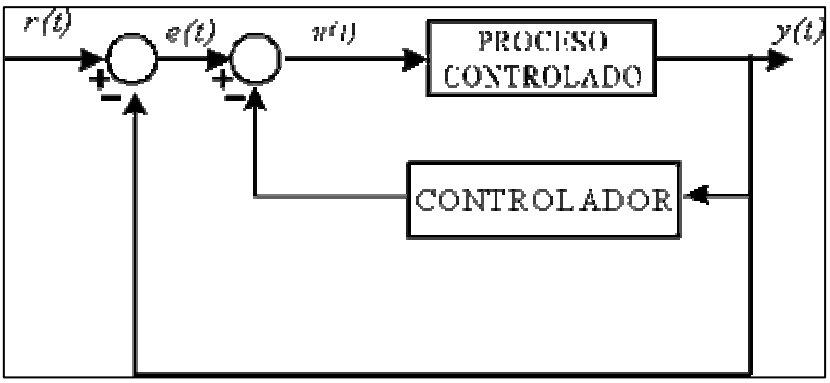
La mayoría de los métodos de diseño de sistemas de control convencionales se basan en el diseño de una configuración fija, es decir, una configuración básica que especifica la ubicación del controlador, servomotor, servoamplificador, fuente, entre otros, dentro del proceso controlado, como se observa en la figura.

Figura 1. Compensación en serie o cascada



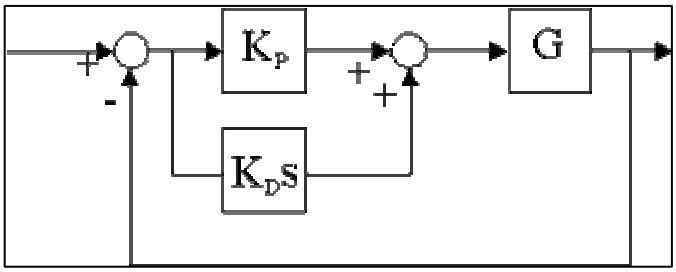
Dentro del diseño del sistema de control analógico fijo, figura anterior, se estipula la retroalimentación negativa, como garantía de mayor estabilidad al sistema, dando lugar a un esquema diferente, tal como se muestra en la siguiente figura.

Figura 2. Compensación mediante realimentación.



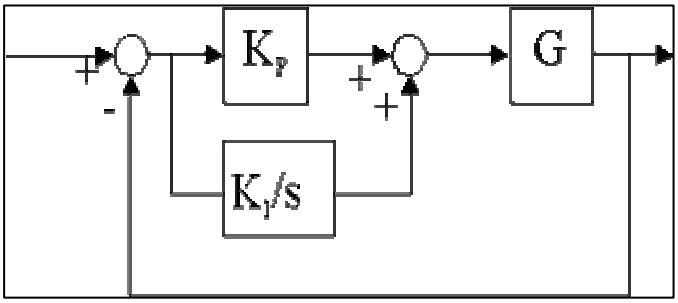
Uno de los controladores más ampliamente empleado es el controlador PID, (proporcional, integral, derivativo), realimentado con un compensador PD o proporcional derivativo con la función de transferencia, como se observa en la figura.

Figura 3 Sistema de control PD en bloques.



La parte integral del controlador PID produce una señal que es proporcional a la integral con respecto al tiempo de la entrada del controlador. En la figura se ilustra un sistema con controlador PI en serie.

Figura 4 Sistema de control con el control PI



Aun cuando el compensador PD puede añadir amortiguamiento a un sistema y no afectar la respuesta en estado estable, el controlador PI mejora la estabilidad relativa y el error en estado estable simultáneamente, incrementando el tiempo de levantamiento.

1.2 GENERALIDADES DE LOS MOTORES CD EN SISTEMAS DE CONTROL

Los motores de corriente directa (CD) son una de las fuentes motrices más ampliamente usadas en la industria actualmente, puesto que los avances tecnológicos han permitido la migración de los servomotores pequeños tipo CA para procesos de control. Los motores CA son más difíciles de controlar, especialmente para control de posición, por sus características no son lineales. Por otro lado, los motores de CD son más caros debidos a las escobillas y conmutadores, y los motores de CD de flujo variable son adecuados sólo para ciertos tipos de aplicaciones de control. Antes de que la tecnología de imán permanente se desarrollara completamente, el par por unidad de volumen o peso de un motor de CD con un campo de imán permanente estaba muy lejos de lo deseado.

Actualmente con el desarrollo de los imanes de “tierras raras”, es posible alcanzar una alta relación par-volumen en motores de CD de imán permanente a un costo razonable. Además los avances alcanzados en la tecnología de escobillas y conmutadores hacen que los motores prácticamente no necesiten mantenimiento.

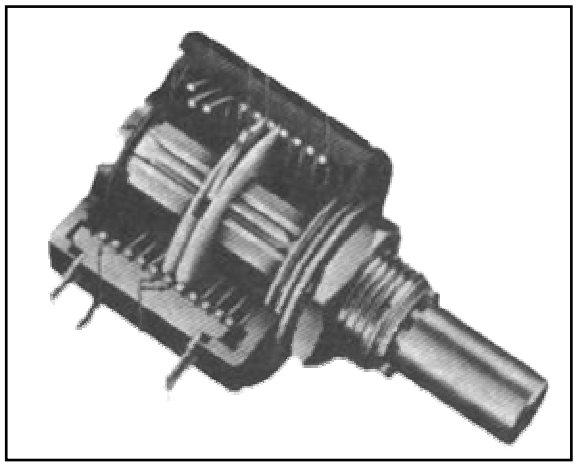
El motor de CD es básicamente un transductor de par que convierte energía eléctrica en energía mecánica. El par desarrollado en el eje del motor es directamente proporcional al flujo en el campo y a la corriente en la armadura. También se genera una diferencia de tensión entre los terminales del motor (fuerza contraelectromotriz) la cual es proporcional a la velocidad del eje y tiende a oponerse al flujo de corriente.

1.3 COMPONENTES DE LOS SISTEMAS DE CONTROL

1.3.1 Potenciómetros de Control. El potenciómetro de control es un transductor electromecánico que desarrolla a la salida una señal eléctrica proporcional al producto de la señal de entrada por el ángulo de giro de su eje, o por el desplazamiento lineal de su cursor sobre una resistencia conductora.

En control es más útil el potenciómetro rotatorio de una o varias vueltas, con movimiento rotacional limitado o ilimitado. Cuando la gráfica del ángulo de giro del eje contra la diferencia de tensión en los terminales de salida es una línea recta, el potenciómetro es lineal.

Figura 5. Potenciómetro rotatorio de 10 vueltas



Algunas de las características más importantes de los potenciómetros de control son:

Resistencia: Se refiere específicamente al rango de su valor óhmico, además de sus cualidades agregadas como constancia a los cambios de temperatura sobre ciertos límites.

Linealidad: Esta condición puede ser de dos casos, a) Linealidad independiente, que corresponde a la linealidad del potenciómetro con respecto a la mejor línea recta que se ajusta a su característica de salida. b) Linealidad con referencia cero, que es la linealidad con respecto a la mejor línea recta que pasa por el punto de rotación cero.

Resolución: Corresponde a la desviación positiva o negativa con respecto a la respuesta ideal de voltaje lineal del potenciómetro, a medida que el contacto deslizante se desplaza sobre el elemento resistivo.

En general los potenciómetros de plástico conductivo son los utilizados para control de precisión, los cuales poseen como ventaja una resolución infinita, larga vida rotacional, salida bien plana y bajo nivel de ruido.

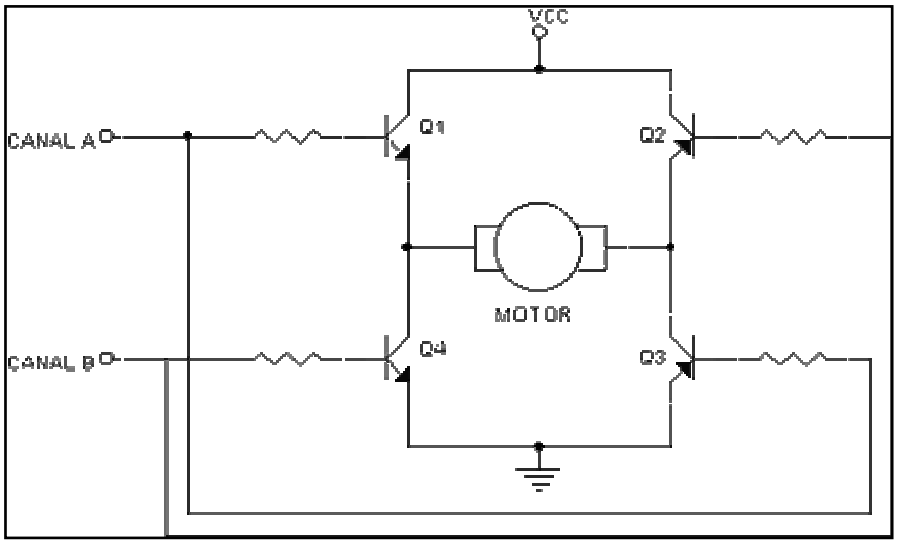
Servoamplificadores

El servoamplificador es un circuito de "potencia" que acepta una señal de muy bajo nivel (señal de control) para proveer voltajes o corrientes positivas o negativas de valor superior y estable, que se puedan aplicar sobre un activador dinámico (Motor).

Aún cuando se dan distintas configuraciones de los servoamplificadores existen dos circuitos de reconocida aplicación: el Tipo H y la configuración Tótem- Pole.

Servoamplificador puente tipo H: Es un circuito a transistores para control bidireccional de los servomotores. Consta de 4 switches ó transistores Q1, Q2, Q3, Q4 que pueden controlar el flujo de corriente de doble circuito, como se observa en la figura.

Figura 6. Servoamplificador puente tipo H

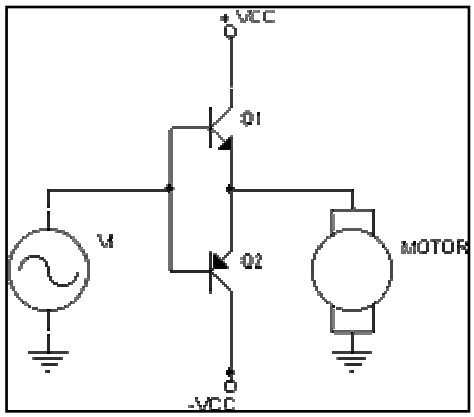


La maniobra de éstos cuatro transistores con las dos señales de entrada origina cuatro estados de control sobre el motor que se presentan a través de la siguiente tabla:

CANAL		INTERRUPTOR O SWITCH				ESTADO DEL MOTOR
A	B	Q1	Q2	Q3	Q4	
Alto	Alto	ON	ON	ON	ON	Frenado dinámico
Alto	Bajo	ON	OFF	ON	OFF	Giro directo
Bajo	Alto	OFF	ON	OFF	ON	Giro inverso
Bajo	Bajo	OFF	OFF	OFF	OFF	Frenado

Servoamplificador TÓTEM – POLE: La estructura básica de éste amplificador se establece sobre dos transistores clase B como se observa en la siguiente figura.

Figura 7. Servo Amplificador TÓTEM – POLE

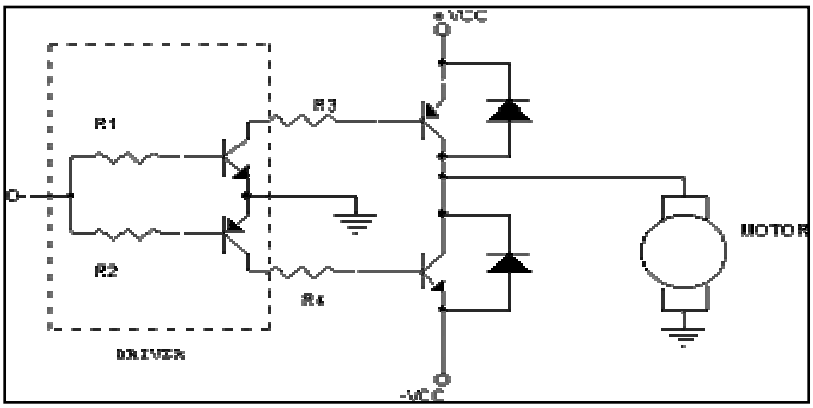


Cada uno de los transistores amplifica un solo semiciclo de la señal de entrada común, lo cual implica fijar el punto de operación en la región de corte de tal manera que al presentarse el semiciclo correspondiente de Vi el transistor Q1 pase a región activa o de conducción y Q2 a corte, cuando el semiciclo sea opuesto, se invierten las funciones.

Dicha disposición se denomina como de “simetría complementaria”, es decir, de iguales características eléctricas pero de signos opuestos al ser uno PNP y el otro NPN.

Aunque esta configuración produce una ganancia de tensión próxima a 1 y una ganancia de corriente elevada, se puede mejorar al acoplar una etapa amplificadora por las bases de los transistores existentes con un par de transistores complementarios la cual se denomina como “etapa driver”, como se observa en la figura siguiente.

Figura 8. Servoamplificador Tótem – Pole con etapa driver



2. VISIÓN GLOBAL DEL SISTEMA

2.1 SERVOSISTEMA MODULAR

El servosistema modular está diseñado para realizar experiencias con estudiantes de sistemas de control, especialmente para la comprensión de técnicas de control en lazo cerrado.

Este sistema comprende: una fuente dedicada de potencia, un servo amplificador, dos motores, una unidad taco generadora con engranajes reductores, otra serie de transductores y módulos, que combinados forman sistemas de control DC, AC, o híbridos.

2.2 FUENTE DE ALIMENTACIÓN

La unidad se alimenta con tensión de entrada de 125V o 230V, 50/60 Hz, 40 VA. Proporciona: una salida de 24V DC 2A no regulados, conectados directamente al servo amplificador con un cable de 8 vías; otra salida DC de 15V, 20 mA; dos tensiones senoidales de 9V rms desfasadas 180º, una última de 18V rms.

2.3 UNIDAD ATENUADORA

Este módulo contiene dos potenciómetros lineales de 10K ohmios con una escala de 1-10 indicada sobre el panel. La unidad puede proporcionar una tensión de referencia cuando está conectada a una fuente DC o como un control de ganancia cuando está conectada a la salida de un amplificador.

2.4 SERVOAMPLIFICADOR

Unidad que se conecta al motor con un cable de 12 vías. Es un circuito protector que limita la corriente del motor en condiciones de sobrecarga. Permite llevar a cabo la alimentación del motor y la selección del sentido de giro por medio de elementos de electrónica de potencia. Recibe una señal que llega a un par diferencial y la amplifica para continuar hacia un amplificador de potencia tipo H y así controlar el sentido de giro del motor.

2.5 MOTOR DC

Este es un motor DC de imán permanente. El eje del motor posee una extensión para el montaje directo con un disco de freno o uno de inercia. También posee un adaptador para acoplarlo a la unidad tacogeneradora.

2.6 UNIDAD DE CARGA

Contiene un disco de freno. Este disco aparece acoplado al eje del motor. La carga del motor se puede variar de acuerdo con la posición del freno magnético.

2.7 UNIDAD TACO GENERADORA

Consta de un generador DC y un display de cristal líquido, posee un interruptor para seleccionar la medida a tomar (en RPM o en tensión DC). Además contiene una caja de engranajes para reducir la velocidad con una relación de 30:1.

2.8 UNIDAD PRE - AMPLIFICADORA

Este dispositivo provee la señal correcta para manejar el servo amplificador. Una señal positiva aplicada a cualquiera de las entradas produce una señal positiva en la salida superior. La otra salida se mantiene en cero. Una entrada negativa produce una salida positiva en el terminal inferior, permaneciendo la salida superior en cero. Un interruptor habilita una red de compensación interna.

2.9 UNIDAD DEL AMPLIFICADOR OPERACIONAL

Es un amplificador de propósito general con facilidad para múltiples entradas y diferentes arreglos de realimentación. Se utiliza para generar la señal de error en los sistemas de lazo cerrado, realizando la comparación de dos o más entradas. La constante de tiempo se puede variar para efectos de inestabilidad en el motor.

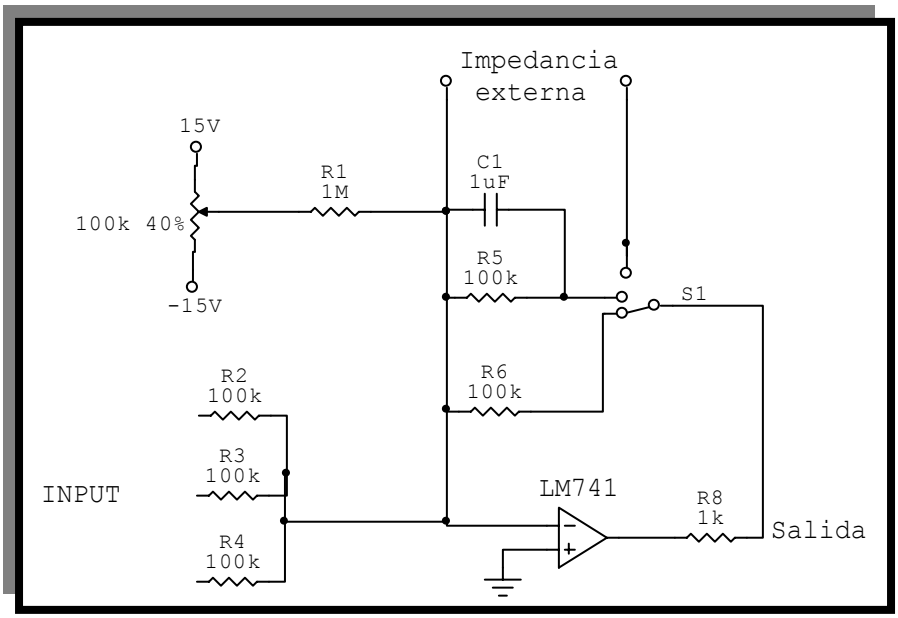
2.10 POTENCIÓMETROS DE ENTRADA Y SALIDA

Potenciómetros de semi-precisión, montados sobre diales indicadores de posición. El potenciómetro de salida contiene un eje para acoplarse a la unidad tacogeneradora.

3. DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO ELECTRÓNICO DE CADA UNO DE LOS CIRCUITOS

3.1 UNIDAD AMPLIFICADORA

Figura 9. Circuito de la Unidad Amplificadora



La unidad amplificadora es un circuito sumador ponderado, con tres sockets para señales de tensión de entrada y uno más para tensión variable, que se suministra a través del potenciómetro de 100K Ω, donde la impedancia de realimentación se controla a través de un conmutador de triple tiro y un solo polo, y puede ser una resistencia de 100K Ω, un capacitor de 1 μF en paralelo con una resistencia de 100 K Ω (ofrece una constante de tiempo de 0,1 s) o una impedancia externa.

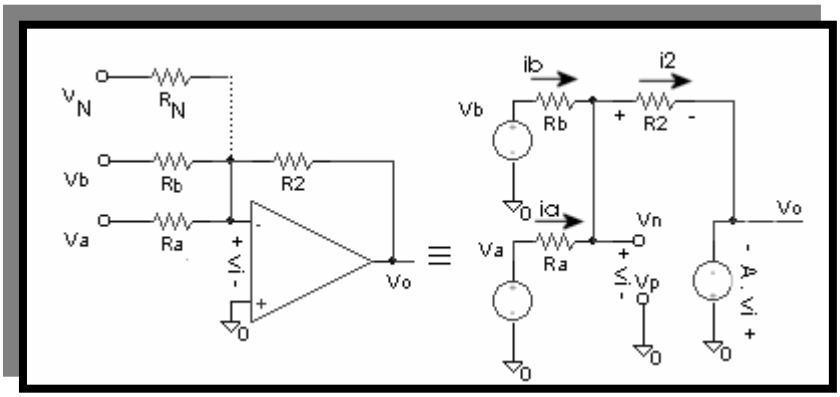
El funcionamiento de la unidad amplificadora es similar para

cuando la impedancia de realimentación es la resistencia de 100K Ω, o cuando es el capacitor de 1 μF en paralelo con una resistencia de 100 K Ω, porque el modulo se va a utilizar solo para señales de entrada DC, y por tal motivo la acción de filtro pasabaja que tendría el capacitor como realimentación no afecta la señal DC.

El potenciómetro ofrece un ajuste de tensión de +/- 1.5 V y el amplificador operacional es protegido de un corto circuito por la resistencia R8. La referencia del amplificador operacional es LM741.

El circuito del circuito sumador inversor de forma general se muestra en la siguiente figura.

Figura 10. Circuito electrónico y equivalente del sumador inversor



Y su función de transferencia se halla así.

$i_2 = i_A + i_B$ siendo: Ec. (1)

$$i_A = \frac{V_A - v_n}{Ra} \qquad i_B = \frac{V_B - v_n}{Rb} \qquad i_2 = \frac{v_n - V_o}{R2}$$ Ec. (2)

v_i es aproximadamente = 0V

v_n es aproximadamente = 0V

luego: $-\frac{V_o}{R2} = \frac{V_A}{Ra} + \frac{V_B}{Rb}$ $V_o = -R2 \cdot \left(\frac{V_A}{Ra} + \frac{V_B}{Rb}\right)$ Ec. (3)

si Ra=Rb=R1

$V_o = -R2 \cdot \left(\frac{V_A}{Ra} + \frac{V_B}{Rb}\right)$ luego:: $V_o = -\frac{R2}{R1} \cdot (V_A + V_B)$ Ec. (4)

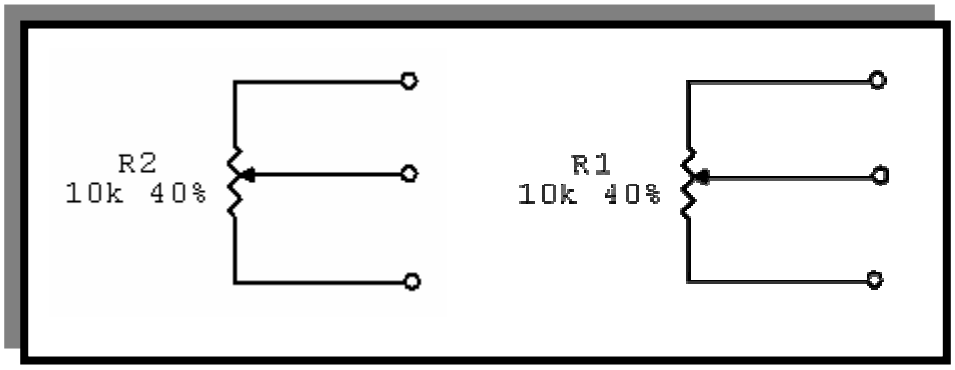
Y en general,

$$V_o = -\frac{R2}{R1} \cdot \left[\sum_{n=A}^{N} (V_A + V_B + \cdots + V_N)\right] \quad \text{Ec. (5)}$$

3.2 UNIDAD ATENUADORA

La unidad atenuadora no tiene circuito, solo esta conformada como se observa en la figura por dos potenciómetros de 10KΩ.

Figura 11. Potenciómetros que conforman la unidad atenuadora



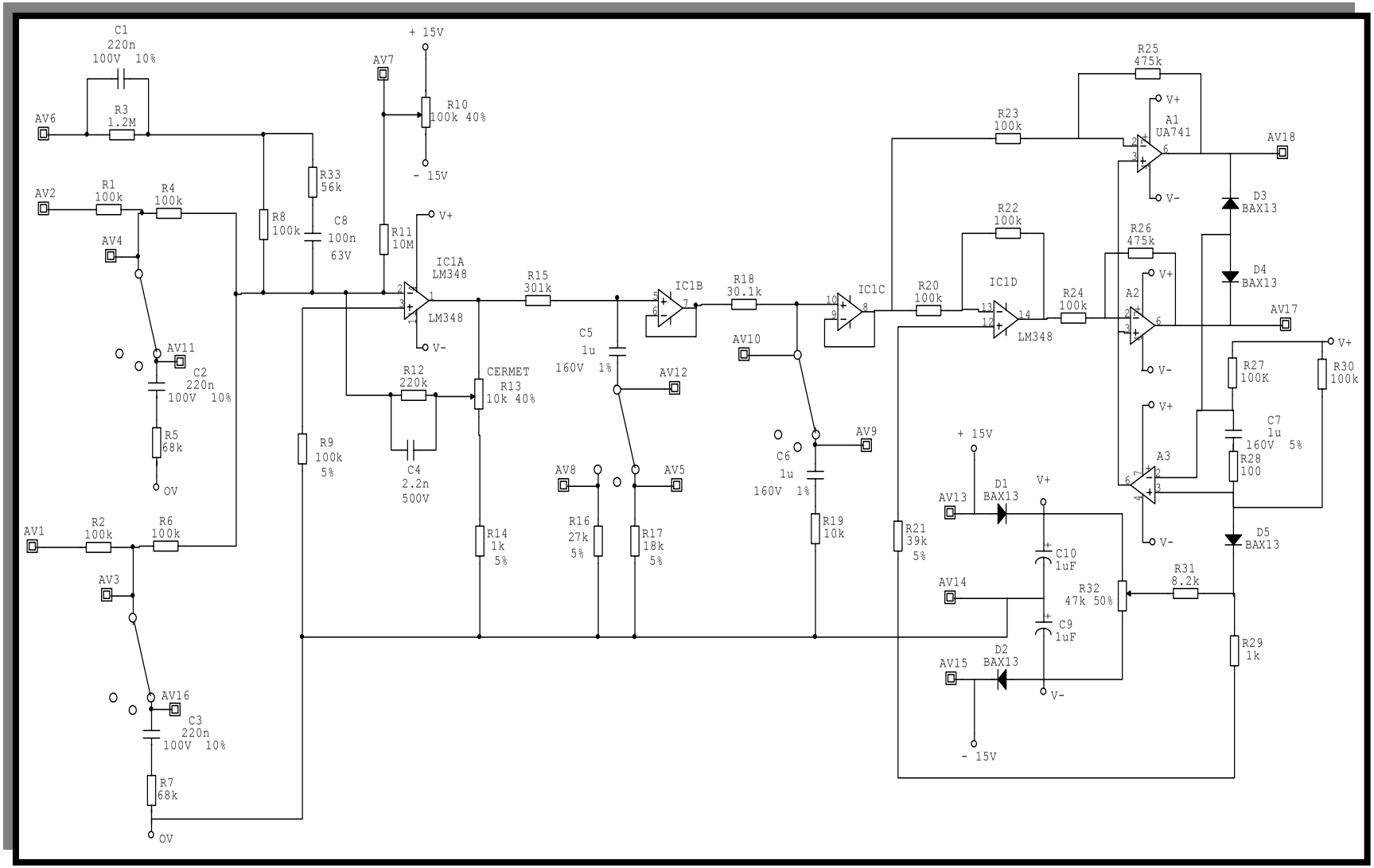
3.3 UNIDAD PREAMPLIFICADORA

El preamplificador provee dos señales de salida al servoamplificador. Dependiendo de la conexión de estas salidas al servoamplificador se puede controlar el sentido de giro del motor.

Dos entradas se pueden conectar, a la entrada del servo amplificador las cuales se van a sumar por la configuración del amplificador operacional IC1A. Este primer amplificador operacional también tiene otra entrada en Av4, la cual también se sumaria con las otras entradas, pero escalada por un factor multiplicador, debido a que a que la impedancia que afecta esta señal a la entrada es diferente a la de la entrada Av1 y Av2. Hay otra entrada que varia de 300mV a -300mV, y se aplica a través de un potenciómetro lineal externo, de 10K Ω, que el usuario puede controlar.

Ver figura siguiente.

Figura 12. Circuito electrónico del pre-amplificadora. La constante de tiempo aplicada por C1 y R3, en la entrada Av4, se diseñó para simular una carga de gran inercia y fricción viscosa, la cual se determina por la constante de tiempo obtenida del paralelo de C1 y R3.



Los dos amplificadores siguientes son simplemente seguidores de tensión, cuando el conmutador està en modo normal, pero si se desea trabajar en compensación AC, o con un τ definido, lo que se aplica en el circuito es una red RC, a la salida de los seguidores de tensión.

El siguiente amplificador trabaja en configuración inversora con ganancia unitaria y el segundo seguidor de tensión trabaja en modo “push-pull” con los amplificadores A1 y A2, los cuales tienen la entrada no invertida conectada con la salida del amplificador A3.

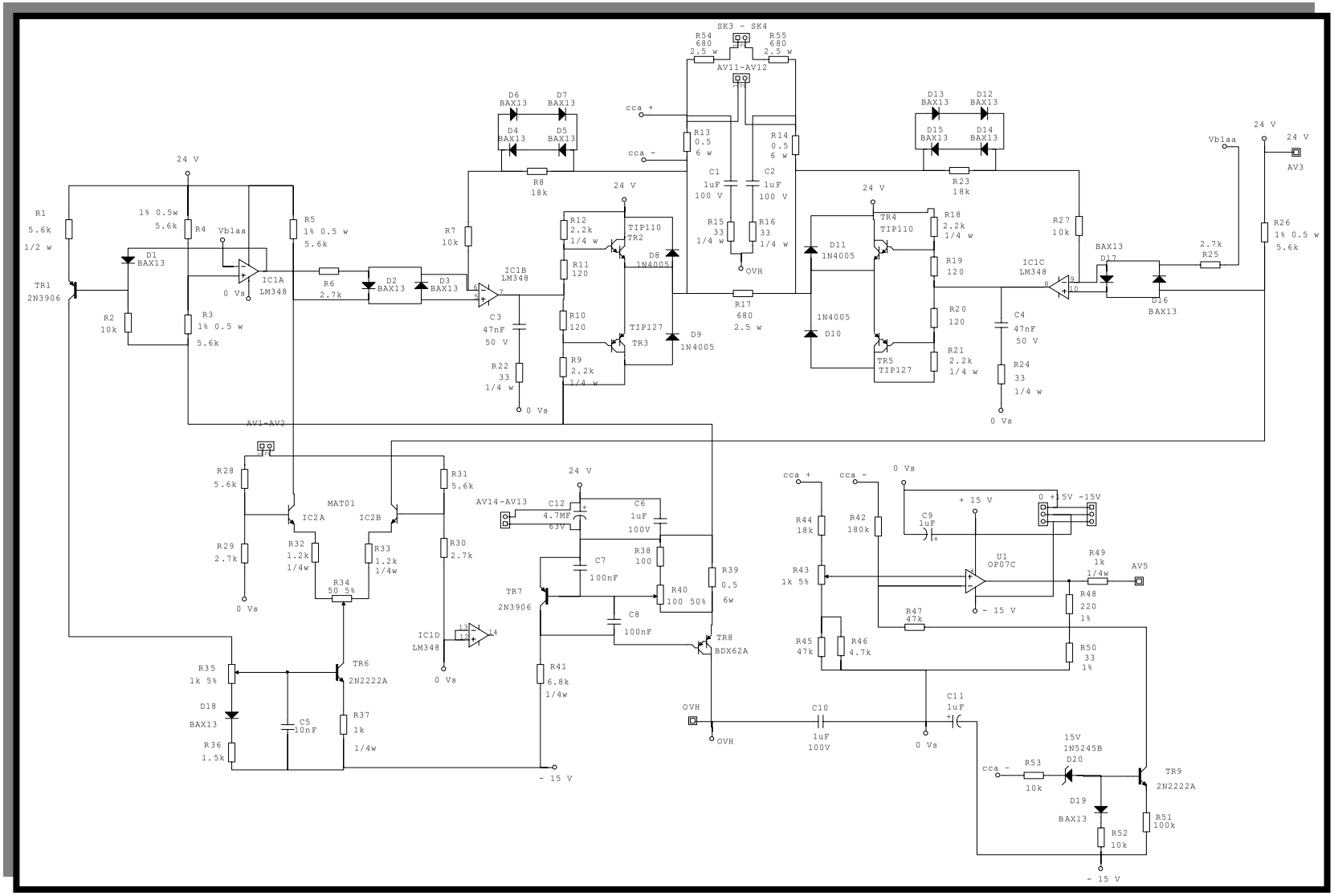
Cuando no hay entradas el potenciómetro lineal R10 y el trímer R32 se ajustan tal que la salida sea de +/- 1,2 V. R13 debe ser ajustada para ganancia mínima.

3.4 SERVOAMPLIFICADOR

El servoamplificador opera básicamente con un par diferencial y un amplificador de potencia tótem-polem, la señal de entrada ingresa al par diferencial, luego va al amplificador de potencia.

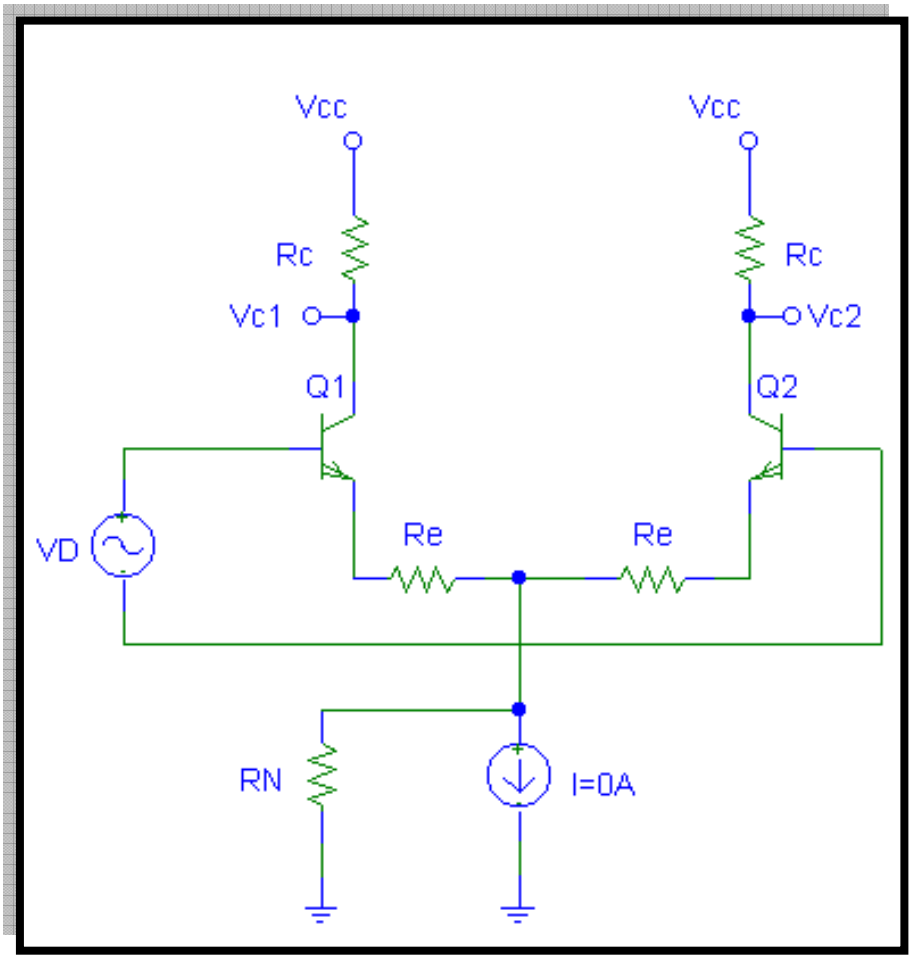
También hay un monitor de la corriente entregada al motor, sin embargo esta función también la hace el amperímetro que està ubicado en la fuente, así que específicamente esta parte del circuito no se utiliza.

Figura 13. Circuito electrónico del servoamplificador



El análisis del par diferencial y el espejo de corriente es el siguiente:

Figura 14. Circuito electrónico de un par diferencial.



$$I_{E1} = \frac{I}{2} + \Delta I \qquad I_{C1} = \alpha\left(\frac{I}{2} + \Delta I\right)$$

$$I_{E2} = \frac{I}{2} - \Delta I \qquad I_{C2} = \alpha\left(\frac{I}{2} - \Delta I\right)$$

Ec. (6)

$$-v_{CC}+\alpha\left(\frac{I}{2}-\Delta I\right)R_C+v_{C2}=0$$

$$v_{C2}=v_{CC}-\alpha I_{C1}=\alpha\left(\frac{I}{2}-\Delta I\right)R_C$$

Ec. (7)

$$-v_{CC}+\alpha\left(\frac{I}{2}+\Delta I\right)R_C+v_{C1}=0$$

$$v_{C1}=v_{CC}-\alpha I_{C1}=\alpha\left(\frac{I}{2}+\Delta I\right)R_C$$

Ec. (8)

$$v_D=v_{C1}-v_{C2}$$

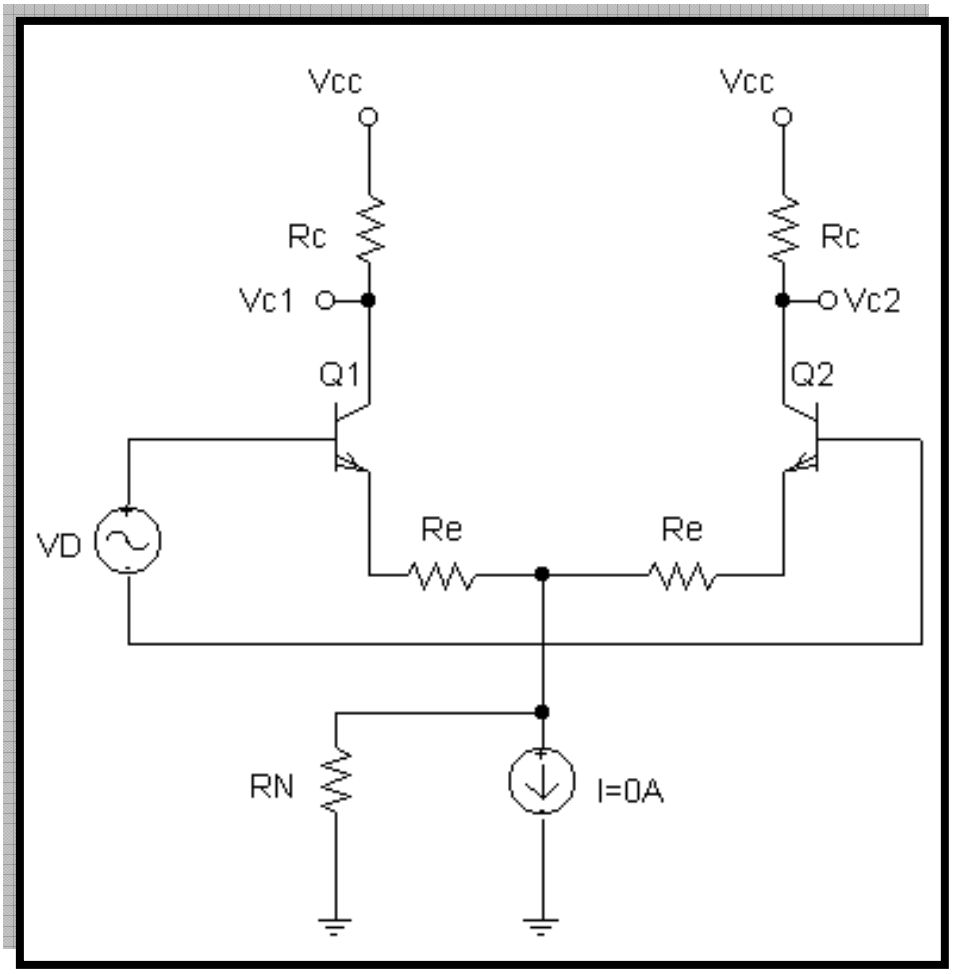
$$v_D=v_{CC}-\alpha\left(\frac{I}{2}+\Delta I\right)R_C+v_{C2}-v_{CC}+\alpha\left(\frac{I}{2}-\Delta I\right)R_C+v_{C2}$$

Ec. (9)

$$v_D=-2\alpha\Delta IR_C$$

3.5 AMPLIFICADOR DIFERENCIAL CON RE

Figura 15. Circuito electrónico del par diferencial



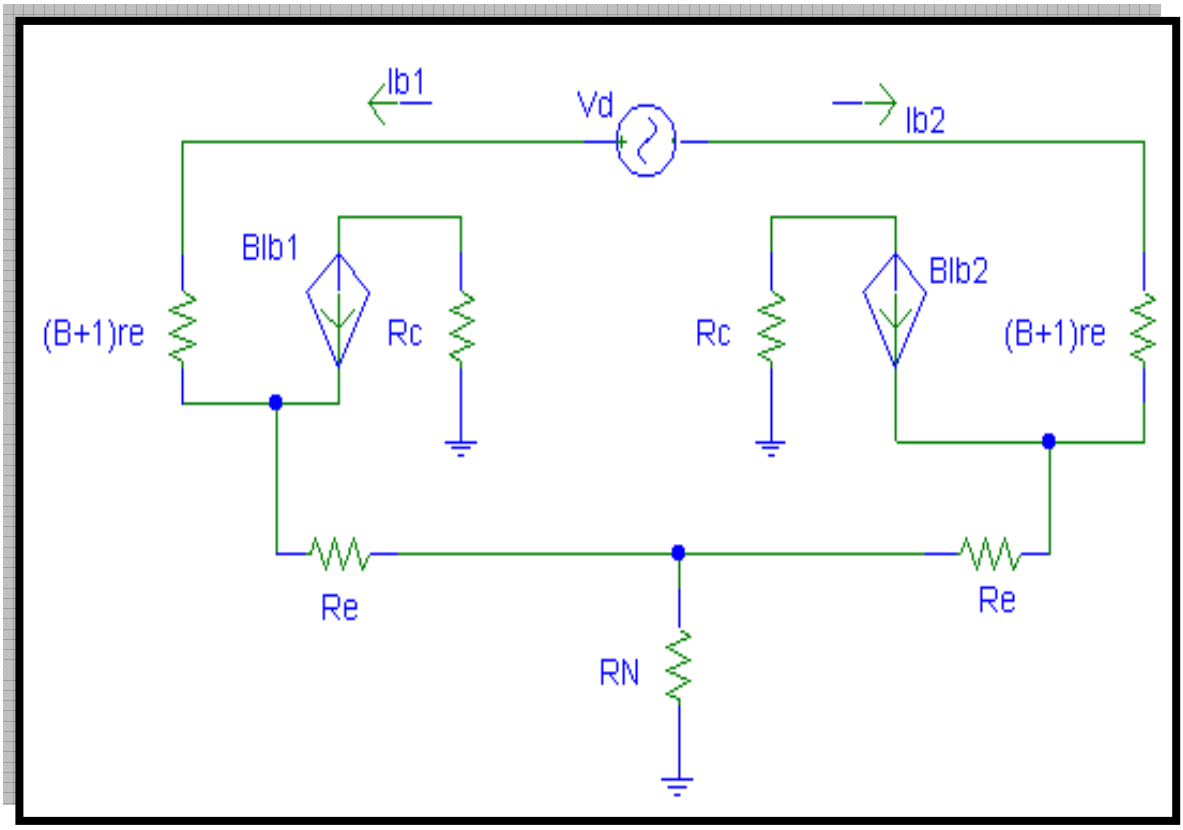
$$R_{idm}=\frac{v_d}{i_b} \qquad re=\frac{v_T}{I_e}=\frac{v_T}{I/2}=\frac{2v_T}{I} \qquad I_e=(\beta+1)*I_b \qquad \text{Ec. (10)}$$

$$-v_D + I_e\left(re + 2R_E + re\right) = 0$$

$$I_e = \frac{v_D}{2R_E + 2re} = (\beta + 1) * i_b \qquad \text{Ec. (11)}$$

$$\frac{v_D}{i_b} = R_{idm} = (\beta + 1)(2re + 2R_E) \qquad \text{Ec. (12)}$$

Figura 16. Circuito equivalente de un par diferencial



3.6 GANANCIA DEL AMPLIFICADOR DIFERENCIAL TOMANDO LA SALIDA DE TENSIÓN EN FORMA DIFERENCIAL

$$A_d = \frac{v_{c1} - v_{c2}}{v_D}$$

$$I_C = \frac{\alpha v_D}{2re + 2R_E}$$

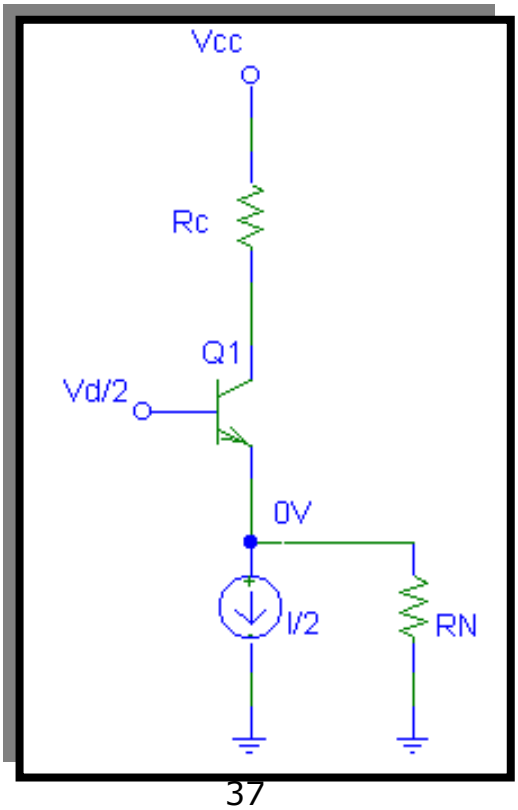
$$-v_{CC} + R_C I_C + v_{C1} = 0 \qquad v_{C1} = \frac{-\alpha v_D R_C}{2re + 2R_E} \quad \text{Ec. (13)}$$

$$v_{C2} = \frac{-\alpha v_D R_C}{2re + 2R_E} \quad \text{Ec. (14)}$$

$$A_d = -\frac{\frac{2\alpha v_D R_C}{2re + 2R_E}}{v_D} = -\frac{\alpha R_C}{re + R_E} \quad \text{Ec. (15)}$$

3.7 SALIDA DE TENSIÓN EN FORMA ASIMETRICA

Figura 17. Circuito electrónico de salida de tensión en forma asimétrica

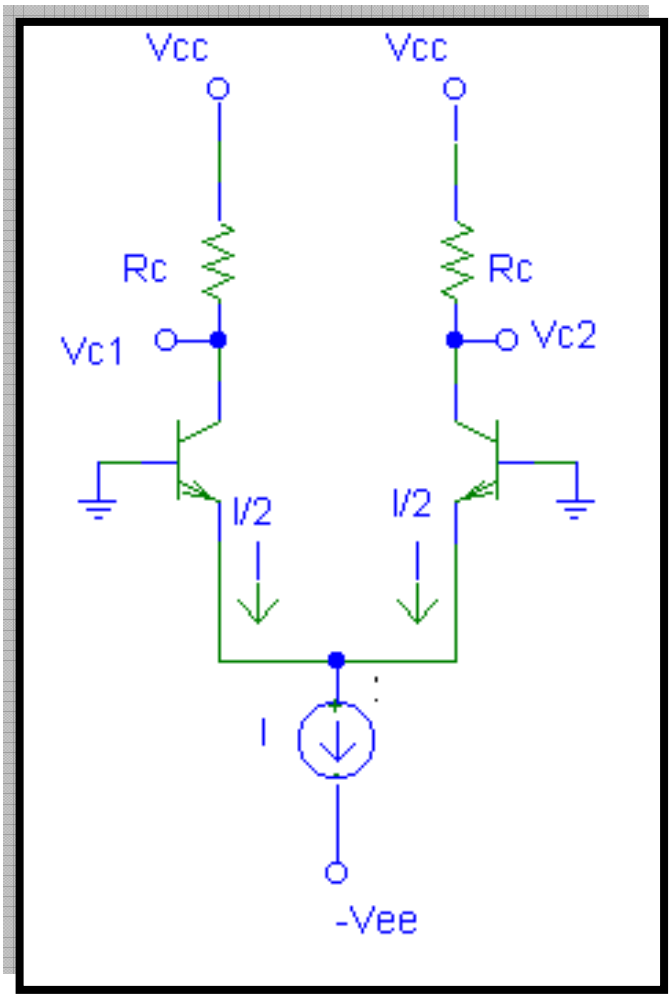


$$A_d = \frac{v_{C1}}{v_d} = -\frac{\beta i_b R_C}{v\pi} = -\frac{gmv\pi R_C}{v\pi} = -gmR_C \qquad \text{Ec. (16)}$$

$$\text{gm} = \frac{\alpha}{re} = \frac{\alpha I}{2v_T} \qquad \text{Ec. (17)}$$

3.8 TENSIÓN DESNIVEL DE ENTRADA

Figura 18. Circuito electrónico de la tensión de desnivel de entrada



$$\left.\begin{matrix} R_C + \Delta R_C/2 \\ R_C - \Delta R_C/2 \end{matrix}\right\} \text{Pr}\,ecisión \qquad v_{C1} = v_{CC} - \alpha I/2\left(R_C + \Delta R_C/2\right) \qquad \text{Ec. (18)}$$

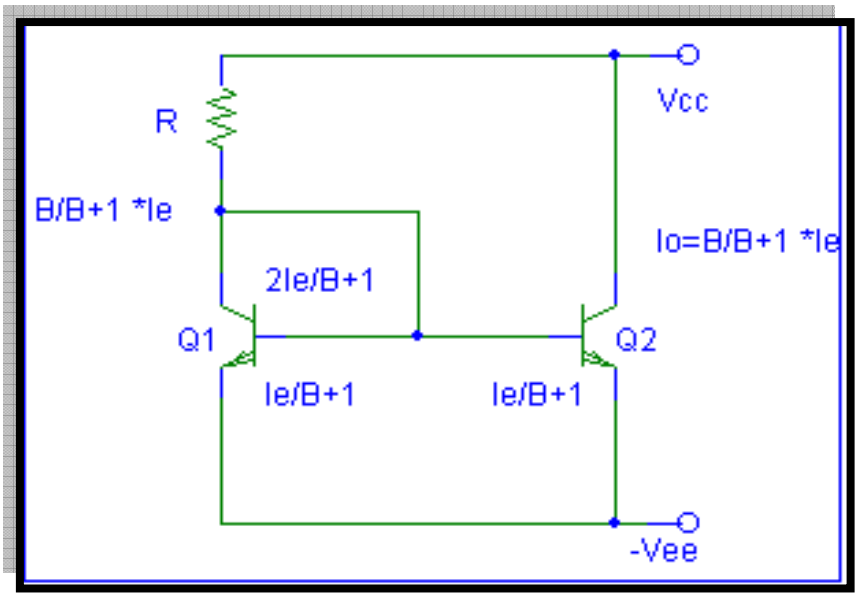
$$v_{OS} = \frac{v_O}{A_d} = \frac{v_{C1} - v_{C2}}{A_D} \qquad \text{Ec. (19)}$$

$$v_{C2} = v_{CC} - \alpha I/2\left(R_C - \Delta R_C/2\right) \qquad \text{Ec. (20)}$$

$$v_{OS} = \frac{\alpha I/2\,\Delta R_C/2 + \alpha I/2\,\Delta R_C/2}{\frac{\alpha I}{2v_T} R_C} = \frac{\Delta R_C}{R_C} * v_T \qquad \text{Ec. (21)}$$

3.9 ESPEJO DE CORRIENTE

Figura 19. Circuito Electrónico del espejo de corriente



$$I_{ref} = \frac{\beta + 2}{\beta + 1} * I_E \qquad \frac{I_0}{I_{ref}} = \frac{\beta / \beta + 1 * I_E}{\beta + 2 / \beta + 1 * I_E} = \frac{\beta}{\beta + 2} = \frac{1}{1 + 2/\beta}$$ Ec. (22)

3.10 FUENTE DE PODER

Este módulo provee todas las tensiones requeridas por el módulo:

- 24V DC no regulados a 2 A.
- +/- 15 V DC regulados a 0.5 A
- 18V AC a 1 A
- 9-0-9 V AC a 10 m A

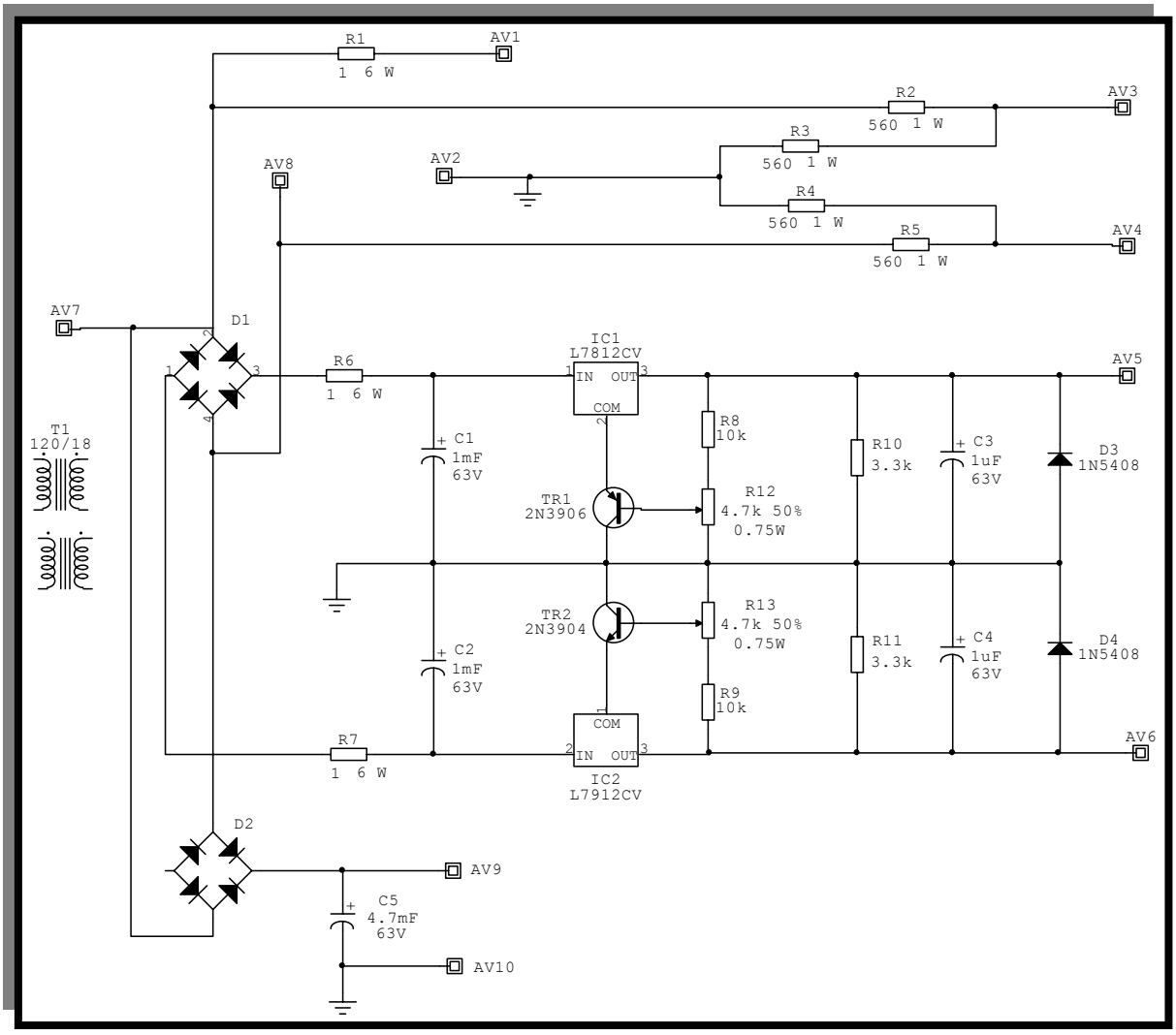
Las tensiones AC no se utilizan, puesto que el Control AC, no hizo parte del diseño del mòdulo.

Los 24 V DC de salida se obtienen a partir de un puente rectificador y son monitoreados por un amperímetro.

Los +/- 15V son derivados de un regulador de tensión de 12V, y se obtienen los 15V sumando un nivel de offset, que son ajustables mediante trimmers.

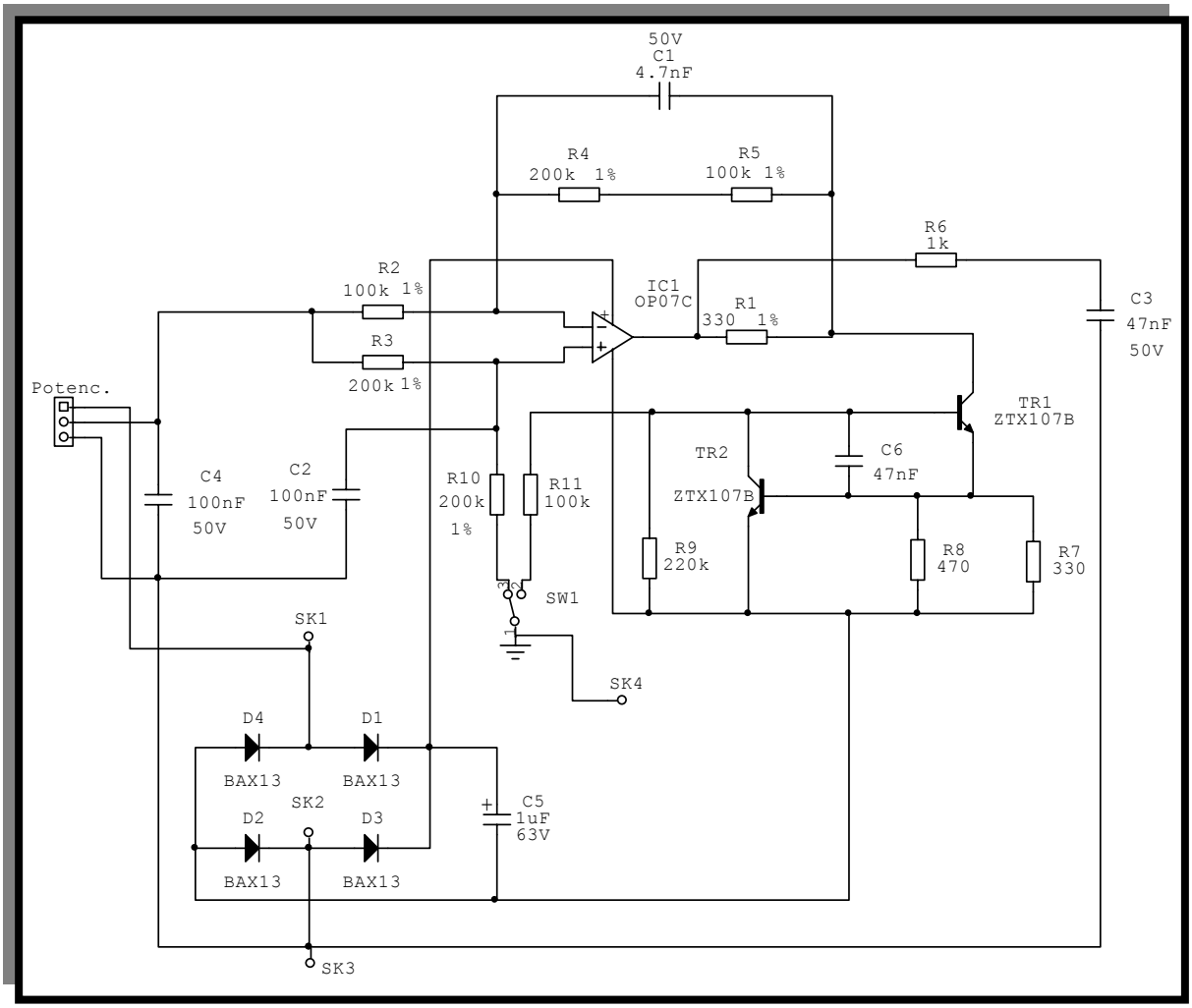
Ver Figura siguiente.

Figura 20. Circuito electrónico de una fuente de poder



3.11 POTENCIÓMETRO DE ENTRADA

Figura 21. Circuito del potenciómetro de entrada



Este módulo utiliza un potenciómetro con un ángulo de giro de 360º mecánicos sinfin de 10KΩ.

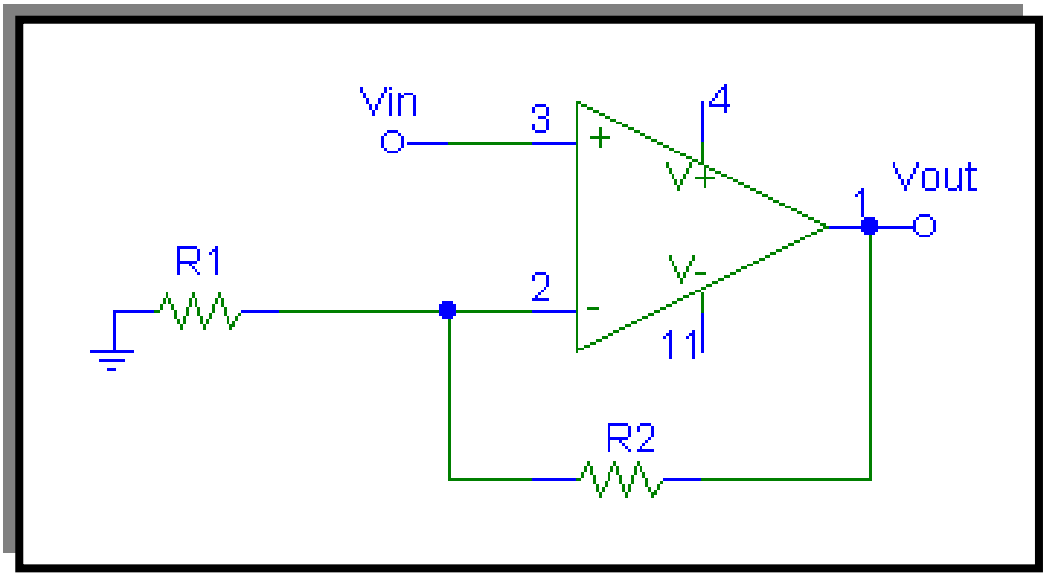
El circuito electrónico se reduce conceptualmente a un amplificador en configuración no inversora, al cual se le puede introducir un paso de 1 V.

El potenciómetro se ajusta para que cuando este en 5KΩ, el disco

estuviera en 0 grados, y para este ángulo se debe tener una tensión de 7.5V, cuando el módulo esta polarizado.

3.12 AMPLIFICADOR NO INVERSOR

Figura 22. Circuito electrónico del amplificador no inversor



Ganancia cuando A tiende a infinita

$$A = 1 + \frac{R_2}{R_1} \qquad \text{Ec. (23)}$$

Ganancia cuando A tiende a infinita

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{1 + R_2/R_1}{1 + \dfrac{1 + R_2/R_1}{A}}$$

$$i_1 = \frac{v_I}{R_1} = \frac{v_I - (v_{out}/A)}{R_1}$$

$$i_2 = \frac{v_0 - v_1}{R_2} = \frac{(v_1 - v_0/A) + v_0}{R_2} \qquad \text{Ec. (24)}$$

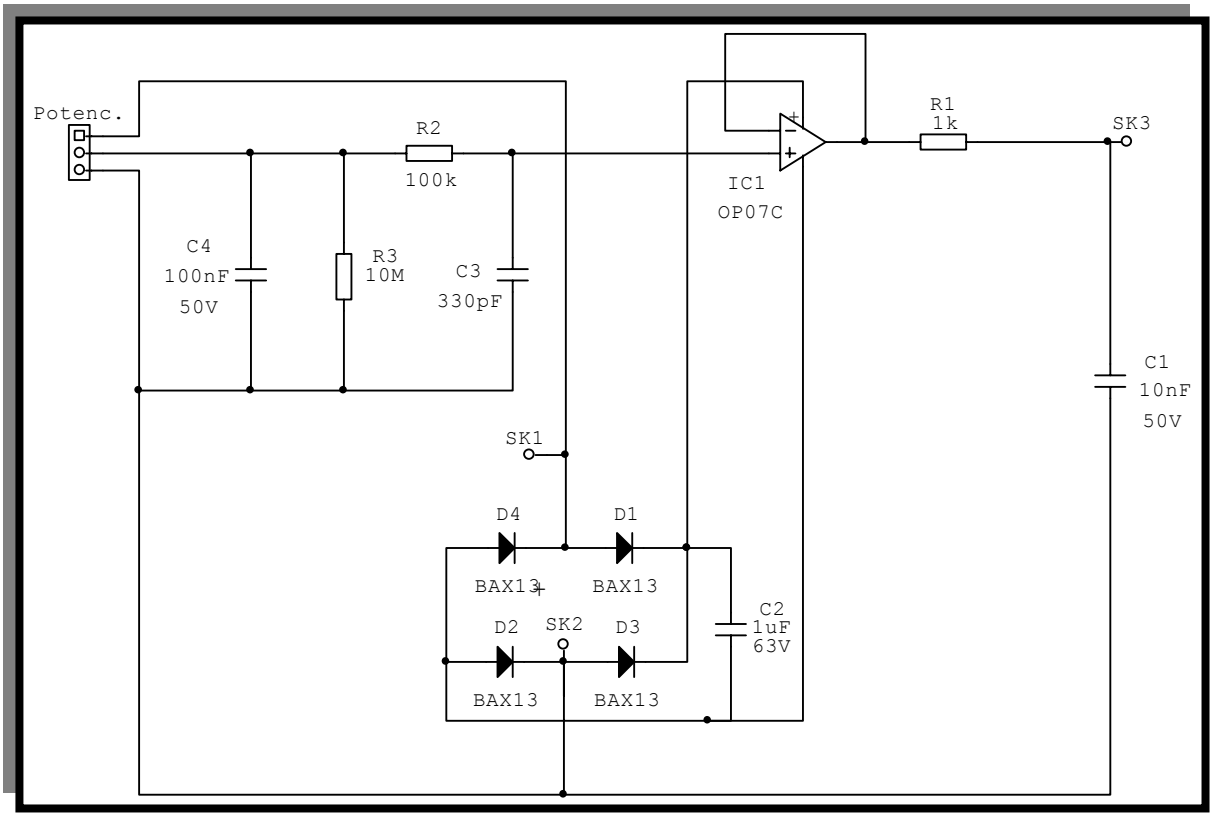
$$i_1 = i_2$$

Resistencia de entrada

$$R_{in} = \frac{v_{in}}{I_{in}} = \frac{v_{in}}{\frac{v_{in}}{R_{in}}} = R_1 \qquad \text{Ec. (25)}$$

3.13 POTENCIÓMETRO DE SALIDA

Figura 23. Circuito electrónico del potenciómetro de salida.

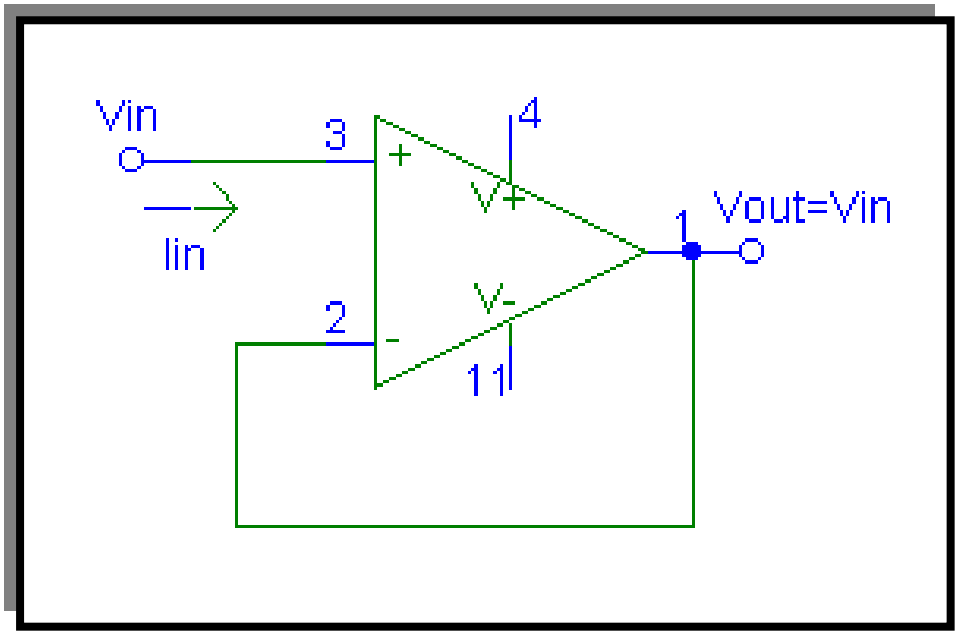


El potenciómetro de salida es un seguidor de tensión, por tal motivo existe una proporción entre los ángulos de giro del potenciómetro y la tensión de salida.

El potenciómetro se ajusta para que cuando este en 5KΩ, el disco estuviera en 0 grados, y para este ángulo se debe tener una tensión de 7.5V, cuando el módulo esta polarizado.

3.14 SEGUIDOR DE TENSIÓN

Figura 24 Circuito del seguidor de tensión



El seguidor no proporciona ganancia de tensión, pero puede proporcionar una cuantiosa corriente de carga, limitada únicamente por las capacidades del amplificador operacional. Observamos que la resistencia de entrada del seguidor es infinita, porque Vin está conectada directamente a la terminal V+, para lo cual Iin=I+=0.

3.15 UNIDAD TACOGENERADORA

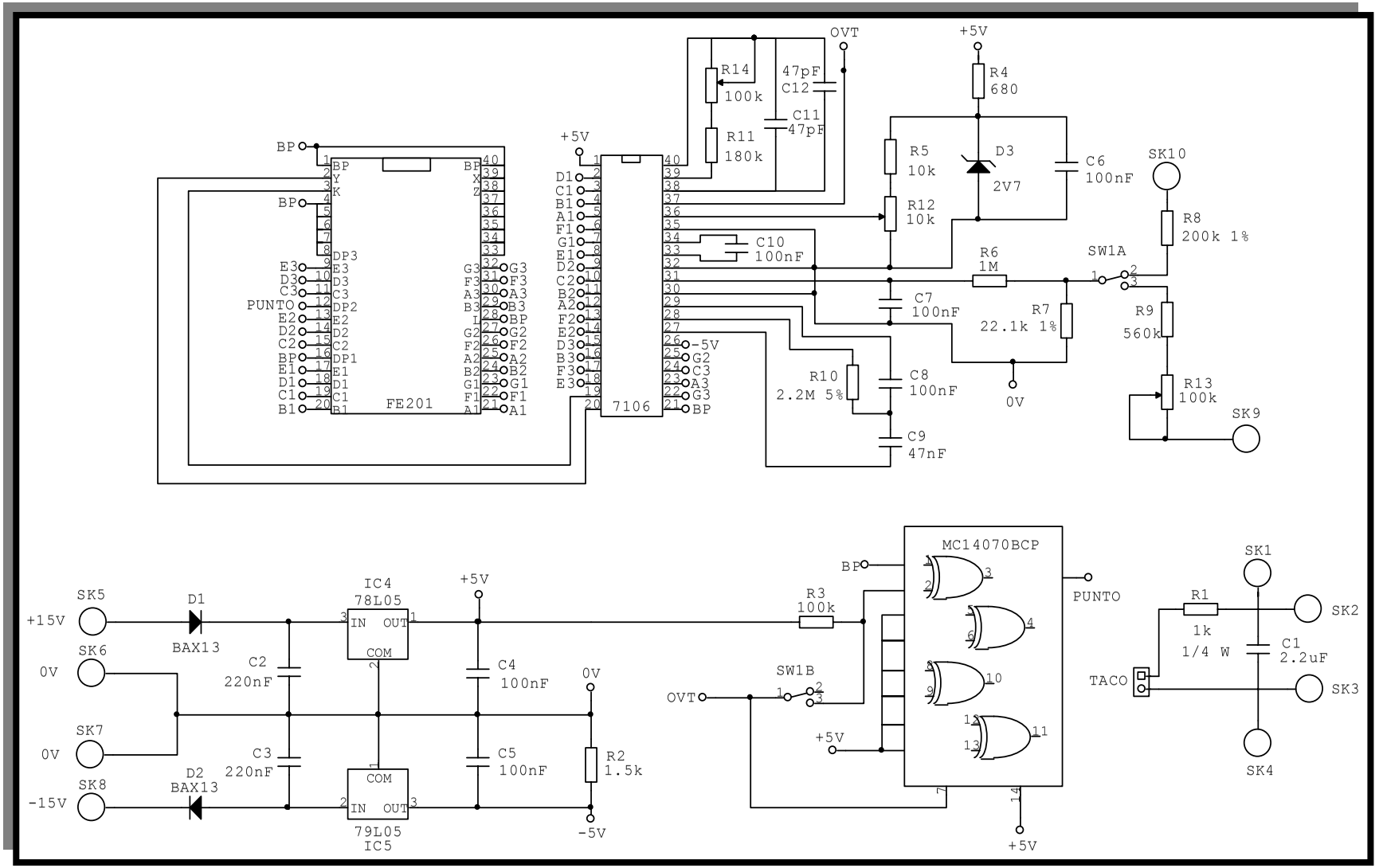
Esta unidad provee una reducción de 30/1 en el acople del motor con respecto al tacogenerador, la tensión medida por el multímetro es de +/- 20V, y el multímetro también mide revoluciones por minuto, solo con un divisor de tensión

El integrado que utiliza el circuito electrónico es un conversor análogo digital con display de cristal líquido y conversor análogo digital de 4 ½ segmentos.

El integrado 4070 son compuertas nand, en el circuito cuya función es aportar el punto cuando se está trabajando como multímetro.

El trimmer R14 ajusta la frecuencia de refresco de los datos y el trimmer R12 se ajusta el nivel de referencia de la tensión.

Figura 25. Circuito electrónico de la unidad tacogeneradora



CONCLUSIONES

Un proyecto de transferencia de tecnología como el nuestro, debe ser posterior a uno de análisis y optimización de los mismos equipos.

La conceptualización de los circuitos utilizados en el sistema de referencia permitió dar soluciones tecnológicas a propuestas alternativas de diseño.

La adquisición de piezas electrónicas en Colombia es muy limitada y la importación de las mismas es un proceso costoso y dispendioso, por lo que fue necesario rediseñar los equipos acorde al nivel de tecnología que se encuentra en el mercado de la región.

La simulación de los circuitos es un paso fundamental en el desarrollo del módulo para tomar medidas de tensión y corriente.

Para el rediseño de las piezas mecánicas fue necesario acudir a expertos en el tema, para poder establecer una sinergia con la precisión de los procesos electrónicos.

Las cajas de los módulos se realizaron con 2 materiales, uno resistente para que soporte pesos considerables y uno maleable o fácil de trabajar, que permita una mejor manufactura.

Al poner en marcha el sistema automático de control analógico, se obtuvo satisfactoriamente el buen desempeño de las practicas de hardware: Obtención de la constante del tacogenerador y aplicar carga al motor; Control de velocidad del motor; Control de posición del motor.

Al utilizar la unidad preamplificadora en la práctica de control de velocidad la ganancia aumentó, por lo que no se hace necesario utilizarla y así obtener un control más suave del motor.

En el diseño de sistemas que trabajen con tecnología superior a la manejada en la región es necesario contemplar como ideas potenciales las soluciones simples.

Los modelos matemáticos que representan la teoría del control clásico se originan a través de la experimentación con modelos físicos y no de forma contraria.

En el modulo de la fuente de poder la teoría de control clásico se originan a través de la experimentación con modelos físicos y no de forma contraria.

En el modulo de la fuente de poder, los reguladores de voltaje 7812 y 7912, y los transistores 2N3906 y 2N3904, se pueden reemplazar por los reguladores 7815 y 7915, puesto que estos suministran la salida de voltaje requerida de forma inmediata. También la resistencia conectada al terminal de entrada de los reguladores no es necesaria.

El par diferencial se puede reemplazar por un amplificador operacional pues ambas configuraciones pueden amplificar señales de voltaje por el orden de micro voltios.

RECOMENDACIONES

Realizar un proyecto de análisis y optimización de los circuitos y diseño de los módulos de control.

Conseguir todos los elementos de circuito de todos los equipos y una vez hecho esto, realizar el diseño de las tarjetas impresas, teniendo en cuenta la forma y tamaño reales de dichos elementos.

Diseñar las dimensiones y forma de las carcazas después de haber realizado el diseño de las tarjetas impresas.

Realizar pruebas y obtener parámetros en los equipos originales para que sirvan de soporte en las posteriores pruebas de los equipos construidos.

Buscar asesoría de expertos en el área de materiales para una adecuada selección acorde con las necesidades del diseño mecánico.

La implementación de prácticas adicionales de laboratorio es una temática que se propone y queda abierta a partir de la entrega de este módulo analógico.

APORTES

La presentación y estética del modulo de control fue tan importantes como su buen funcionamiento, y supero las expectativas planteadas.

La vibración originada por él acople entre el motor y el reductor de velocidad fue reducida a un nivel mínimo esto a traves de un acople flexible lo cual es determinante en la durabilidad del modulo, puesto que la vibración ocasiona fallas en el sistema a largo plazo.

Para comodidad del usuario se dejo movible la posición de la unidad tacogeneradora la cual esta acoplada al motor, lo cual se logro por medio de la implementación del acople flexible.

BIBLIOGRAFÍA

DORF, R. C. Sistemas Automáticos de Control. Edit. Fondo Educativo Interamericano. México, 1996. 5a. edición.

HAMBLEY. Electrónica. Segunda Edición. MacGraw Hill.

KUO, Benjamín C. Sistemas de Control Automático. Edit. Prentice Hall Hispanoamericana. México, 1996. 7a. edición.

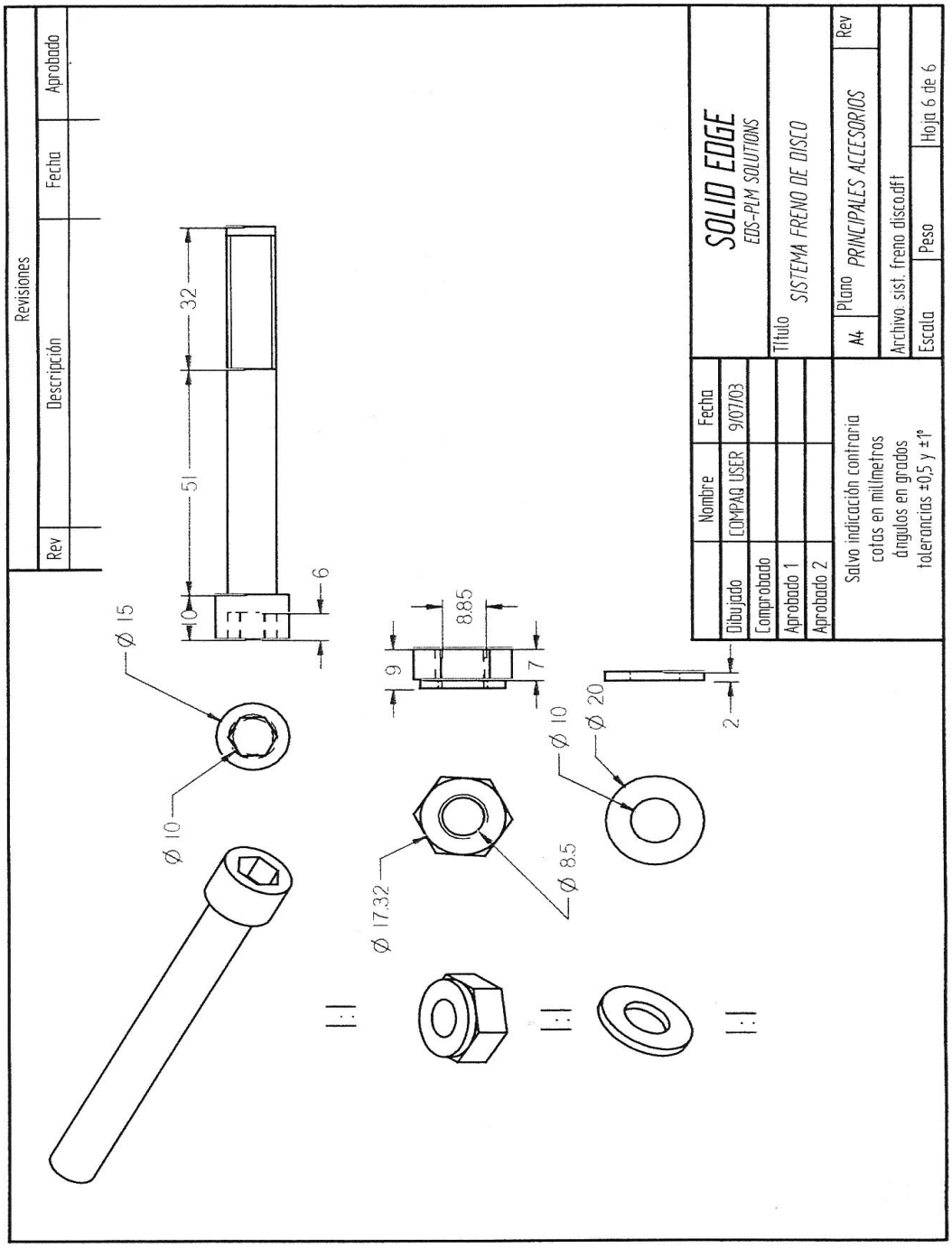
NEAMEN. Análisis y Diseño de Circuitos Electrónicos. McGraw Hill. Segunda Edición.

SAVANT. RODEN. CARPENTIER. Otros. Diseño Electrónico. MacGraw Hill. Segunda Edición.

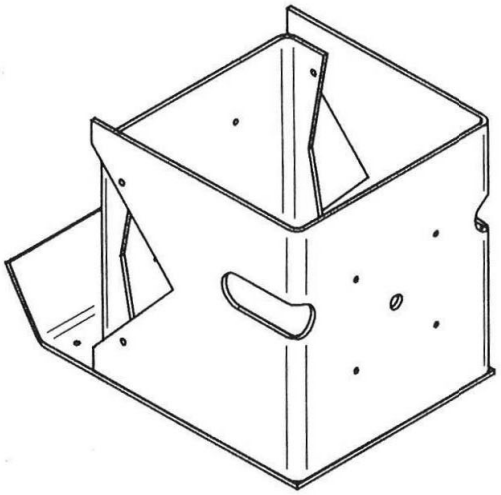
SEDRA, Smith. Circuitos Microelectrónicos. Editorial Oxford. Segunda Edición.

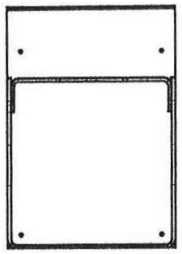
OGATA, K. Ingeniería de Control Moderna. Edit. Prentice Hall Interamericana. México, 1997. 5a. edición.

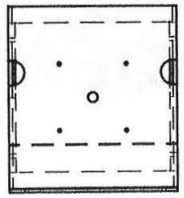
Anexo A. Diseño Mecánico de las Cajas

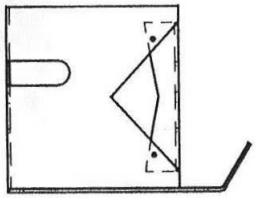


Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado









	Nombre	Fecha
Dibujado	COMPAQ USER	14/07/03
Comprobado		
Aprobado 1		
Aprobado 2		

Salvo indicación contraria
cotas en milímetros
ángulos en grados
tolerancias ±0,5 y ±1°

SOLID EDGE
EDS-PLM SOLUTIONS

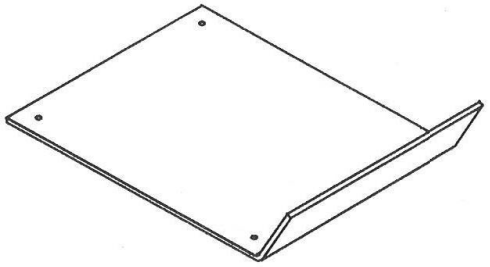
Título ESTRUCTURA REDUCTOR VELOCIDAD

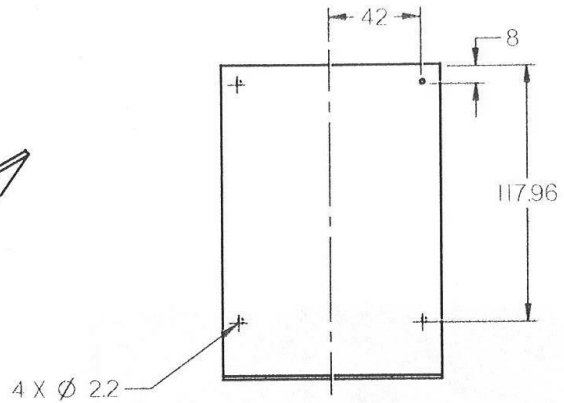
A4	Plano VISTA GENERAL	Rev

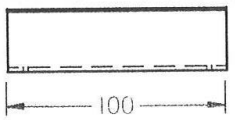
Archivo reductor.dft

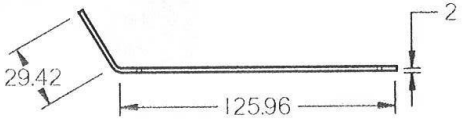
Escala	Peso	Hoja 1 de 4

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado









	Nombre	Fecha
Dibujado	COMPAQ USER	14/07/03
Comprobado		
Aprobado 1		
Aprobado 2		

Salvo indicación contraria
cotas en milímetros
ángulos en grados
tolerancias ±0,5 y ±1°

SOLID EDGE
EDS-PLM SOLUTIONS

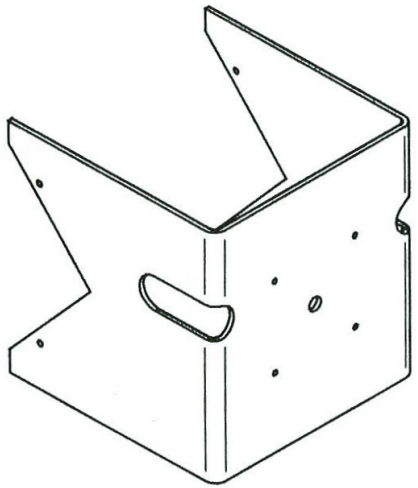
Título: ESTRUCTURA DE POTENCIOMETROS

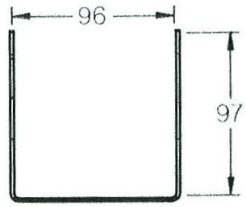
A4	Plano: BASE	Rev

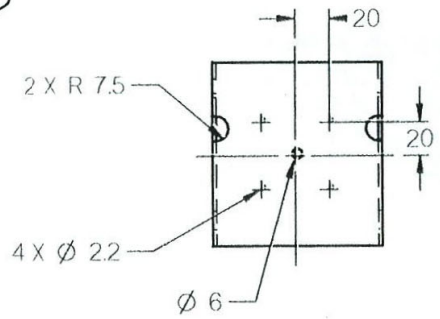
Archivo: reductor.dft

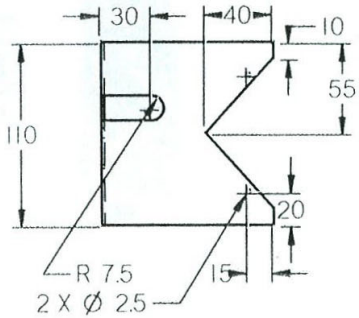
Escala	Peso	Hoja 2 de 4

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado









	Nombre	Fecha
Dibujado	COMPAQ USER	14/07/03
Comprobado		
Aprobado 1		
Aprobado 2		

Salvo indicación contraria
cotas en milímetros
ángulos en grados
tolerancias ±0,5 y ±1°

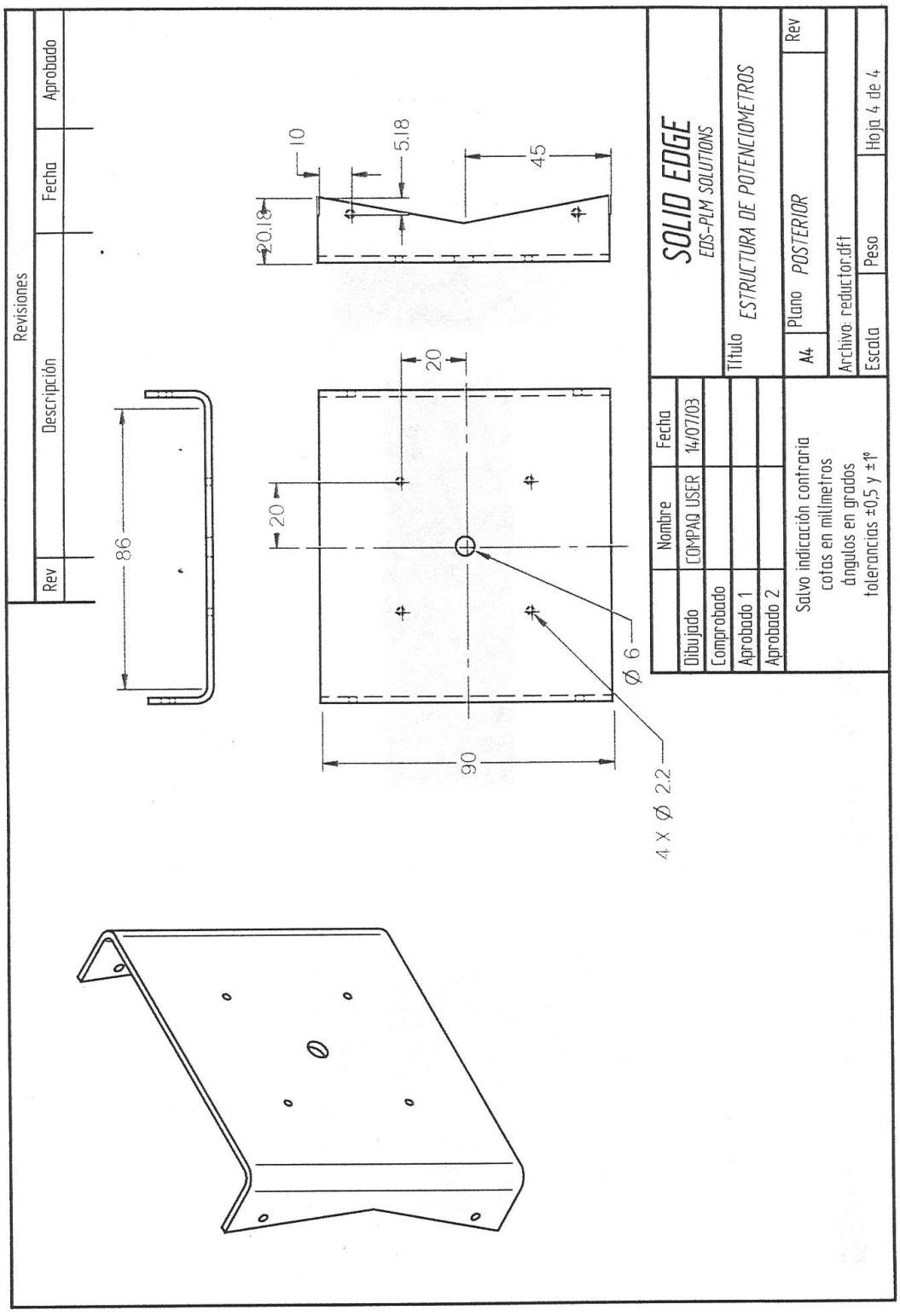
SOLID EDGE
EDS-PLM SOLUTIONS

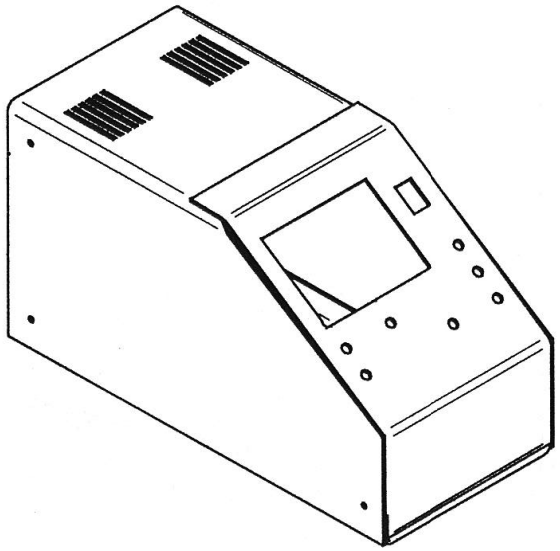
Título ESTRUCTURA DE POTENCIOMETROS

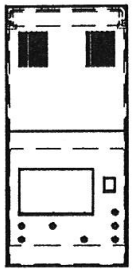
A4 | Plano FRONTAL | Rev

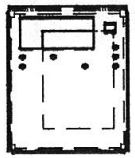
Archivo: reductor.dft

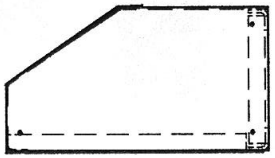
Escala | Peso | Hoja 3 de 4


Revisiones
Rev
Descripción
Fecha
Aprobado
86
20
20
90
Ø 6
4 X Ø 2.2
10
5.18
45
20.18
SOLID EDGE
EDS-PLM SOLUTIONS
Título ESTRUCTURA DE POTENCIOMETROS
Nombre
Fecha
Dibujado
COMPAQ USER
14/07/03
Comprobado
Aprobado 1
Aprobado 2
Salvo indicación contraria
cotas en milímetros
ángulos en grados
tolerancias ±0,5 y ±1°
A4
Plano POSTERIOR
Rev
Archivo: reductor.dft
Escala
Peso
Hoja 4 de 4









Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado

	Nombre	Fecha
Dibujado	COMPAQ USER	15/07/03
Comprobado		
Aprobado 1		
Aprobado 2		

Salvo indicación contraria
cotas en milímetros
ángulos en grados
tolerancias ±0,5 y ±1°

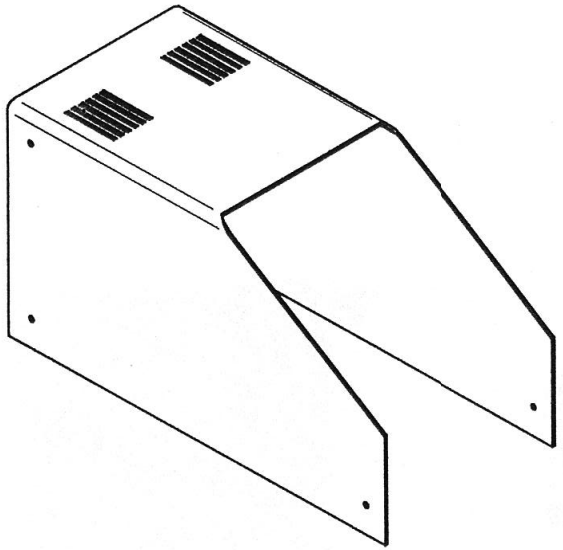
SOLID EDGE
EDS-PLM SOLUTIONS

Título

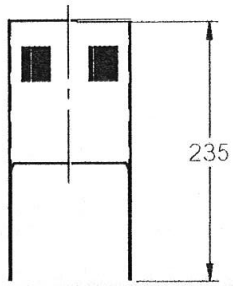
A4	Plano	Rev

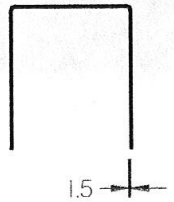
Archivo: FUENTES.dft

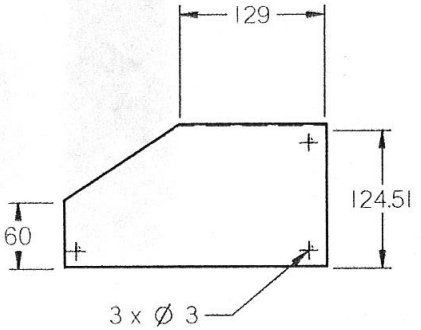
Escala	Peso	Hoja 1 de 6



Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado







	Nombre	Fecha
Dibujado	COMPAQ USER	15/07/03
Comprobado		
Aprobado 1		
Aprobado 2		

Salvo indicación contraria
cotas en milímetros
ángulos en grados
tolerancias ±0,5 y ±1°

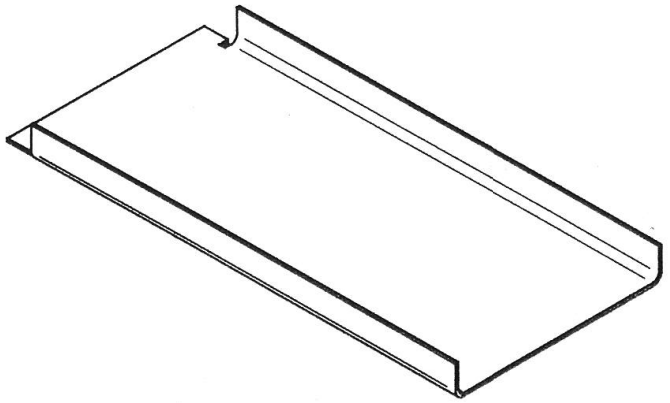
SOLID EDGE
EDS-PLM SOLUTIONS

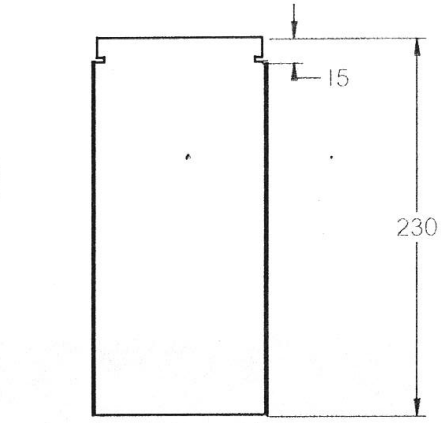
Título

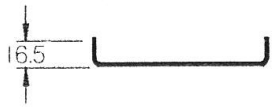
A4	Plano	Rev

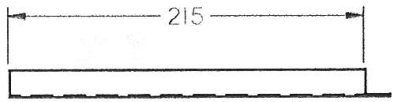
Archivo: FUENTES.dft

Escala	Peso	Hoja 2 de 6









Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado

	Nombre	Fecha
Dibujado	COMPAQ USER	15/07/03
Comprobado		
Aprobado 1		
Aprobado 2		

Salvo indicación contraria
cotas en milímetros
ángulos en grados
tolerancias ±0,5 y ±1°

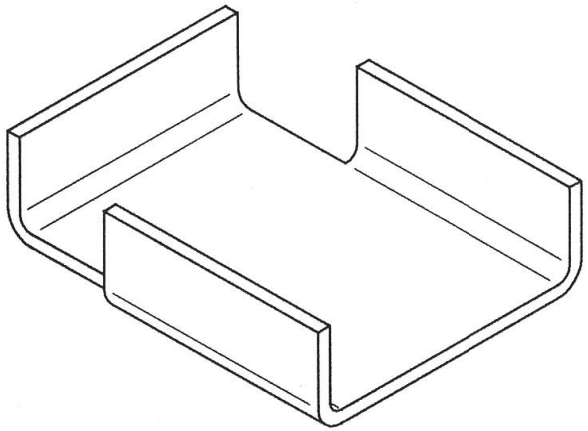
SOLID EDGE
EDS-PLM SOLUTIONS

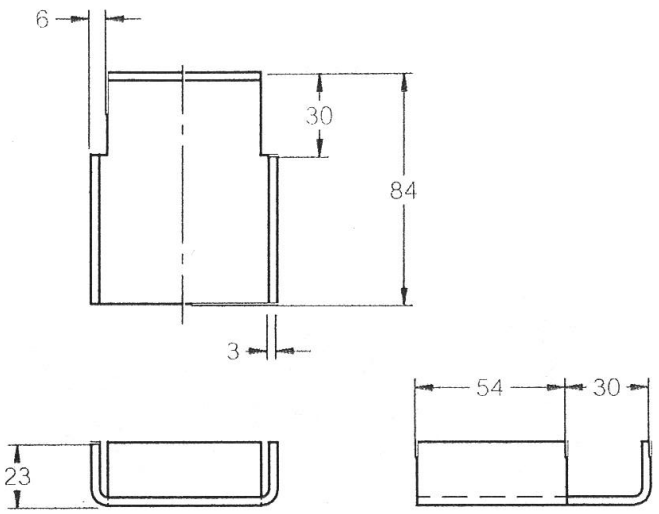
Título

A4	Plano	Rev

Archivo: FUENTES.dft

Escala	Peso	Hoja 3 de 6





Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado

	Nombre	Fecha
Dibujado	COMPAQ USER	15/07/03
Comprobado		
Aprobado 1		
Aprobado 2		

Salvo indicación contraria
cotas en milímetros
ángulos en grados
tolerancias ±0,5 y ±1°

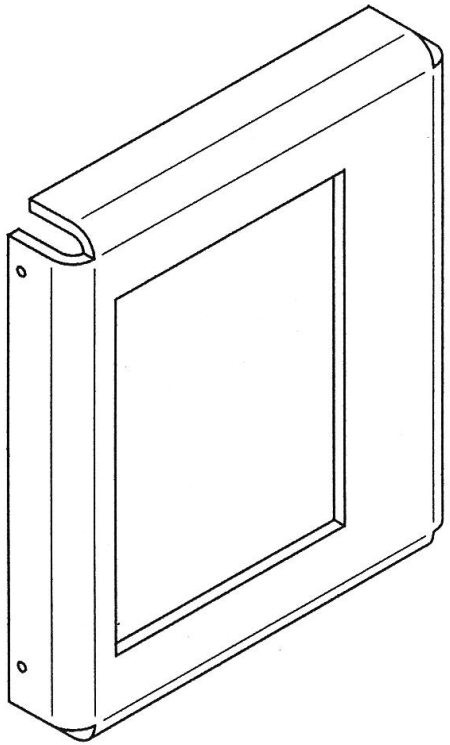
SOLID EDGE
EDS-PLM SOLUTIONS

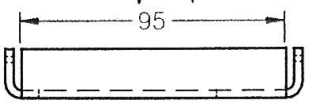
Título

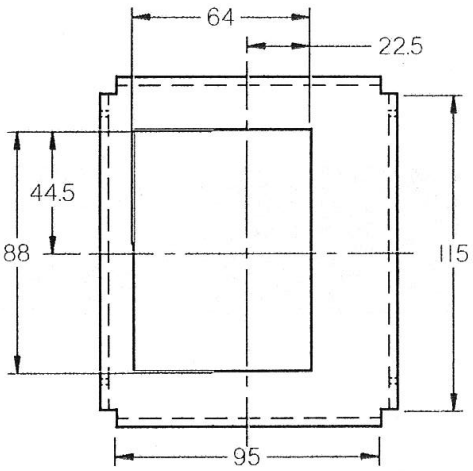
A4	Plano	Rev

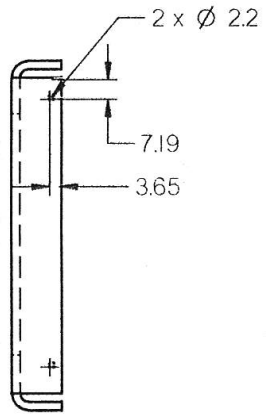
Archivo: FUENTES.dft

Escala	Peso	Hoja 5 de 6









Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado

	Nombre	Fecha
Dibujado	COMPAQ USER	15/07/03
Comprobado		
Aprobado 1		
Aprobado 2		

Salvo indicación contraria
cotas en milímetros
ángulos en grados
tolerancias ±0,5 y ±1°

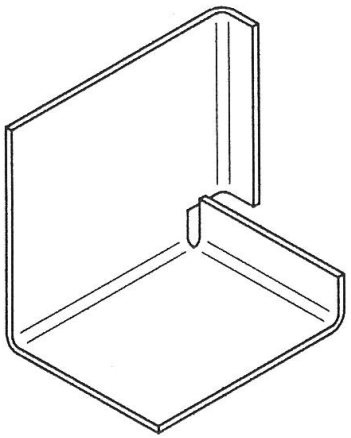
SOLID EDGE
EDS-PLM SOLUTIONS

Título

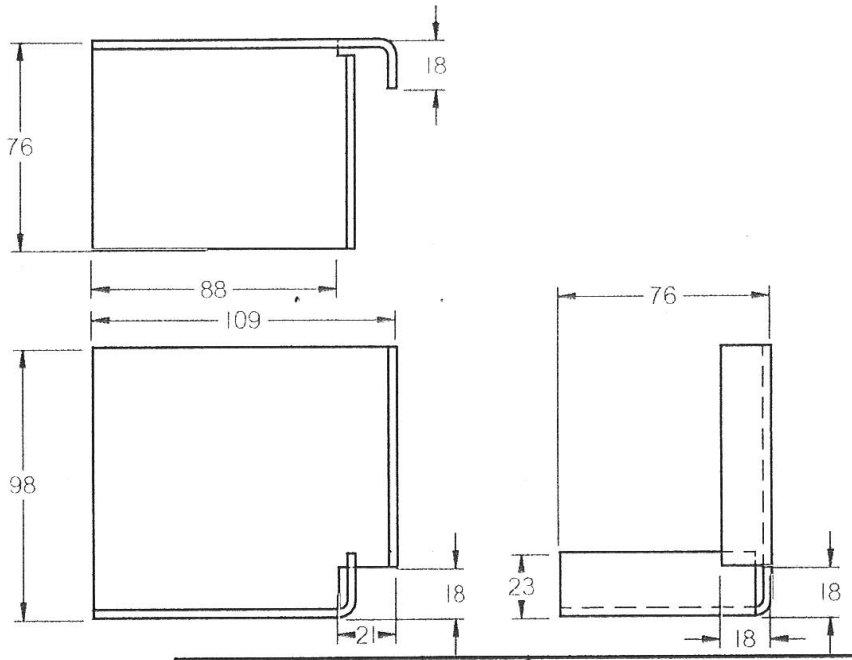
A4	Plano	Rev

Archivo: FUENTES.dft

Escala	Peso	Hoja 4 de 6



Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



	Nombre	Fecha
Dibujado	COMPAQ USER	15/07/03
Comprobado		
Aprobado 1		
Aprobado 2		

Salvo indicación contraria
cotas en milímetros
ángulos en grados
tolerancias ±0,5 y ±1°

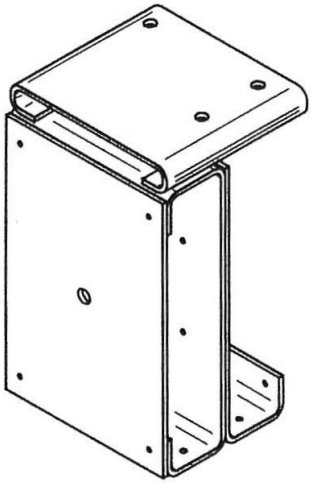
SOLID EDGE
EDS-PLM SOLUTIONS

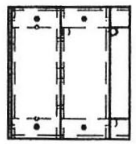
Título

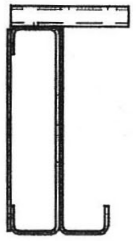
A4	Plano	Rev

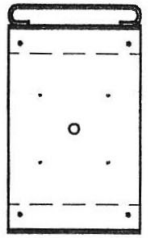
Archivo: FUENTES.dft

Escala	Peso	Hoja 6 de 6









Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado

	Nombre	Fecha
Dibujado	COMPAQ USER	10/07/03
Comprobado		
Aprobado 1		
Aprobado 2		

Salvo indicación contraria
cotas en milímetros
ángulos en grados
tolerancias ±0,5 y ±1°

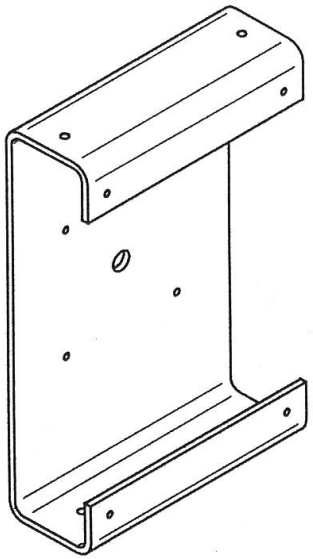
SOLID EDGE
EDS-PLM SOLUTIONS

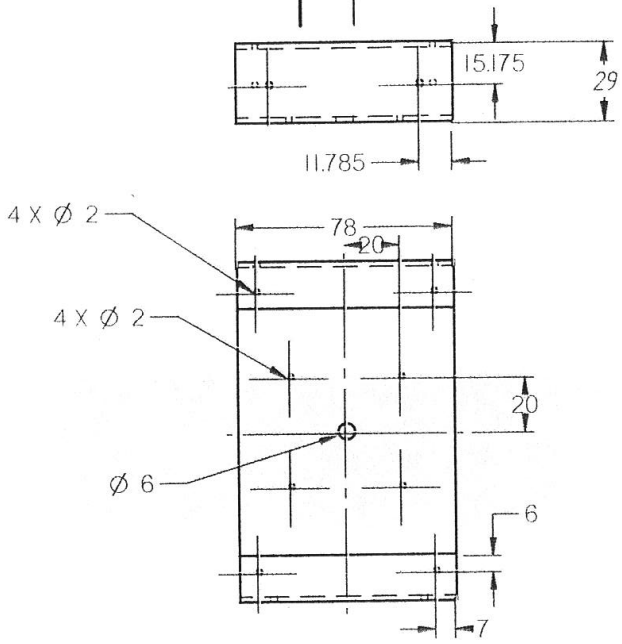
Título: ESTRUCTURA DE POTENCIOMETROS

A4	Plano: VISTA GENERAL	Rev

Archivo: potenciometro.dft

Escala	Peso	Hoja 1 de 5





Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado

	Nombre	Fecha
Dibujado	COMPAQ USER	10/07/03
Comprobado		
Aprobado 1		
Aprobado 2		

Salvo indicación contraria
cotas en milímetros
ángulos en grados
tolerancias ±0,5 y ±1°

SOLID EDGE
EDS-PLM SOLUTIONS

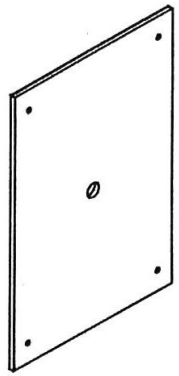
Título: ESTRUCTURA DE POTENCIOMETROS

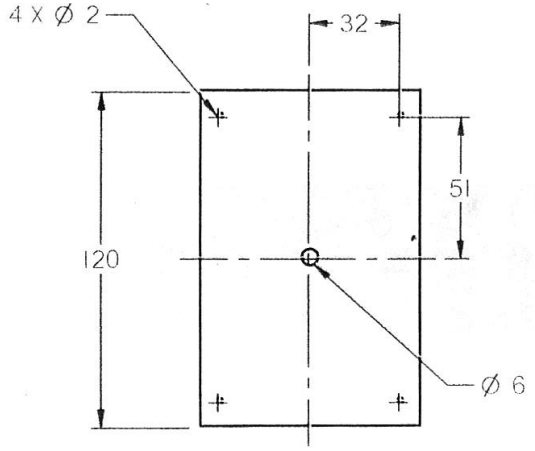
A4 | Plano: PARTE FRONTAL | Rev

Archivo: potenciometro.dft

Escala | Peso | Hoja 2 de 5

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado





	Nombre	Fecha
Dibujado	COMPAQ USER	10/07/03
Comprobado		
Aprobado 1		
Aprobado 2		

Salvo indicación contraria
cotas en milímetros
ángulos en grados
tolerancias ±0,5 y ±1°

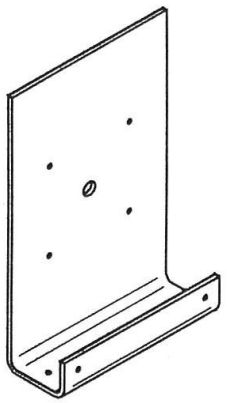
SOLID EDGE
EDS-PLM SOLUTIONS

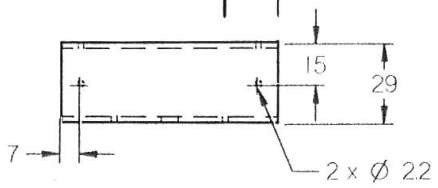
Título: ESTRUCTURA DE POTENCIOMETROS

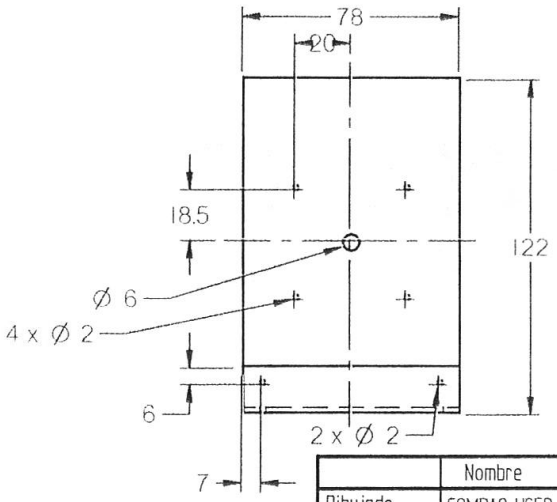
A4 | Plano: ACRILICO FRONTAL | Rev

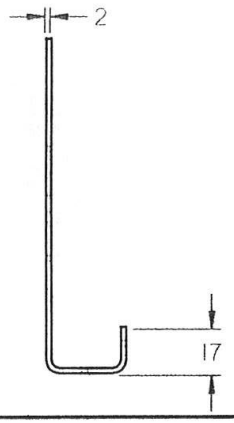
Archivo: potenciometro.dft

Escala | Peso | Hoja 3 de 5









Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado

	Nombre	Fecha
Dibujado	COMPAQ USER	10/07/03
Comprobado		
Aprobado 1		
Aprobado 2		

Salvo indicación contraria
cotas en milímetros
ángulos en grados
tolerancias ±0,5 y ±1°

SOLID EDGE
EDS-PLM SOLUTIONS

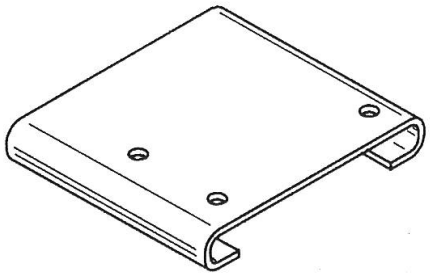
Título: ESTRUCTURA DE POTENCIOMETROS

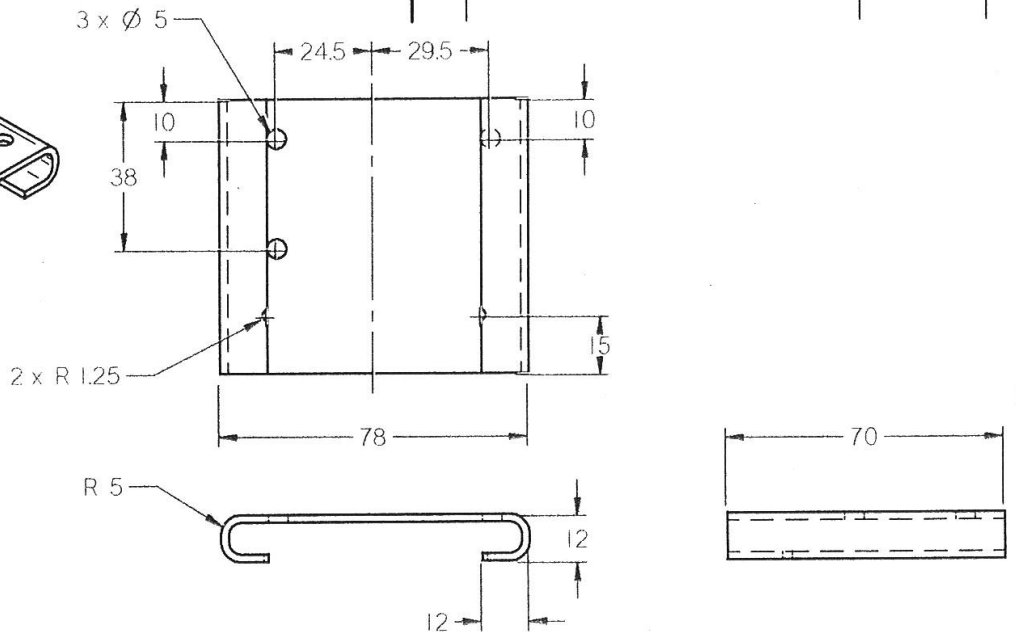
A4 | Plano: PARTE POSTERIOR | Rev

Archivo: potenciometro.dft

Escala | Peso | Hoja 4 de 5

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado





	Nombre	Fecha
Dibujado	COMPAQ USER	10/07/03
Comprobado		
Aprobado 1		
Aprobado 2		

Salvo indicación contraria
cotas en milímetros
ángulos en grados
tolerancias ±0,5 y ±1°

SOLID EDGE
EDS-PLM SOLUTIONS

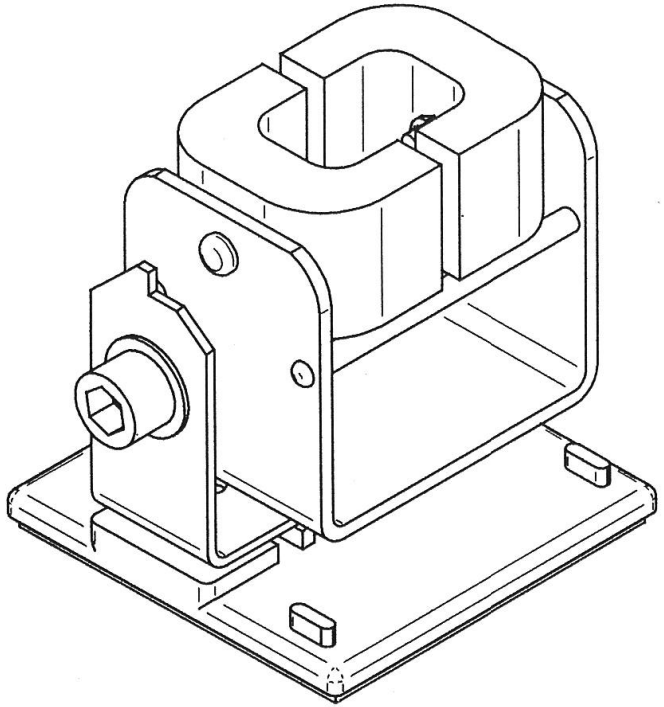
Título: ESTRUCTURA DE POTENCIOMETROS

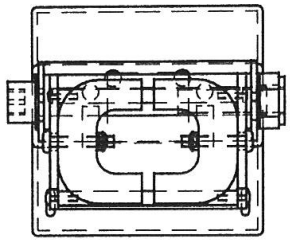
A4	Plano: TAPA	Rev

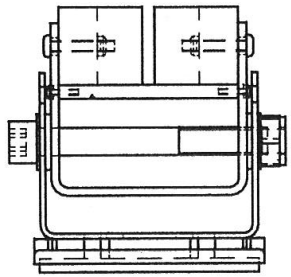
Archivo: potenciometro.dft

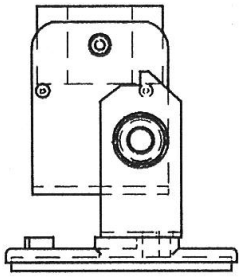
Escala	Peso	Hoja 5 de 5

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado









	Nombre	Fecha
Dibujado	COMPAQ USER	9/07/03
Comprobado		
Aprobado 1		
Aprobado 2		

Salvo indicación contraria
cotas en milímetros
ángulos en grados
tolerancias ±0,5 y ±1°

SOLID EDGE
EDS-PLM SOLUTIONS

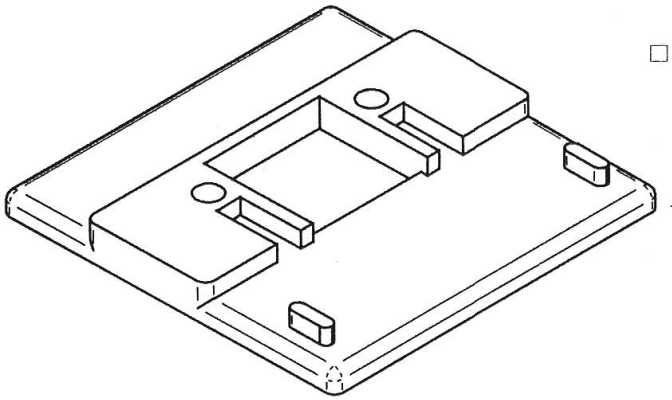
Título: SISTEMA FRENO DE DISCO

A4	Plano: VISTA GENERAL	Rev

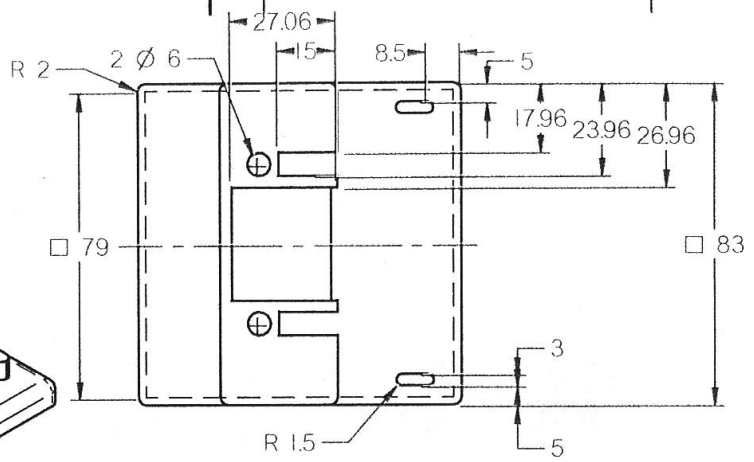
Archivo: sist. freno disco.dft

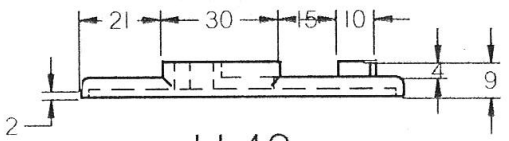
Escala	Peso	Hoja 1 de 6

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



1:1





1:1,43

	Nombre	Fecha
Dibujado	COMPAQ USER	9/07/03
Comprobado		
Aprobado 1		
Aprobado 2		

Salvo indicación contraria
cotas en milímetros
ángulos en grados
tolerancias ±0,5 y ±1°

SOLID EDGE
EDS-PLM SOLUTIONS

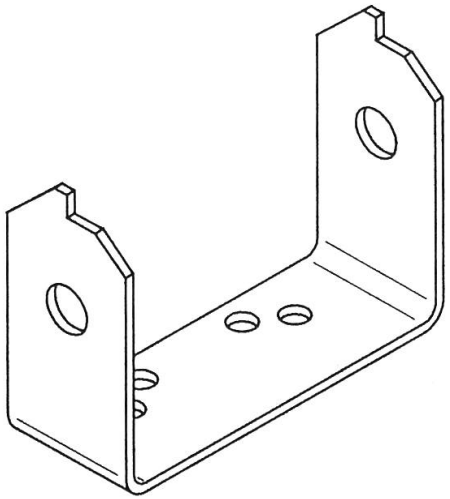
Título: SISTEMA FRENO DE DISCO

A4 | Plano: BASE DEL SISTEMA | Rev

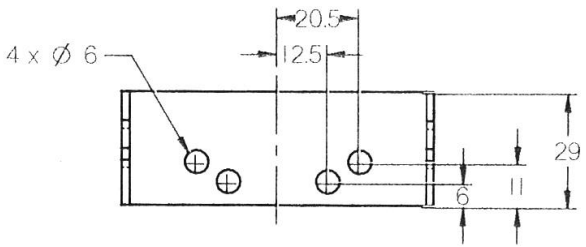
Archivo: sist. freno disco.dft

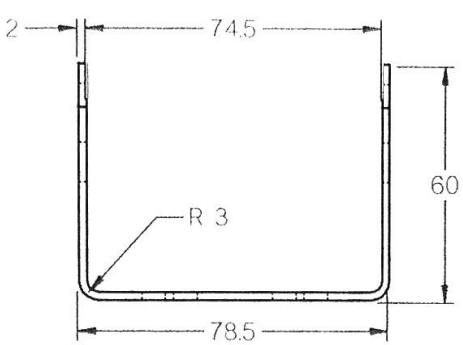
Escala | Peso | Hoja 2 de 6

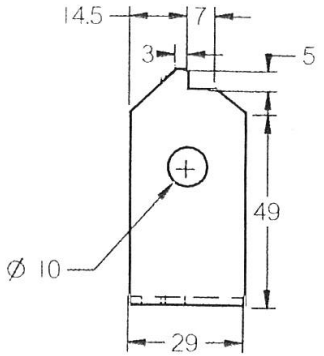
Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



1:1







1:1,43

	Nombre	Fecha
Dibujado	COMPAQ USER	9/07/03
Comprobado		
Aprobado 1		
Aprobado 2		

Salvo indicación contraria
cotas en milímetros
ángulos en grados
tolerancias ±0,5 y ±1°

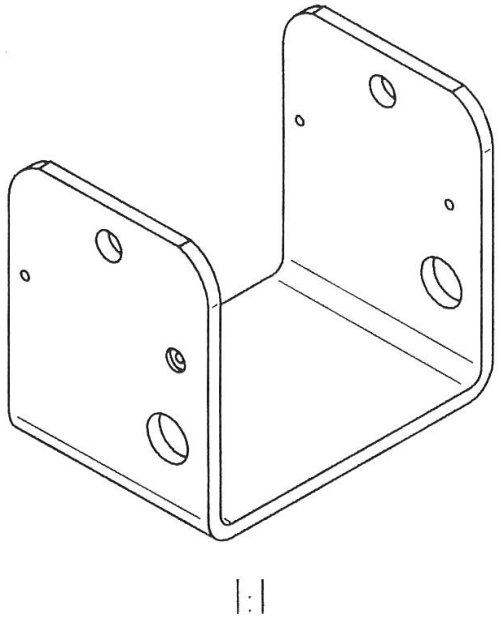
SOLID EDGE
EDS-PLM SOLUTIONS

Título: SISTEMA FRENO DE DISCO

A4 | Plano: SOPORTE PRINCIPAL | Rev

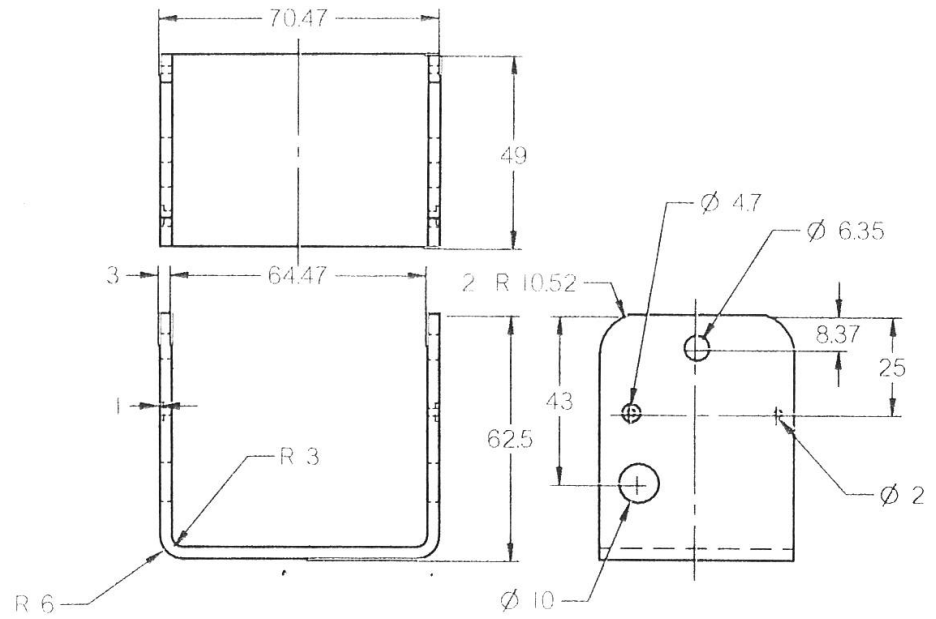
Archivo: sist. freno disco.dft

Escala | Peso | Hoja 3 de 6



1:1

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



	Nombre	Fecha
Dibujado	COMPAQ USER	9/07/03
Comprobado		
Aprobado 1		
Aprobado 2		

Salvo indicación contraria
cotas en milímetros
ángulos en grados
tolerancias ±0,5 y ±1°

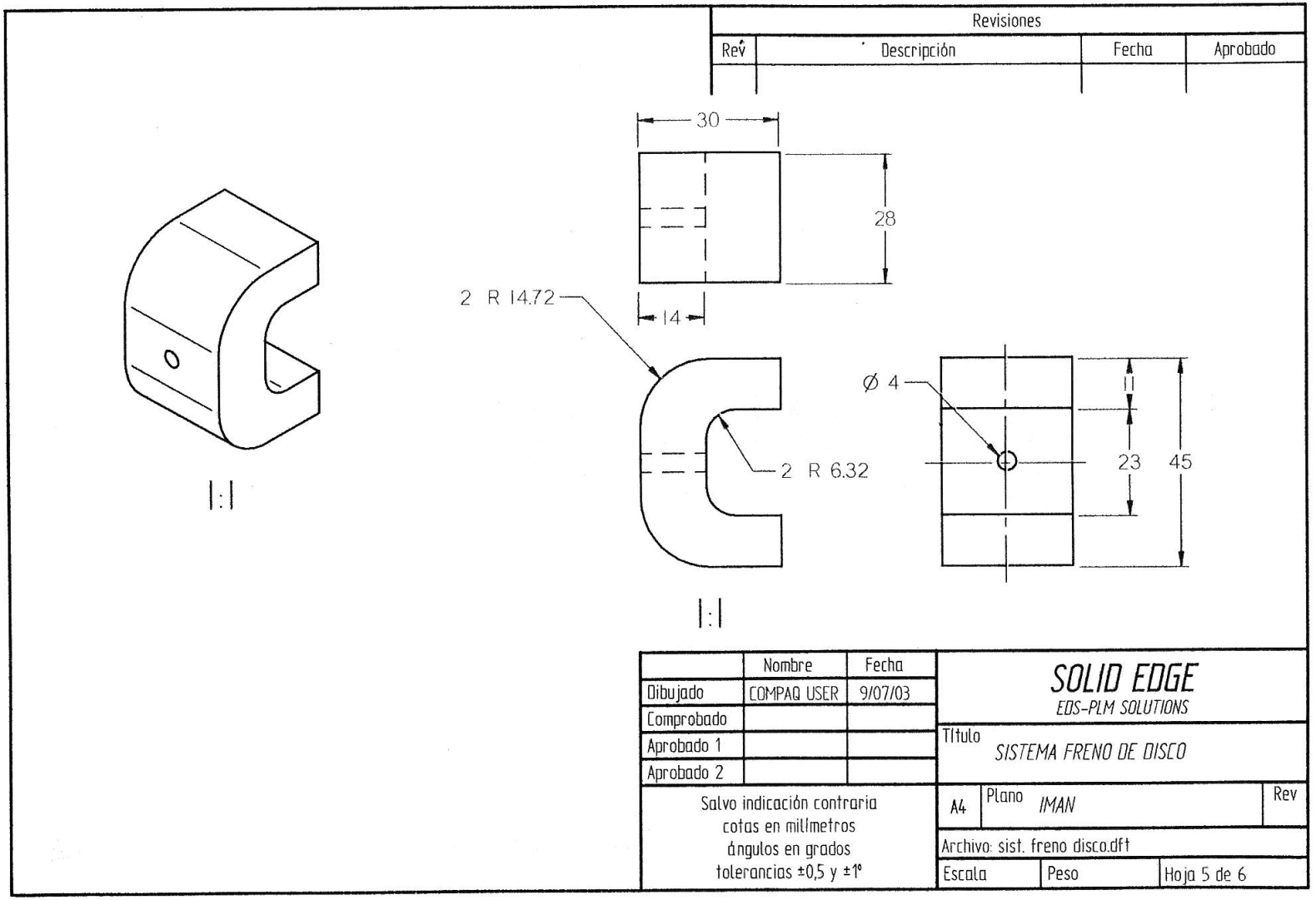
SOLID EDGE
EDS-PLM SOLUTIONS

Título: SISTEMA FRENO DE DISCO

A4 | Plano: SOPORTE SECUNDARIO | Rev

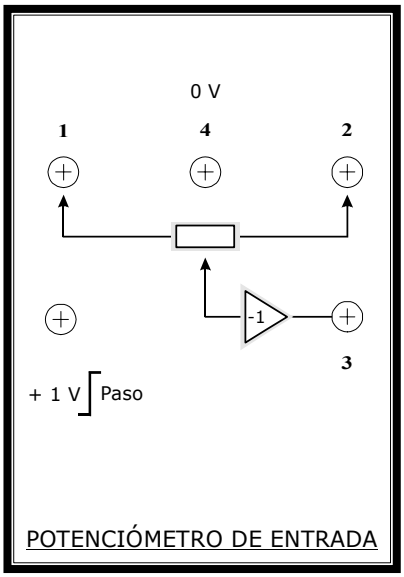
Archivo: sist. freno disco.dft

Escala | Peso | Hoja 4 de 6

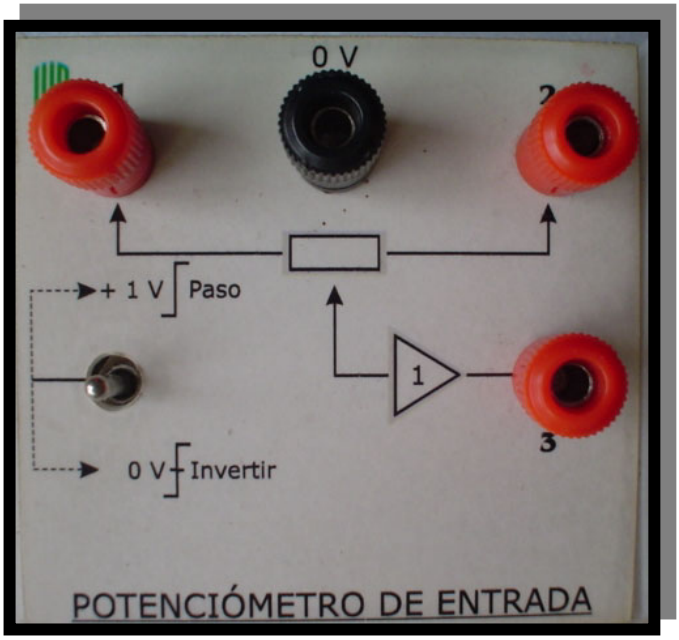

Revisiones
Rev
Descripción
Fecha
Aprobado
30
28
14
2 R 14.72
2 R 6.32
Ø 4
11
23
45
1:1
1:1
Nombre
Fecha
Dibujado
COMPAQ USER
9/07/03
Comprobado
Aprobado 1
Aprobado 2
Salvo indicación contraria
cotas en milímetros
ángulos en grados
tolerancias ±0,5 y ±1°
SOLID EDGE
EDS-PLM SOLUTIONS
Título
SISTEMA FRENO DE DISCO
A4
Plano
IMAN
Rev
Archivo: sist. freno disco.dft
Escala
Peso
Hoja 5 de 6

Evidencia Gráfica del Módulo de Control Analógico (Diseño de Circuitos Impresos, Rótulos y Fotografías)

Anexo B. Potenciómetro de Entrada

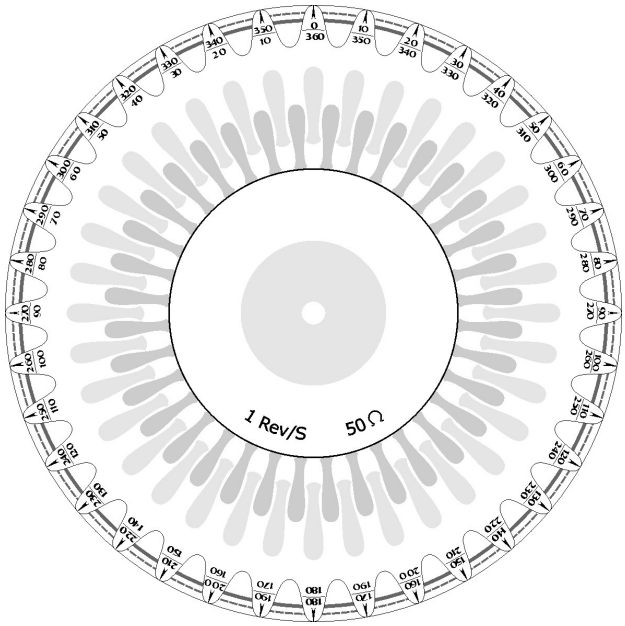


Diseño del Rótulo del Potenciómetro de Entrada (Vista Superior).

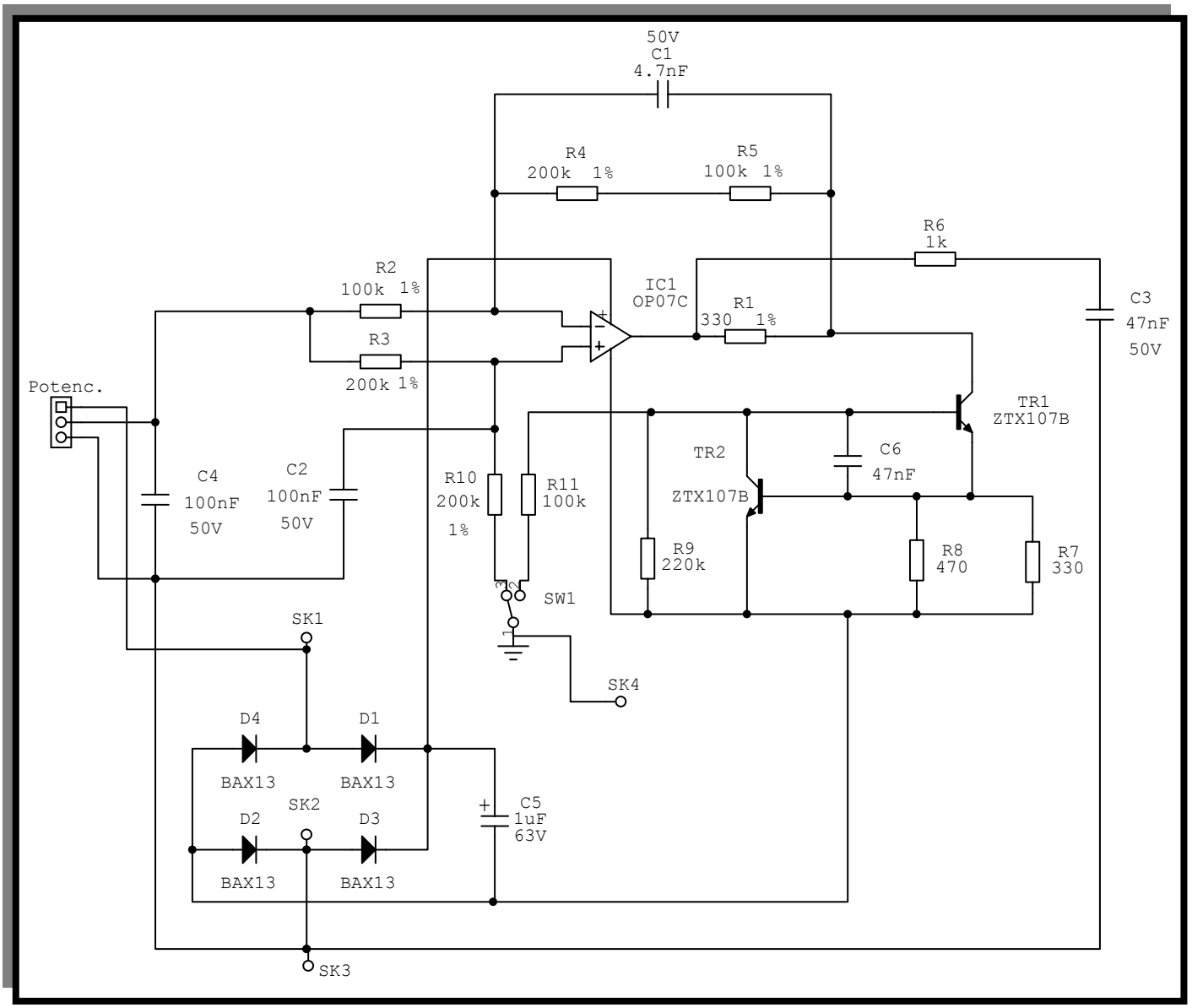


Fotografía del Potenciómetro de Entrada(Vista Superior)

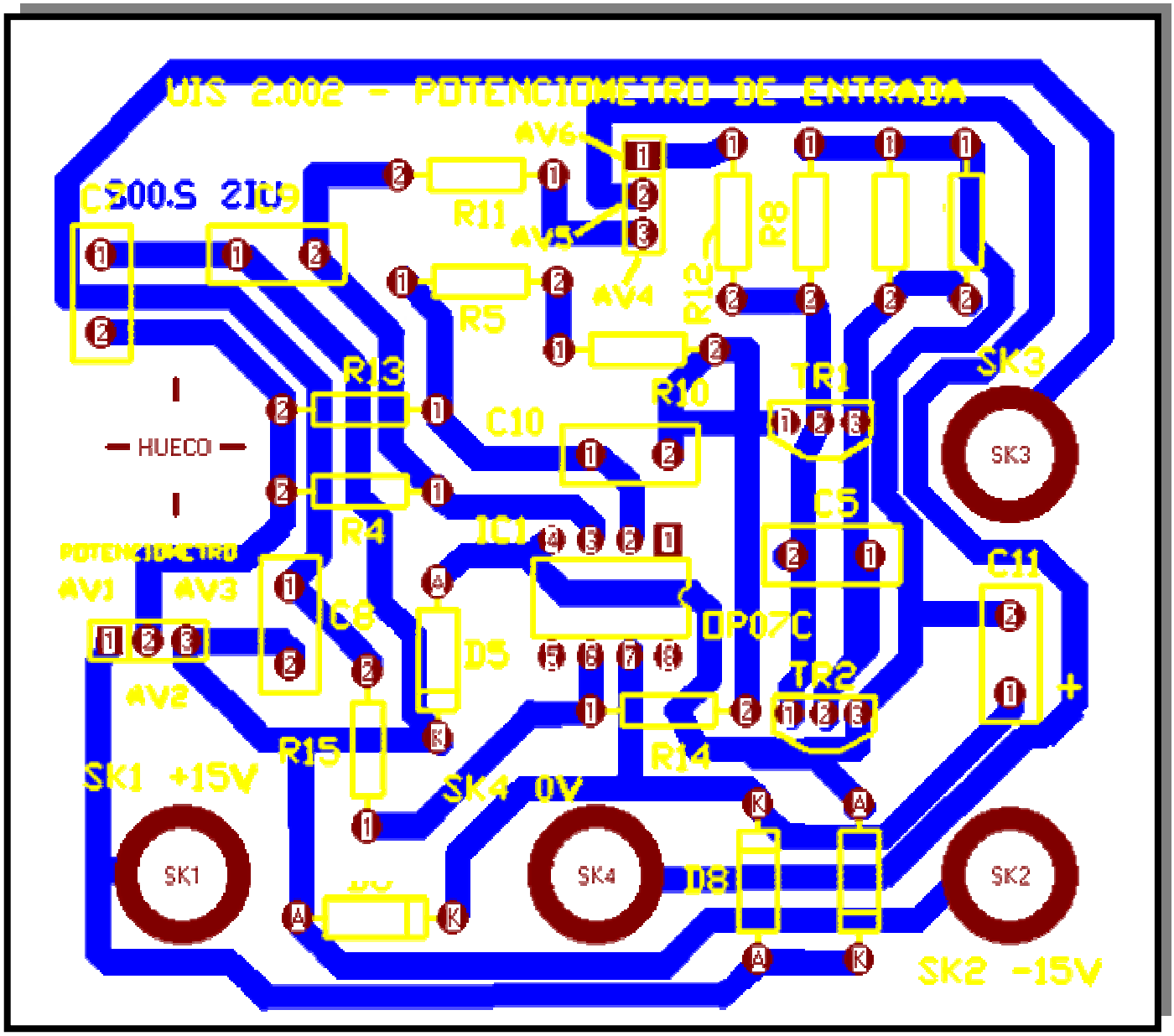
Diseño de la Etiqueta del Potenciómetro de Entrada (Vista Frontal).



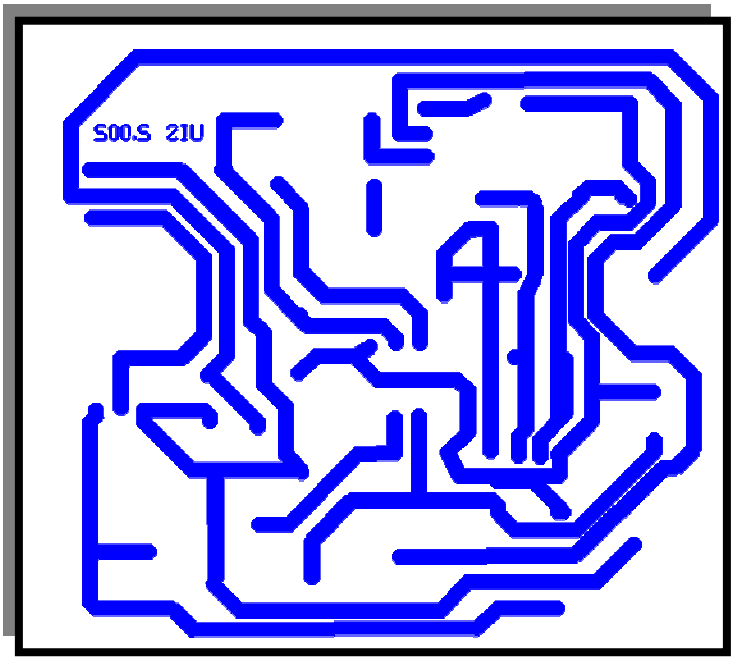
Fotografía del Potenciómetro de Entrada (Vista Frontal)



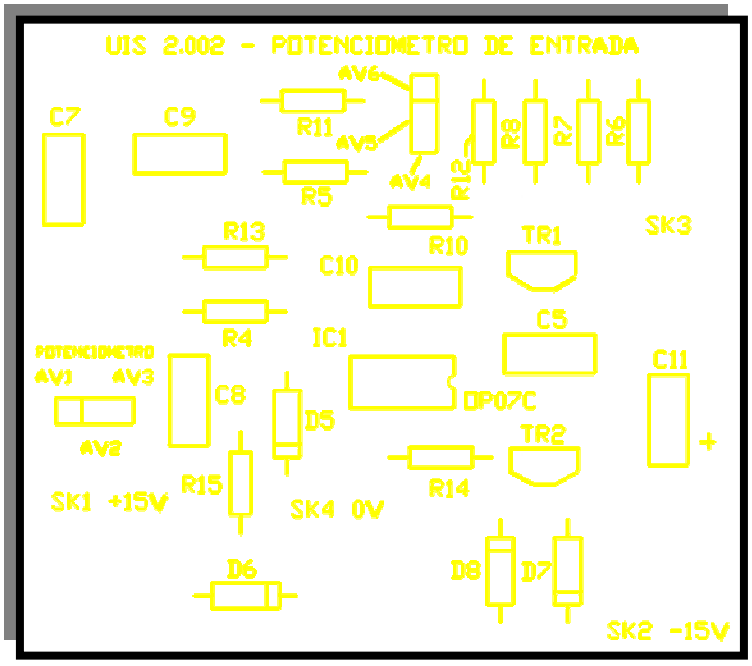
Diseño del Circuito Electrónico del Potenciómetro de Entrada



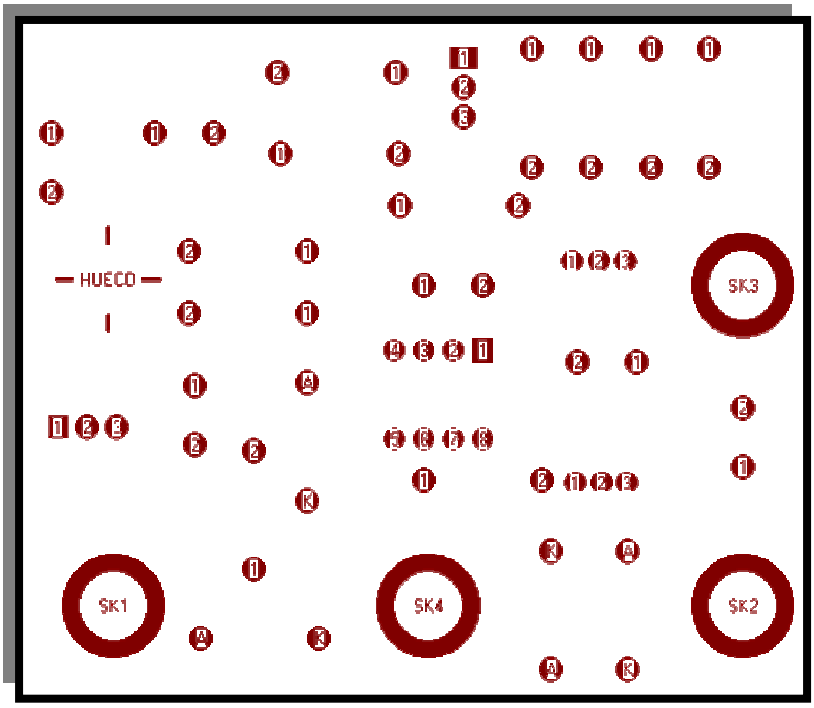
Diseño del Circuito Impreso del Potenciómetro de Entrada



Enrutado del Circuito Impreso del Potenciómetro de Entrada

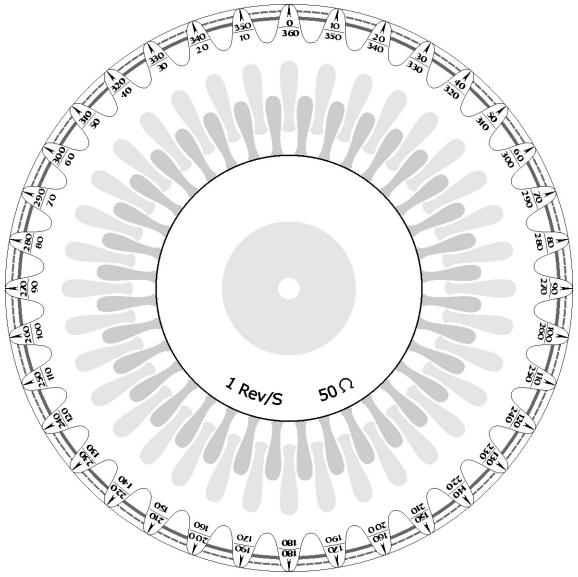


Máscara de Componentes del Circuito Impreso del Potenciómetro de Entrada



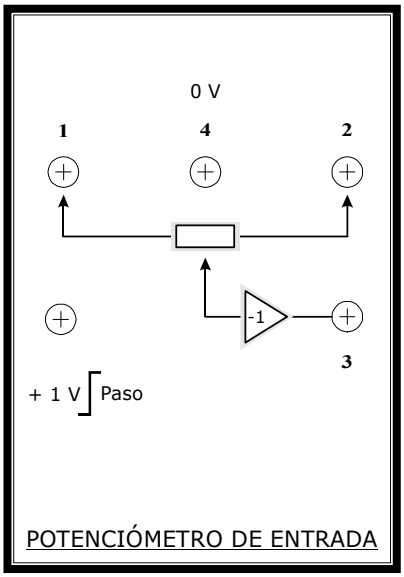
Pads del Circuito Impreso del Potenciómetro de Entrada

Anexo C. Potenciómetro de Salida

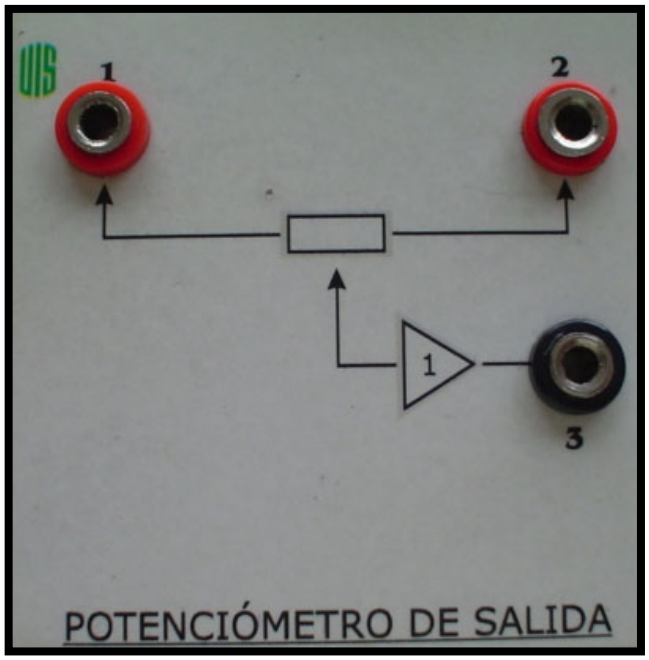


Diseño del Rótulo del Potenciómetro de Entrada (Vista Frontal).

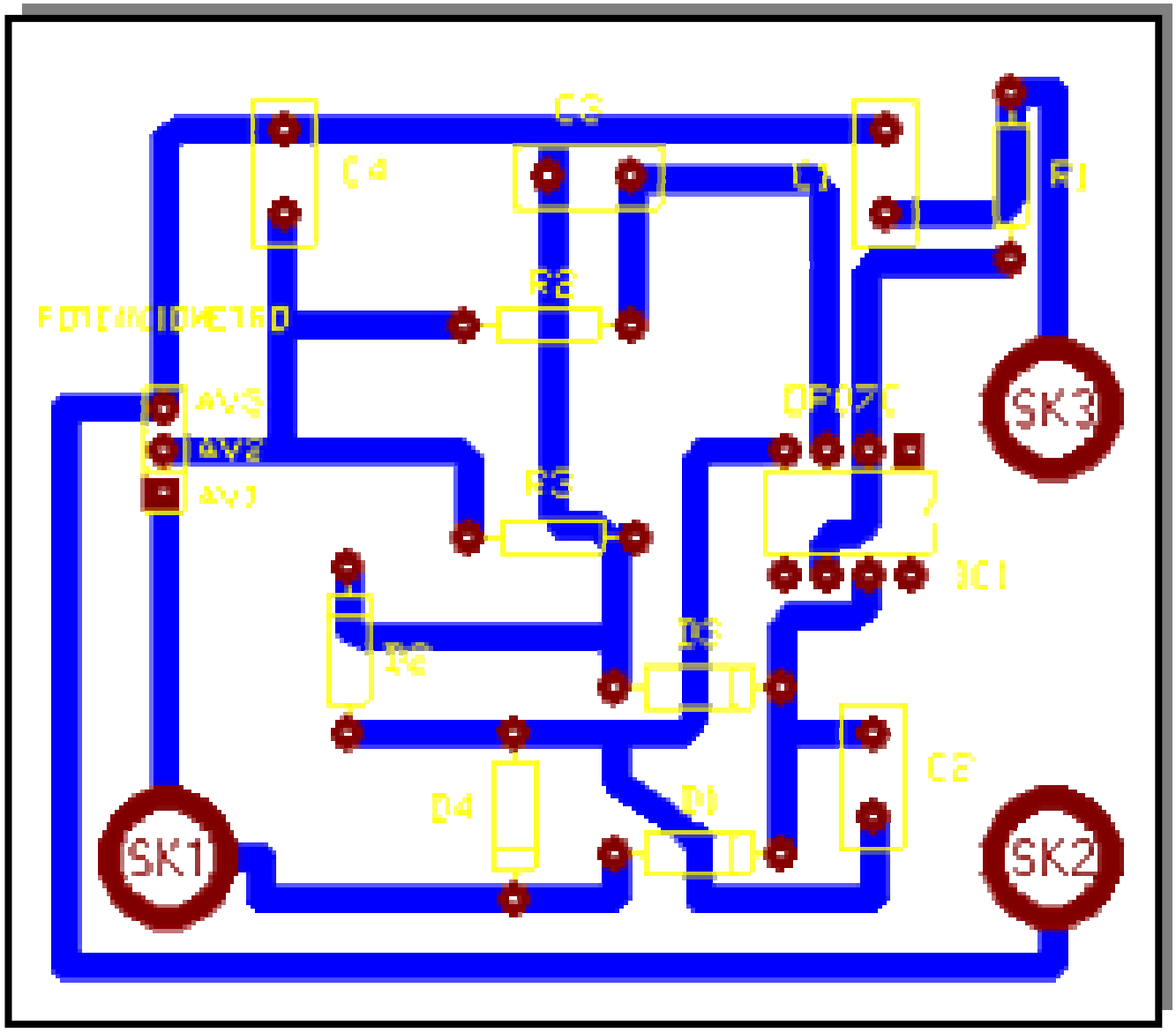
Fotografía del Potenciómetro de Salida (Vista Frontal)



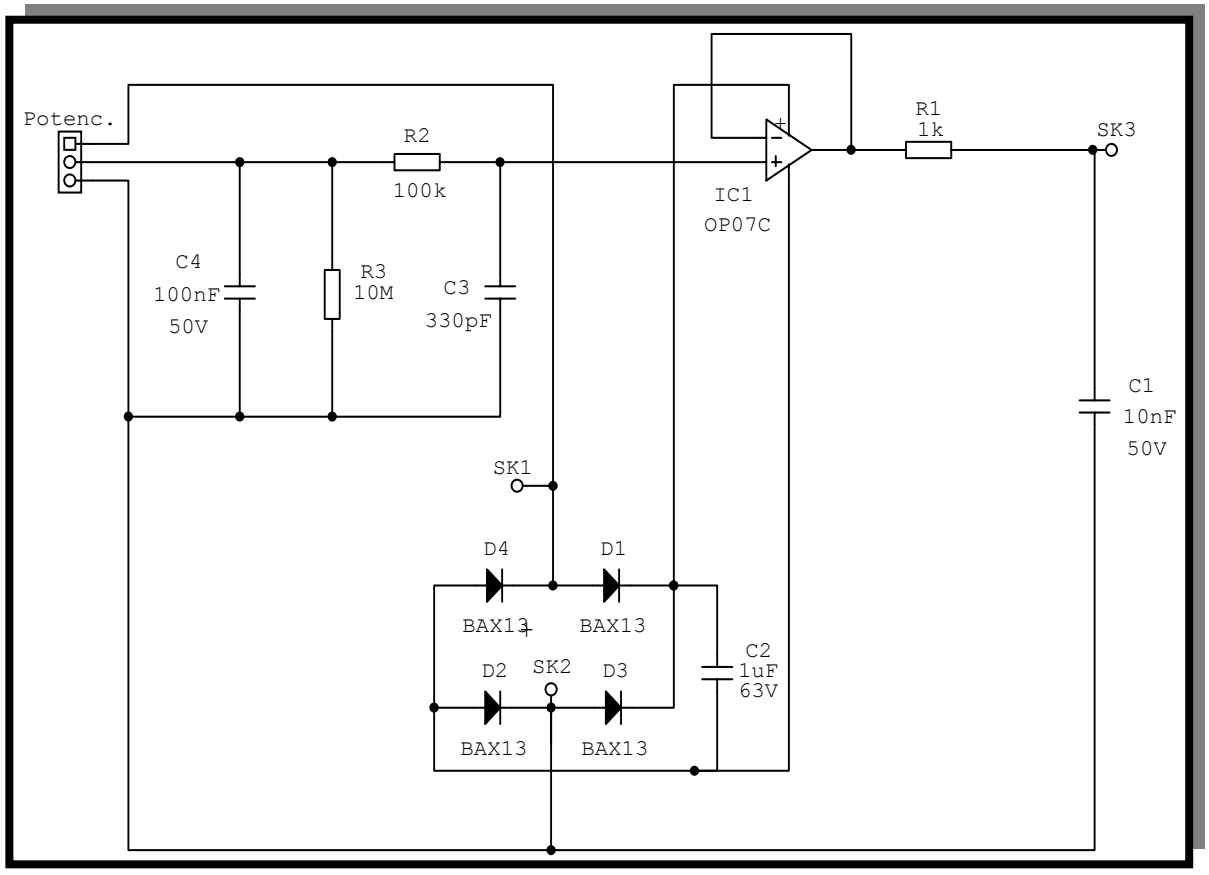
Diseño de la Etiqueta del Potenciómetro de Salida (Vista Superior)



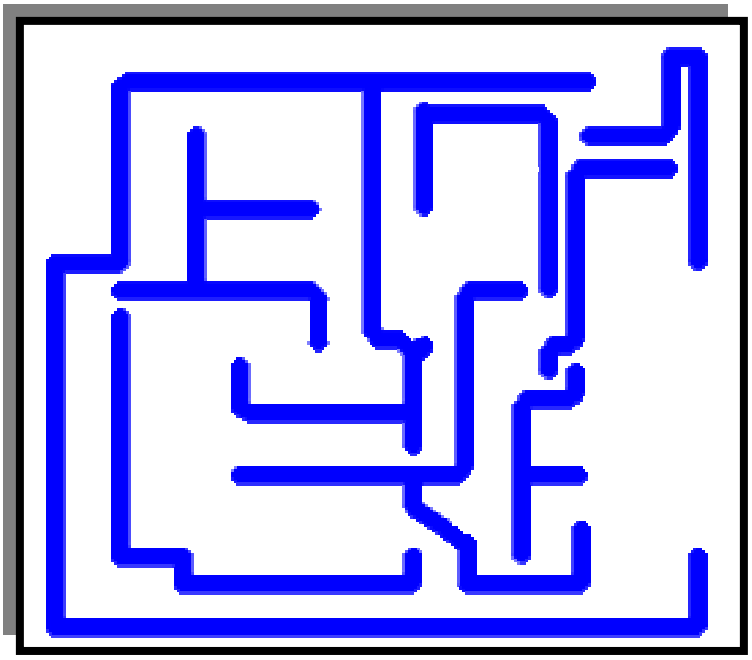
Fotografía del Potenciómetro de Salida (Vista Superior)



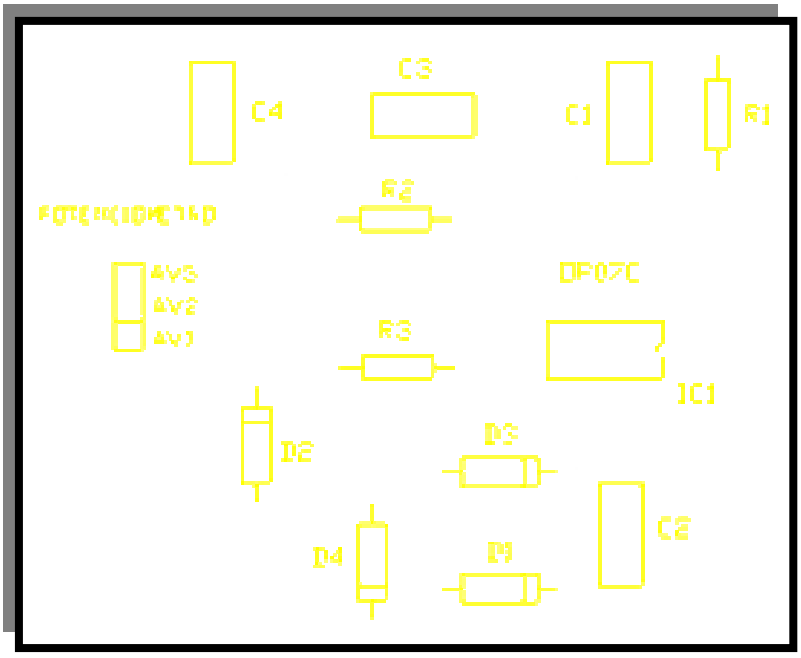
Diseño del Circuito Electrónico del Potenciómetro de Salida



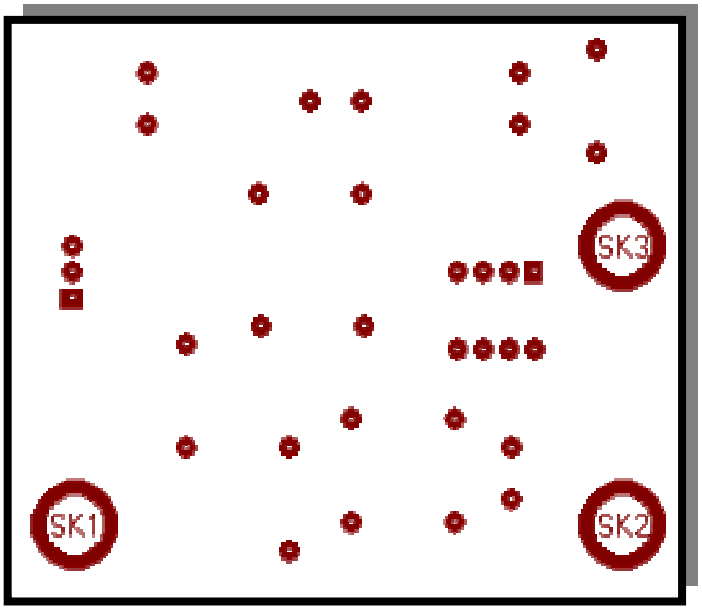
Diseño del Circuito Impreso del Potenciómetro de Salida



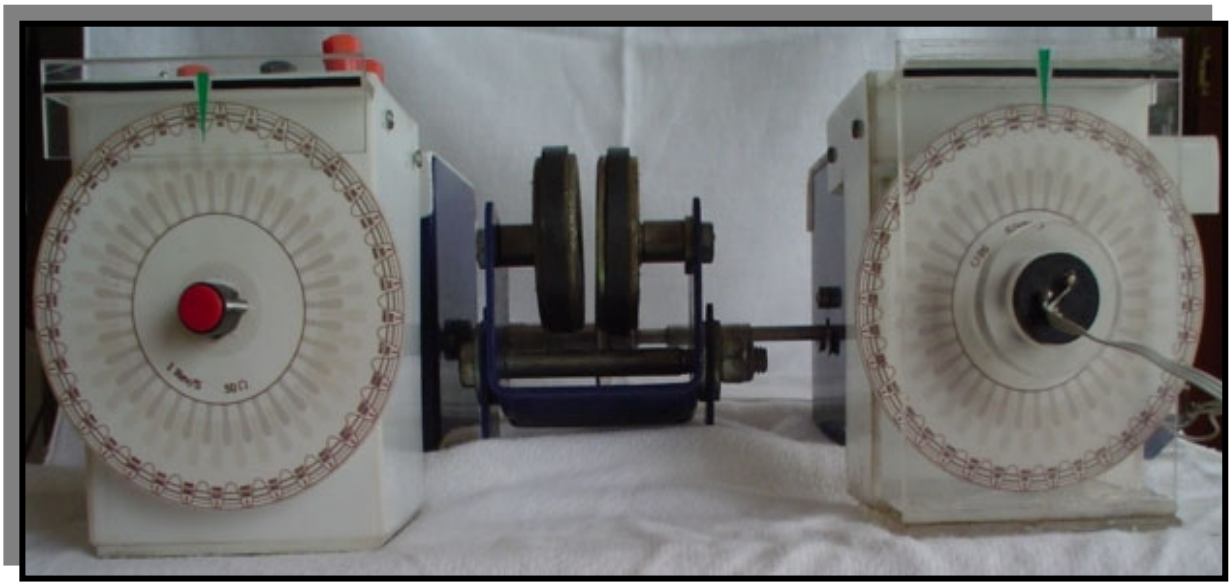
Enrutado del Circuito Impreso del Potenciómetro de Salida



Máscara de Componentes del Circuito Impreso del Potenciómetro de Salida

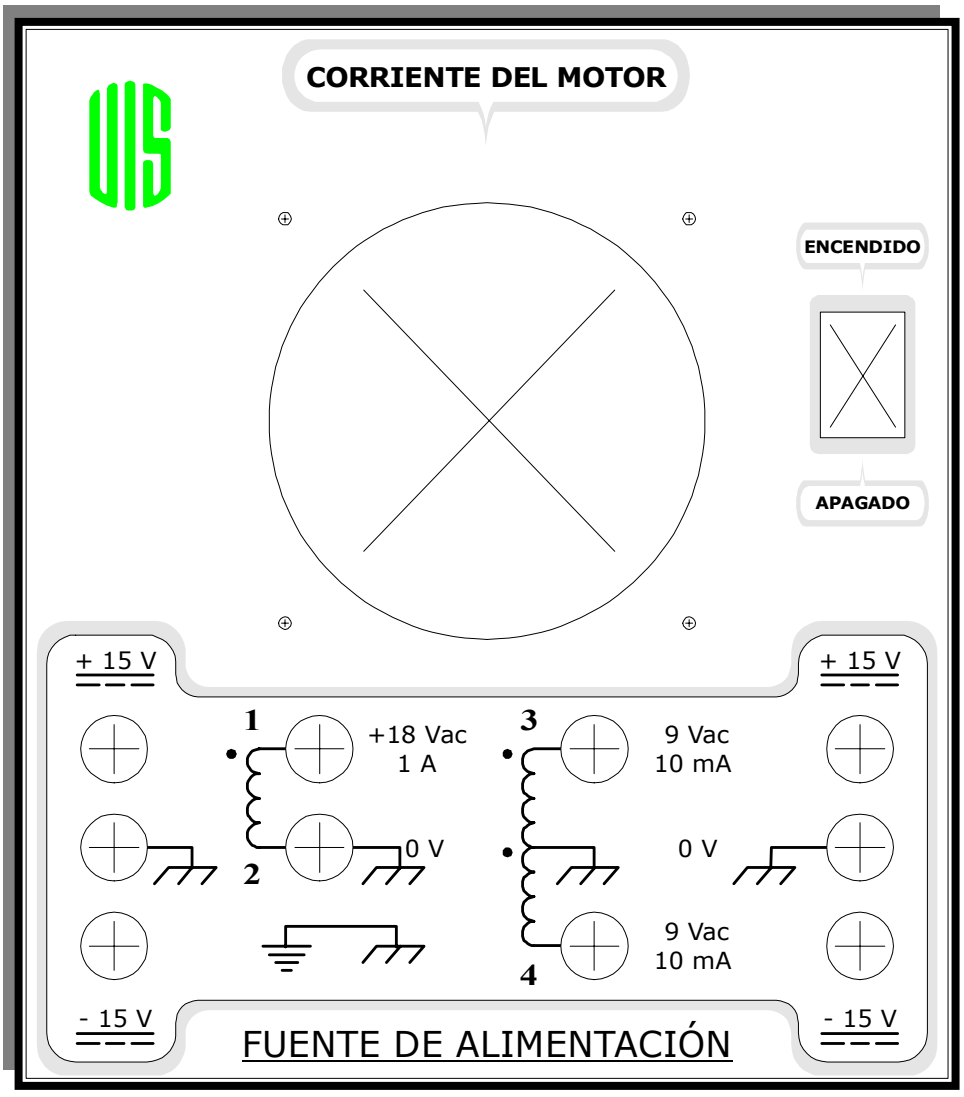


Pads del Circuito Impreso del Potenciómetro de Salida



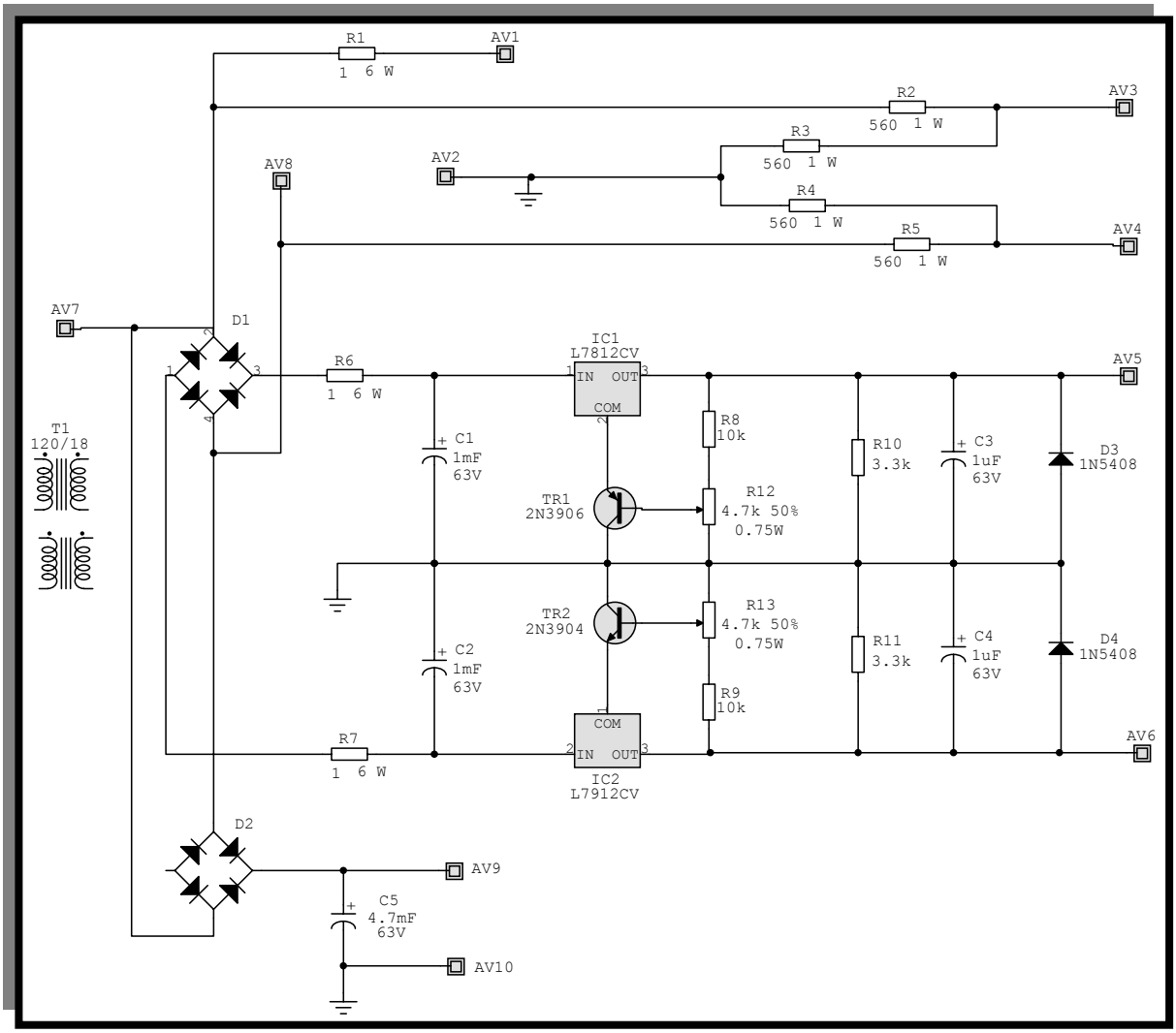
Fotografía de los Potenciómetros de Entrada y de Salida.

Anexo D. Fuente

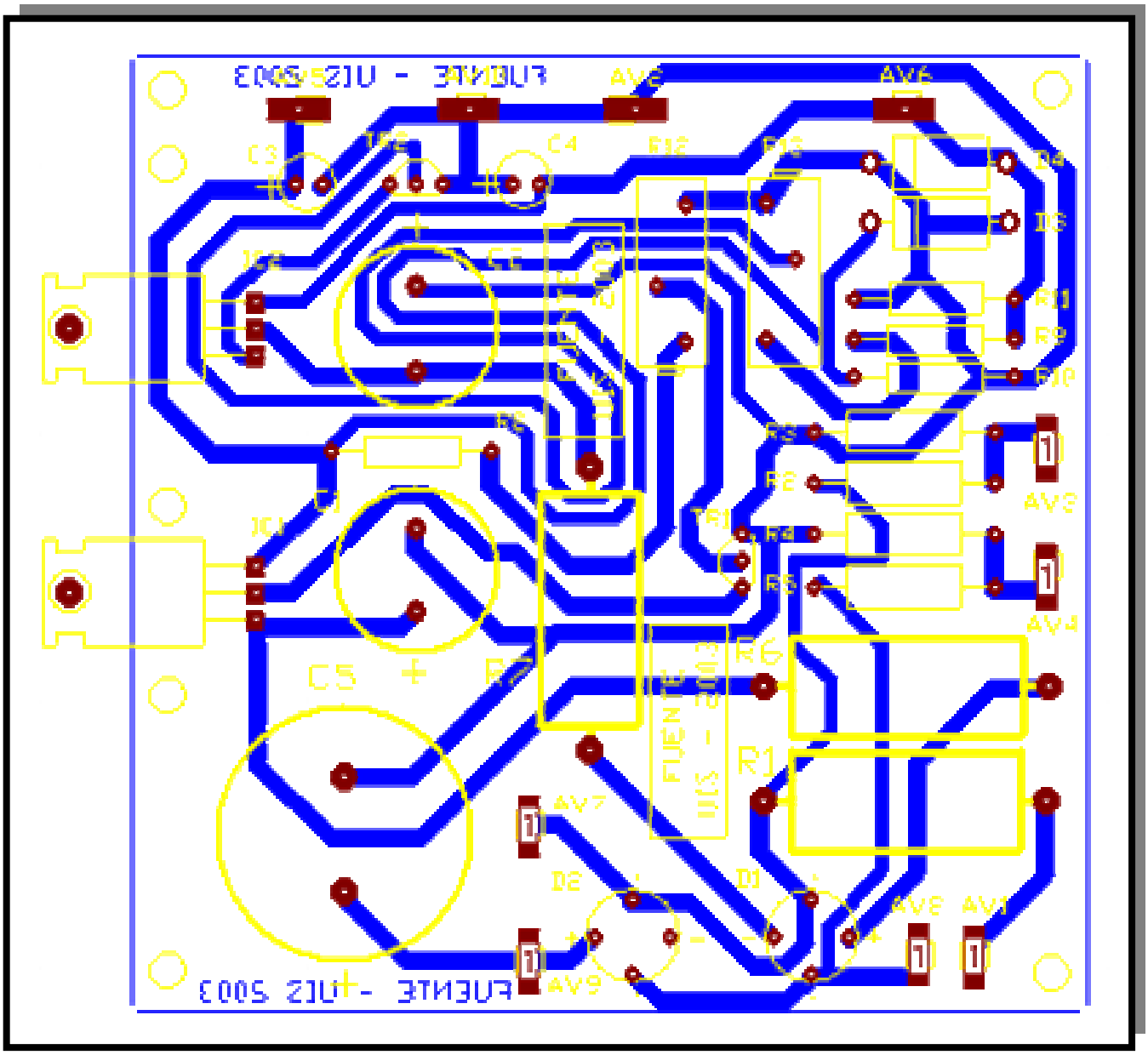


Diseño de la Etiqueta de la Fuente (Vista Frontal)

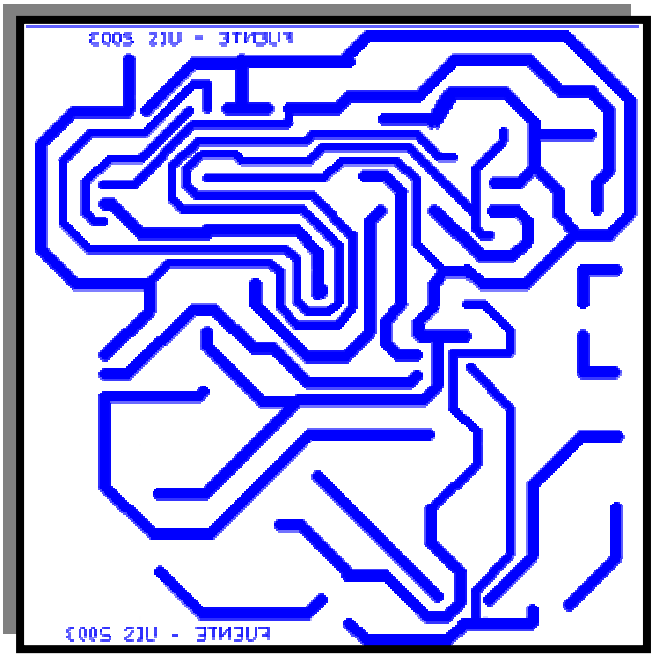
Fotografía de la Fuente de Alimentación. (Vista Frontal)



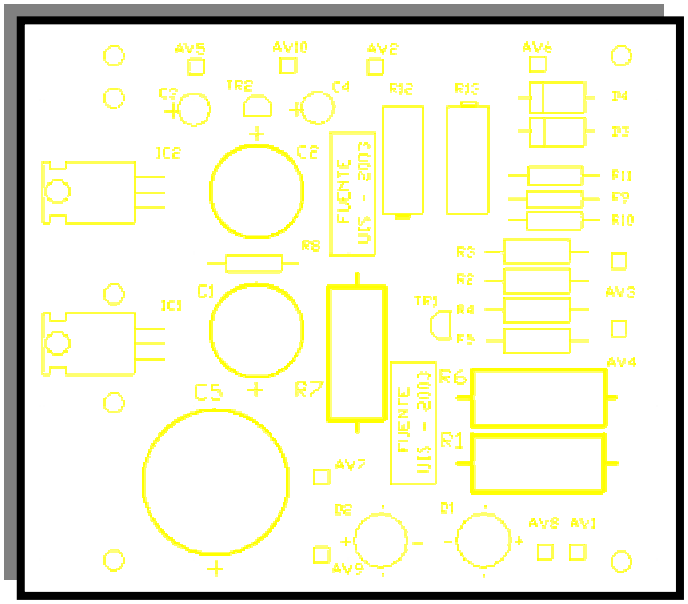
Diseño del Circuito Electrónico de la Fuente.



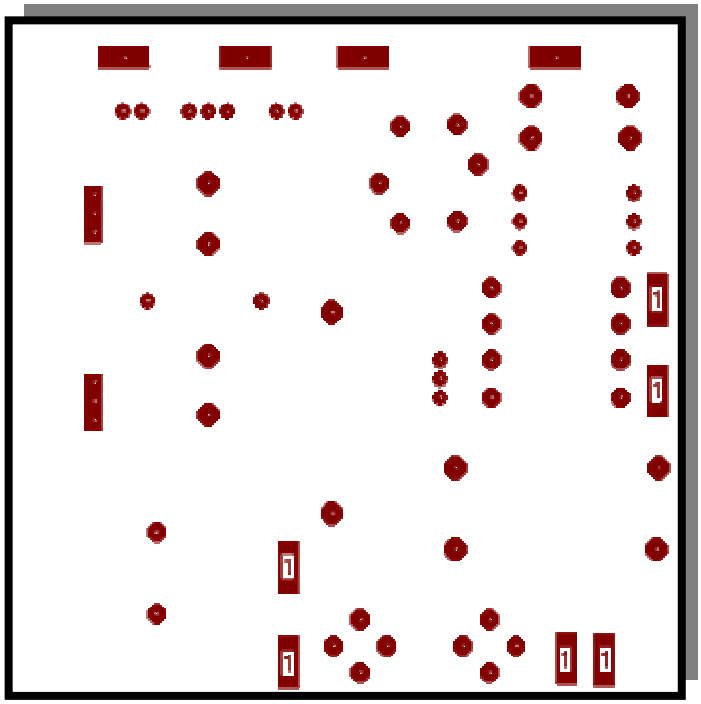
Diseño del Circuito Impreso de la Fuente



Enrutado del Circuito Impreso de la Fuente

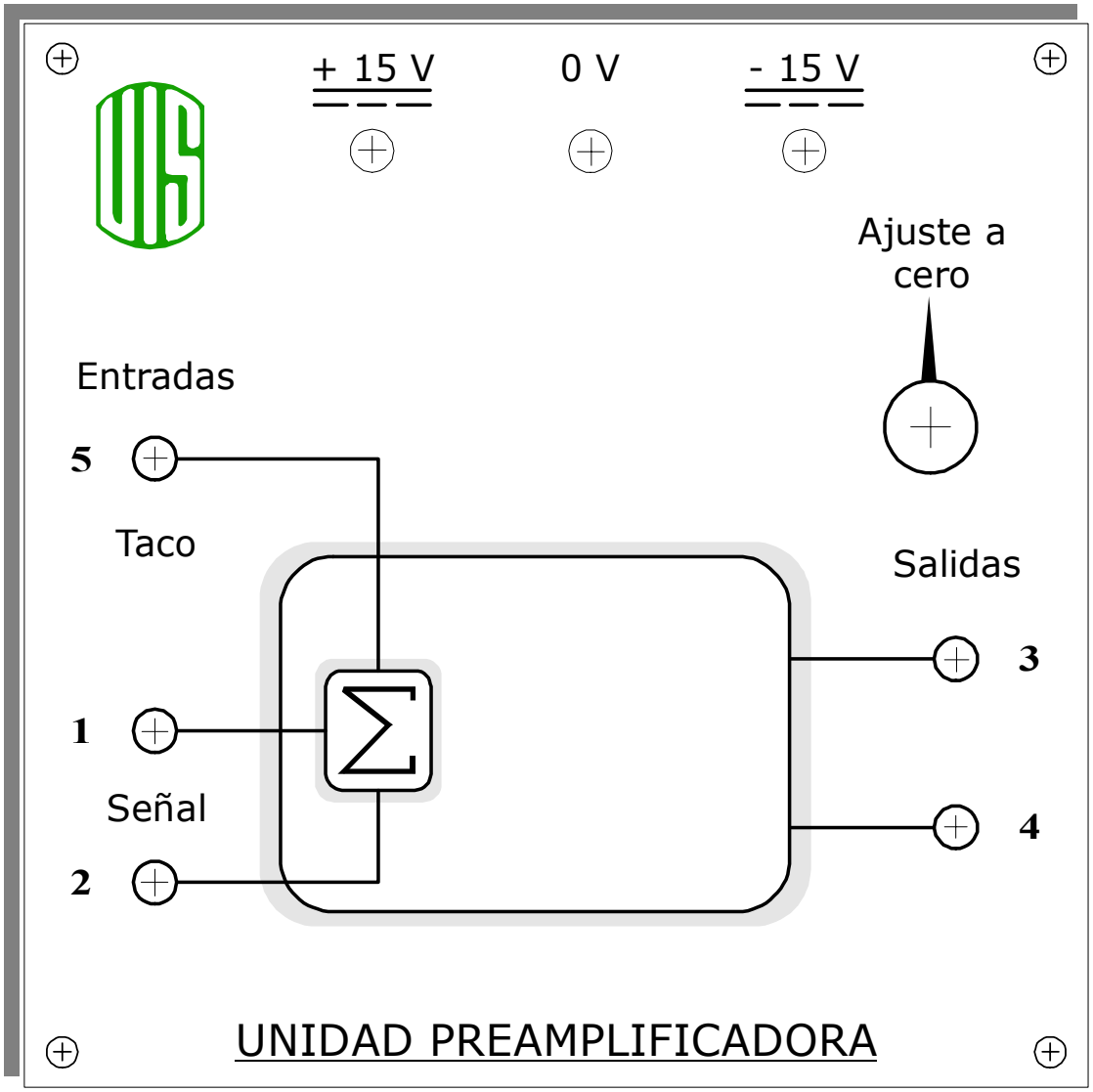


Máscara de Componentes del Circuito Impreso del Potenciómetro de Entrada



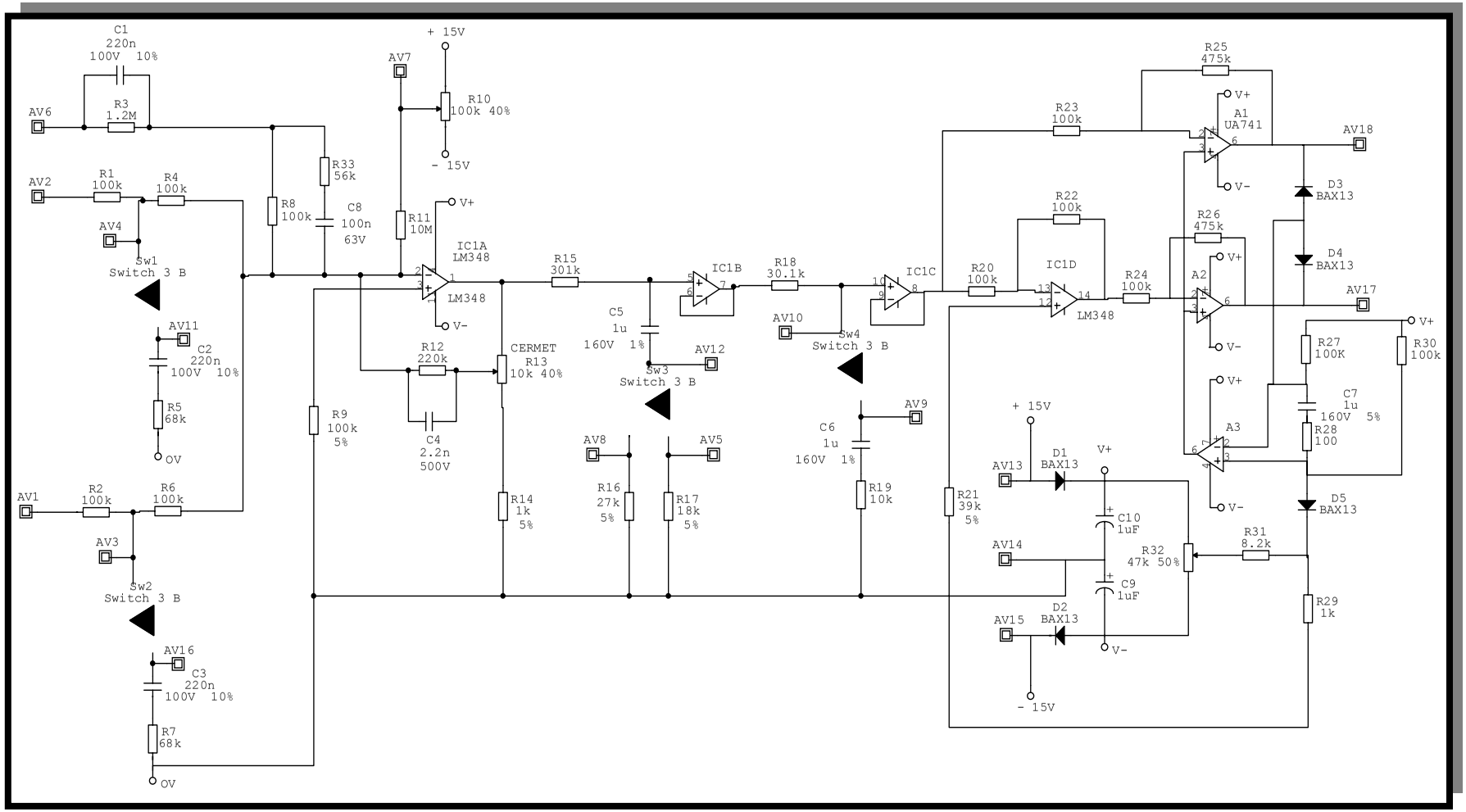
Pads del Circuito Impreso de la Fuente

Anexo E. Preamplificador

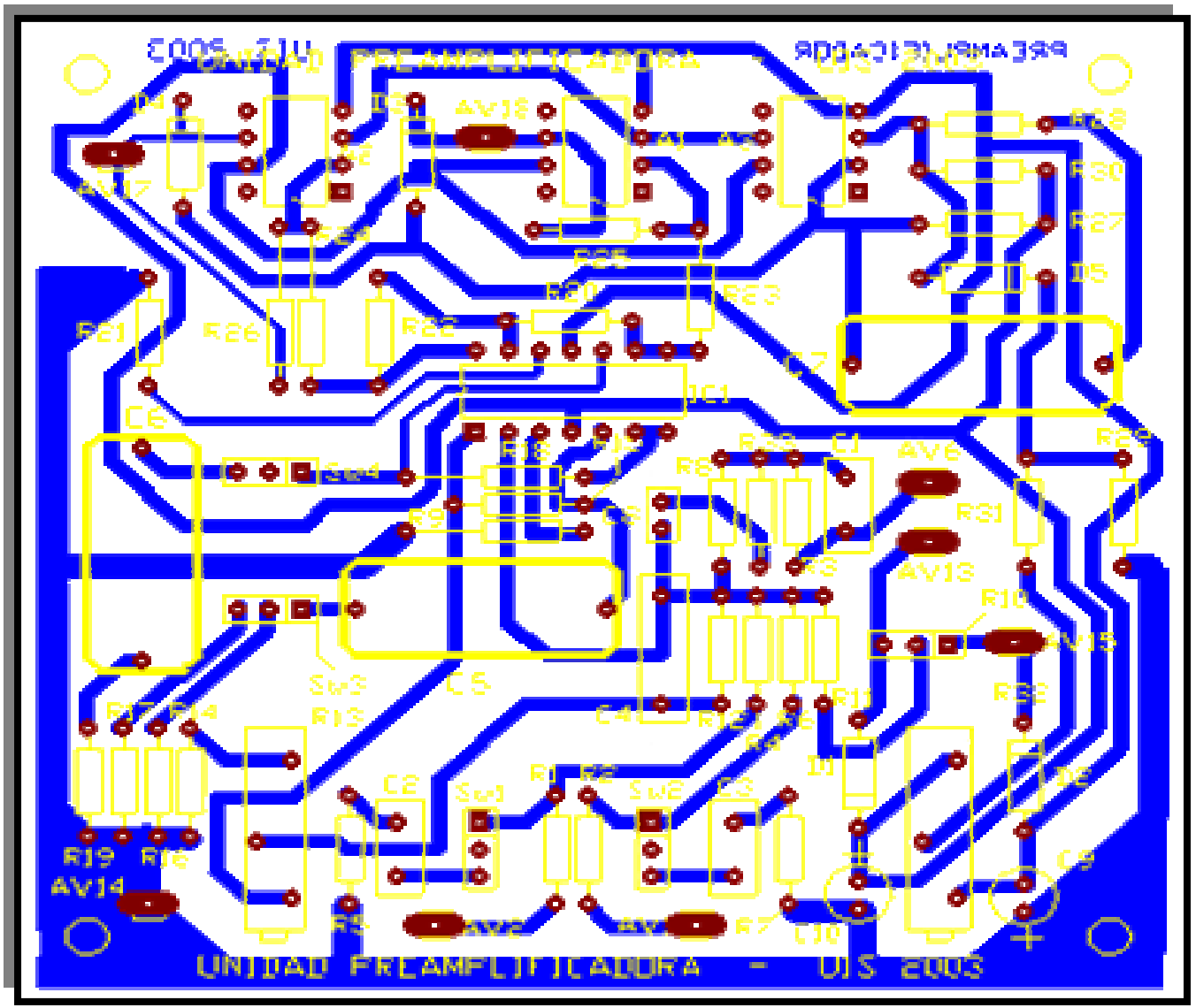


Diseño de la Etiqueta de la Unidad PreAmplificadora (Vista Superior)

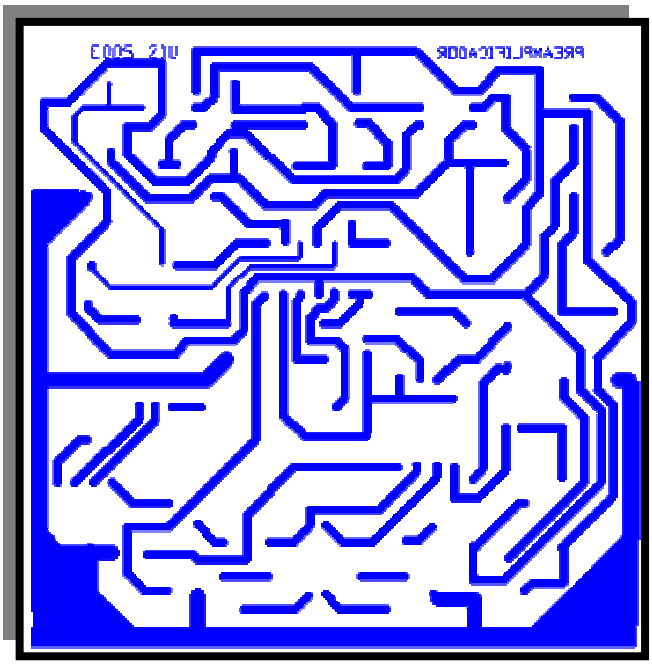
Fotografía de la Unidad de Preamplificación (Vista Superior).



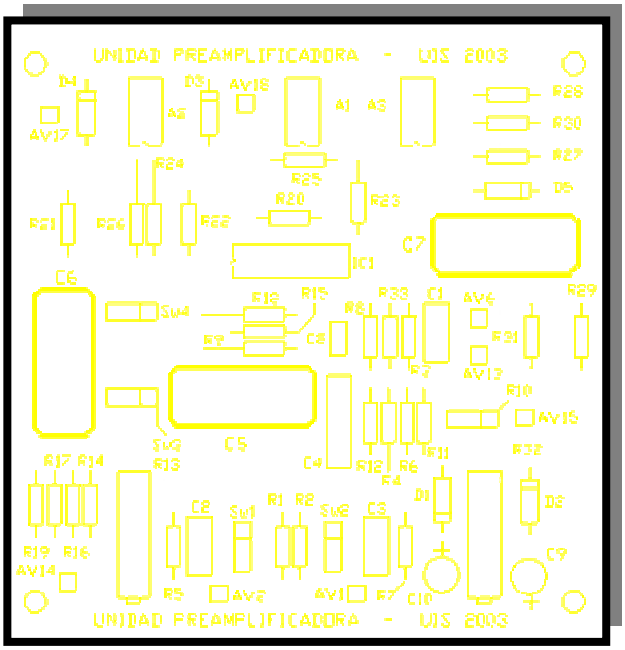
Diseño del Circuito Electrónico de la Unidad de Preamplificación.



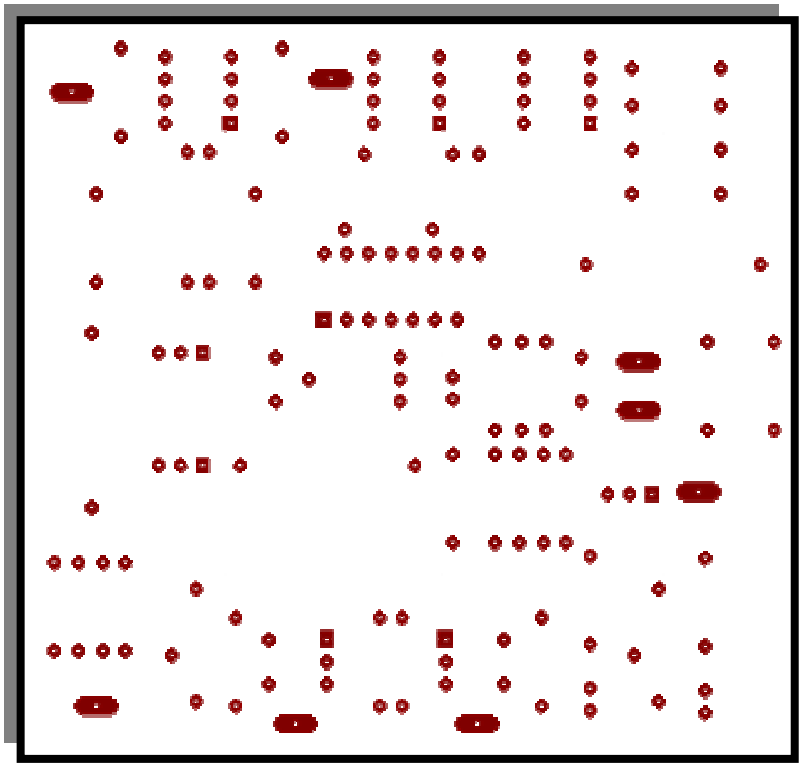
Diseño del Circuito Impreso de la Unidad de Preamplificación.



Enrutado del Circuito Impreso de la Unidad de Preamplificación

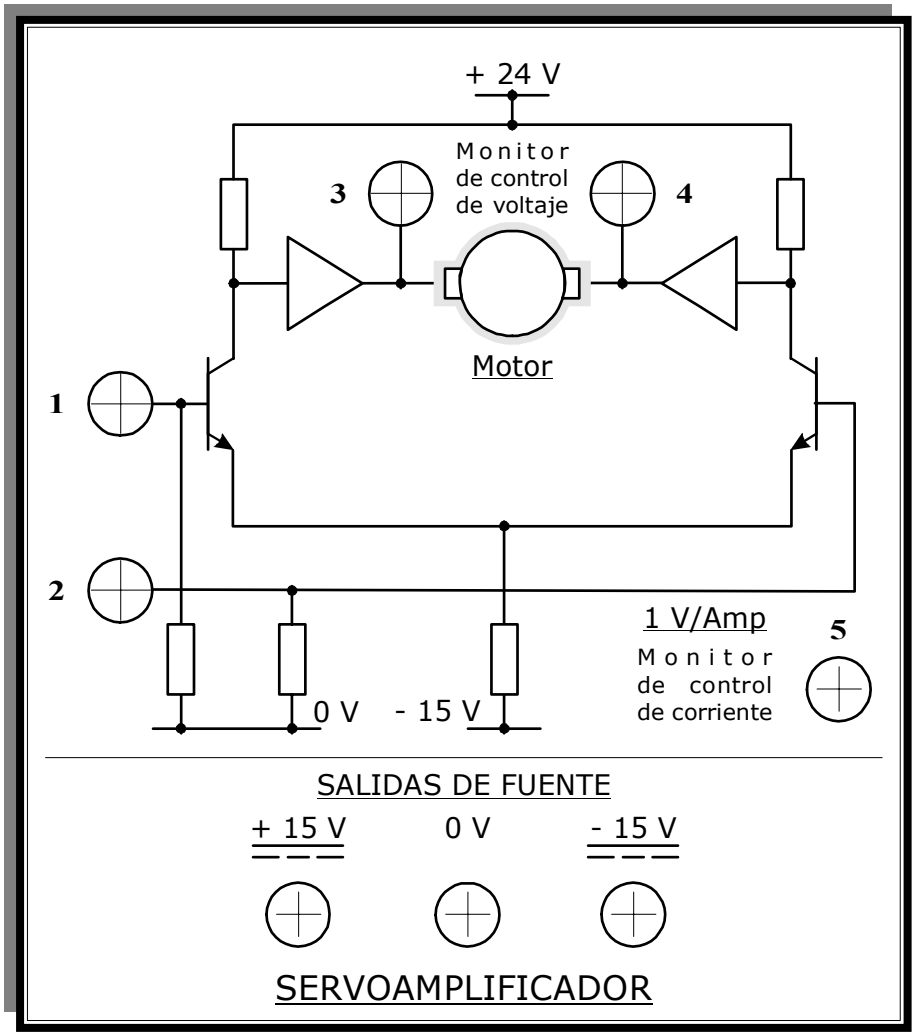


Máscara de Componentes del Circuito Impreso de la Unidad de Preamplificación



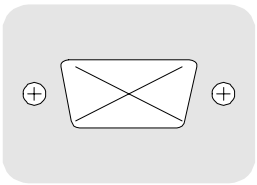
Pads del Circuito Impreso de la Unidad de Preamplificación

Anexo F. Servoamplificador

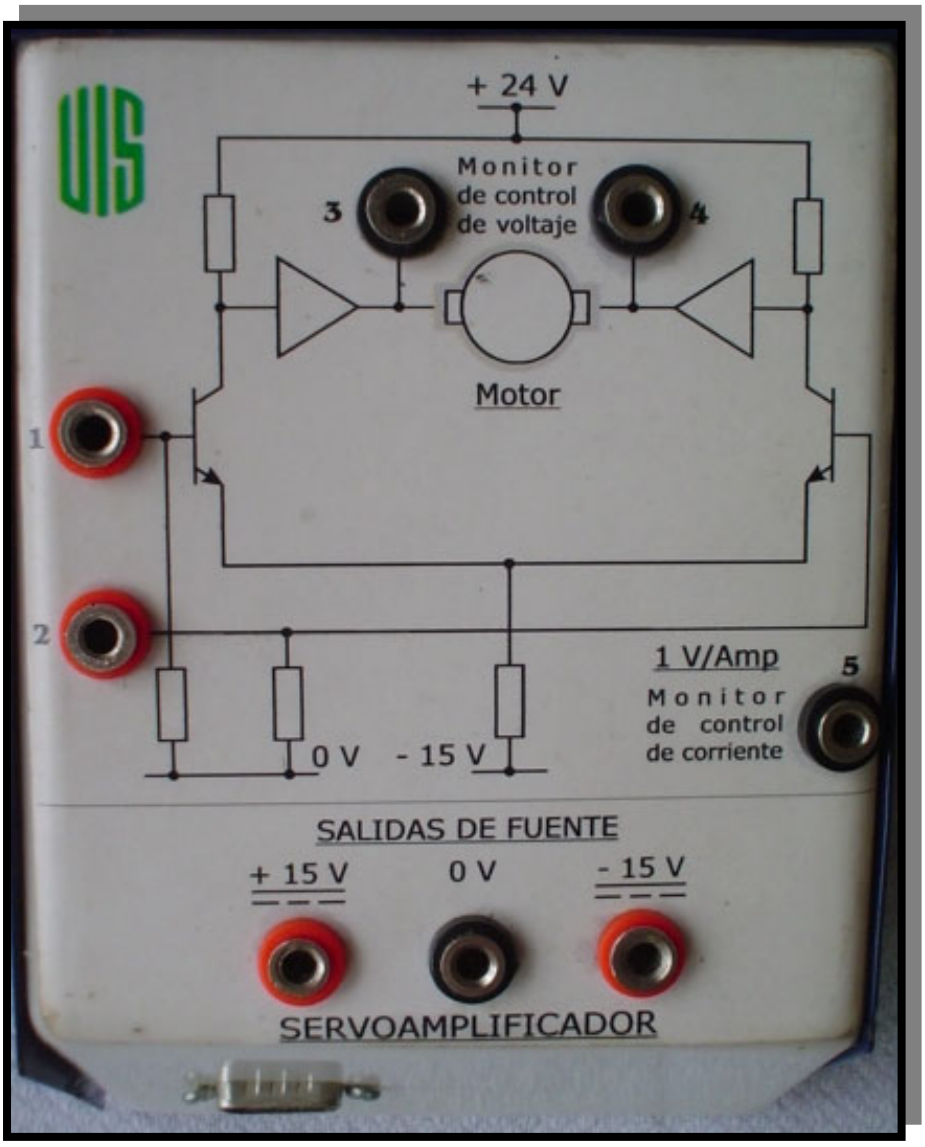


Diseño de la Etiqueta del Servoamplificador (Vista Frontal).

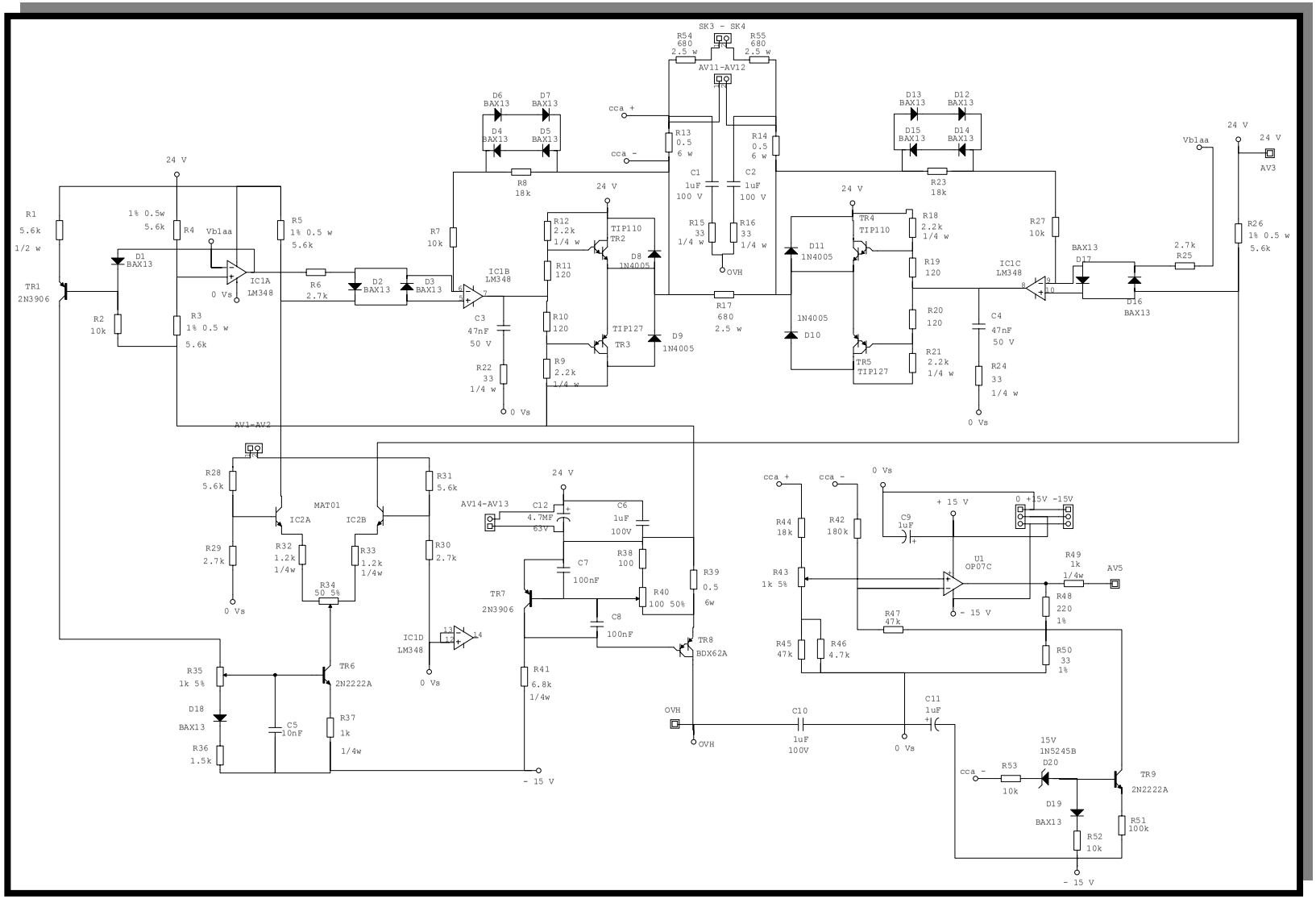
.



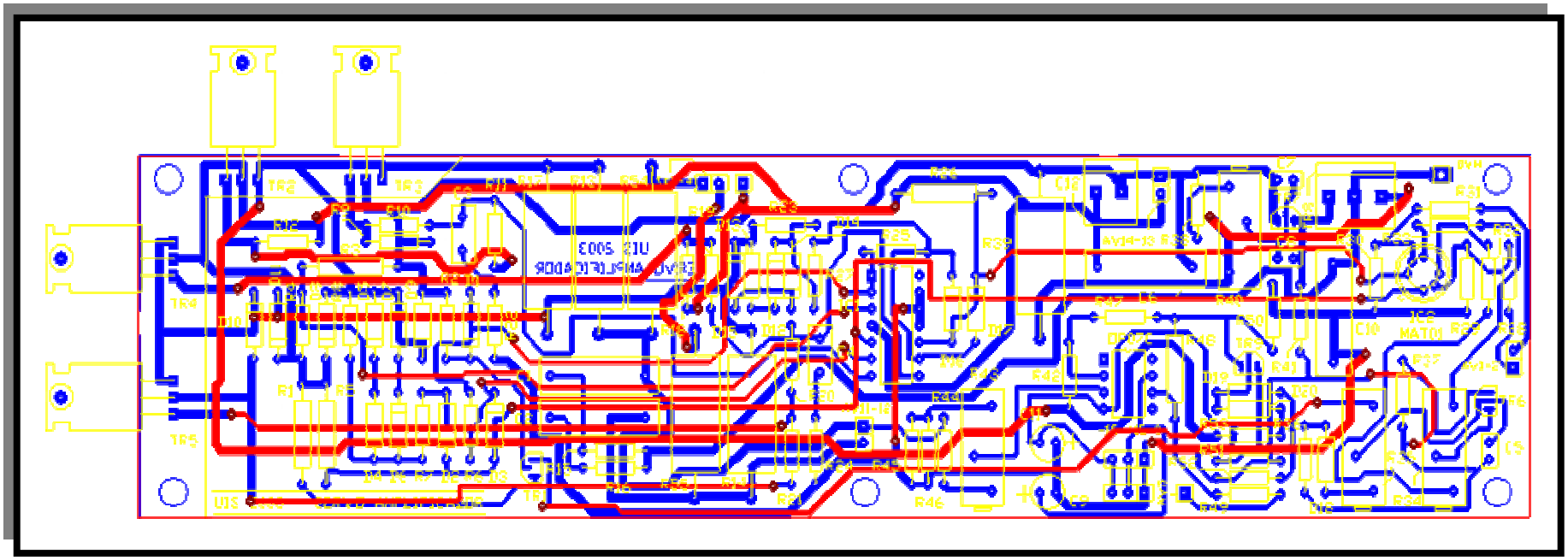
Diseño del Servoamplificador (Vista Posterior)



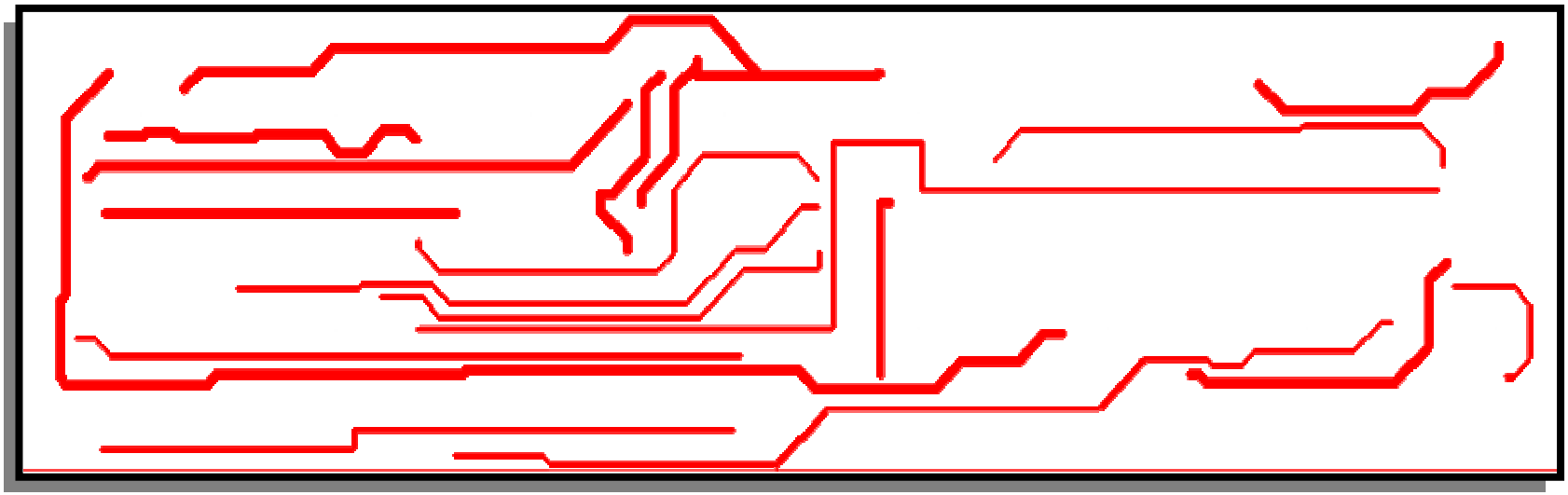
Fotografía del Servoamplificador (Vista Frontal)



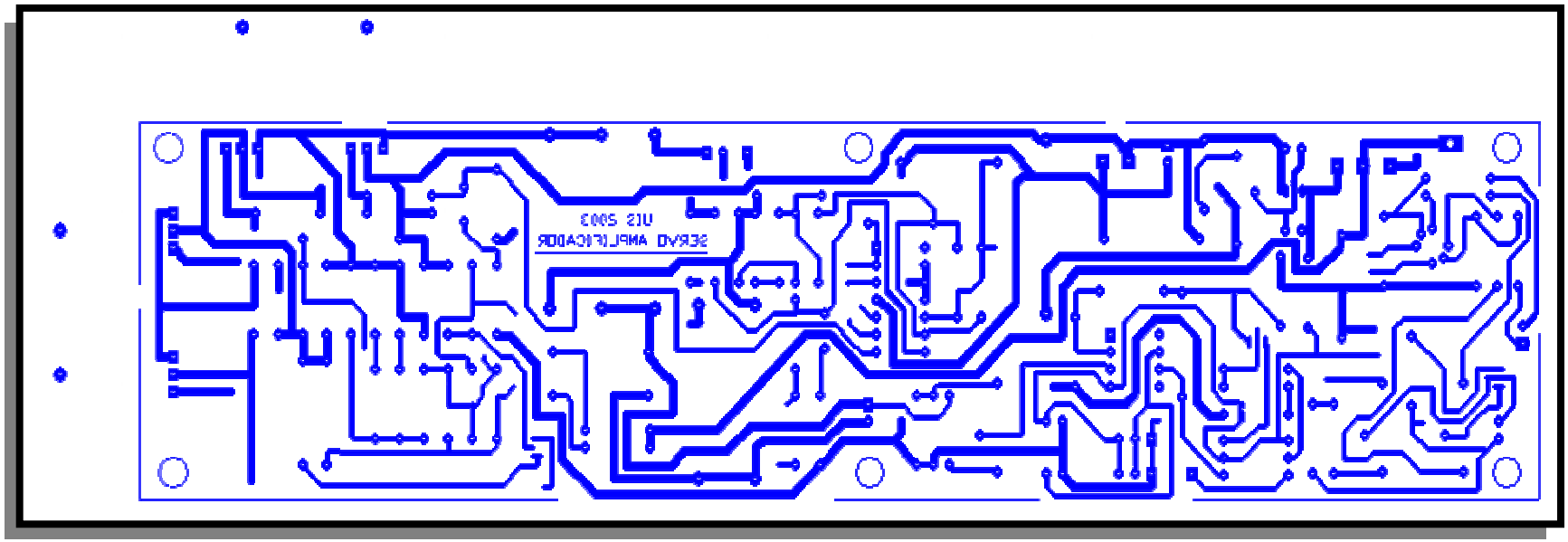
Diseño del Circuito Electrónico del Servoamplificador.



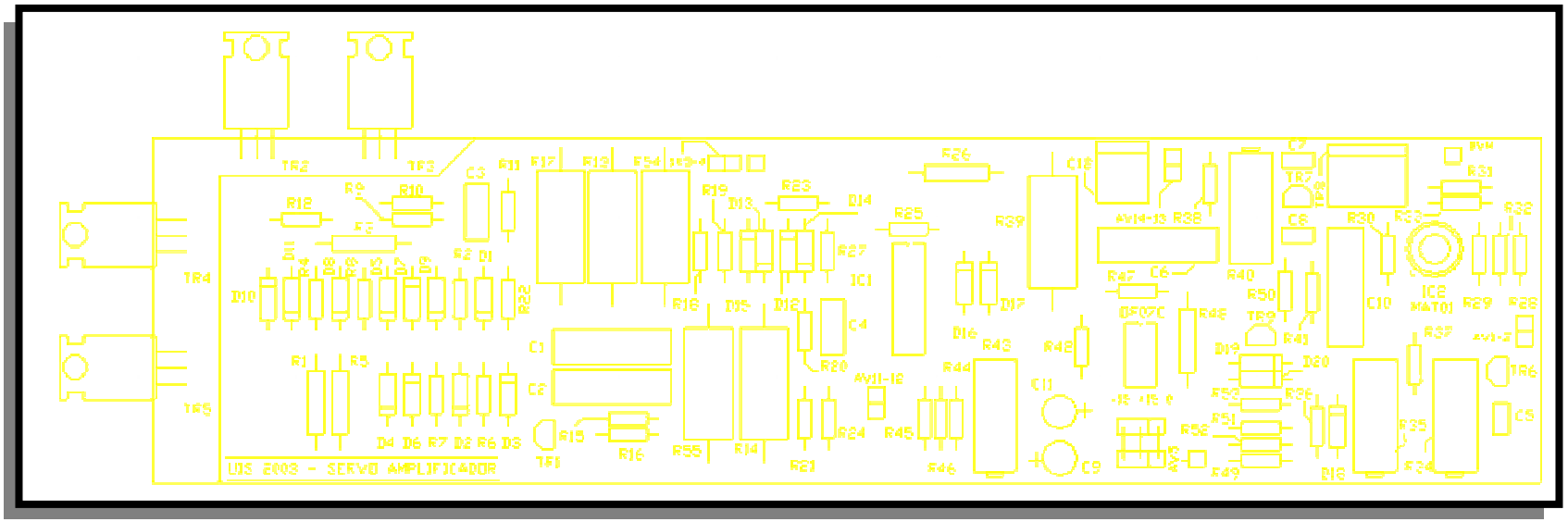
Diseño del Circuito Impreso del Servoamplificador



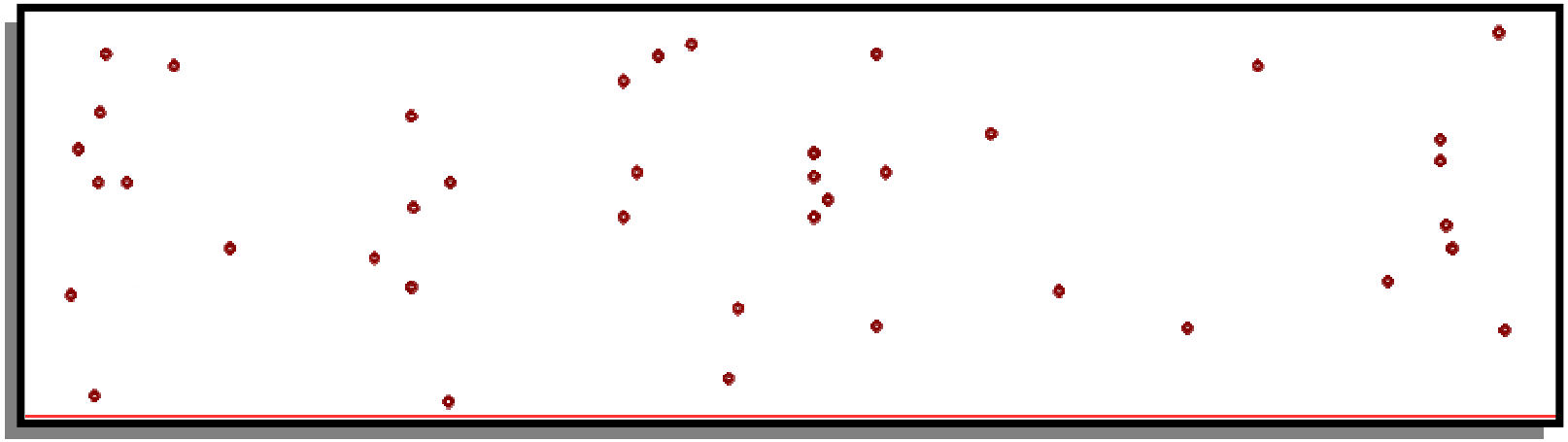
Enrutado del Circuito Impreso del Servoamplificador (Segunda Cara)



Enrutado del Circuito Impreso del Servoamplificador

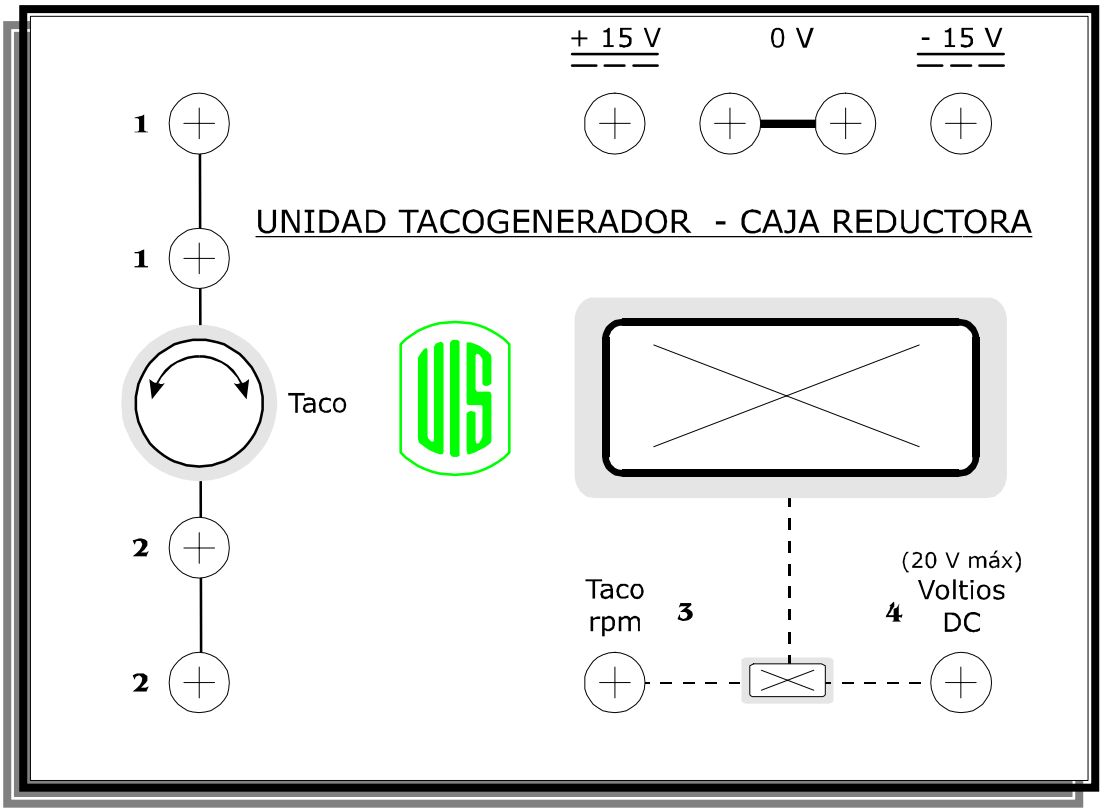


Máscara de Componentes del Circuito Impreso del Servoamplificador



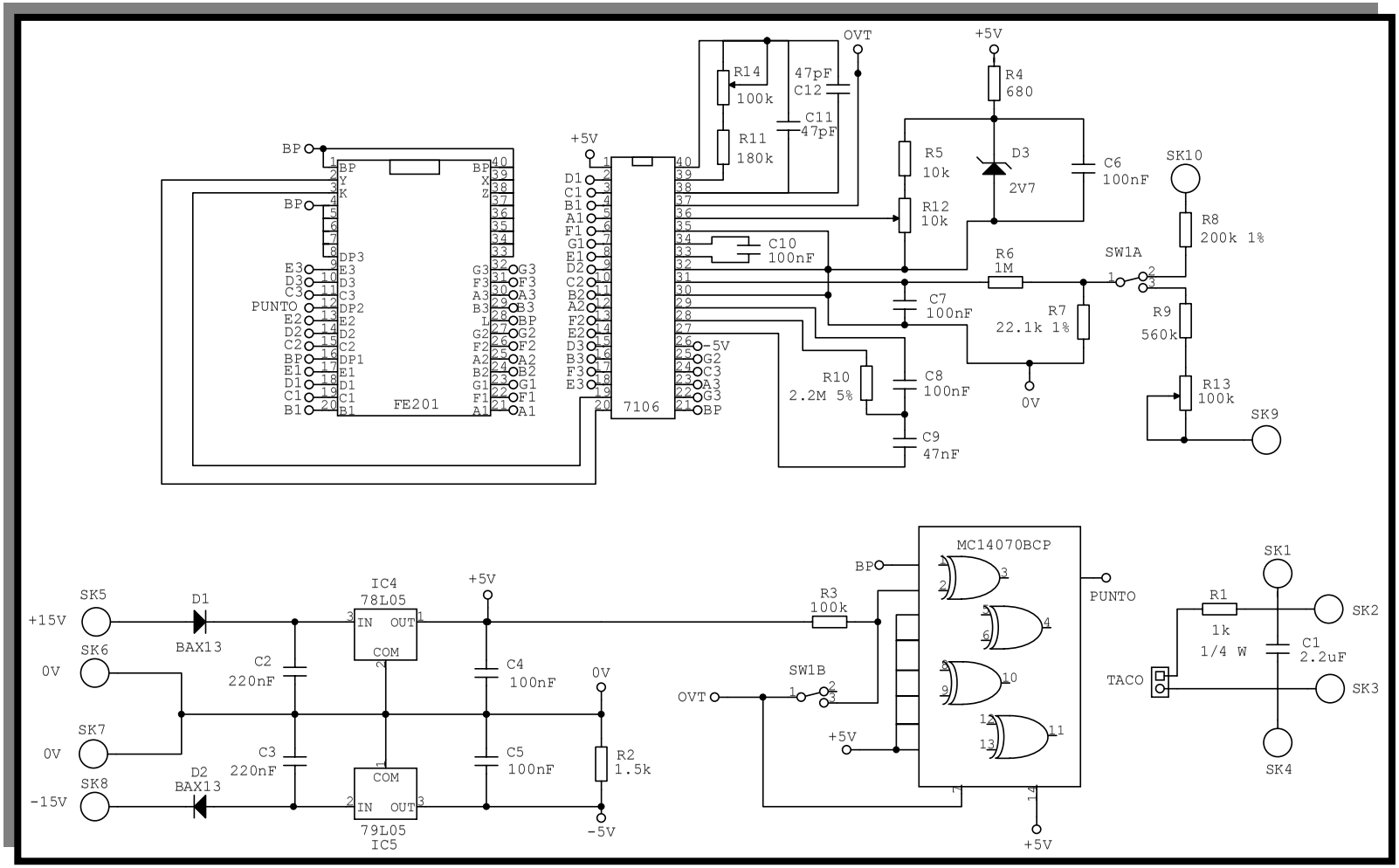
Pads del Circuito Impreso del Servoamplificador

Anexo G. Unidad Tacogeneradora

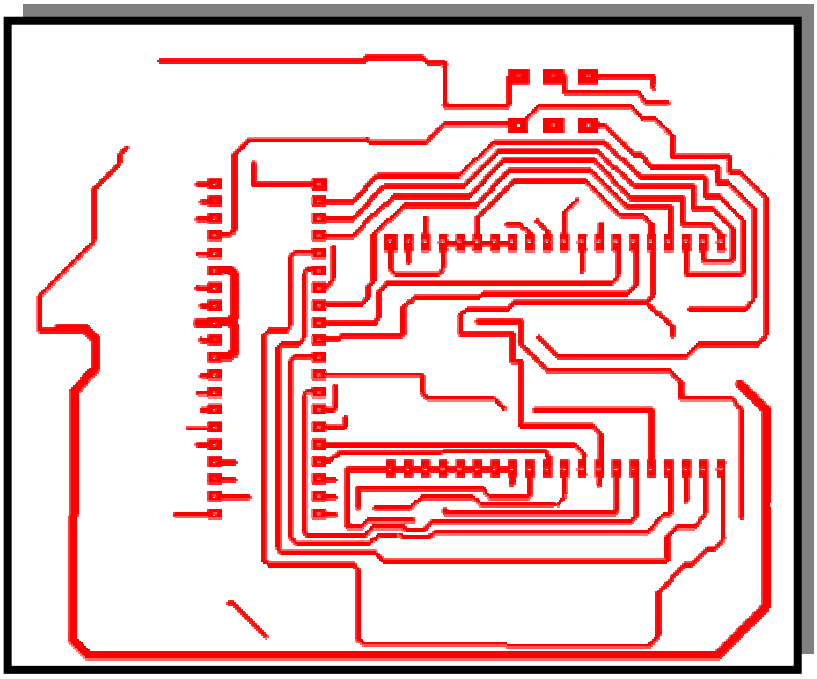


Diseño de la Etiqueta de la Unidad Tacogeneradora

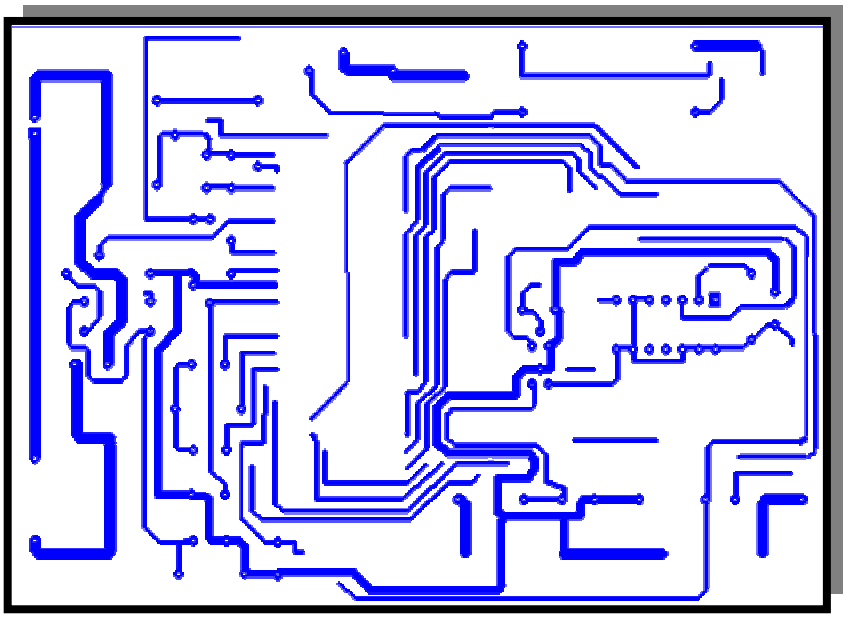
Fotografía de la Unidad Tacogeneradora (Vista Frontal)



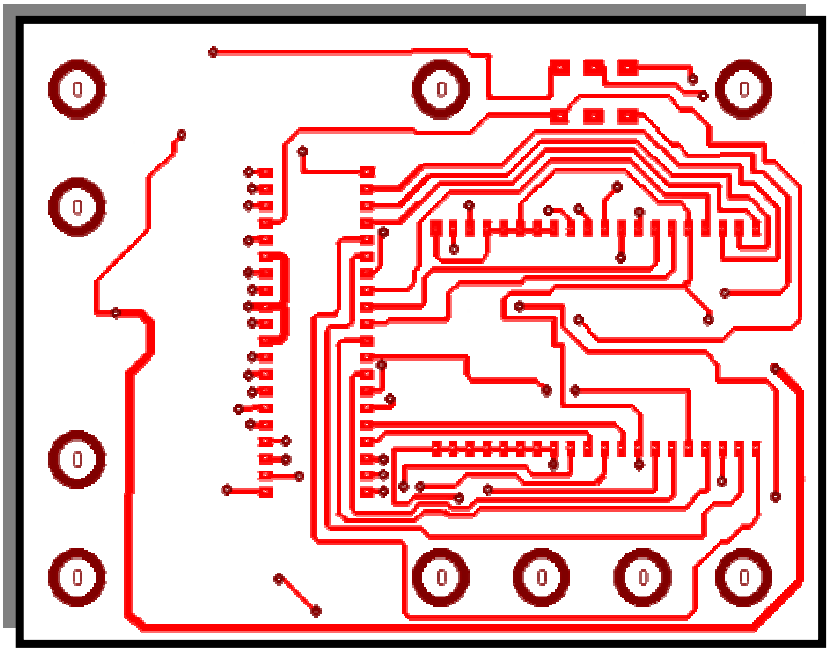
Diseño del Circuito Electrónico de la Unidad Tacogeneradora



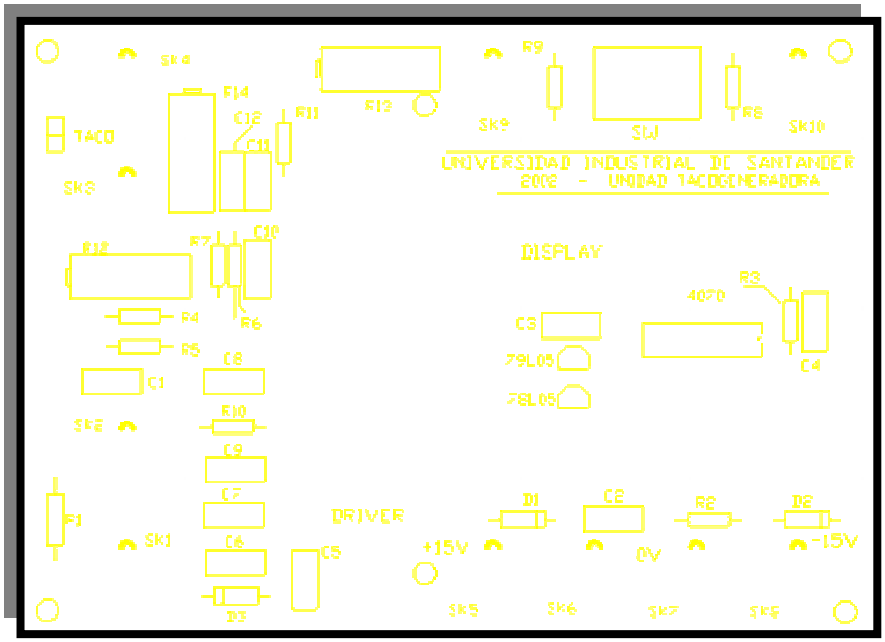
Enrutado del Circuito Impreso de la Unidad Tacogeneradora (Segunda Cara)



Enrutado del Circuito Impreso de la Unidad Tacogeneradora

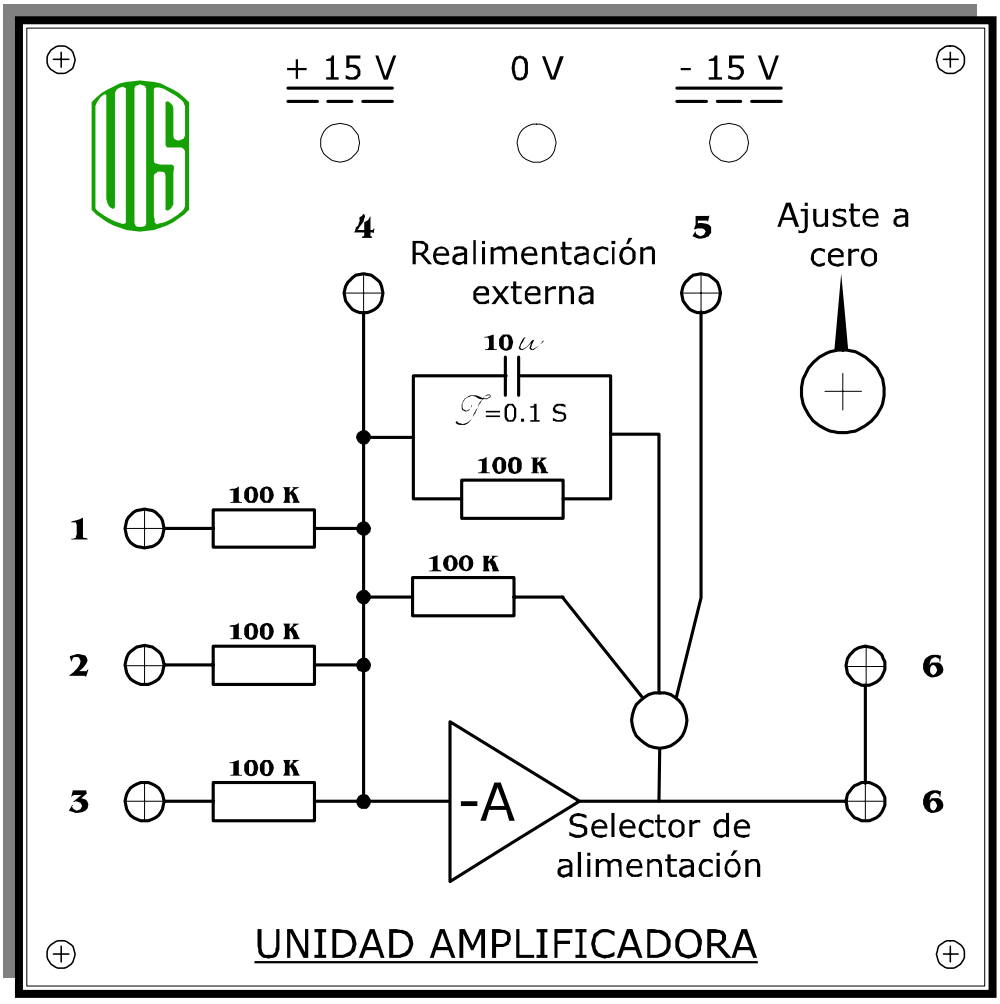


Máscara de Componentes del Circuito Impreso de la Unidad Tacogeneradora



Pads del Circuito Impreso de la Unidad Tacogeneradora

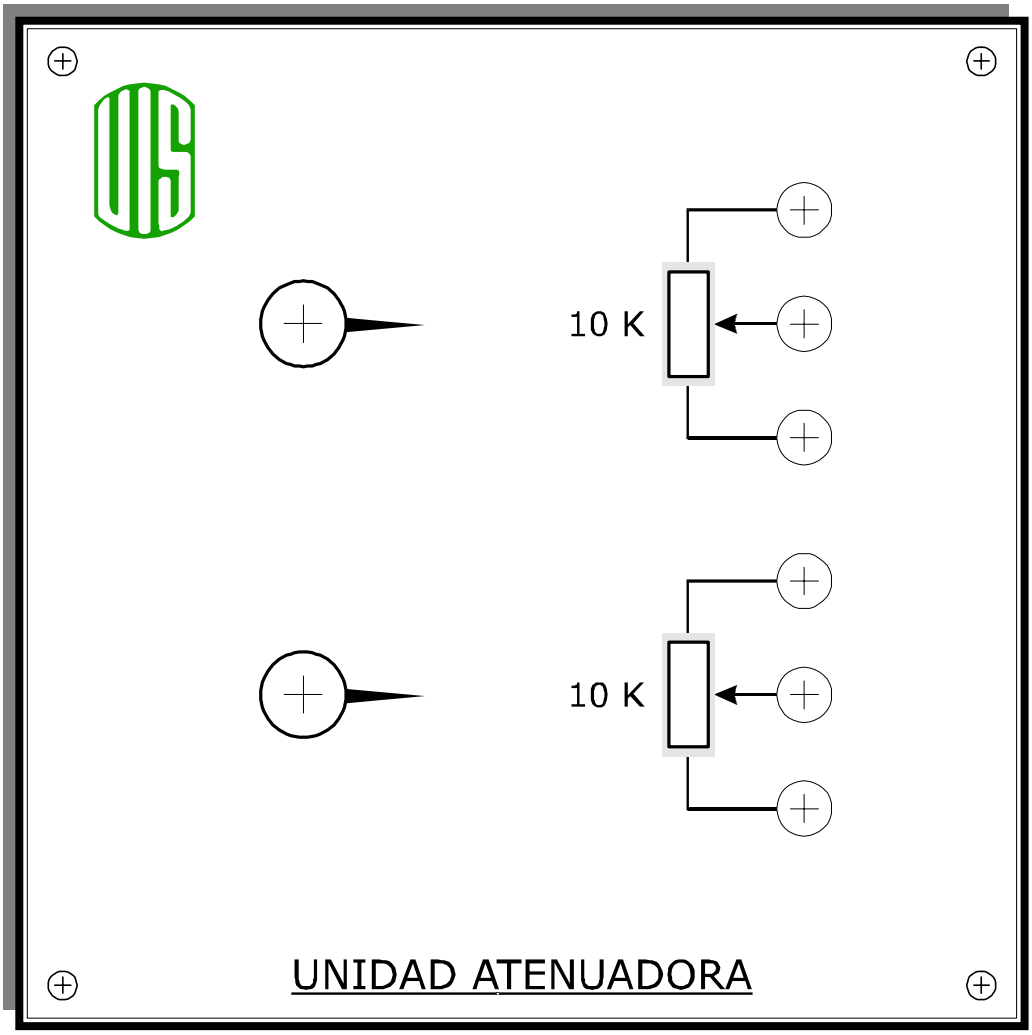
Anexo H. Unidad Amplificadora



Diseño de la Etiqueta de la Unidad Amplificadora (Vista Superior).

Fotografía de la Unidad Amplificadora (Vista Superior)

Anexo I. Unidad Atenuadora



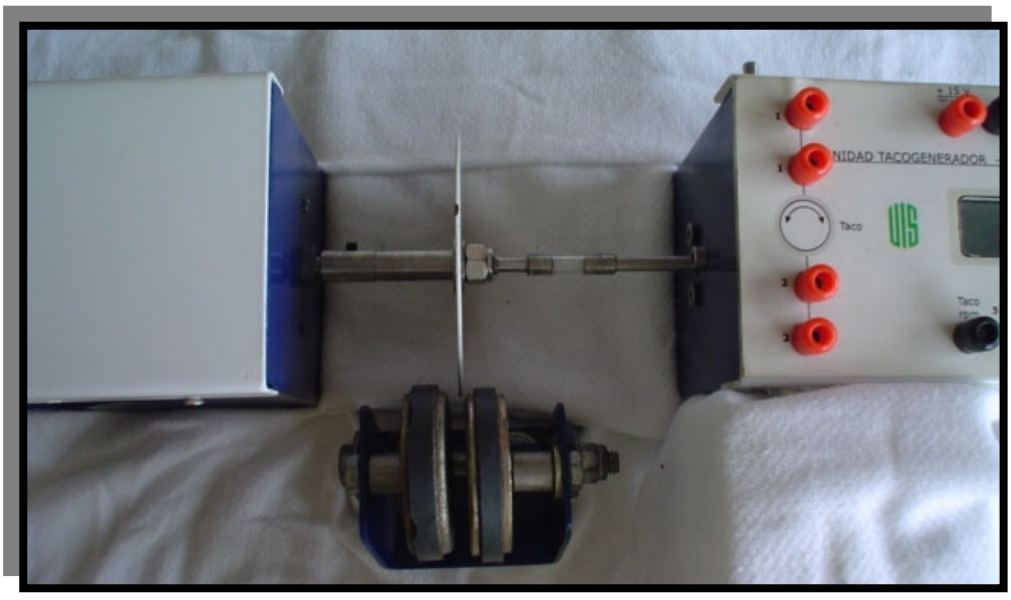
Diseño de la Etiqueta de la Unidad Atenuadora (Vista Superior)

Fotografía de la Unidad Atenuadora (Vista Superior)

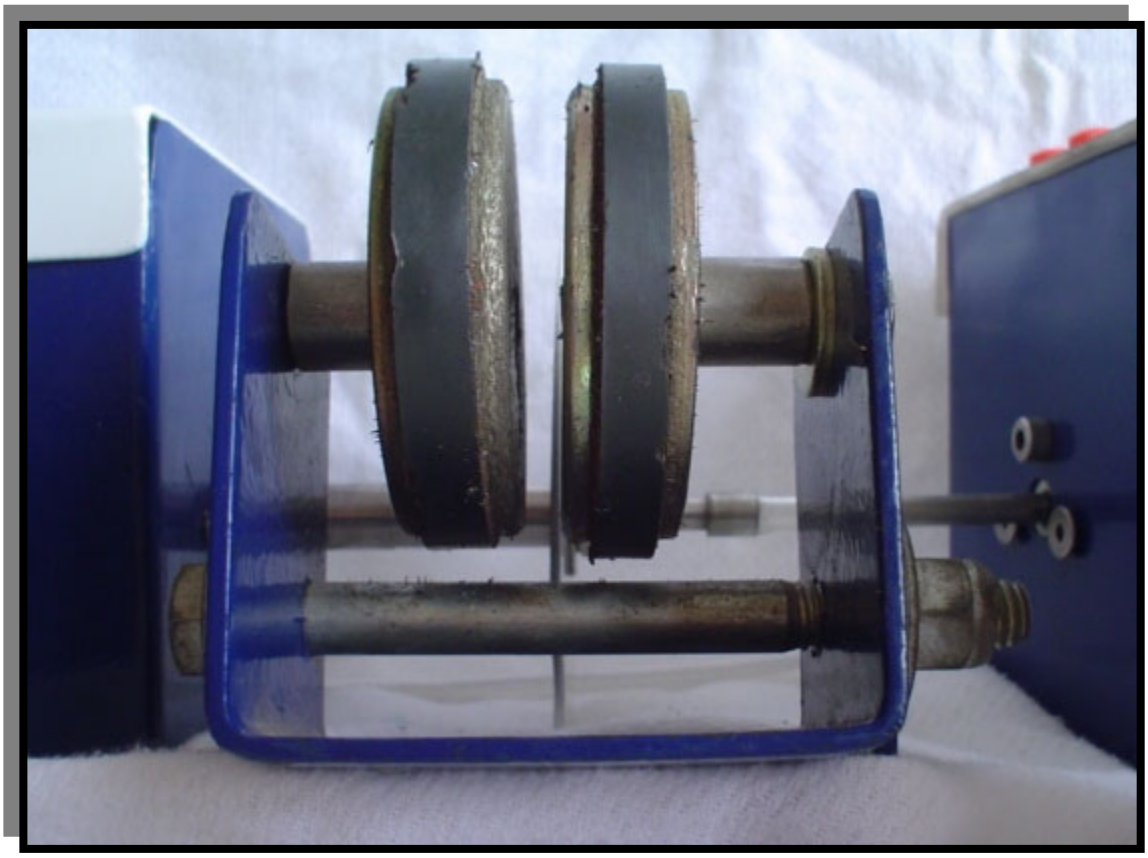
Anexo J. Mecanismo Completo

Mecanismo Completo sobre Lámina de Apoyo

Anexo K. Otras Partes Mecánicas



Acople entre el Motor y la Unidad Tacogeneradora



Freno Mecánico

Anexo L. Diagrama Esquemático y sus Conexiones en el Mecanismo

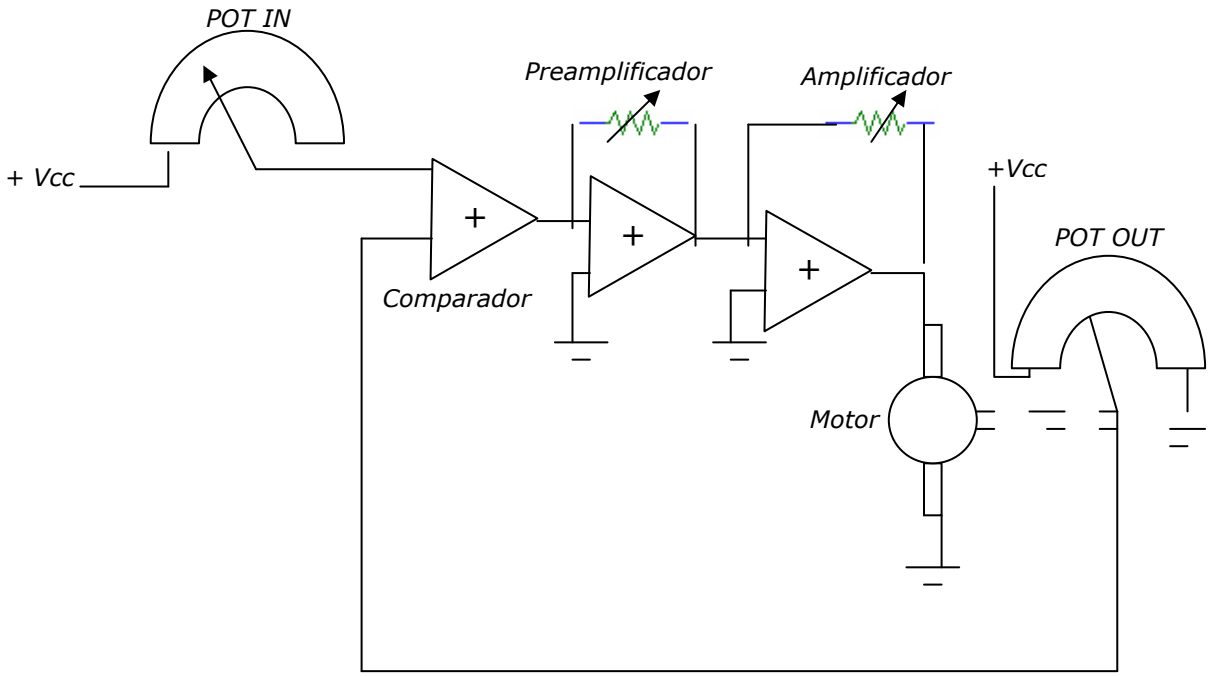


Diagrama Esquemático del Control de Posición

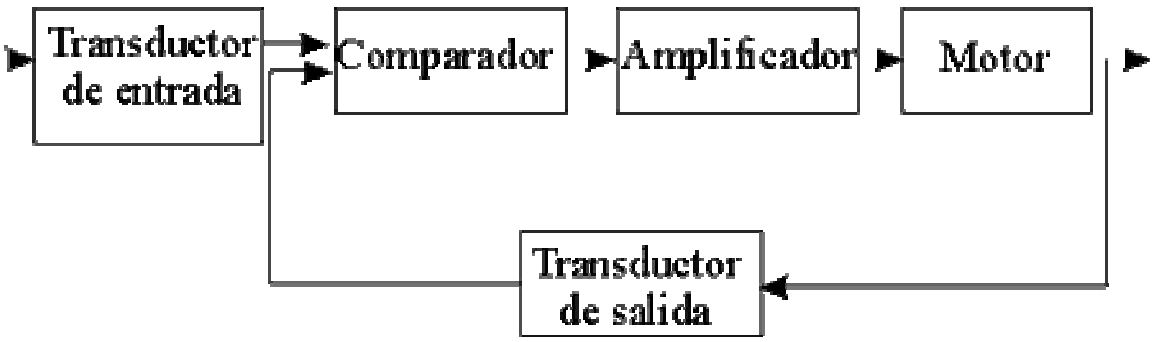


Diagrama de Bloques del Control de Posición

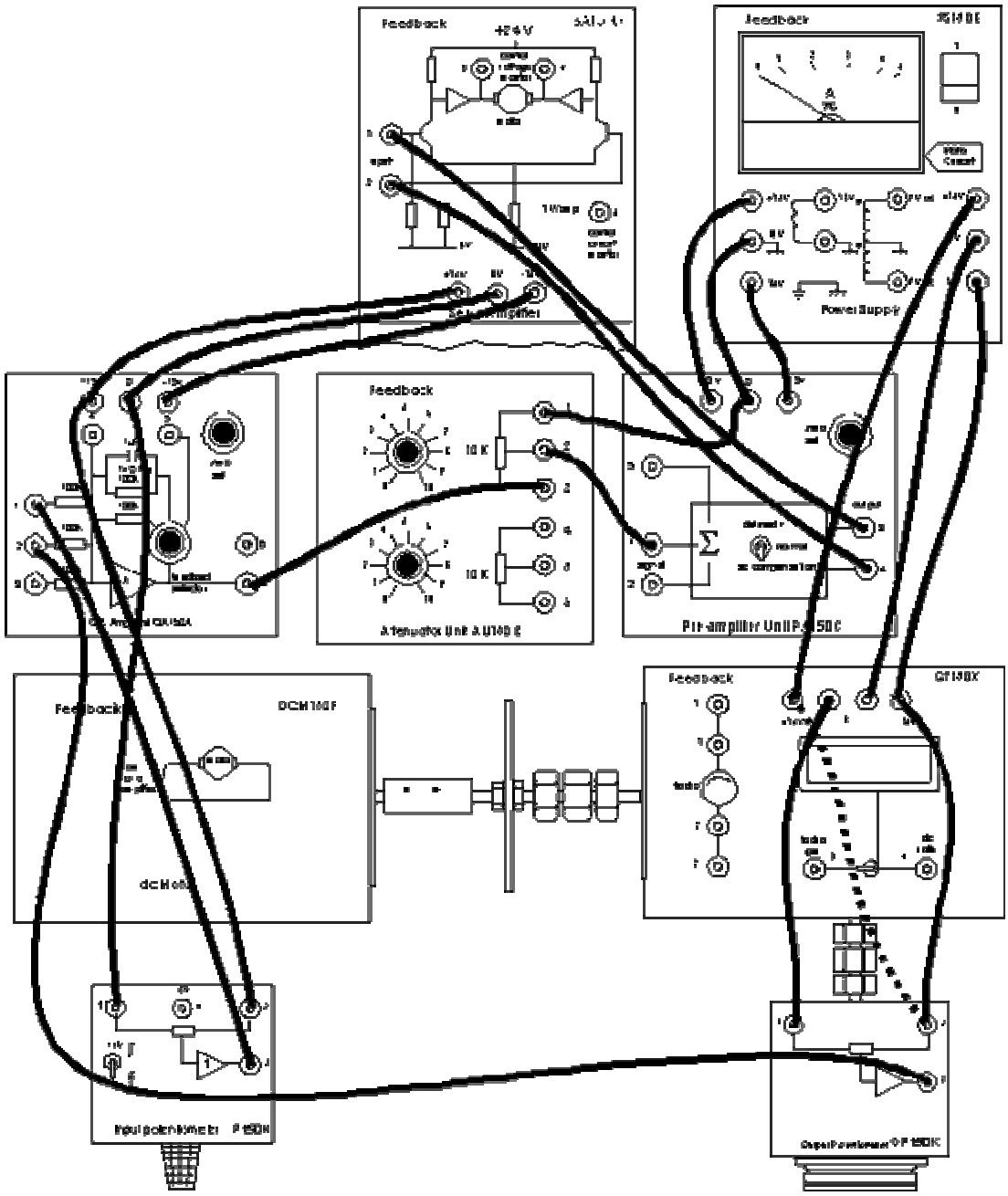
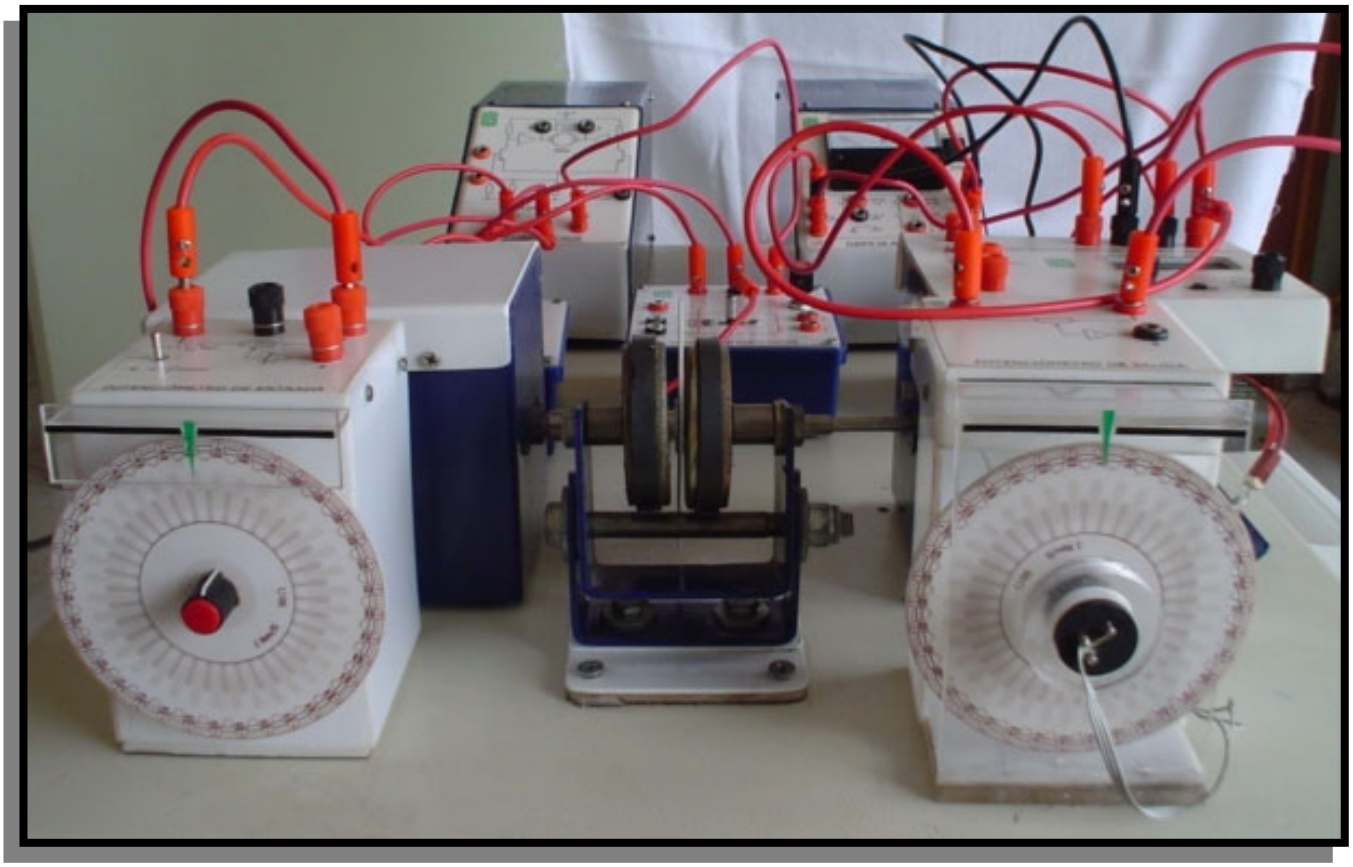


Diagrama Esquemático del Control de Posición



Fotografía de las Conexiones del Módulo de acuerdo con el Diagrama Esquemático