

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRES
FACULTAD DE INGENIERIA
CARRERA INGENIERIA ELECTRONICA**



MEMORIA LABORAL

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA DE CONTROL PARA
HORNO DE SECADO DE MADERA**

ASESOR: Javier Sanabria García

POSTULANTE: Richard Limachi Quelca

LA PAZ, DICIEMBRE DE 2018



**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERIA**



LA FACULTAD DE INGENIERIA DE LA UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS AUTORIZA EL USO DE LA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO SI LOS PROPÓSITOS SON ESTRICTAMENTE ACADÉMICOS.

LICENCIA DE USO

El usuario está autorizado a:

- a) Visualizar el documento mediante el uso de un ordenador o dispositivo móvil.
- b) Copiar, almacenar o imprimir si ha de ser de uso exclusivamente personal y privado.
- c) Copiar textualmente parte(s) de su contenido mencionando la fuente y/o haciendo la cita o referencia correspondiente en apego a las normas de redacción e investigación.

El usuario no puede publicar, distribuir o realizar emisión o exhibición alguna de este material, sin la autorización correspondiente.

TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS. EL USO NO AUTORIZADO DE LOS CONTENIDOS PUBLICADOS EN ESTE SITIO DERIVARA EN EL INICIO DE ACCIONES LEGALES CONTEMPLADAS EN LA LEY DE DERECHOS DE AUTOR.

DEDICATORIA

Quiero dedicar este proyecto a toda mi familia. Para mis padres Porfirio Limachi y Bernarda Quelca, por su comprensión y ayuda en momentos malos y menos malos. Me han enseñado a encarar las adversidades sin perder nunca la dignidad ni desfallecer en el intento. Me han dado todo lo que soy como persona, mis valores, mis principios, mi perseverancia y mi empeño, y todo ello con una gran dosis de amor y sin pedir nunca nada a cambio.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por protegerme durante todo mi camino y darme fuerzas para superar obstáculos y dificultades a lo largo de toda mi vida.

A mis hermanos, Alfredo, Jaime, Mónica, Lilian y William, por haber ayudado de forma directa o indirecta en la conclusión de mis estudios.

A mis amigos, Jorge, Joel, Galo, Alvaro, Bruno, por todo el apoyo brindado en los buenos y malos momentos, por toda la compañía y consejos brindados desinteresadamente.

A mi tutor Ingeniero Javier Sanabria García por todo el apoyo y orientación valiosos brindados en el desarrollo de este proyecto.

A todos los docentes que formaron parte en mi instrucción para esta bella profesión que es la ingeniería, por toda la paciencia, conocimientos y experiencias transmitidas.

A esa persona que hizo que me diera cuenta del tiempo desperdiciado extrañando el pasado.

A todas las personas que ayudaron directa e indirectamente en la realización de este proyecto.

Soy un hombre afortunado al tenerlos a mi lado. Para ellos, muchas gracias por todo.

“Para empezar un gran proyecto, hace falta valentía. Para terminar un gran proyecto, hace falta perseverancia (Anónimo).”

Contenido

1	INTRODUCCION.....	3
1.1	RESUMEN DE LA ACTIVIDAD LABORAL.	3
1.2	TRABAJOS REALIZADOS.....	3
1.2.1	La Micro-empresa “PROLEÑA S.R.L”	3
1.2.2	Organización.	3
1.2.3	Posiciones.....	4
1.2.4	Dependencia.	4
1.2.5	Actividad realizada.....	4
1.2.6	Resultados.	5
1.3	HOLA S.R.L - (Inicio 11/2015 a la fecha – duración 3 años).....	5
1.3.1	Organización.	5
1.3.2	Posiciones.....	5
1.3.3	Dependencia.	5
1.3.4	Actividad.	8
1.3.5	Resultados.	8
2	CASO DE ESTUDIO.	8
2.1	Antecedentes.....	8
2.1.1	OBJETIVOS.	9
2.1.2	JUSTIFICACION.....	10
2.1.3	ALCANCE DEL PROYECTO.	11
2.1.4	LIMITES DEL PROYECTO.	11
2.1.5	MARCO REFERENCIAL.	12
2.2	DESARROLLO.	16
2.2.1	Generalidades.	16
2.2.2	Recopilación de información y Requerimientos.	16
2.2.3	MODELADO Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA MADERA- SECADERO.....	18
2.2.4	Desarrollo de la estructura del sistema de control electrónico.....	34
2.3	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	85
2.3.1	Resultados principales.:	85
2.3.2	Recomendaciones:	86
3	ANALISIS DE LA ACTIVIDAD:.....	86
3.1	Desempeño laboral.....	86

3.2	Formación Recibida En La Umsa:	87
4	BIBLIOGRAFÍA	88

1 INTRODUCCION.

1.1 RESUMEN DE LA ACTIVIDAD LABORAL.

La Actividad laboral desarrollada durante el periodo de trabajo en PROLEÑA S.R.L., fué en su totalidad en el área de electrónica de potencia y control electrónico, desarrollando periféricos de control, periféricos sensores, implementación de circuitos de adecuación de señales, investigación y evaluación de técnicas de encendido de quemadores a GLP(Gas Licuado De Petróleo) y GNC(Gas Natural Comprimido), implementación de buses de campo para comunicaciones industriales, configuración y mantenimiento de computadores para proyectos de automatización controlados por computador.

1.2 TRABAJOS REALIZADOS.

1.2.1 La Micro-empresa “PROLEÑA S.R.L” dedicada a la investigación y producción de equipos energéticos eficientes. (Inicio 04/2011 fin 12/2012- duración 1 año 8 meses), brinda servicios de diseño, implementación y venta de sistemas térmicos de bajo consumo, alta eficiencia térmica y bajas emisiones, para aplicaciones domésticas e industriales medianas, orientados a la mejora del consumo energético y productos amigables con el medio ambiente

1.2.2 Organización.

La microempresa PROLEÑA S.R.L. constituida por un Gerente General Juan Carlos Guzmán Salinas, co-fundador Subgerente Mirko Tomislav Kirigin Pinell, un técnico electrónico Richard Limachi Quelca (mi persona), y un operario técnico cerrajero eventual.

1.2.3 Posiciones.

Juan Carlos Guzmán Salinas, como gerente general de la microempresa, encargado de planificar la ejecución de proyectos, organizar las tareas a realizar, dirigir y coordinar con el personal que componía la microempresa PROLEÑA S.R.L.

Mirko Kirigin Pinell, como subgerente, encargado de brindar los instrumentos y material adecuado para el desarrollo de los proyectos, desarrollo de entornos gráficos computacionales para la interacción con los equipos desarrollados, y entablar relaciones con los proveedores y clientes con los que se tenía proyectos en común. Richard Limachi Quelca, Como técnico electrónico, encargado del desarrollo de los sistemas electrónicos como: circuitos de control de potencia para actuadores, circuitos de adecuación de señales para diferentes tipos de sensores, circuitos de adecuación de señal para la comunicación entre periféricos actuadores/sensores y el computador de control central y todo circuito electrónico que fuera necesario para los proyectos desarrollados en PROLEÑA S.R.L.

1.2.4 Dependencia.

La microempresa “PROLEÑA S.R.L.” contaba con un personal muy reducido, y eventualmente contrataba los servicios de terceros para cumplir con algún requerimiento especial para los proyectos en desarrollo, es así que todo el personal dependía del gerente general José Luis Guzmán y el subgerente Mirko Kiriguin como inmediatos superiores de mi persona y el personal técnico en trabajos de cerrajería y metal-mecánica.

1.2.5 Actividad realizada.

Como técnico electrónico, mi persona se encontraba encargado del desarrollo de sistemas electrónicos de media y baja potencia, realizar el mantenimiento de equipos computacionales y todo equipo eléctrico-electrónico de la organización, participando activamente en el desarrollo de los proyectos encarados por PROLEÑA S.R.L.

1.2.6 Resultados.

Durante el periodo de trabajo en la Microempresa PROLEÑA S.R.L., se desarrollaron diversos tipos de sistemas electrónicos, entre los que se pueden mencionar: circuitos de control de potencia para cargas inductivas, circuitos de control para cargas resistivas, circuitos de control de rotación de motores, circuitos para sensores de posición de aletas de ventilador, circuitos de adecuación de señal para sensores de temperatura, humedad relativa, células de carga.

Todos los sistemas electrónicos fueron desarrollados desde el esquema electrónico hasta la fabricación, montaje en placas de baquelita y su posterior puesta a producción de acuerdo a los requerimientos de PROLEÑA S.R.L.

1.3 HOLA S.R.L - (Inicio 11/2015 a la fecha – duración 3 años).

1.3.1 Organización.

Hola S.R.L, especializada en la gestión de Contact Center, relaciones con clientes (CRM), Customer Experience Management (CEM) y Outsourcing de Atención al cliente, ventas y procesos comerciales, encargada de brindar personal especializado para diversas áreas a la empresa Nuevatel PCS de Bolivia S.A., constituida legalmente de acuerdo a legislación vigente en Bolivia.

1.3.2 Posiciones.

Dentro la organización, designado como encargado de soporte a infraestructura de Tecnología de la Información “IT “, el trabajo encomendado es el de brindar soporte técnico a nivel de hardware y software a los usuarios de Nuevatel PCS de Bolivia S.A., teniendo como inmediato superior al administrador de Infraestructura de Nuevatel PCS de Bolivia S.A.

1.3.3 Dependencia.

El cargo de encargado de soporte a infraestructura IT, tiene directa dependencia del área de infraestructura de tecnología de la información de Nuevatel PCS de Bolivia S.A.

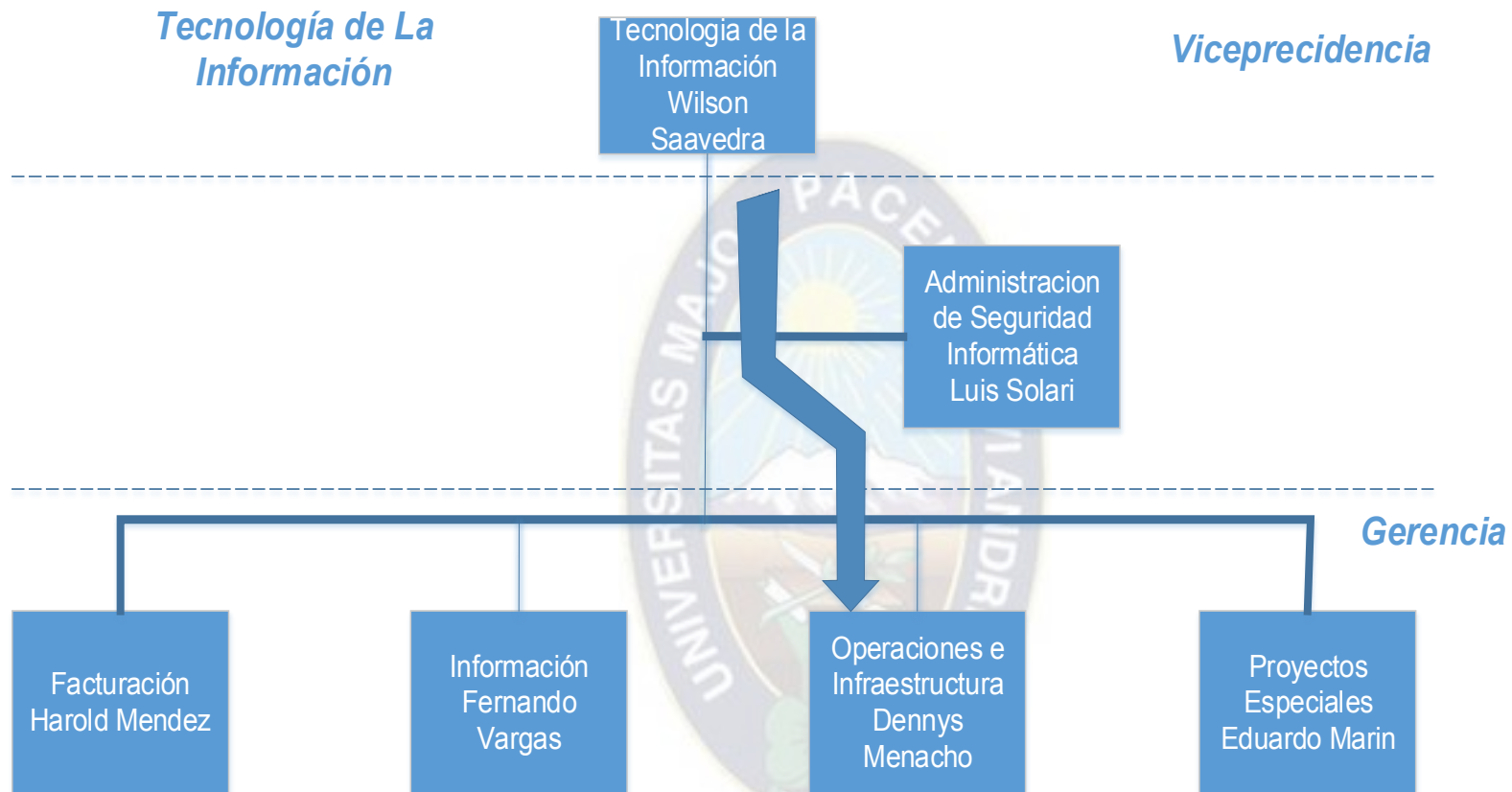


Fig. 1.1: organigrama Vicepresidencia IT - Gerencia IT

Fuente: Elaboración Propia

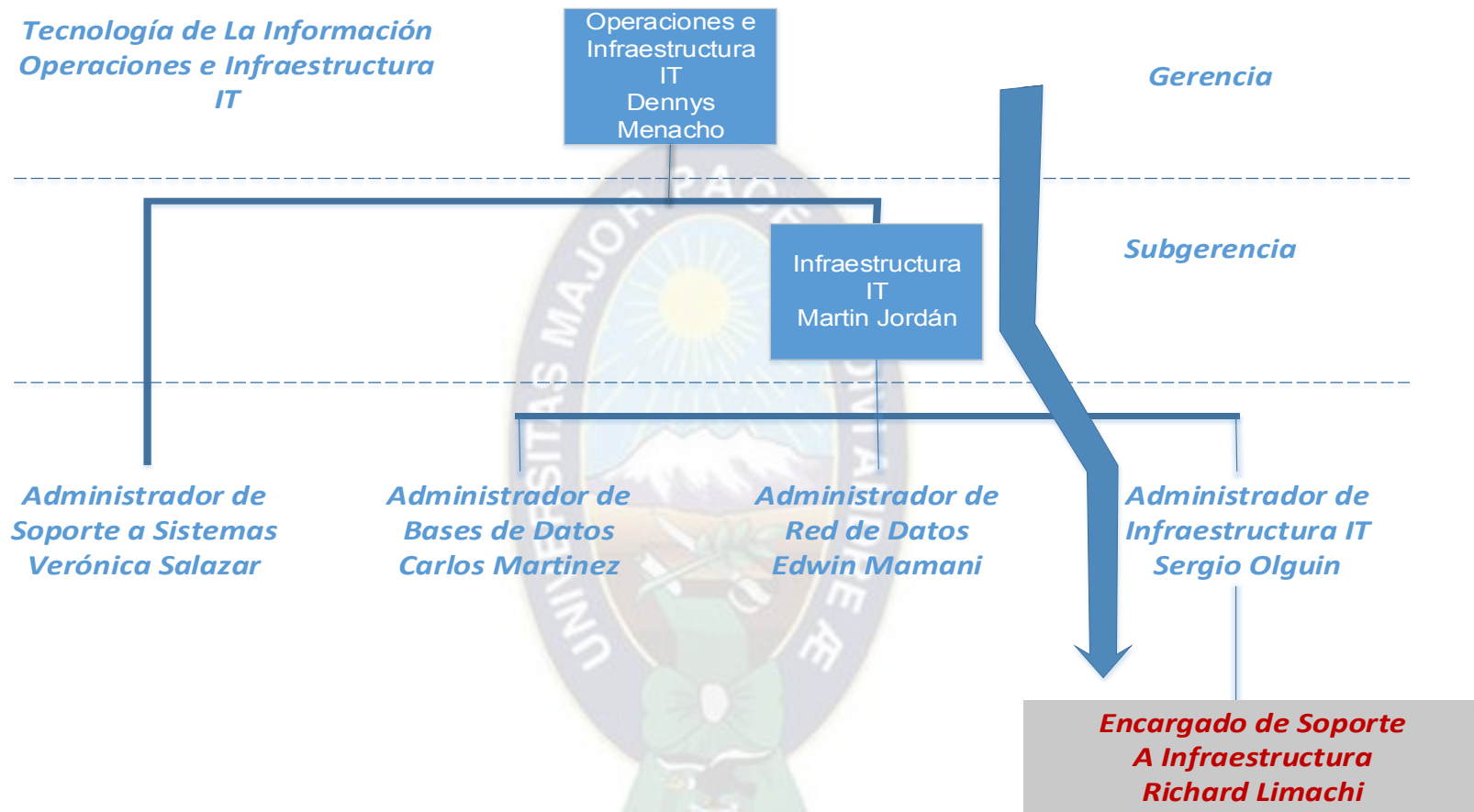


Fig 1.2: Organigrama Gerencia IT – Subgerencia IT

Fuente: Elaboración Propia

1.3.4 Actividad.

Dentro las actividades y/o funciones como encargado de soporte a infraestructura están: ser responsable de apoyar a usuarios en operaciones de implementación o adecuación de servicios informáticos, gestionar el servicio de correo electrónico, detección y eliminación de virus y/o programas espías, instalación y configuración de componentes internos o externos en computadores, instalación y mantenimiento de software propio de la empresa y programas comerciales, realización y control de copias de seguridad de la información sensible de la empresa, recuperación de datos eliminados o destruidos accidentalmente o de forma intencionada, control de inventario y administración de Hardware y software autorizado, mantener en operatividad los equipos de computación de los usuarios finales de los colaboradores de Nuevatel, atender las solicitudes de servicio técnico de los usuarios de la Oficina.

1.3.5 Resultados.

Actualmente se brinda soporte técnico tanto a nivel de software como hardware al personal de Nuevatel PCS de Bolivia S.A., de acuerdo a los requerimientos establecidos en la política de la Empresa, de forma oportuna y eficaz consiguiendo la satisfacción del usuario interno de la organización. Se logró adquirir sólidos conocimientos sobre la administración de servidores de Active Directory de Microsoft, servidores de servicio de DHCP INFOBLOX y configuración de programas de ofimática especializados de acuerdo a cada área específica que compone la empresa a la que se brinda soporte IT.

2 CASO DE ESTUDIO.

2.1 Antecedentes.

Los Hornos Industriales de Secado, tienen diversas aplicaciones en diferentes sectores de la industria, tanto para modificar físicamente algunos materiales como para provocar reacciones químicas, necesarias para algún proceso industrial como el curado de pintura auto o para la eliminación de humedad y secado de la madera para la elaboración de muebles, siendo este último el objeto del presente caso de estudio.

El secado artificial de madera, surgió como respuesta a las deficiencias que presentaba el secado natural, en la actualidad se emplean diferentes técnicas para eliminar el exceso de agua en la madera, a continuación, se describen las más comunes:

- **Secado al Aire:** El secado al aire, consiste esencialmente en eliminar el exceso de humedad de la madera, mediante la circulación de aire ambiental a través pilas de madera con una separación entre cada pieza, y así se pueda producir un secado natural. Esta técnica consume mucho tiempo en el proceso de secado y no garantiza una humedad lo suficientemente baja para el uso de la materia prima además de estar sujeta a los cambios climáticos.
- **Secado bajo Techo:** El secado bajo techo, consiste en apilar la madera bajo una cubierta o techo para protegerla de la lluvia y radiación solar, para después mediante el uso de ventiladores forzar la circulación del aire a través de las pilas de madera y así reducir el contenido de humedad. Al igual que la técnica anterior, este método de secado consume mucho tiempo y trabajo para el secado de la materia prima.
- **Secado En Horno:** Los hornos de secado de madera más comunes son los de Secado convencional, secado por des-humidificación, al vacío y solar, para el secado de madera por horno, se coloca las pilas de madera al interior del horno el mismo que tiene unas características de diseño que permiten tener un control sobre la temperatura y humedad del aire que fluye al interior del Horno

2.1.1 OBJETIVOS.

2.1.1.1 Objetivo General.

Diseño e implementación de un sistema de control electrónico del tipo PID para un horno de secado de madera, implementado en un computador, y así mantener los niveles de Temperatura, Humedad Relativa y flujo de aire, necesarios para acelerar el proceso de secado de la madera que será utilizada para la elaboración de muebles, y con esto la micro-empresa Scala Design S.R.L. pueda disponer de materia prima de buena calidad.

2.1.1.2 Objetivos Específicos

- Se propuso un modelo matemático de la cámara de secado para controlar el proceso de secado de madera mediante la regulación de temperatura, Humedad Relativa y Flujo de Aire.
- Se diseñó un controlador PID adecuado, para controlar las variables que intervienen en el proceso de secado de madera y se validó el funcionamiento del controlador mediante simulación en la herramienta “Simulink” de MatLab.
- Se identificaron y evaluaron las diferentes estructuras posibles para la construcción de una cámara de secado de madera que se adecue a las necesidades de Scala Design S.R.L.
- Se seleccionaron los dispositivos los dispositivos sensores y actuadores necesarios, para controlar las variables que intervienen en el proceso de secado artificial de Madera, en base al controlador diseñado y la estructura de la cámara de secado elegida.

2.1.2 JUSTIFICACION.

Para la producción de muebles de calidad, la micro empresa Scala Design S.R.L. requiere de madera seca y con imperfecciones imperceptibles, anteriormente para la obtención de madera con las características mencionadas, se utilizaba un método de secado natural al aire el cual tardaba entre 1 a 5 meses, por lo que resultaba prácticamente imposible alcanzar niveles bajos de humedad necesarios para los usos de producción de la madera.

Mediante el secado artificial en el horno de secado de madera se busca reducir el tiempo de secado entre 5 a 10 días permitiendo alcanzar un contenido de humedad bajo alrededor del 10%.

2.1.3 ALCANCE DEL PROYECTO.

El proyecto únicamente considera el diseño, implementación y pruebas del sistema electrónico de control para el secado artificial de madera tomando como referencia el secado de tablas de madera, con dimensiones de 2.54cm X 10cm X 320cm, sin ningún tratamiento de acabado, hasta un volumen de 70pie³ por proceso de secado, no se considera el secado de productos acabados de madera, ya que no es el caso de estudio.

2.1.4 LIMITES DEL PROYECTO.

El proceso de secado, se consideró únicamente para la especie Roble (*Amburana cearensis*), debido a que es el tipo de madera más utilizado por la microempresa Scala Design S.R.L. para la fabricación de muebles.

Los parámetros que se tomaron en cuenta para el diseño del sistema de control de secado son humedad final de la madera aproximada del 10%, rajaduras menores al 6,25% de la longitud total de la madera, ausencia de torceduras y el color final del producto.

Con la implementación del horno, no se garantiza que la madera secada artificialmente esté libre al 100% de rajaduras, torceduras o decoloración, pero se busca reducir el tiempo de secado de la madera en un periodo de tiempo aproximado de 5 a 10 días con un mínimo de imperfecciones.

2.1.5 MARCO REFERENCIAL.

El proceso de secado artificial de madera, es realizado en instalaciones especialmente adecuadas para este fin, como ser cámaras cerradas en las que se establecen condiciones climáticas extremas, diferentes a las condiciones ambientales normales. Mediante la utilización ventiladores, se produce un flujo de aire estable que circula a través de la materia prima apilada, y con la ejecución de un programa de secado pre-establecido que regula la temperatura y humedad relativa se genera un clima extremo al interior de la cámara de secado que acelera el proceso de secado de la madera.

La velocidad de secado se puede variar, elevando y/o reduciendo la temperatura, tanto como sea admisible para la madera de la especie Roble en particular, evitando ocasionar daños de consideración en el producto final. De la misma manera, se puede controlar la humedad relativa del aire de tal forma que el gradiente de humedad no produzca esfuerzos de tensión causantes de grietas y deformaciones.

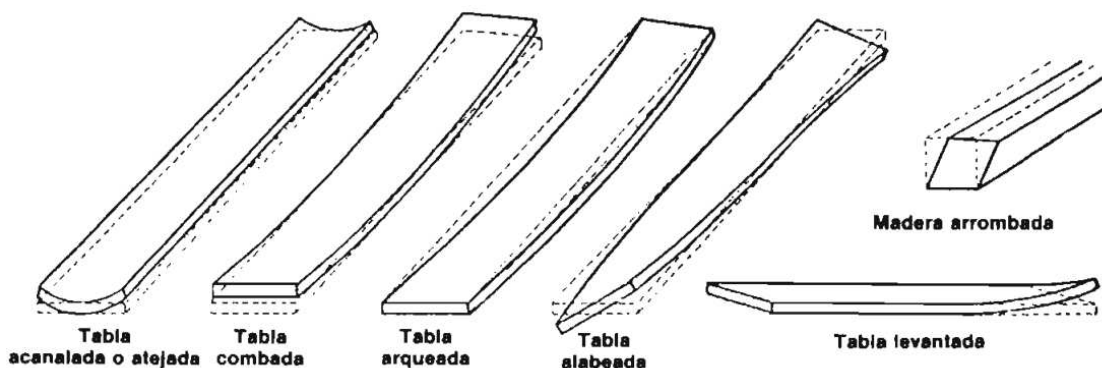


Figura 2.1: Defectos de Madera Secada por medio natural.

Fuente: Guía práctica para el secado de madera en hornos.

Mediante el secado artificial, además de disminuir el tiempo de secado considerablemente y de reducir la generación de defectos, se consigue alcanzar contenidos de humedad lo suficientemente bajos, de acuerdo a los requerimientos para el uso final de la madera.

Los costos directos del secado artificial en hornos, son al principio, mucho más altos que los del secado natural al aire, ya que se debe agregar a la inversión de instalaciones y equipos, los costos de operación (combustibles, electricidad y supervisión). Sin embargo, la rapidez del proceso de secado, que se estima entre 10 y 40 veces más rápido que al aire libre, y la calidad final del producto seco, deberán compensar de manera favorable las inversiones iniciales realizadas para contar con un proceso de secado artificial.

2.1.5.1 Programa de control de secado.

El programa de secado del horno, es el encargado de establecer condiciones de temperatura y humedad cada vez más severas, en base a intervalos de tiempo establecidos, o en función del contenido de humedad que va alcanzando la madera, la velocidad de pérdida de humedad es en promedio un valor específico para cada especie.

Un programa de secado, en el que la variación de las condiciones climáticas se encuentra en función del tiempo de secado, por lo general es aplicable para especies de madera de secado rápido, y homogéneas en cuanto al espesor y contenido de humedad inicial.

Por otra parte, un programa de secado basada en el contenido de humedad de la madera, está dirigido más para su aplicación en el secado de especies difíciles de secar y propensas a presentar defectos durante el proceso de secado.

El contenido de humedad de la madera puede ser determinado por métodos gravimétricos donde se mide la diferencia de peso que se presenta entre testigos madera colocados dentro del secadero y calculando su pérdida de humedad.

También es posible determinar el contenido de humedad de la madera, mediante métodos basados en la variación de la resistencia eléctrica, que se produce en la madera con la variación del contenido de humedad, utilizando electrodos en tablas, conectados a un equipo que se encarga de determinar el contenido de humedad del producto de forma continua.

2.1.5.2 Proceso de Secado utilizado por Scala Design S.R.L.

En la microempresa Scala Design S.R.L, la madera era secada totalmente al aire, antes de proceder con su utilización para la fabricación de muebles.

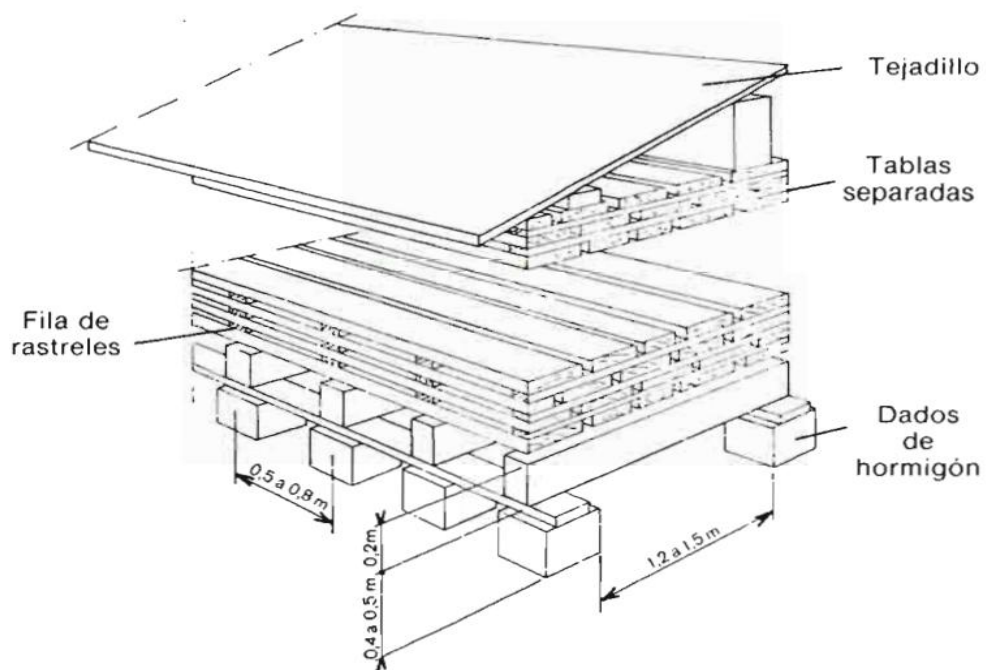


Figura 2.2: Esquema de secado utilizado por Scala Design.

Fuente: Scala Design S.R.L.

En el proceso de secado al aire que utilizaba Scala Design S.R.L., la madera era apilada a la intemperie o en un cobertizo abierto, de modo que las tablas estén expuestas a la atmosfera ambiental, para que tenga lugar la transferencia de la humedad de la madera al aire. La velocidad de secado, y por consiguiente la duración de este proceso, dependía en gran medida de las condiciones atmosféricas que imperaban en las instalaciones de Scala Design S.R.L.

El resultado que se obtenía de este proceso de secado, no era muy satisfactorio para la micro-empresa, ya que el producto resultante contenía diversas imperfecciones indeseables que terminaban en pérdida de materia prima.



2.2 DESARROLLO.

2.2.1 Generalidades.

En el proyecto encomendado por Scala Design S.R.L. a Proleña S.R.L., para el diseño e implementación de un horno de secado de madera, fue necesario el diseño de un sistema de control de secado y posterior implementación, capaz de mantener los factores climáticos que intervienen en el proceso de secado, como la temperatura, humedad relativa y flujo de aire, dentro de rangos preestablecidos de acuerdo al tipo de madera que será procesada, que para el caso de estudio será de la especie Roble (*Amburana cearensis*), que es el tipo de materia prima de mayor utilización por Scala Design.

2.2.2 Recopilación de información y Requerimientos.

El tipo de madera a someter al proceso de secado artificial es de la especie Roble, en una presentación de tablas con dimensiones nominales de 2.54cm de espesor, 10cm de ancho, 320cm de Largo, con una humedad inicial aproximada del 80%, y una humedad final esperada aproximada del 10%, para un volumen total de madera de 70 pie³, eventualmente se realizarán pruebas secando tablas de madera, con dimensiones de 5cm de espesor, 20cm de ancho, 320cm de Largo (solo como pruebas para evaluar la viabilidad sobre la capacidad de secar materia prima de mayor espesor).

Para el diseño del volumen de la cámara de secado, se toma en cuenta las necesidades requeridas de acuerdo al volumen de madera a ser procesado (70 pie³).

- Dimensiones de la Pila de madera:

Alto: (22 piezas de 1") + (22 separadores de 25mm)

Ancho: (11 piezas de 4")

Largo: 3.2m

- De los datos anteriores se obtiene que:

Alto: 111,76cm = 1,12m

Ancho: $111,76\text{cm} = 1.12\text{m}$

Largo: $320\text{cm} = 3,2\text{m}$

Al no existir un estándar para las dimensiones de la cámara de secado, estas se determinaron en base a las dimensiones de la pila de madera y a los componentes en su interior.

Por lo tanto, se consideró que, para el ancho de la cámara, se debían agregar 75cm a cada lado de la pila, para permitir a los operarios conformar la pila de madera, además de el espacio requerido para la instrumentación, además un factor importante es el espacio necesario para que el flujo de aire pueda ingresar a la pila de una manera óptima, con lo que el ancho interior termina midiendo 2,7m.

Para el largo se consideró agregar a cada extremo de la pila de tablas 50cm, esto para poder secar tablas con un largo menor a 4,2m.

Para determinar el alto de la cámara de secado, se consideró que la pila de madera, se encontraría apilada sobre unos apoyos de 20cm, para evitar deformaciones se incorporaron vigas de madera de 15cm aseguradas a los apoyos y se dejaron 60cm libres para poder manipular tanto la madera como los contrapesos, dando una altura interna total de la cámara de secado de 2.06m hasta el cielo falso más 0,6m para la instalación del sistema de ventilación y calefacción, obteniéndose un total de 2,66m de altura externa de la cámara de secado.

2.2.3 MODELADO Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA MADERA-SECADERO.

El paso inicial para la obtención del modelo matemático del sistema Madera-Secadero, es identificar las variables controladas y variables manipulables del sistema, una vez identificadas estas variables, se procede a plantear un modelo matemático que represente una aproximación del comportamiento del sistema de secado de madera, para luego validar este modelo matemático mediante simulación matemática en un programa computacional (para este caso se utilizó MatLab).

2.2.3.1 MODELADO DEL SISTEMA MADERA-SECADERO. Para el modelado del sistema de secado, se consideró el intercambio de calor que sucede entre la pila de madera, sistema de humidificación, renovación de aire al interior de la cámara y pérdidas de calor con las paredes de la cámara durante el proceso de secado.

Las variables a ser consideradas para desarrollar el modelo matemático son las siguientes:

Variables Controladas:

- Temperatura al interior del horno.
- Humedad Relativa al interior del horno.

Variables Manipuladas

- Calor Generado por el quemador a Gas.
- Flujo másico de Vapor de agua rociada al interior del horno.
- Flujo de aire.

Realizando el balance de energías al interior del secadero se obtiene la ecuación.

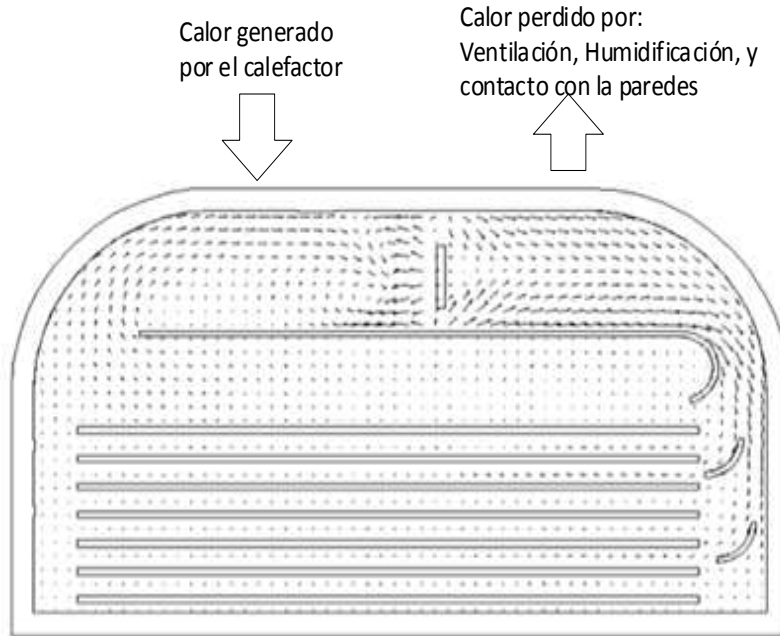


Figura 2.3: Intercambio de calor de la Cámara de secado
Fuente: Elaboración propia

$$Q_{CAM} = Q_{CAL} - Q_{HUM} - Q_{VEN} - Q_{PERD} \quad (2.1)$$

Donde:

- Q_{CAM} = Calor total al interior de la cámara de secado.
- Q_{CAL} = Calor generado por el sistema de calefacción.
- Q_{HUM} = Calor perdido por Humidificación.
- Q_{VEN} = Calor extraído por recambio de aire.
- Q_{PERD} = Calor perdido por transferencia hacia las paredes de la cámara de secado.

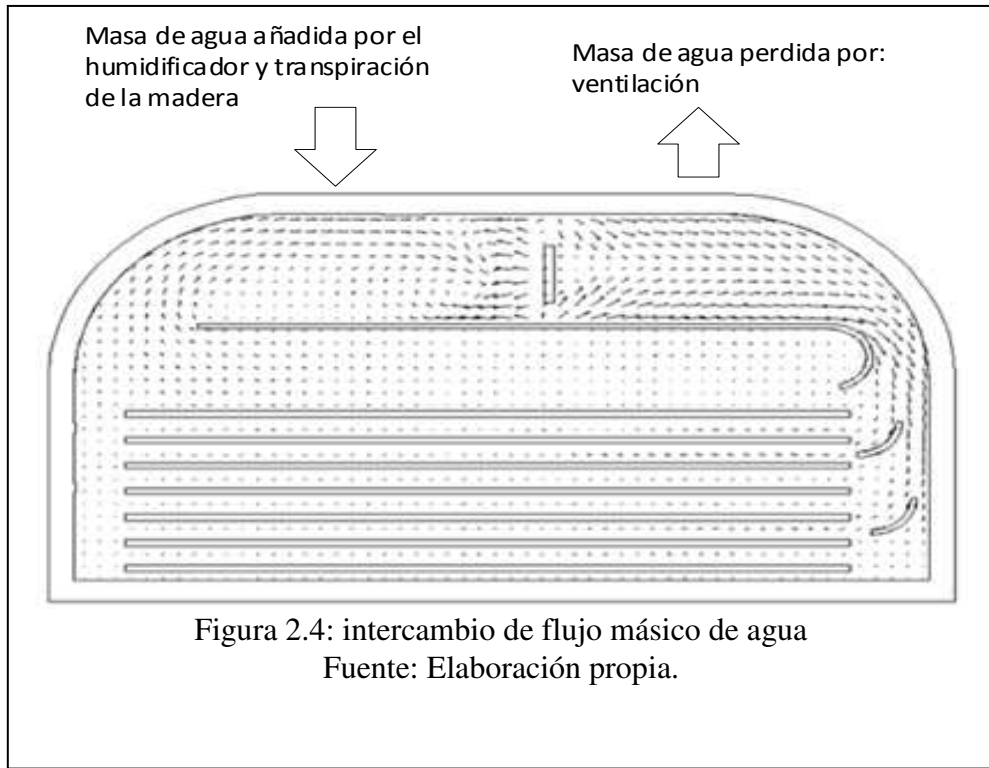
Desarrollando la ecuación (2.1) se obtiene la ecuación (2.4)

$$\rho C_P V \frac{dT}{dt} = Q_{CAL}(t) - \lambda q_{HUM} - \rho C_P \dot{V}(t) [T_{INV}(t) - T_{EXT}(t)] - KA \frac{T_{CAM} - T_{EXT}}{L} \quad (2.2)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{\rho C_P V} [Q_{CAL}(t) - \lambda q_{HUM}] - \frac{\dot{V}(t)}{V} [T_{INV}(t) - T_{EXT}(t)] - \frac{KA}{\rho C_P V L} [T_{CAM} - T_{EXT}] \quad (2.3)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{\rho C_P V} Q_{CAL}(t) - \frac{\lambda}{\rho C_P V} q_{HUM} - T_{CAM}(t) \frac{\dot{V}}{V} + T_{EXT} \frac{\dot{V}}{V} - \frac{KA}{\rho C_P V L} T_{CAM}(t) + \frac{KA}{\rho C_P V L} T_{EXT} \quad (2.4)$$

Para el modelado de la variación de la humedad, se realiza el balance de masas mostrado en la ecuación 2.5.



$$m_{CAM} = m_{HUM} + m_{CAR} - m_{VEN} \quad (2.5)$$

Donde:

m_{CAM} = Masa de agua total al interior de la cámara de secado.

m_{HUM} = Masa de agua pulverizada al interior de la cámara de secado.

m_{CAR} = Masa de agua evaporada por la pila de madera.

m_{VEN} = Masa de agua que se elimina por ventilación.

Desarrollando la ecuación (2.5) se obtiene la ecuación (2.7)

$$\rho V \frac{dW_{CAM}}{dt} = q_{HUM} + q_{CAR} - \rho \dot{V} [W_{CAM} - W_{EXT}] \quad (2.6)$$

$$\frac{dW_{CAM}}{dt} = \frac{1}{\rho V} [q_{HUM} + q_{CAR}] - \frac{1}{V} \dot{V} [W_{CAM} - W_{EXT}] \quad (2.7)$$

De acuerdo a la ecuación (2.7), la dinámica del subsistema de humidificación y de la carga están en función de la variable humedad absoluta. Esta esta variable no es medible directamente, ya que la etapa de adquisición cuantifica el valor de la humedad relativa. Por

esta razón se ve la necesidad de usar la ecuación 2.8, para representar el valor de la humedad absoluta en términos de la humedad relativa.

$$W = \frac{0.62198P_{ws}(T)HR}{P_{ATM}-P_{ws}(T)HR} = \frac{aP_{ws}(T)HR}{P_{atm}-P_{ws}(T)HR} \quad (2.8)$$

Donde:

P_{ws} : Presión de vapor saturado de Agua

P_{atm} : Presión atmosférica

HR : Humedad Relativa al interior de la cámara de secado

$$\frac{dW}{dt} = \frac{aP_{ws}P_{atm}}{(P_{atm}-P_{ws}HR)^2} \frac{dHR}{dt} \quad (2.9)$$

Reemplazando 2.9 en 2.7

$$\frac{aP_{ws}P_{atm}}{(P_{atm}-P_{ws}HR)^2} \frac{dHR}{dt} = \frac{1}{\rho V} [q_{HUM} + q_{CAR}] - \frac{1}{V} \dot{V} [W_{CAM} - W_{EXT}] \quad (2.10)$$

$$\frac{dHR}{dt} = \frac{P_{atm}}{aP_{ws}\rho V} [q_{HUM} + q_{CAR}] - \frac{2}{a\rho V} HR [q_{HUM} + q_{CAR}] + \frac{P_{ws}}{aP_{atm}\rho V} HR^2 [q_{HUM} + q_{CAR}] - \left[\frac{1}{V} + 2 \frac{W_{EXT}}{aV} \right] HR \dot{V} + \left[\frac{P_{ws}}{VP_{atm}} + \frac{P_{ws}W_{EXT}}{aP_{atm}V} \right] \dot{V} HR^2 + \frac{P_{atm}W_{EXT}}{aP_{ws}V} \dot{V} \quad (2.11)$$

En La tabla (2.2) se describen las variables utilizadas y las unidades de medida que tienen.

Símbolo	Descripción	Unidad
Q_{CAM}	Calor al interior de la Cámara de Secado.	J
Q_{CAL}	Calor generado por el calefactor.	J
Q_{HUM}	Calor perdido por humidificador.	J
Q_{VEN}	Calor extraído por ventilación.	J
Q_{PERD}	Calor perdido por conducción hacia las paredes.	J
m_{CAM}	Masa de agua al interior de la Cámara de Secado.	Kg
m_{HUM}	Masa de agua pulverizada al interior Cámara de Secado.	Kg
m_{CAR}	Masa de agua evaporada por la pila de madera.	Kg
m_{VEN}	Masa de agua que se elimina por ventilación.	Kg
ρ	Densidad de aire.	$\text{Kg} \cdot \text{m}^{-3}$
C_p	Calor específico a presión constante.	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
V	Volumen interior de la cámara de secado.	m^3
λ	Calor latente de evaporación.	$\text{J} \cdot \text{Kg}^{-1}$
q_{HUM}	Cantidad de agua pulverizada en la cámara de secado.	m^3
\dot{V}	Capacidad de ventilación.	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
T_{CAM}	Temperatura al interior Cámara de Secado.	$^{\circ}\text{C}$
T_{EXT}	Temperatura al exterior Cámara de Secado.	$^{\circ}\text{C}$
K	Resistencia térmica de los materiales.	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}$
A	Área de paredes de la Cámara de Secado.	m^2
L	Espesor de las paredes.	m
q_{CAR}	Cantidad de agua evaporada por la pila de madera.	m^3
W_{CAM}	Humedad absoluta al interior de la Cámara de Secado.	Adimensional
W_{EXT}	Humedad absoluta al exterior de la Cámara de Secado.	Adimensional
HR	Humedad Relativa al interior de la Cámara de Secado.	Adimensional
P_{atm}	Presión atmosférica.	Atm
P_{ws}	Presión de vapor saturado.	Atm

Tabla 2.2: Descripción de variables.

Fuente: Elaboración Propia

Las ecuaciones 2.4 y 2.11 pueden ser reordenadas respectivamente de la siguiente forma:

$$\frac{dT}{dt} = K_1 Q_{CAL}(t) - K_2 q_{HUM} - K_3 \dot{V} T_{CAM}(t) + K_4 \dot{V} - K_5 T_{CAM}(t) + K_6 \quad (2.12)$$

$$\frac{dHR}{dt} = K_7 [q_{HUM} + q_{CAR}] + K_8 HR [q_{HUM} + q_{CAR}] + K_9 HR^2 [q_{HUM} + q_{CAR}] + K_{10} \dot{V} HR + K_{11} \dot{V} HR^2 + K_{12} \dot{V} \quad (2.13)$$

Renombrando las variables para un manejo más fácil, tenemos:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{CAM} \\ HR \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{CAL} \\ q_{Hum} \\ \dot{V} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

$$\dot{x}_1 = K_1 u_1 + K_2 u_2 + K_3 u_3 x_1 + K_4 u_3 + K_5 x_1 + K_6 \quad (2.16)$$

$$\dot{x}_2 = K_7 (u_2 + q_{CAR}) + K_8 x_2 (u_2 + q_{CAR}) + K_9 x_2^2 (u_2 + q_{CAR}) + K_{10} u_3 x_2 + K_{11} u_3 x_2^2 + K_{12} u_3 \quad (2.17)$$

Donde:

$$K_1 = \frac{1}{\rho C_p V} \cong 0.0301$$

$$K_2 = -\frac{\lambda}{\rho C_p V} \cong -74.1310$$

$$K_3 = -\frac{1}{V} \cong -0.0357$$

$$K_4 = T_{EXT} \frac{1}{V} \cong 0.6429$$

$$K_5 = -\frac{KA}{\rho C_p V L} \cong -0.2205$$

$$K_6 = \frac{KA}{\rho C_p V L} T_{EXT} \cong 3.9689$$

$$K_7 = \frac{P_{atm}}{a P_{ws} \rho V} \cong 0.2780$$

$$K_8 = -\frac{2}{a \rho V} \cong -0.0975$$

$$K_9 = \frac{P_{ws}}{a P_{atm} \rho V} \cong 0.0086$$

$$K_{10} = -\left[\frac{1}{V} + 2 \frac{W_{EXT}}{aV} \right] \cong 0.0443$$

$$K_{11} = \left[\frac{P_{ws}}{VP_{atm}} + \frac{P_{ws} W_{EXT}}{a P_{atm} V} \right] \cong -7.5508 * 10^{-4}$$

$$K_{12} = \frac{P_{atm} W_{EXT}}{a P_{ws} V} \cong -0.2282$$

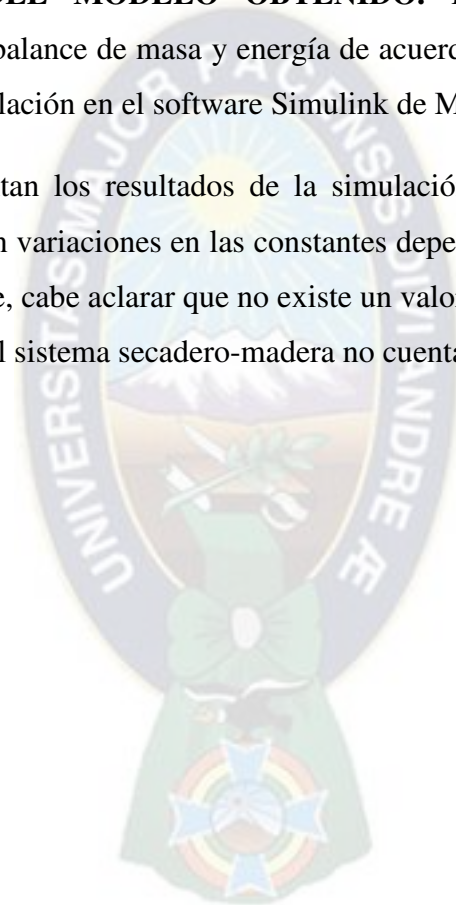
Una representación mediante diagrama de bloques del modelo obtenido se puede apreciar en la figura 2.5.

Observando la asignación de constantes, se puede ver que las más propensas a sufrir algún cambio involuntario por las condiciones climáticas externas a la cámara de secado son: K_4 , K_6 , K_7 , K_9 , K_{11} y K_{12} .

La variación que estas constantes puedan sufrir, es consecuencia de la dependencia de factores externos que tiene como: la temperatura exterior “ T_{EXT} ” y la presión de vapor saturado “ P_{ws} ”, ya que durante el proceso no se tiene el control sobre estas variables.

2.2.3.2 SIMULACIÓN DEL MODELO OBTENIDO. La validación del modelo matemático, obtenido por balance de masa y energía de acuerdo a las ecuaciones 2.1 y 2.5, se la realiza mediante simulación en el software Simulink de MatLab.

A continuación, se presentan los resultados de la simulación del modelo obtenido y la simulación del modelo con variaciones en las constantes dependientes de factores externos mencionados anteriormente, cabe aclarar que no existe un valor de referencia al que se debe llegar, ya que el modelo del sistema secadero-madera no cuenta con un controlador,



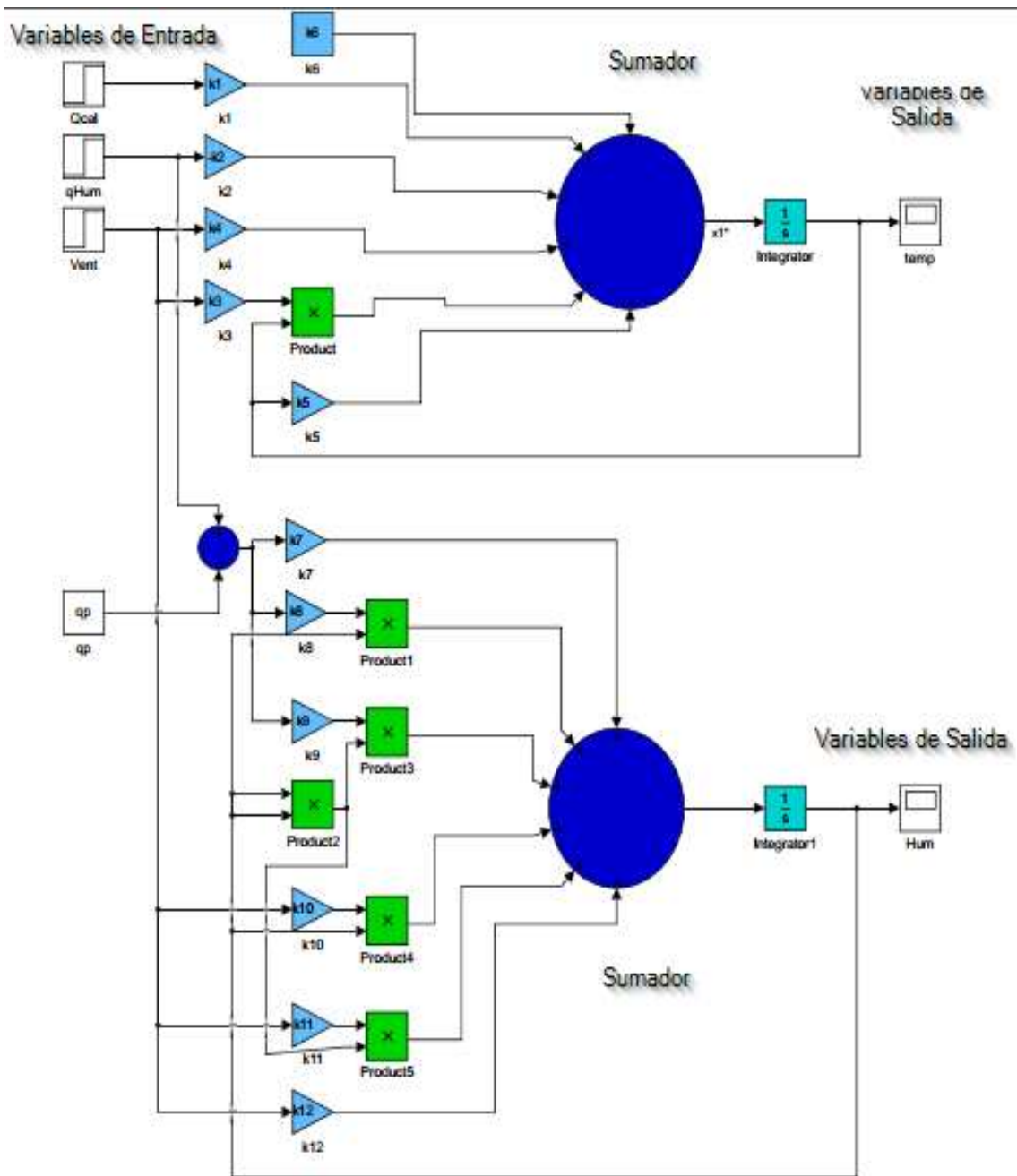


Figura 2.5: Diagrama de bloques del modelo matemático obtenido.
 Fuente: Elaboración propia.

Gráficas resultantes de la simulación:

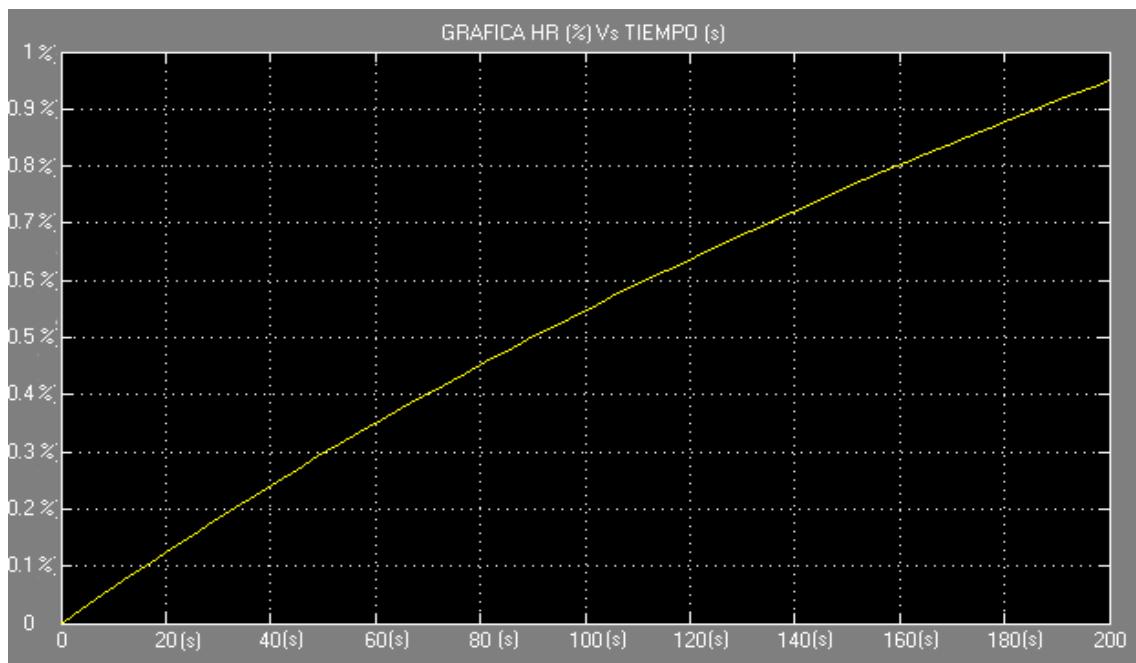
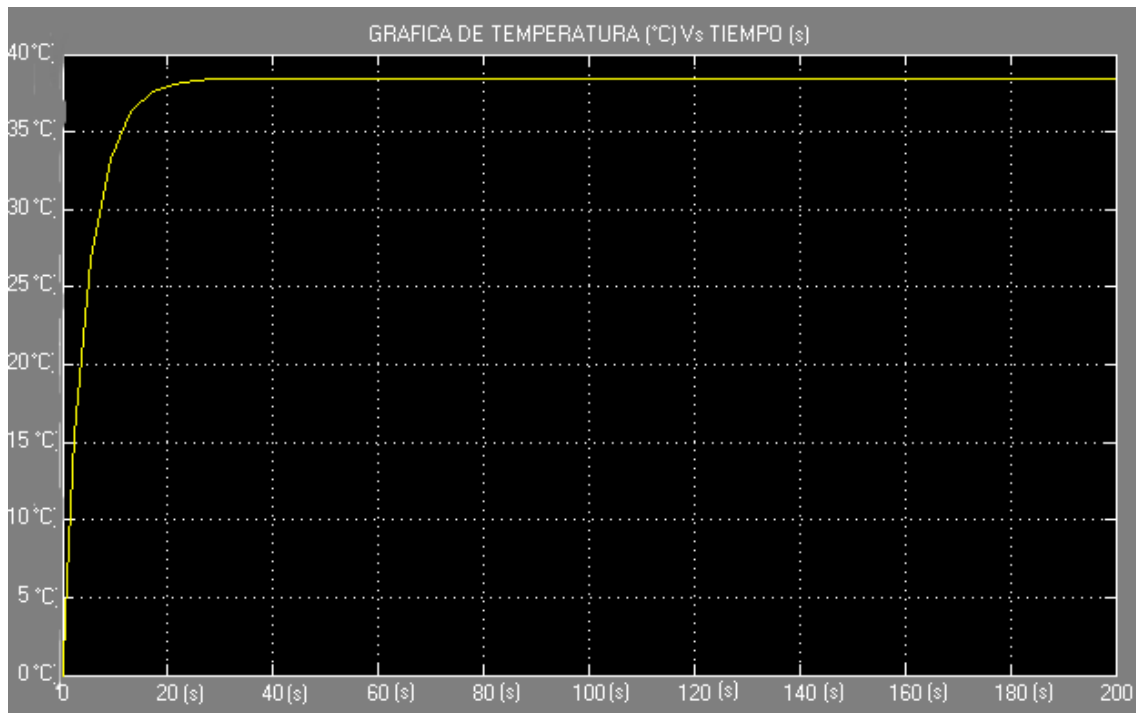


Figura 2.6: Respuesta al escalón unitario del modelo obtenido.

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar, en la parte superior de la figura 2.6, se presenta la respuesta al escalón unitario de la temperatura, y se puede notar que alcanza un régimen estable al cabo de 20 segundos.

Por otra parte, la gráfica inferior que representa a la respuesta al paso unitario de la función de Humedad relativa, presenta una característica inestable debido a que la respuesta tiende a valores más altos con el paso del tiempo.

2.2.3.3 DISEÑO DEL CONTROLADOR. EL modelo matemático obtenido es una función no lineal (ecuaciones 2.16 y 2.17), por contener potencias y productos, para facilitar su tratamiento en el espacio de estados y como requisito, es necesario linealizar las ecuaciones alrededor de un punto de trabajo, este punto de trabajo estará dado por: temperatura alrededor de 18 °C y humedad relativa 54%.

$$x_1 = 20^{\circ}\text{C}, x_2 = 54\% \quad u_{10} = 0.1\text{ J}, u_{20} = -5 * 10^{-3}\text{ J}, u_{30} = -0.247\text{ m}^3 \quad (2.18)$$

Linealizando las ecuaciones (2.16) y (2.17) mediante la serie de Taylor, se obtiene las expresiones 2.19 y 2.20

$$\dot{x}_1 = K_5 x_1 + K_3(u_{30}x_1 + x_{10}u_3) + K_1 u_1 + K_2 u_2 + K_4 u_3 \quad (2.19)$$

$$\dot{x}_2 = K_8[(u_{20} + q_{PLT})x_2 + x_{20}u_2] + K_9[2x_{20}(u_{20} + q_{PLT})x_2 + x_{20}^2 u_2] + K_{10}(u_{30}x_2 + x_{20}u_3) + K_{11}(2x_{20}u_{30}x_2 + x_{20}^2 u_3) + K_7 u_2 + K_{12} u_3 \quad (2.20)$$

Reemplazando las constantes por un valor numérico se obtiene las ecuaciones 2.21 y 2.22.

$$\dot{x}_1 = K_{13}x_1 + K_1 u_1 + K_2 u_2 + K_{14}u_3 \quad (2.21)$$

$$\dot{x}_2 = K_{15}x_2 + K_{16}u_2 + K_{17}u_3 \quad (2.22)$$

Donde:

$$K_{13} = K_5 + K_3 u_{30} \cong -0.2117$$

$$K_{14} = K_3 x_{10} + K_4 \cong -0.0714$$

$$K_{15} = K_8(u_{20} + q_{PLT}) + K_9 2x_{20}(u_{20} + q_{PLT}) + K_{10}u_{30} + K_{11}2x_{20}u_{30} \cong 0.0138$$

$$K_{16} = K_8x_{20} + K_9x_{20}^2 + K_7 \cong 47.2209$$

$$K_{17} = K_{10}x_{10} + K_{11}x_{20}^2 + K_{12} \cong -4.1742$$

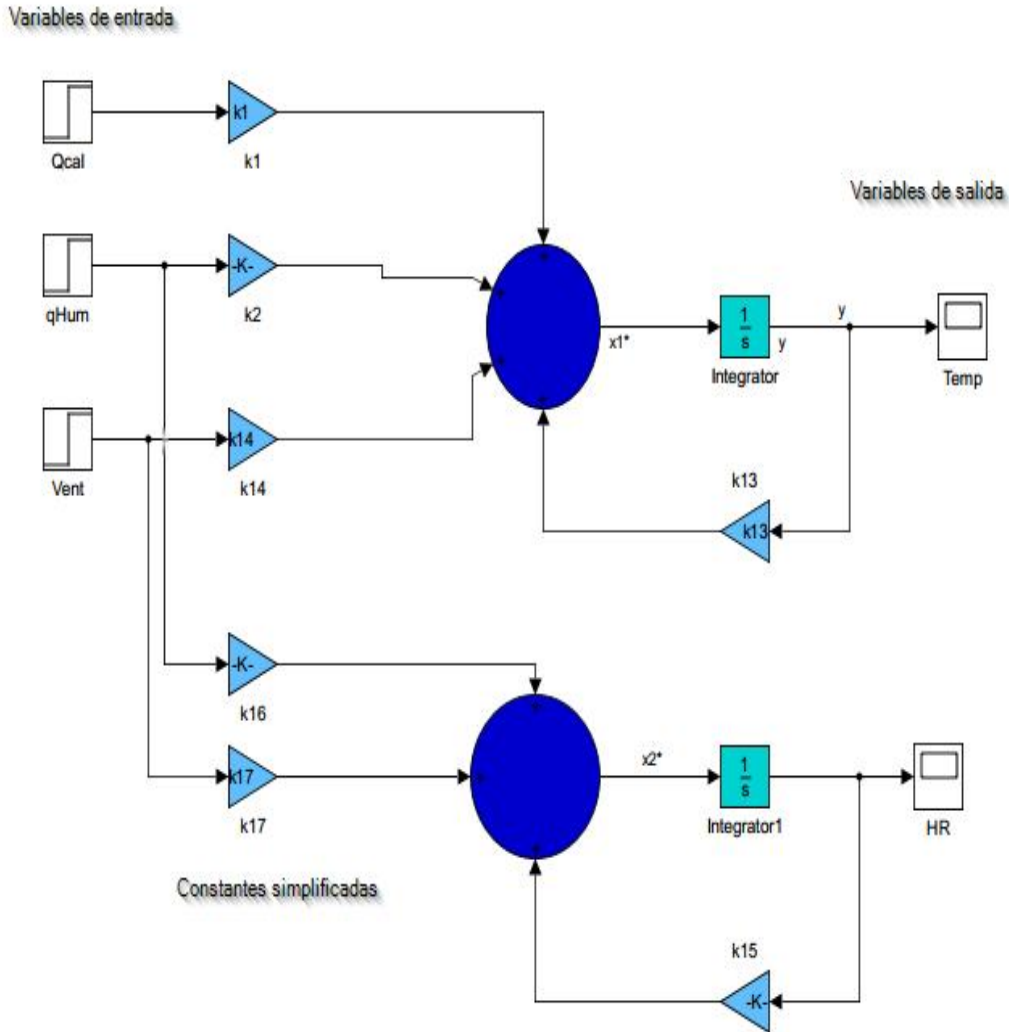


Figura 2.7: Diagrama de bloques del modelo matemático Linealizado.
Fuente: Elaboración Propia.

Del mismo modo que en la simulación del modelo obtenido, en la simulación del modelo linealizado, es necesario analizar las constantes susceptibles de variación a causa de parámetros externos no controlados, es en ese sentido que, se observa que las nuevas constantes susceptibles de variación son aquellas que son función de las constantes dependientes de la temperatura exterior y presión de vapor saturado, para

este caso resultan ser: “ K_{14} , K_{15} , K_{16} y K_{17} ”, por lo que en la simulación se variarían estos valores para observar la incidencia que tienen en la respuesta del modelo linealizado.

2.2.3.3.1 SIMULACIÓN DEL MODELO LINEALIZADO.

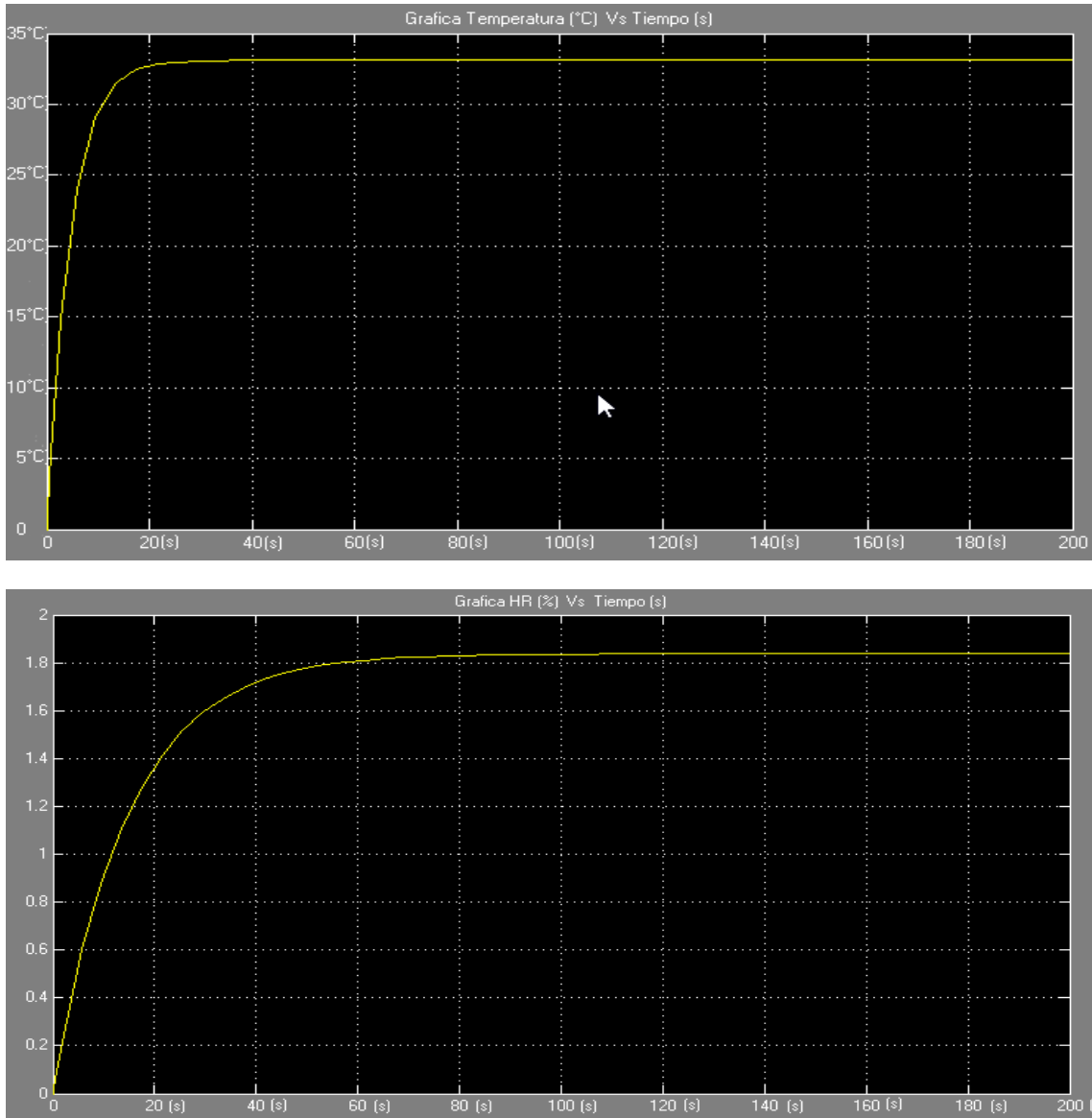


Figura 2.8: Respuesta al escalón unitario del modelo matemático Linealizado.

Fuente: Elaboración propia.

Comparando las gráficas de simulación del modelo matemático original (figura 2.6) y modelo linealizado (figura 2.8), se puede afirmar que el modelo matemático

linealizado es una buena aproximación del modelo matemático original, también se puede apreciar que la humedad relativa presenta una estabilidad en su respuesta.

2.2.3.3.2 REPRESENTACIÓN EN ESPACIO DE ESTADOS DEL MODELO OBTENIDO.

Una vez habiéndose obtenido el modelo matemático lineal del sistema de Múltiples entradas y Múltiples Salidas “Sistema MIMO”, para poder diseñar el controlador, la mejor estrategia es representar este modelo en el espacio de estados, representando las ecuaciones 2.21 y 2.22 en el espacio de estados, se obtiene las ecuaciones 2.25 y 2.26

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (2.23)$$

$$y = Cx + Du \quad (2.24)$$

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} K_{13} & 0 \\ 0 & K_{15} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} K_1 & K_2 & K_{14} \\ 0 & K_{16} & K_{17} \end{bmatrix} u \quad (2.25)$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} x \quad (2.26)$$

Donde:

$$A = \begin{bmatrix} K_{13} & 0 \\ 0 & K_{15} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} K_1 & K_2 & K_{14} \\ 0 & K_{16} & K_{17} \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La técnica a utilizarse para el diseño del controlador es por desacoplo, se elige esta técnica de diseño debido a su capacidad de determinar un controlador capaz de reducir las interacciones que puedan existir entre las variables de entrada y salida.

La Matriz de transferencia de la planta viene representada por la ecuación 2.28.

$$G_p(s) = C(sI - A)^{-1}B + D \quad (2.27)$$

$$G_p(s) = \begin{bmatrix} \frac{K_1}{s-K_{13}} & \frac{K_2}{s-K_{13}} & \frac{K_{14}}{s-K_{13}} \\ 0 & \frac{K_{16}}{s-K_{15}} & \frac{K_{17}}{s-K_{15}} \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

La Matriz de transferencia deseada del sistema incluido el controlador se puede representar por la ecuación

$$G(s) = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_{Temp}s+1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_{HR}s+1} \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

Donde:

- T_{Temp} : Tiempo deseado de estabilización de la temperatura.
- T_{HR} : Tiempo deseado de estabilización de la humedad relativa

Para determinar la matriz de transferencia del controlador se utiliza la ecuación 2.30

$$G_c(s) = G_p(s)^{-1}G(s)[I - G(s)]^{-1} \quad (2.30)$$

Reemplazando las ecuaciones 2.28 y 2.29 en la expresión 2.30 se determina la matriz de transferencia del controlador.

$$G_c(s) = \begin{bmatrix} \frac{K_a s^2 + K_b s + K_c}{s^2 - s K_d} & \frac{K_e s^2 + K_f s + K_g}{s^2 - s K_h} & \frac{K_i s + K_j}{s^2 - s} \\ 0 & \frac{K_k s^2 + K_l s + K_m}{s^2 - s K_h} & \frac{K_o s + K_p}{s^2 - s} \\ 0 & 0 & \frac{s+1}{s^2 - s} \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

Los componentes de la matriz de control no presentan la forma característica de la ecuación de un controlador PID, esto se da debido a que la matriz de transferencia del controlador también incluye la matriz de desacoplo.

Realizando un replanteo de los componentes de la matriz del controlador, se puede obtener la forma característica del controlador PID además de apreciar la matriz de desacoplo, que es la encargada de reducir la interacción entre las variables de entrada y salida, ecuación 2.32:

$$G_c(s) = \begin{bmatrix} \frac{K_a s^2 + K_b s + K_c}{s K_d} & \frac{K_e s^2 + K_f s + K_g}{s K_h} & \frac{K_i s + K_j}{s} \\ 0 & \frac{K_k s^2 + K_l s + K_m}{s K_h} & \frac{K_o s + K_p}{s} \\ 0 & 0 & \frac{s+1}{s} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \frac{K_d}{s-K_d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_h}{s-K_h} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{s-1} \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

$$G_c(s) = G_{PID}(s) * G_D(s) \quad (2.33)$$

El diagrama de bloques del sistema de control MIMO diseñado se muestra en la figura 2.9.

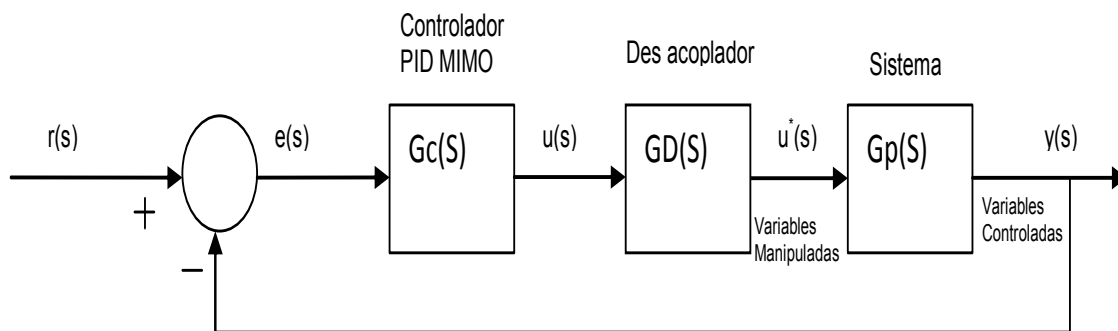


Figura 2.9: Diagrama de bloques del sistema de control realimentado.

Fuente: Elaboración propia.

Para obtener una respuesta del sistema controlado, se hace uso del programa matemático MatLab, cargando las matrices del sistema (modelo matemático), la matriz del controlador y del des-acoplador, se puede observar que la respuesta del sistema es mucho más veloz (Figura 2.10).

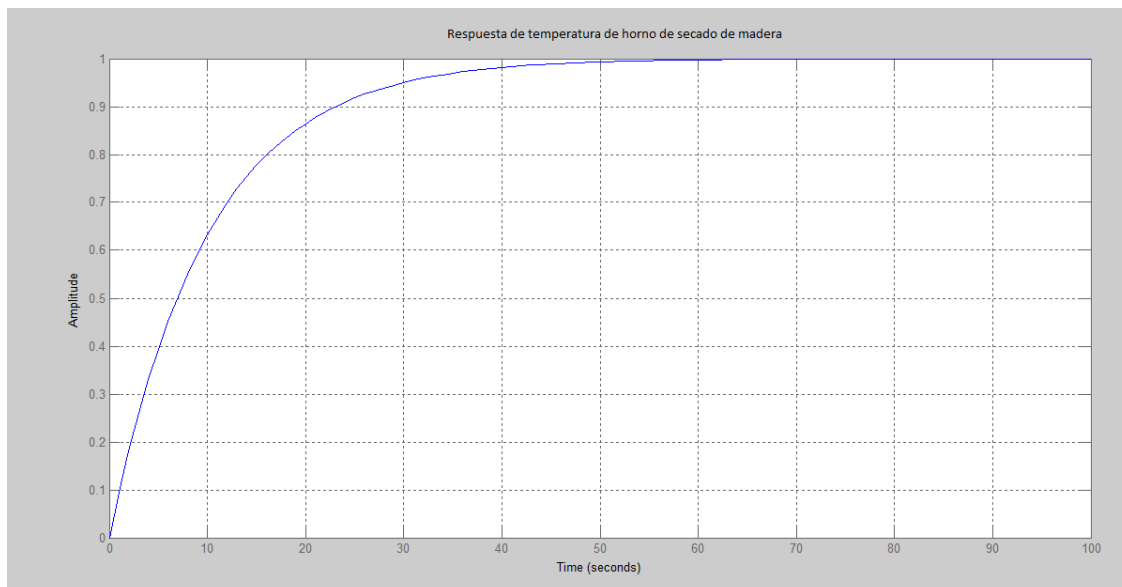


Figura2.10a: Respuesta al escalón unitario de la temperatura del invernadero
Fuente: Elaboración Propia

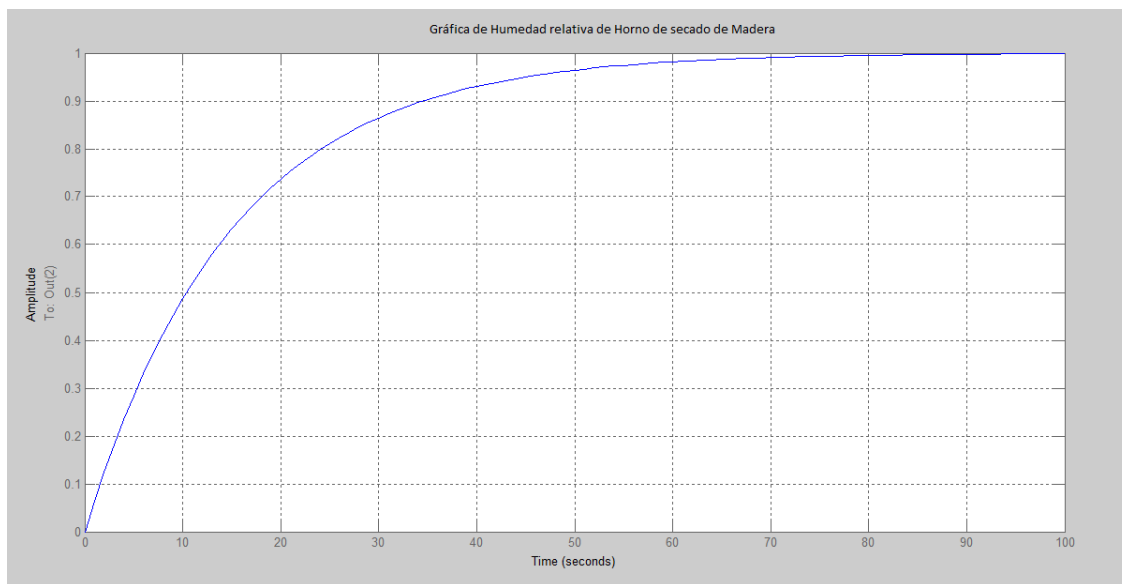


Figura2.10b: Respuesta al escalón unitario de la Humedad Relativa del invernadero
Fuente: Elaboración Propia.

Como se puede observar en la gráfica resultante, la respuesta de la temperatura (figura 2.10a) y de la humedad relativa (figura 2.10b) a una señal de referencia de paso unitario, son más rápidas que gráficas obtenidas del modelo linealizado (figura 2.8) para tiempos de

establecimiento para temperatura $T_t=5$; y tiempo de establecimiento para humedad Relativa $Thr=10$

2.2.4 Desarrollo de la estructura del sistema de control electrónico.

En el diseño del sistema electrónico para el horno de secado, con el fin de facilitar su implementación, escalamiento, modificaciones, posibles reparaciones y mínimas conexiones, está basado en el desarrollo de subsistemas independientes de actuadores, sensores y un computador central en el que se ejecuta el programa de secado, todos los periféricos se encontrarán interconectados entre sí mediante un bus de campo diferencial, con alta inmunidad al ruido en las comunicaciones y de un largo alcance.

Línea Serie RS-485:	Línea de transmisión balanceada
Topología:	Bus lineal con terminadores en ambos extremos(opcional)
Medio de transmisión:	Par trenzado y apantallado
Longitud:	Menor o igual a 1200 m, dependiendo de la velocidad de transmisión
Número de estaciones:	32 (maestros, esclavos y repetidores)
Velocidad:	9.6 / 19.2 / 93.75 kbits/s, L <=1200m 187,5 kbit/s, si longitud <=1000m 500 kbit/s, si longitud <=600m 1500 kbit/s, si longitud <=200m 10/12 Mbit/s, si longitud <=100m
Chip Transceiver	SN75176 A, DS3695, Max485, Max1487 y otros

Tabla 2.3: Características del Estándar 485.

Fuente: Hoja de Datos “Maxim Integrated “

El medio de conexión elegido y que cumple con las especificaciones detalladas líneas arriba, es el bus de campo diferencial que utiliza el estándar RS485 implementado en half-duplex, debido a que este estándar garantiza una comunicación libre de errores por las características que posee, en la tabla 3.2 se puede apreciar una descripción de las características básicas más sobresalientes de este bus de campo.

La figura 2.11 muestra la arquitectura general de conexión entre periféricos y computador central mediante el bus de línea balanceada del sistema de control.



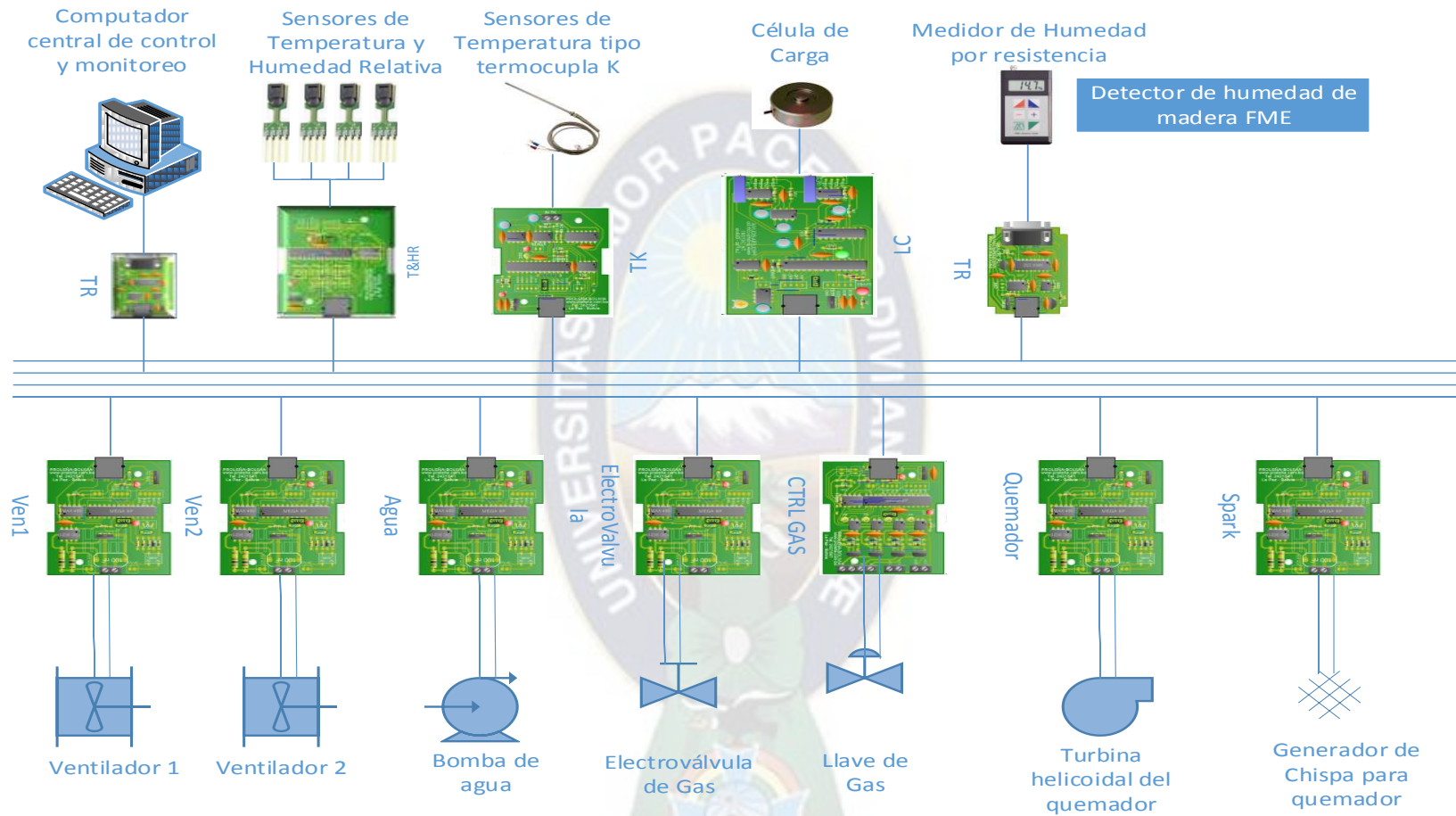


Figura 2.11: Esquema general de conexión
Fuente: elaboración propia.

2.2.4.1 DESCRIPCIÓN DE PERIFÉRICOS DE CONTROL Y SENSORES:

El diseño de funcional y lógico de todos los periféricos, obedecen al mismo esquema funcional y lógico, se procedió de este modo con el fin de poder realizar una producción en serie y evitar rediseñar las etapas principales para cada periférico individualmente. En la figura 2.12 se presenta el esquema bajo el cual se fueron diseñados los periféricos.

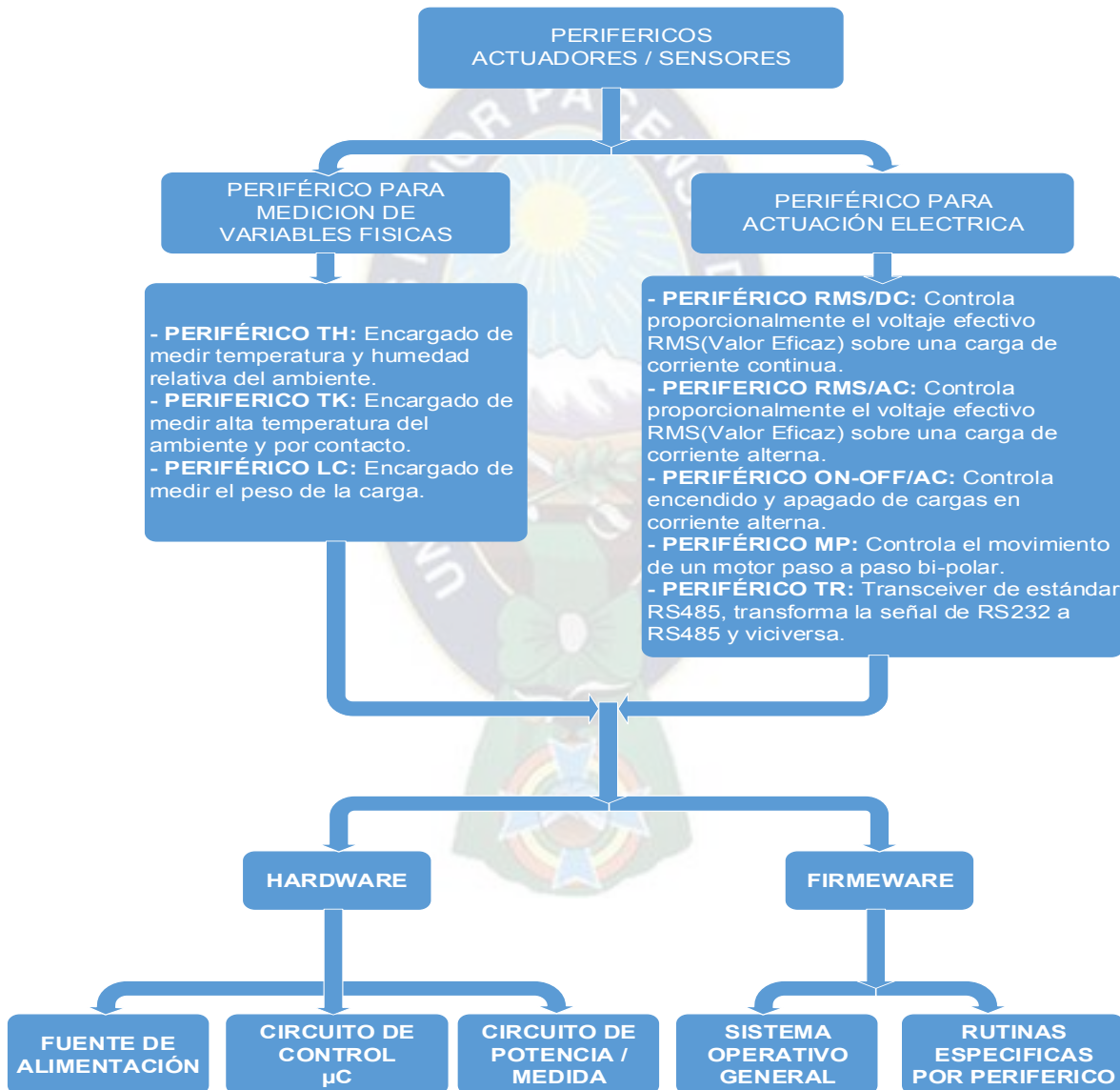


Fig. 2.12: Esquema funcional de periféricos sensores y actuadores.

Fuente: elaboración Propia

2.2.4.1.1 Descripción general del periférico TR(transceiver).

El periférico TR, es un circuito electrónico que adecua las señales de voltaje utilizados en las normas de comunicación RS232 y RS485.

El periférico permite conectar la PC al bus de comunicación para enviar o recibir comandos, además de poder realizar un Reset en todos los periféricos conectados al bus de comunicación.

2.2.4.1.1.1 Diagrama de bloques.

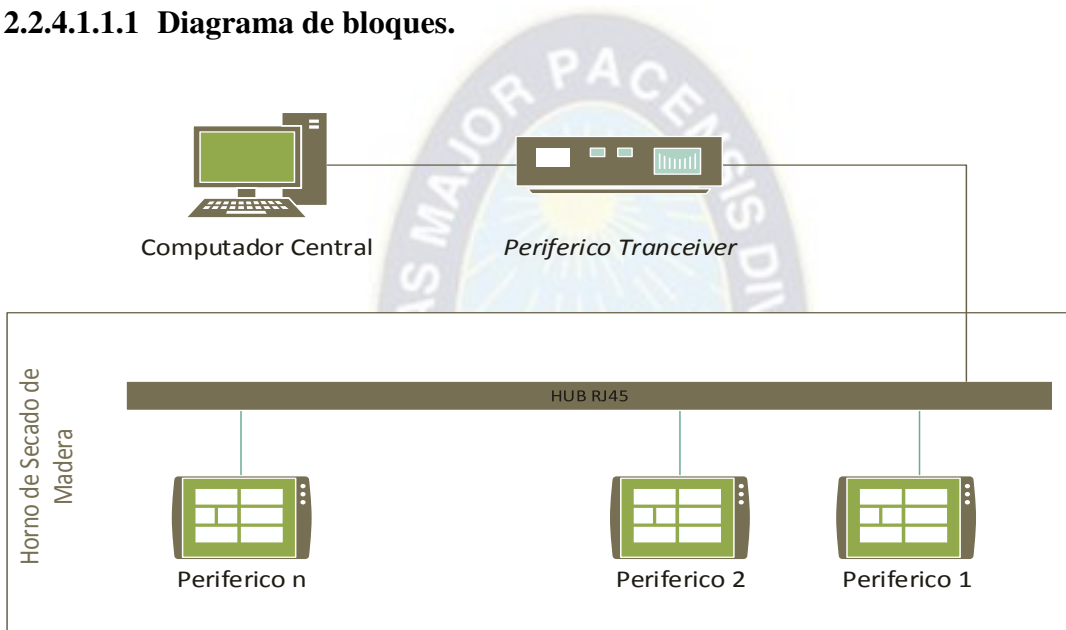


Figura 2.13: Diagrama de bloques de conexión de periféricos.
Fuente: Proleña S.R.L.

Esta representación de bloques, nos permite identificar la utilidad del periférico como el medio de comunicación entre la PC y los periféricos conectados al bus. No está presente la fuente de alimentación, ya que se parte de la idea de que el circuito se encuentra ya alimentado y no es significativo a la hora de representar la estructura del periférico.

2.2.4.1.1.2 Esquemas electrónicos:

Se ha dividido el esquema electrónico del periférico en dos partes para facilitar una mejor interpretación: Fuente de Alimentación y Circuito de comunicación.

2.2.4.1.1.3 Fuente de alimentación.

El periférico es alimentado por una fuente de tensión de 12V DC con un mínimo de 250mA de corriente. Lo que supone un consumo de 3W.

La fuente de alimentación es de salida fija, en este caso la tensión de salida es dada por un regulador de tensión (el circuito integrado 7805), que proporciona a su salida una tensión de 5 voltios. Esta tensión es utilizada para alimentar todos los componentes pasivos y circuitos integrados del periférico.

2.2.4.1.1.3.1 Componentes: Los componentes que conforman la fuente de alimentación son:

- **Conector de alimentación:** Es un conector RJ45 donde dos pines (2) Gnd y (5) Vcc, van enchufados a la fuente de alimentación de 12VDC.
- **Condensador C5:** Este condensador está situado a la entrada del regulador. Actúa como un filtro de alta frecuencia, con lo que se consigue quitar los picos de tensión que puedan llegar a existir.
- **Regulador 7805:** Este circuito integrado transforma la tensión de 12V que hay en su entrada en 5V a su salida con el cual se alimenta todos los componentes del periférico.

2.2.4.1.1.4 Circuito de comunicación:

El circuito de comunicación incorpora dos transceptores, uno que se utiliza para acondicionar las señales de voltaje entre las normas de comunicación serial RS232E a RS232-TTL y otro que se encarga de acondicionar las señales al estándar de comunicación serial RS485.

El circuito hace uso de la línea RTS de la salida RS232, para seleccionar el comportamiento del transceptor MAX485 en modo recepción o envío, haciendo uso de un transistor que trabaja en configuración de corte y saturación. Se utiliza la señal DTR para hacer un reset en todos los periféricos que se encuentran conectados al bus de comunicación. Utilizando para este fin un opto-acoplador y un transistor que trabajan como un interruptor.

2.2.4.1.1.5 Componentes del circuito tranceiver: Los componentes que conforman el circuito de comunicación son:

- **Conector para comunicación y alimentación:** Es un conector RJ45 que usa 5 de sus 8 líneas de un cable de red Categoría 6, cuyo orden de conexión es cruzado 1-8, 2-7, 3-6, 4-5, 5-4, 6-3, 7-2, 8-1. Se usa la siguiente nomenclatura: Reset (6) el cual permite un reset físico del periférico desde la computadora. Vcc (5) alimentación positiva de la fuente de voltaje. A (3) y B (4) usados para la comunicación RS485. Gnd (2) tierra de la fuente de voltaje.
- **Conector para PC:** Es un conector para 9 pines de uso estándar comercializado bajo el nombre de conector DB9 hembra.
- **Drivers/Receivers:** El circuito integrado MAX232 es un dispositivo electrónico que incorpora un transmisor para la norma RS232E estándar de comunicación que opera (+/-12VDC) y RS232 TTL (+/-5VDC), para su funcionamiento solo requiere el uso de capacitores para la adaptación de estas señales de voltaje.

- **Optoacoplador:** Se trata de un dispositivo electrónico que permiten aislamiento óptico, se puede entender como un LED IR y un optotransistor en un mismo encapsulado.
- **Transistor:** Un dispositivo activo semiconductor que es capaz de amplificar, oscilar y actuar como un interruptor.
- **Transceptor:** El transceptor MAX485 es un circuito integrado que incorpora un transmisor y receptor RS485 y RS232/TTL. Su función es la de acondicionar las señales eléctricas de las dos normas de una a la otra respectivamente.

Siendo que la norma RS-485 no es verdaderamente bidireccional simultánea, es necesario seleccionar el funcionamiento del dispositivo, ya sea que queremos enviar o recibir datos. Esto se hace usando el pin /RE del dispositivo.

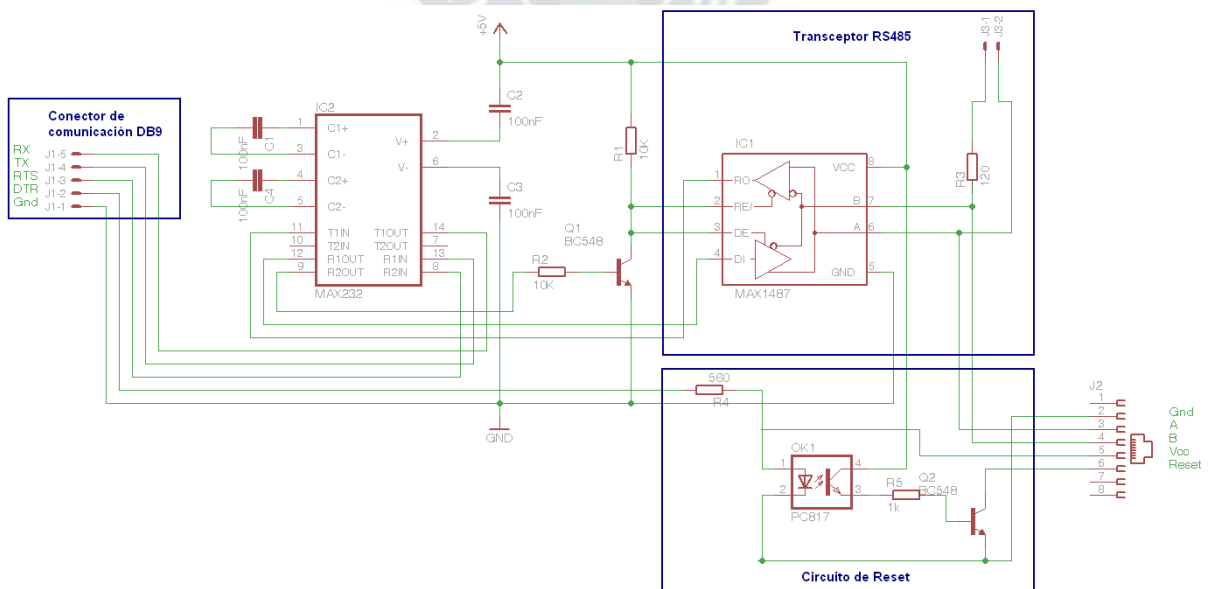


Figura 2.14: Esquema detallado del circuito de comunicación.
Fuente: Proleña S.R.L.

2.2.4.1.1.6 Circuito final:

El desarrollo del circuito impreso a cargo de PROLEÑA S.R.L. tiene como características:

- Ser de capa simple para interconexión de componentes, Baquelita como material de soporte y terminado en impresión serigráfica con pintura epóxica color verde.
- El circuito terminado es albergado en una caja plástica de 6.2cm x 5cm x 2.5cm de la fábrica brasilera PATOLA.

En la imagen se puede apreciar la apariencia del PCB (Printed Circuit Board) terminado con la disposición de componentes electrónicos y el arte de impresión.

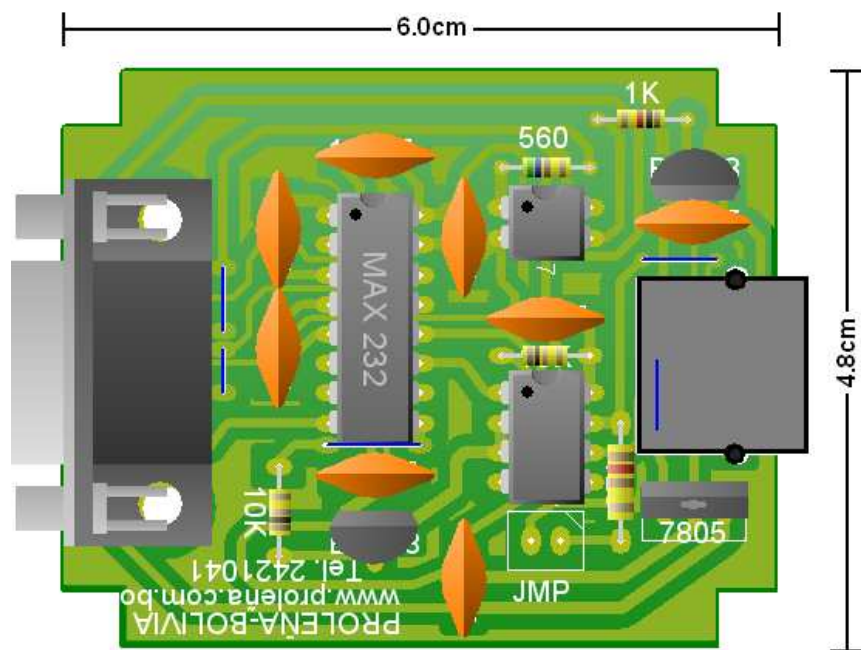


Figura 2.15: Circuito PCB terminado.
Fuente: Proleña S.R.L.

2.2.4.1.1.7 Especificaciones Técnicas:

Parámetro	Valor
Tasa de transferencia máxima	200kbps
Velocidad de transmisión RS485	Depende de la velocidad establecida por el transmisor del PC

Tabla 2.4: Especificaciones técnicas de comunicación de Periférico Transceiver.

Fuente: Proleña S.R.L.

2.2.4.1.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PERIFÉRICO TH “TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA”.

El periférico TH, es un circuito electrónico que permite obtener señales digitales procedentes de los sensores digitales conectados al periférico.

El sensor digital hace uso de un transductor o detector primario (elemento de medida), es el elemento que responde a la variable física a ser medida y utiliza energía de dicha variable para transformar su propio estado, de tal forma que el resultado pueda ser utilizado como información útil y representativa de la variable física medida.

El periférico TH es un sistema o equipo electrónico que permite la comunicación entre la PC y el sistema de adquisición de cantidades de variables físicas. Adapta e interpreta y las señales procedentes de la PC y se comunica con sus terminales (sensores digitales).

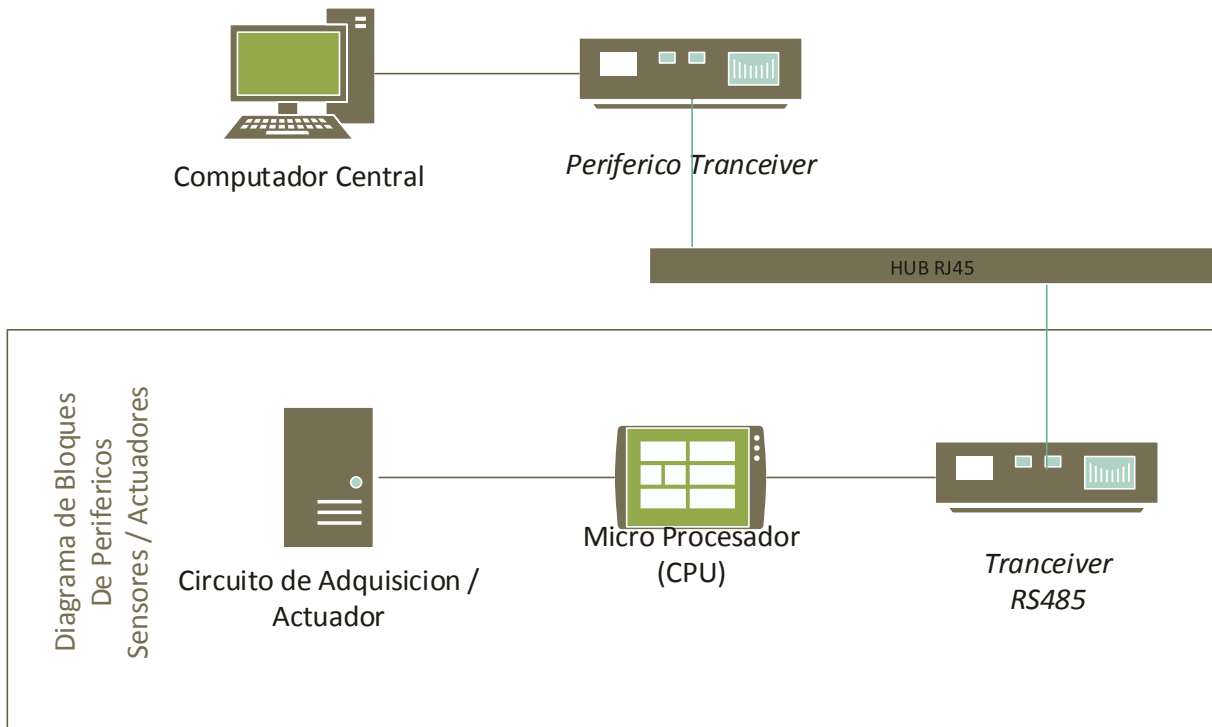


Figura 2.16: Diagrama de bloques general para periféricos Sensores y Actuadores
Fuente: PROLEÑA S.R.L.

En esta representación de bloques, no está presente la fuente de alimentación, ya que se parte de la idea de que el circuito se encuentra alimentado y no es significativo a la hora de representar la estructura del periférico.

2.2.4.1.2.1 Esquemas electrónicos.

El esquema electrónico del periférico TH, se muestra en la figura 2.18, en adelante no se hará referencia a los circuitos de alimentación y circuitos de comunicación, ya que estas etapas fueron descritas en el periférico tranceiver, y se repiten para todos los periféricos tanto actuadores como sensores.

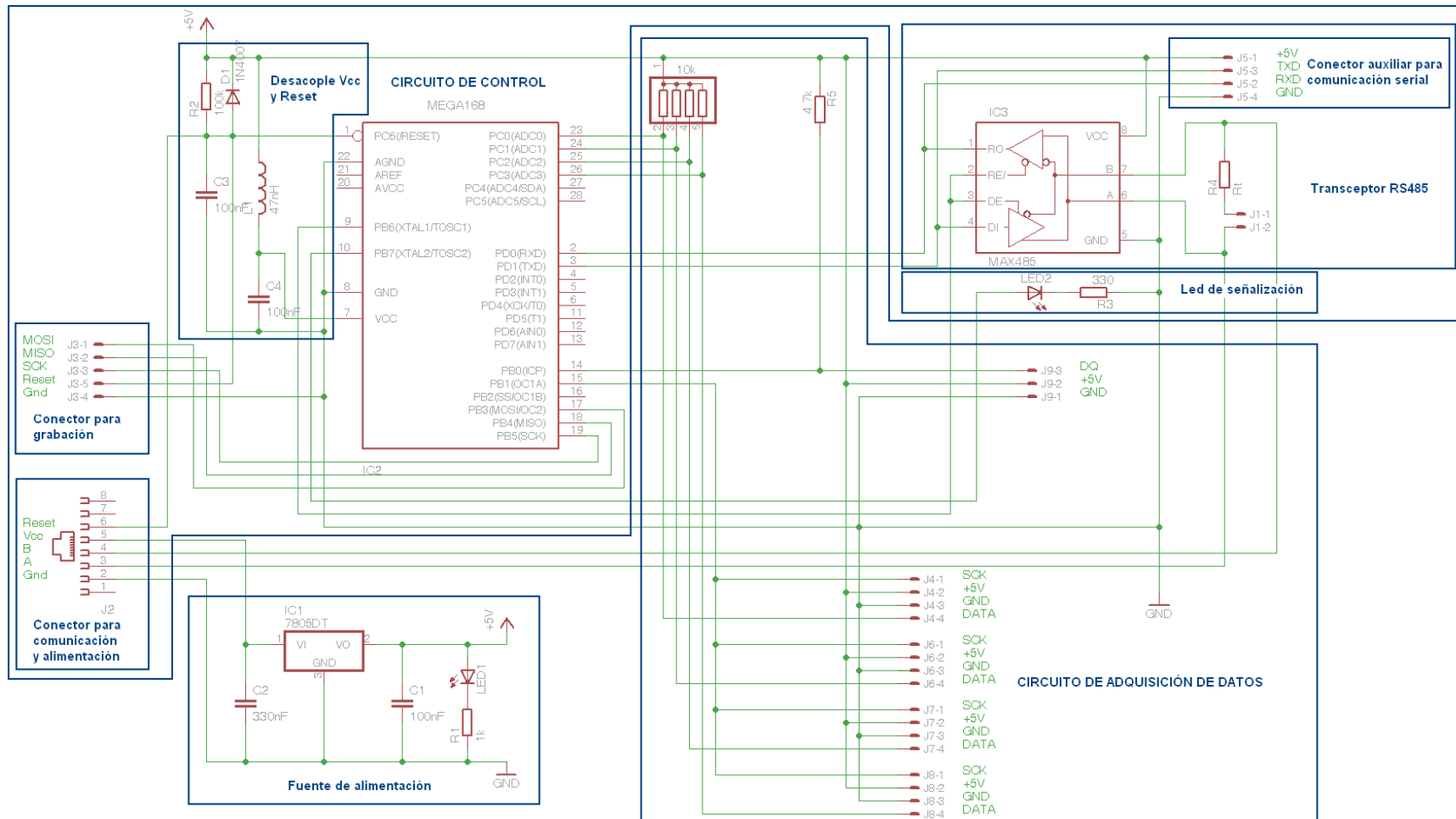


Figura 2.17: ESQUEMA ELECTRÓNICO PERIFÉRICO TH (Temperatura y Humedad Relativa)
Fuente: Proleña S.R.L.

2.2.4.1.2.2 Circuito de control:

El circuito de control es el encargado del funcionamiento del periférico, puede entenderse como el cerebro del mismo.

Tiene como tareas las siguientes:

- Controlar la recepción y envío de datos a la PC.
- Verificar la correspondencia de datos al protocolo de comunicación.
- Verificar la integridad de datos mediante el uso de CRC (Cyclic Redundancy Check).
- Realizar comunicación con el sensor a través de un protocolo específico del fabricante.
- Solicitar al sensor digital la lectura actual de la variable a medir.
- Realizar cálculos para convertir los datos obtenidos en valores adecuados con el uso de fórmulas y criterios del fabricante.
- Calcular las correcciones necesarias por influencia de la temperatura en el caso de una medida de humedad relativa.
- Enviar estos valores a la PC.

Cuando recibe una cadena de datos valida enciende el LED de señalización por un intervalo de tiempo de 10ms.

2.2.4.1.2.3 Componentes del circuito de control:

- **Conector para comunicación y alimentación:** Es un conector RJ45 que usa 5 de sus 8 líneas de un cable de red Categoría 6, cuyo orden de conexión es cruzado 1-8, 2-7, 3-6, 4-5, 5-4, 6-3, 7-2, 8-1.

Se usa la siguiente nomenclatura:

- **Reset (6)** el cual permite un reset físico del periférico desde el computador principal.
- **Vcc (5)** alimentación positiva de la fuente de voltaje.

- **A (3), B (4)** usados para la comunicación RS485.
- **Gnd (2)** tierra de la fuente de voltaje.

- **Microcontrolador (CPU):** El ATmega168 es un microcontrolador CMOS¹ de 8 bits a baja potencia basado en arquitectura RISC² de AVR. Ejecutando las instrucciones en un solo ciclo de reloj, el ATmega168 alcanza un desempeño de 1 MIPS (Millones de instrucciones por Segundo) por MHz permitiendo al diseñador optimizar consumos de potencia contra la velocidad de procesamiento.

- **Transceptor:** El transceptor MAX485 es un circuito integrado que incorpora un transmisor y receptor RS485 y RS232/TTL.

La función que cumple es la de acondicionar las señales eléctricas de los dos estándares de comunicación en ambos sentidos.

Siendo que la norma RS-485 no es verdaderamente bidireccional simultánea, es necesario seleccionar el funcionamiento del dispositivo, ya sea que queremos enviar o recibir datos. Esto se hace usando el pin /RE del dispositivo.

- **LED de señalización:** El LED permite informar mediante señales luminosas el funcionamiento del microcontrolador.

Observación: Debido a que el circuito de control y el circuito de alimentación son los mismos para todos los periféricos, en adelante solo se detallará el circuito de adquisición de datos, que es el que varía en cada periférico.

¹ Complementary metal-oxide-semiconductor.

² Reduced instruction set computer

2.2.4.1.2.4 Circuito de adquisición:

El circuito de adquisición de datos a nivel de componentes electrónicos es bastante reducido, está compuesto de 5 resistencias cuyos valores usados se adecuan a las recomendaciones del fabricante.

Como se utiliza sensores digitales, etapas como acondicionamiento de señales y filtros se encuentra presentes en el encapsulado de los sensores.

El periférico puede manejar un máximo de 4 sensores de temperatura y humedad (SHT75), cada sensor dispone de un conector por sensor, de acuerdo a recomendaciones del fabricante.

2.2.4.1.2.5 Componentes:

Resistencias de polarización: Es un conjunto de 5 resistencias eléctricas, 4 para los sensores de temperatura y humedad (SHT75), Su función es polarizar las entradas de colector abierto de los sensores a (Vcc) +5VDC.

Conector sensor SHT75: Se trata de un conector tipo pin header de 4 terminales o pines que tienen la siguiente disposición: Pin 1 SCK (Señal de reloj), Pin 2 +5V (Alimentación digital), Pin 3 GND (Tierra digital), Pin 4 DATA (Señal digital bidireccional de datos).

Sensor SHT75: Es un sensor integrado de temperatura y humedad relativa calibrado en fábrica con salida digital mediante un bus serie síncrono y protocolo específico del fabricante. En el dispositivo se debe compensar la medida de humedad dependiendo de la temperatura. Cuenta también en su interior con un calefactor, para evitar condensación de agua al interior de la cápsula de medida para condiciones de niebla o similar donde existe condensación.

Cuenta con una interfaz de comunicación 2-wire serial con protocolo propietario. Su rango de trabajo para humedad relativa de 0% a 100% con una resolución de 0.03% y en temperatura de -40°C a 123.8°C con una resolución de 0.01°C.

2.2.4.1.2.6 Circuito final:

El desarrollo del circuito impreso a cargo de PROLEÑA S.R.L. tiene como características: Ser de capa simple para interconexión de componentes, Baquelita como material de soporte y terminado en impresión serigráfica con pintura epóxica color verde.

El circuito terminado es albergado en una caja plástica de 8.5cm x 7.2cm x 4cm de la fábrica brasilera PATOLA.

En la imagen se puede apreciar la apariencia del PCB (Printed Circuit Board) terminado con la disposición de componentes electrónicos y el arte de impresión.

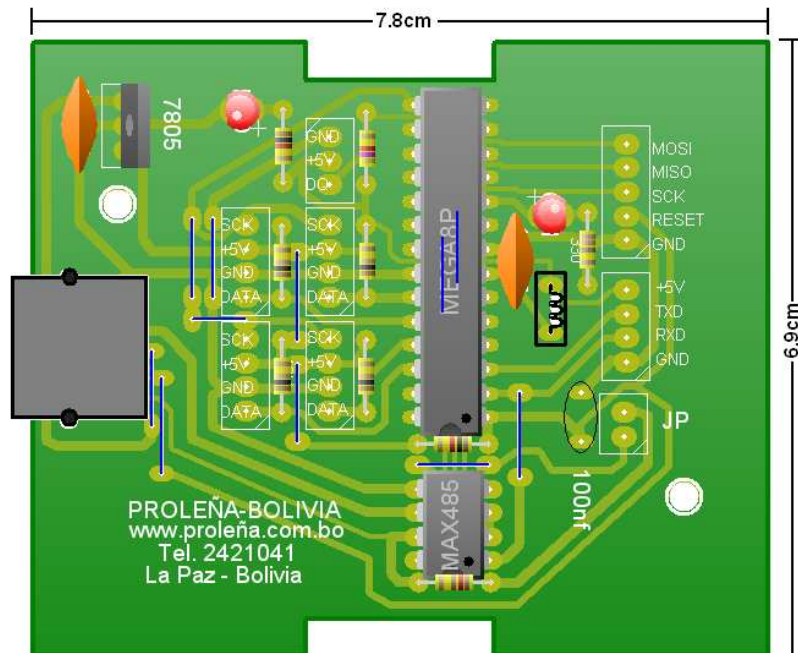


Figura 2.18: Circuito PCB periférico Sensor TH (Temperatura y Humedad Relativa)
Fuente: Proleña S.R.L.

2.2.4.1.2.7 Especificaciones Técnicas

Parámetro	Valor
Frecuencia de reloj del microcontrolador	8MHz
Velocidad de transmisión RS485	9600bps 8,N,1
Verificación de datos	CRC16-CCITT
Sensor de temperatura y humedad	SHT75
Rango de medidas	-40 ~ 123.8°C, 0.01°C
Resolución	0 ~ 100% HR, 0.03%
Cantidad máxima de sensores	4
Sensor de temperatura	DS1820
Rango de medidas	-55 ~ 125°C
Resolución	+/- 0.5°C, -10 ~ 85°C
Cantidad máxima de sensores	8

Tabla 2.5: Especificaciones técnicas Periférico TH

Fuente: Proleña S.R.L.

2.2.4.1.3 ESQUEMA ELECTRÓNICO PERIFÉRICO TK “SENSOR DE TEMPERATURA PARA TERMOCUPLA TIPO K”.

El periférico TK, es un circuito electrónico que permite obtener señales analógicas procedentes de su etapa de adquisición de datos en el que se encuentra conectado un transductor primario (termocupla de tipo K).

El transductor o detector primario (elemento de medida) responde a la variable física a ser medida en este caso la temperatura.

El periférico TK es un sistema o equipo electrónico que permite la comunicación entre la PC y el sistema de adquisición de cantidades de variables físicas. Adapta e interpreta y las señales procedentes de la PC, así como las señales obtenidas en su circuito de adquisición.

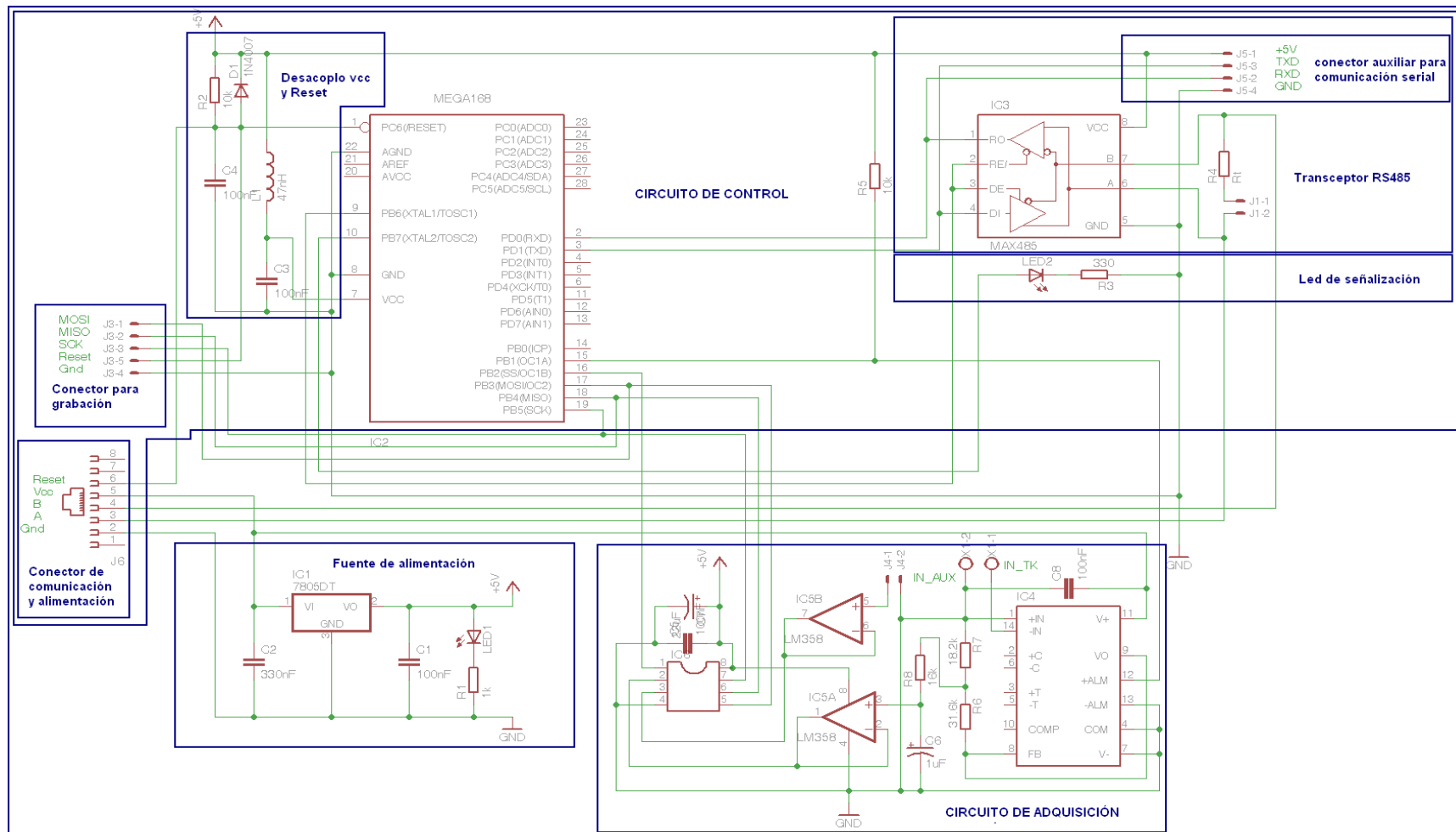


Figura 2.19: **ESQUEMA ELECTRÓNICO PERIFÉRICO TK (Termo Cupla)**

Fuente: Proleña S.R.L...

2.2.4.1.3.1 Circuito de adquisición de datos:

El circuito de adquisición de datos, está compuesto por una etapa de amplificación de señal dedicado para termocupla, con compensación de junta fría, un amplificador operacional de uso general y un conversor analógico digital de 12bits.

El amplificador para termocupla, está diseñado y calibrado para ser usado con termocuplas de tipo K en un rango de -200°C a 1250°C , dando como salida un voltaje de 10mV por grado Celsius. El amplificador operacional de uso general contiene dos amplificadores operacionales, de los cuales, un amplificador es utilizado para adecuar la señal procedente del amplificador de termocupla a niveles de trabajo del ADC utilizado. El otro amplificador interno es utilizado como una entrada auxiliar de voltaje en un rango de $0\text{V} - 3.6\text{V}$.

AD595: Se trata de un amplificador operacional dedicado, contiene todos los elementos necesarios para amplificar y compensar el voltaje presente en una termocupla.

LM358: Es un amplificador operacional de uso general que alberga dos amplificadores operacionales.

LTC1291: Es un conversor analógico digital de alimentación simple (+5V), doble canal analógico, interfaz de comunicación serial (SPI) y 12 bits de resolución.

Conector de termocupla: Se trata de un conector tipo borne al cual se atornilla los cables de la termocupla.

Conector auxiliar: Se trata de un conector tipo pin header al cual el cual puede ser utilizado para medir voltajes entre $0 - 3.6\text{V}$.

2.2.4.1.3.3 Especificaciones Técnicas

Parámetro	Valor
Frecuencia de reloj del microcontrolador	8MHz
Velocidad de transmisión RS485	9600bps 8,N,1
Verificación de datos	CRC16-CCITT
Sensor de temperatura	Termocupla tipo K
Rango de medida	0 -1250°C
Resolución	+/- 1°C
Cantidad máxima de sensores	1
Entrada auxiliar analógica	Si
Cantidad de entradas analógicas	1
Rango de medida	0 – 3.0V
Resolución de ADC	12bits

Tabla 2.6: Especificaciones técnicas Periférico Termocupla

Fuente: Proleña S.R.L.

2.2.4.1.4 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PERIFÉRICO LC “CELULA DE CARGA”.

El periférico LC, es un circuito electrónico que permite obtener señales analógicas procedentes de la célula de carga conectada al periférico.

Esta señal de voltaje procedente de la célula de carga, es amplificada y compensada con el uso de circuitos electrónicos adecuados. También es corregida mediante una ecuación obtenida en la calibración previa de la célula de carga, obteniendo así una lectura de peso.

El periférico LC es un sistema o equipo electrónico que permite la comunicación entre la PC y el sistema de adquisición de peso. Adapta e interpreta y las señales procedentes de la PC y obtiene valores de su terminal (célula de carga).

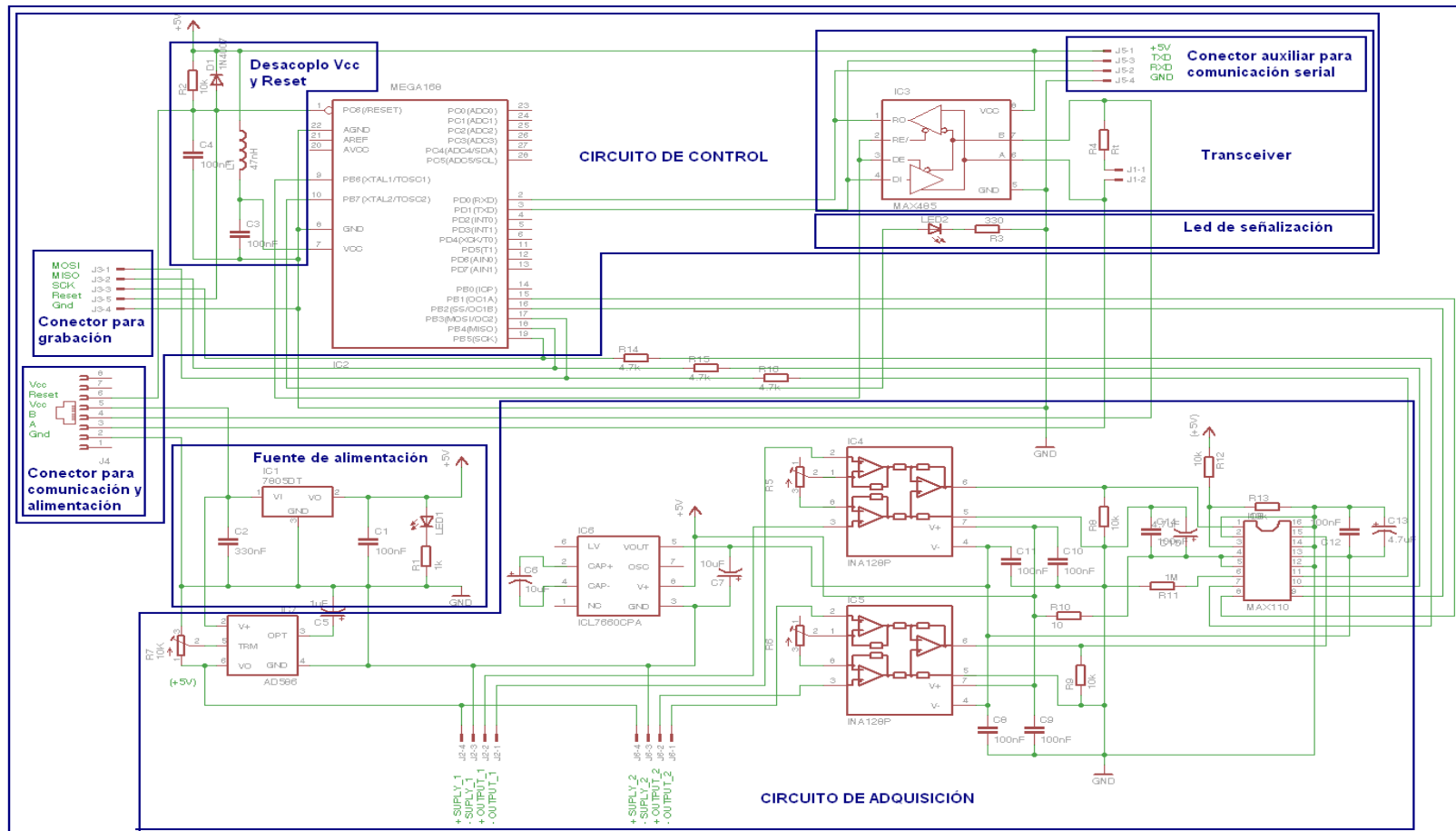


Figura 2.21: ESQUEMA ELECTRÓNICO PERIFÉRICO LC (Célula de Carga)

Fuente: Proleña S.R.L.

2.2.4.1.4.1 Circuito de adquisición:

El circuito de adquisición de datos, está compuesto de dos amplificadores operacionales de instrumentación, un circuito de voltaje de referencia precisión, un inversor de voltaje DC, y un convertor analógico digital de 14bits.

El circuito comprende dos sub-circuitos idénticos en componentes, pero con diferentes factores de ganancia para amplificadores de instrumentación, esto para cubrir dos rangos de operación en los cuales se puede encontrar la célula de carga. O utilizar para tener lecturas de 2 células de carga a la vez.

2.2.4.1.4.2 Componentes:

AD586: Se trata de un circuito electrónico que provee de un voltaje de referencia (+5V) de precisión, cuyo valor y estabilidad es primordial para un adecuado funcionamiento de la célula de carga.

ICL7660: Es un circuito integrado cuya función es la convertir un voltaje positivo a negativo, en este caso de +5V a -5V, este voltaje es necesario para la operación de los amplificadores operacionales de instrumentación y al convertor analógico digital.

INA128: Es un amplificador operacional de instrumentación de precisión con ganancia variable, necesitando solo el uso de una resistencia de precisión.

MAX110: Es un convertor analógico digital que usa auto-calibración interna con una resolución de 14bits y doble canal difer que no requiere componentes externos para su funcionamiento. Su interfaz de comunicación es de tipo serial SPI.

Conector para célula de carga: Es un conector de tipo pin-header de cuatro terminales que son usadas para alimentar a la célula de carga e ingresar el voltaje obtenido en la misma al amplificador de instrumentación.

2.2.4.1.4.3 Circuito final:

El desarrollo del circuito impreso a cargo de PROLEÑA S.R.L. tiene como características: Ser de capa simple para interconexión de componentes, Baquelita como material de soporte y terminado en impresión serigráfica con pintura epóxica color verde.

El circuito terminado es albergado en una caja plástica de 15.5cm x 12cm x 7.5cm de fabricación argentina ASSANO.

En la imagen se puede apreciar la apariencia del PCB (Printed Circuit Board) terminado con la disposición de componentes electrónicos y el arte de impresión.

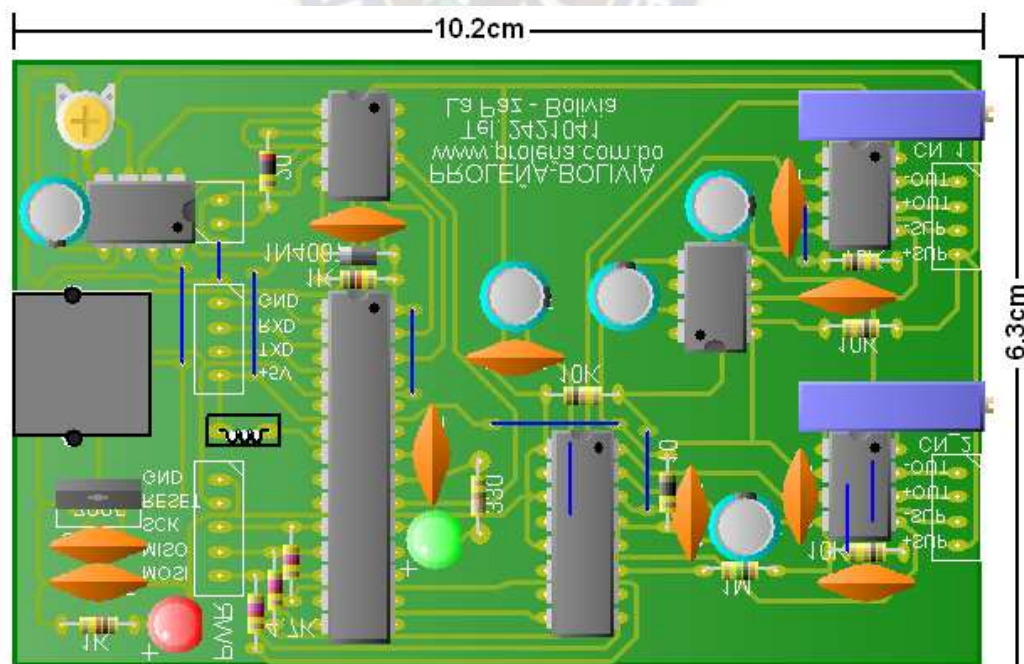


Figura 2.22: Circuito PCB periférico LC (Célula de Carga)
Fuente: Proleña S.R.L.

2.2.4.1.4.4 Especificaciones Técnicas

Parámetro	Valor
Frecuencia de reloj del microcontrolador	8MHz
Velocidad de transmisión RS485	9600bps 8,N,1
Verificación de datos	CRC16-CCITT
Entradas analógicas	Si
Rango de medida	-2.5VDC – 2.5VDC
Resolución del conversor analógico digital	14bits
Cantidad máxima de entradas analógicas	2

Tabla 2.7: Especificaciones técnicas Periférico Célula de Carga

Fuente: Proleña S.R.L.

2.2.4.1.5 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PERIFÉRICO RMS/DC:

El periférico RMS/DC es un circuito electrónico que permite controlar el voltaje efectivo DC suministrado a una carga resistiva o inductiva. En una medida porcentual al voltaje total suministrado.

El funcionamiento está basado en el principio de modulación de ancho de pulso sobre el MOSFET³ del circuito de potencia, lo que permite así mismo controlar el voltaje efectivo sobre la carga final.

El MOSFET externo al periférico, depende de la potencia suministrada a la carga.

El periférico RMS/DC es un sistema o equipo electrónico que permite la comunicación entre la PC y el sistema o máquina a controlar. Adapta e interpreta y las señales procedentes de la PC para gobernar los elementos correspondientes del sistema bajo control.

³ Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor.

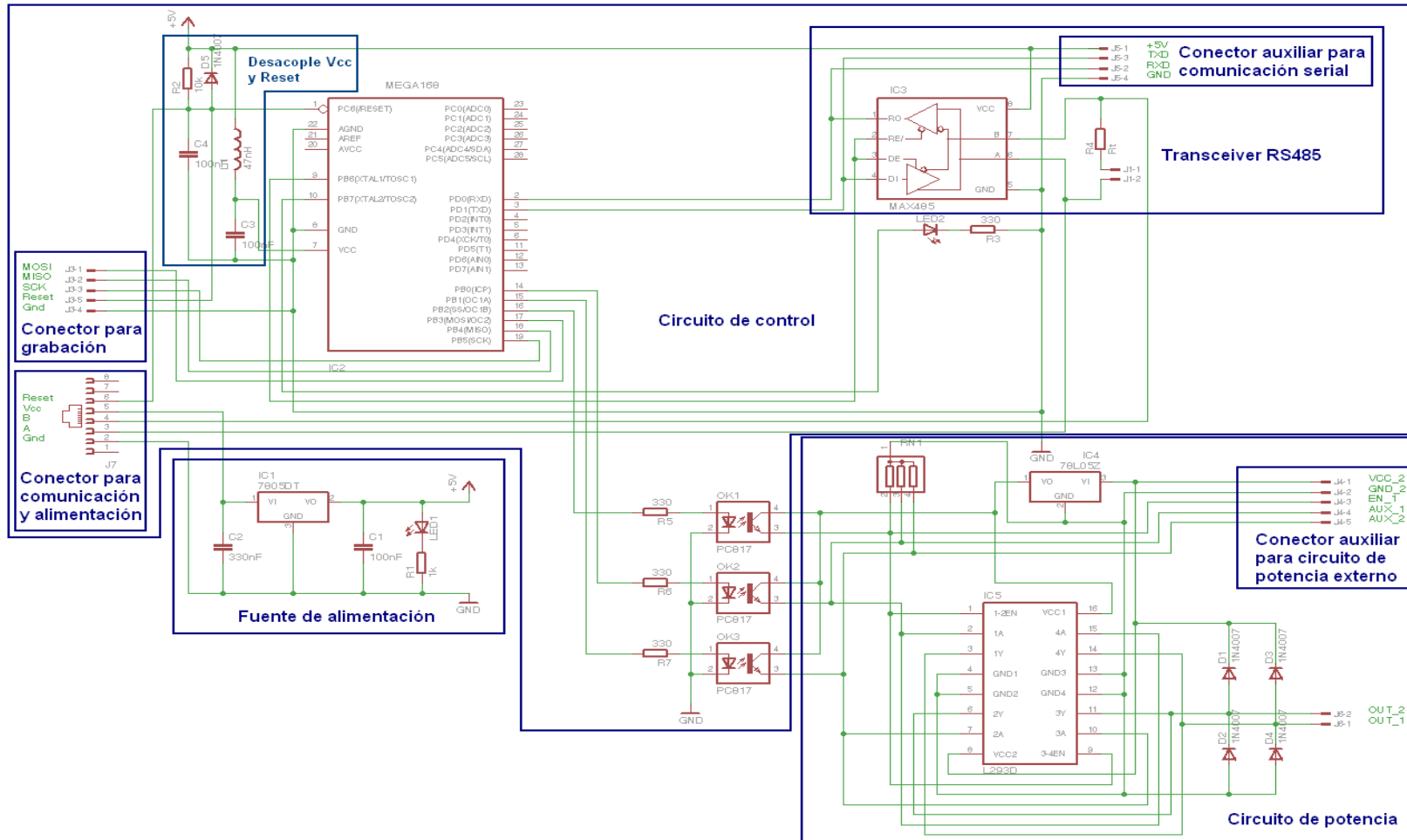


Figura 2.23: ESQUEMA ELECTRÓNICO PERIFÉRICO RMS/DC
Fuente: Proleña S.R.L.

2.2.4.1.5.1 Circuito de potencia:

El principio de funcionamiento de este circuito está basado en la modulación de ancho de pulso PWM (pulse width modulation). Es una técnica en la que se modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica, ya sea para transmitir información a través de un canal de comunicaciones o para controlar la cantidad de energía que se envía a una carga. El ciclo de trabajo de una señal periódica es el ancho relativo de su parte positiva en relación con el período.

Expresado matemáticamente:

$$D = \frac{\tau}{T}$$

Donde:

D es el ciclo de trabajo.

τ es el tiempo en que la función es positiva (ancho del pulso).

T es el período de la función.

La construcción típica de un circuito PWM, se lleva a cabo mediante un comparador con dos entradas y una salida, en este caso se utiliza el comparador interno del microcontrolador con la configuración adecuada para variar la frecuencia de trabajo de 10 a 100kHz. El ciclo útil del ancho de pulso (τ) es variable de 0 a 100 % con una resolución de 0.01%.

Cuando el periférico recibe una cadena válida de la PC, utiliza la referencia de frecuencia que esta guardada en una variable de estado, y el valor recibido de la PC para calcular los valores que este deberá escribir en los registros internos del Timer interno del microcontrolador, para obtener el ancho de pulso solicitado a esta frecuencia dada.

Como se puede observar en el esquema, el circuito interno de potencia en el periférico para manejar cargas de baja demanda de corriente con un máximo de 0.5A y 12VDC.

Para corrientes mayores se debe utilizar el conector auxiliar y controlar un circuito de acuerdo a las demandas.

2.2.4.1.5.2 Componentes:

- **Optoacoplador:** Se trata de un dispositivo electrónico que permite el aislamiento eléctrico, se puede entender como un LED IR y un opto-transistor en un mismo encapsulado.
- **Resistencias pull-up:** Se trata de 3 resistencia (RN1) cuya función es la de polarizar las salidas del circuito de potencia, forzando estas al estado lógico bajo (0L) para evitar ruidos en las mismas cuando estas se encuentran no energizadas.
- **Driver L293:** El L293B es un driver de 4 canales, capaz de proporcionar una corriente de salida de hasta 1A por canal. Cada canal es controlado por señales de entrada compatibles TTL y cada pareja de canales dispone de una señal de habilitación que desconecta las salidas de los mismos.
- **Circuito de protección** para evitar sobre corrientes inversas: Formado por 4 diodos rectificadores (D1, D2, D3, D4) su función es de filtra corrientes inversas generadas en la desconexión de cargas inductivas.
- **Conector de salida:** Se trata de un conector tipo pin-header (Conector de salida) el cual permite conectar los cables de alimentación hacia la carga final. Está diseñado para manejar una corriente de hasta 0.5A en 12VDC.
- **Conector auxiliar** para circuito externo de potencia: Se trata de un conector tipo pin header de 5 pines VCC_2, GND_2, EN_1, AUX_1, AUX_2 (Conector auxiliar para circuito de potencia externo) el cual permite controlar el funcionamiento de un circuito de potencia externo al periférico para manejar potencias mayores.

2.2.4.1.5.3 Circuito final:

El desarrollo del circuito impreso a cargo de PROLEÑA S.R.L. tiene como características: Ser de capa simple para interconexión de componentes, Baquelita como material de soporte y terminado en impresión serigráfica con pintura epóxica color verde.

El circuito terminado es albergado en una caja plástica de 8.5cm x 7.2cm x 4cm de la fábrica brasilera PATOLA.

En la imagen se puede apreciar la apariencia del PCB (Printed Circuit Board) terminado con la disposición de componentes electrónicos y el arte de impresión.

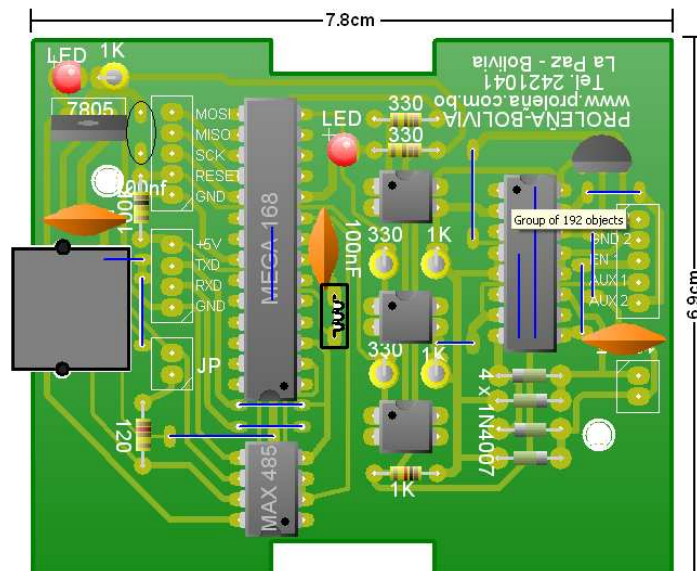


Figura 2.24: PCB ACABADO PERIFÉRICO RMS/DC
Fuente: Elaboración propia

2.2.4.1.5.4 Especificaciones Técnicas

Parámetro	Valor
Frecuencia de reloj del microcontrolador	8MHz
Velocidad de transmisión RS485	600bps 8,N,1
Verificación de datos	CRC16-CCITT
Control de ciclo útil para PWM	0 – 100 %, 0.01%
Corriente máxima para drive interno	0.5A, 12VDC
Conexión a circuito externo de potencia	Si, por conector auxiliar

Tabla 2.8: Especificaciones técnicas Periférico RMS/DC

Fuente: Proleña S.R.L.

2.2.4.1.6 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PERIFÉRICO RMS/AC.

El periférico RMS/AC, es un circuito electrónico que permite controlar el voltaje efectivo de alimentación de una carga resistiva, alimentada con corriente alterna y como consecuencia lograrla variación de la potencia en la misma.

Su funcionamiento se basa en ajustar el tiempo de disparo del elemento activo (TRIAC), lo que permite asimismo ajustar el voltaje efectivo aplicado a la carga.

El TRIAC a utilizar esta en función de la potencia de la carga.

El periférico RMS/AC es un sistema o equipo electrónico que permite la comunicación entre la PC y el sistema o máquina a controlar. Interpreta y adapta las señales procedentes de la PC para gobernar los elementos correspondientes del sistema bajo control.

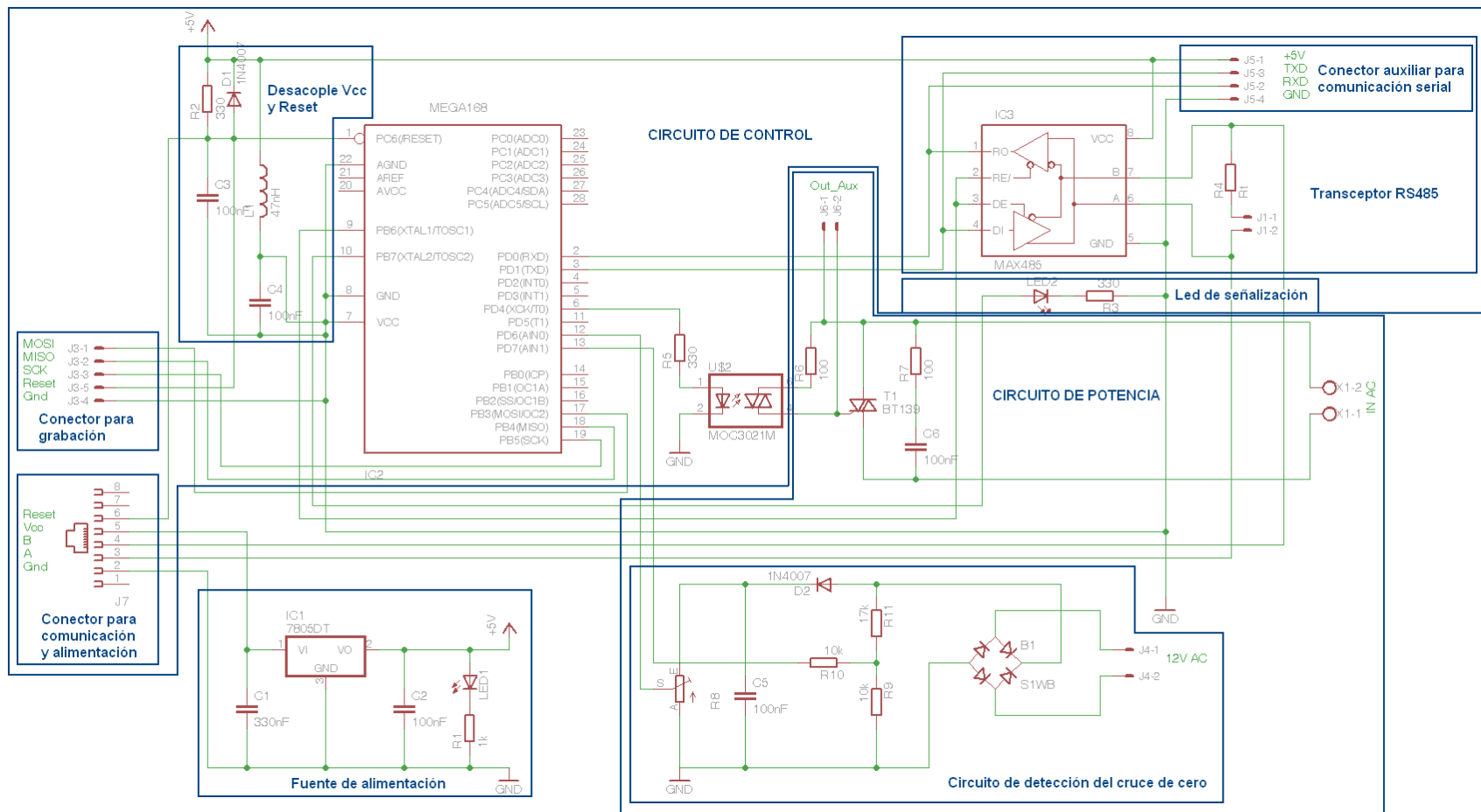


Figura 2.25: ESQUEMA ELECTRÓNICO PERIFÉRICO RMS/DC
Fuente: Proleña S.R.L.

2.2.4.1.6.1 Circuito de potencia:

El circuito de potencia, es el encargado de manejar o controlar el voltaje efectivo de alimentación de una carga resistiva. La relación de voltaje efectivo potencia efectiva asumiendo una resistencia constante es la siguiente: $P=V^2/R$ (Donde: P =Potencia [W], V =Voltaje [V], R =Resistencia [W]). Como se ve existe una relación cuadrática entre voltaje efectivo suministrado y potencia efectiva en la carga.

El principio de funcionamiento usado, es el de control de ángulo de fase en el disparo del TRIAC, este consiste en disparar la compuerta del TRIAC en un instante de tiempo dado después del cruce de cero.

La referencia de cruce de cero de la onda de voltaje alterno, es determinada usando un transformador de núcleo de hierro(montado de forma externa al periférico), que reduce el voltaje de red de 220VAC a 12VAC, este voltaje ingresa a través de un conector tipo pin-header al circuito de rectificación de onda completa del periférico, este voltaje obtenido pasa por una red resistiva que acondiciona las señales de voltaje requeridos, las señales obtenidas ingresan al amplificador operacional interno del microcontrolador, que trabaja como comparador analógico. El pin AN1 recibe la señal de voltaje alterno a comparar, el pin AN0 recibe la señal de referencia a cero.

Para variar el ángulo de fase el sistema de control, se toma como datos de entrada el valor enviado por la PC y el estado de la señal de cruce de cero. Con el uso de uno de sus Timers y comparadores internos energiza en el instante correspondiente al valor requerido al LED IR del Optotriac, este a su vez dispara el TRIAC interno de baja potencia del circuito integrado y este a su vez la compuerta del TRIAC a controlar.

2.2.4.1.6.2 Componentes:

- **Circuito de detección del cruce de cero:** Formado por los elementos B1, R9, R11, R10, D2, C5 y R8. Es un circuito electrónico, que permite determinar el instante en el cual la señal alterna de voltaje pasa por el punto cero de la misma (Para una frecuencia de 50Hz este ocurre cada 10ms).
- **OptoTRIAC:** Es un circuito integrado (MOC3021), que es parte del circuito de control y parte del circuito de potencia, su función es la disparar al TRIAC (T1), mediante un TRIAC de baja potencia que se encuentra en su interior y es activado por luz infrarroja, brindando de esta manera un aislamiento óptico entre el circuito de control y potencia. También está conectado directamente al conector auxiliar el cual permite disparar un TRIAC de potencia externo al periférico.
- **TRIAC:** Puede entenderse como un "tiristor bidireccional", debido a que conduce en ambas direcciones. Por el TRIAC estándar, la corriente circula en cualquiera de las dos direcciones entre los terminales principales MT1 y MT2. Esto es iniciado por una corriente pequeña de señal aplicada entre el terminal de puerta (G) y MT1. También se puede entender como un interruptor de estado sólido para corriente alterna.
 - En el esquema, del circuito está identificado como T1, la máxima corriente recomendada es de 1A, esto debido a la reducida disipación de calor que le proporciona el estar en el interior de la caja plástica.
 - Para aplicaciones donde se requiere mayor necesidad de corriente se debe usar un TRIAC externo al periférico, usando el conector auxiliar para disparar este.

- **Filtro:** La resistencia R7 y el capacitor de poliéster C6 forman una red snubber (amortiguadora) para evitar ruidos en la compuerta de disparo proveyendo así de inmunidad ante falsos disparos.
- **Conector de salida:** Se trata de un conector tipo borne (IN_AC), el cual permite atornillar el cable de una de las fases al circuito de potencia. Está diseñado para manejar de hasta 1A de corriente.
- **Conector auxiliar para circuito externo de potencia:** Es un conector tipo pin-header (Out_Aux) el cual permite controlar el disparo de un TRIAC externo al periférico, es usado con el TRIAC de potencia BTA40.

2.2.4.1.6.3 Circuito final:

El desarrollo del circuito impreso a cargo de PROLEÑA S.R.L. tiene como características: Ser de capa simple para interconexión de componentes, Baquelita como material de soporte y terminado en impresión serigráfica con pintura epóxica color verde.

El circuito terminado es albergado en una caja plástica de 8.5cm x 7.2cm x 4cm de la fábrica brasilera PATOLA.

En la imagen se puede apreciar la apariencia del PCB (Printed Circuit Board) terminado con la disposición de componentes electrónicos y el arte de impresión.

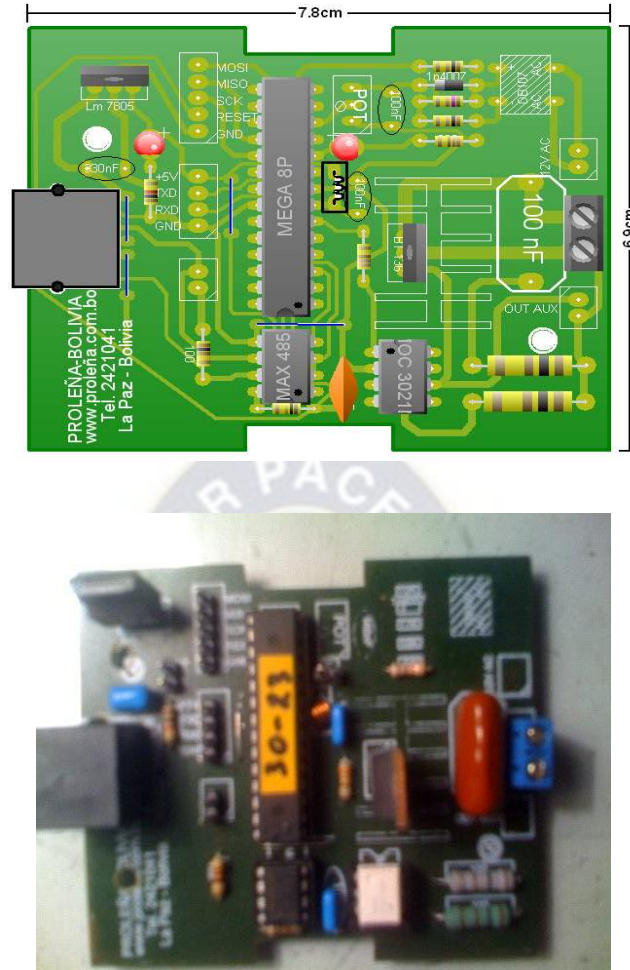


Figura 2.26: CIRCUITO PCB FINAL PERIFÉRICO RMS/AC
Fuente: Proleña S.R.L.

2.2.4.1.6.4 Especificaciones Técnicas

Parámetro	Valor
Frecuencia de reloj del microcontrolador	8MHz
Velocidad de transmisión RS485	9600bps 8,N,1
Verificación de datos	CRC16-CCITT
Corriente máxima para TRIAC Interno	1A, 220VAC
Conexión a TRIAC externo	Si, por conector auxiliar
Rango de control voltaje RMS/AC	0 – 100%, 0.1%

Tabla 2.9: Especificaciones técnicas Periférico RMS/AC

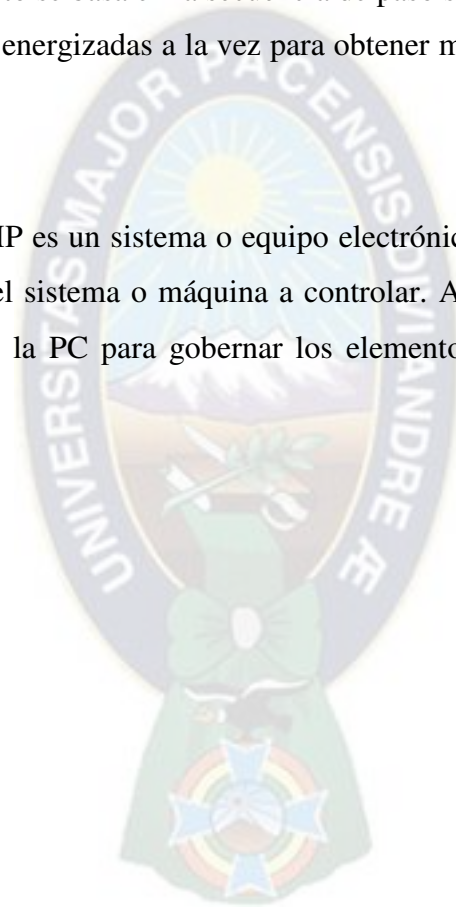
Fuente: Proleña S.R.L.

2.2.4.1.7 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PERIFÉRICO MP “MOTOR PASO”.

El periférico MP, es un circuito electrónico que permite controlar el funcionamiento de un motor paso de tipo unipolar de hasta 1A por bobina.

Su funcionamiento se basa en la secuencia de paso simple para motor paso unipolar, con dos bobinas energizadas a la vez para obtener mayor torque en el moviendo del motor paso.

El periférico MP es un sistema o equipo electrónico que permite la comunicación entre la PC y el sistema o máquina a controlar. Adapta e interpreta y las señales procedentes de la PC para gobernar los elementos correspondientes del sistema bajo control.



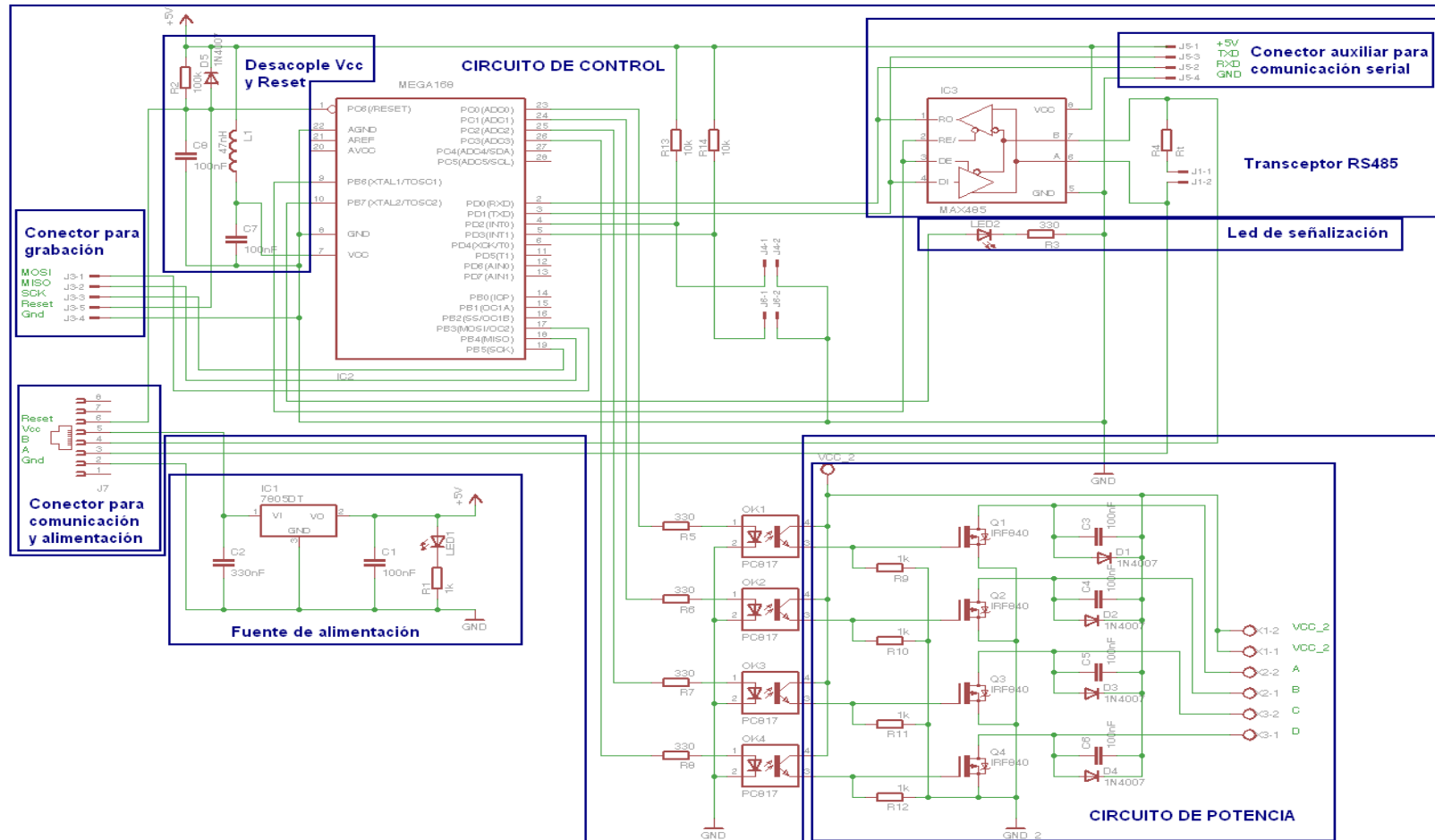


Figura 2.27: ESQUEMA ELECTRÓNICO PERIFÉRICO MP
Fuente: Elaboración propia

2.2.4.1.7.1 Circuito de potencia:

El principio de funcionamiento de este circuito, está basado en la secuencia para motor unipolar, de paso simple con dos bobinas energizadas a la vez. El movimiento del motor paso está gobernado por la circulación de corriente a través de las bobinas de motor paso en la secuencia indicada con el uso de MOSFET de potencia para tal propósito.

La secuencia de movimiento es en sentido horario y anti-horario con retención o no en la posición del último paso.

El circuito también cuenta con dos interruptores que una vez instalados de manera adecuada en la parte mecánica de la aplicación, sirve como fin de carrera en otras palabras son topes que evitan daños al motor paso en caso de que se obstaculice su libre movimiento. Por ejemplo, si se solicita dar 500 pasos y la aplicación permite de manera libre recorrer 100 pasos el interruptor instalado en el sentido de giro cambia el estado de su señal de 5V a 0V, esto es entendido por el circuito de control como el final del movimiento y detiene el funcionamiento del circuito de potencia.

2.2.4.1.7.2 Componentes.

- **Opto-acoplador:** Se trata de un dispositivo electrónico, que permite el aislamiento eléctrico entre la etapa de potencia y de control, se puede entender como un LED IR y un opto-transistor en un mismo encapsulado.
- **Resistencias pull-down:** Se trata de 4 resistencias cuya función es la de polarizar a tierra, las compuertas de los MOSFET's, cuando estas se encuentran no energizadas.
- **MOSFET:** Es un transistor de efecto de campo el cual trabaja como un interruptor de estado sólido, maneja corrientes altas con pérdidas menores en comparación a las que se tendría con el uso de un transistor BJT común.

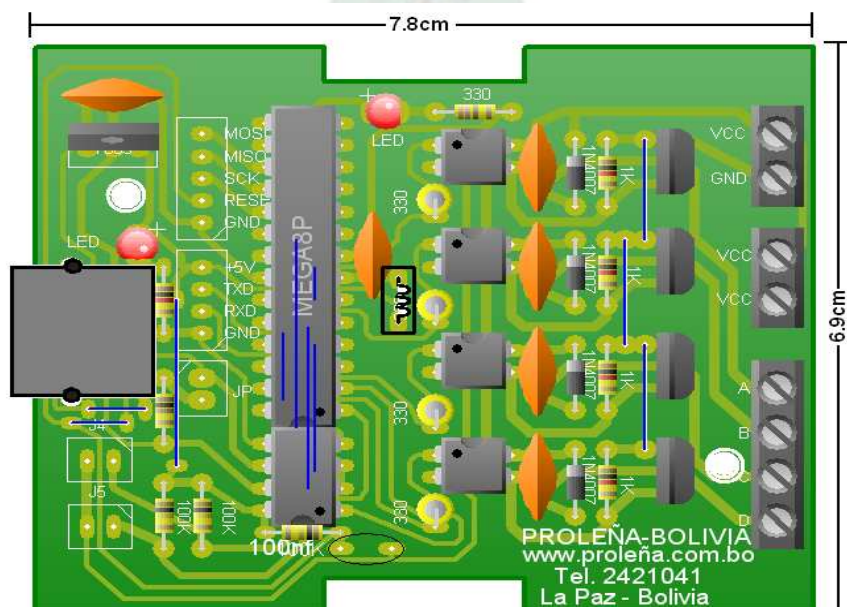
- **Circuito de protección para evitar sobre corrientes inversas:** Formado por 4 diodos rectificadores y 4 capacitores, su función es de filtrar corrientes inversas generadas en la desconexión de cargas inductivas.
- **Conector de salida:** Se trata de un conector tipo borne de 6 terminales, al cual se atornilla los cables de las bobinas del motor. Está diseñado para manejar una corriente máxima de 1A en 12VDC.

2.2.4.1.7.3 Circuito final:

El desarrollo del circuito impreso a cargo de PROLEÑA S.R.L. tiene como características: Ser de capa simple para interconexión de componentes, Baquelita como material de soporte y terminado en impresión serigráfica con pintura epóxica color verde.

El circuito terminado es albergado en una caja plástica de 8.5cm x 7.2cm x 4cm de la fábrica brasilera PATOLA.

En la imagen se puede apreciar la apariencia del PCB (Printed Circuit Board) terminado con la disposición de componentes electrónicos y el arte de impresión.



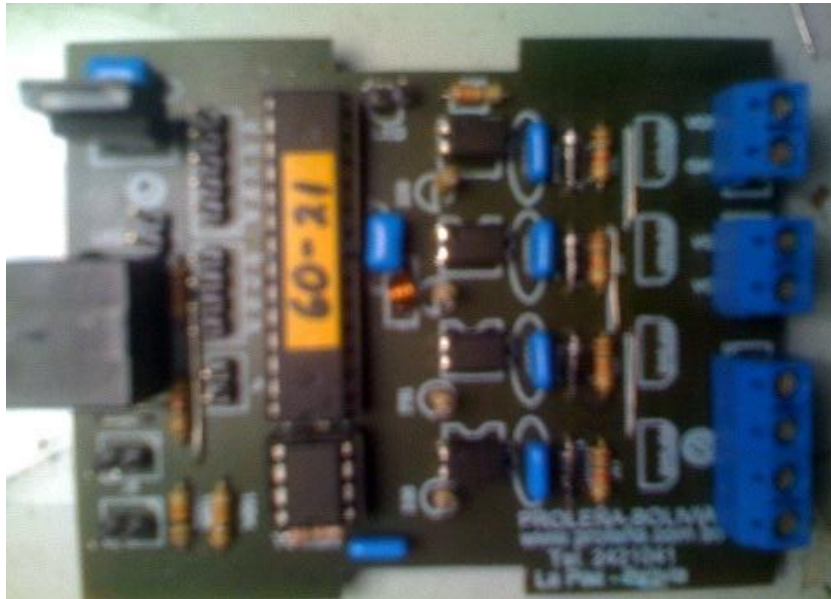


Figura 2.28: CIRCUITO PCB FINAL PERIFÉRICO MP

Fuente: Proleña S.R.L.

2.2.4.1.7.4 Especificaciones Técnicas.

Parámetro	Valor
Frecuencia de reloj del microcontrolador	8MHz
Velocidad de transmisión RS485	600bps 8,N,1
Verificación de datos	CRC16-CCITT
Tipo de motor	Unipolar
Grados por paso	1.8°
Velocidad por paso	100 pasos/s
Corriente máxima por bobina	1A, 12VDC

Tabla 2.10: Especificaciones técnicas Periférico MP

Fuente: Proleña S.R.L.

2.2.4.2 Verificación técnica de instalaciones:

Para la construcción de la cámara de secado e instalación de los sistemas de control electrónico, se solicitó a Scala Design S.R.L. que se pueda designar un área libre, con una superficie mínima de 4,9m x 6,4m, además de un ambiente en interior para la instalación del computador principal de control.

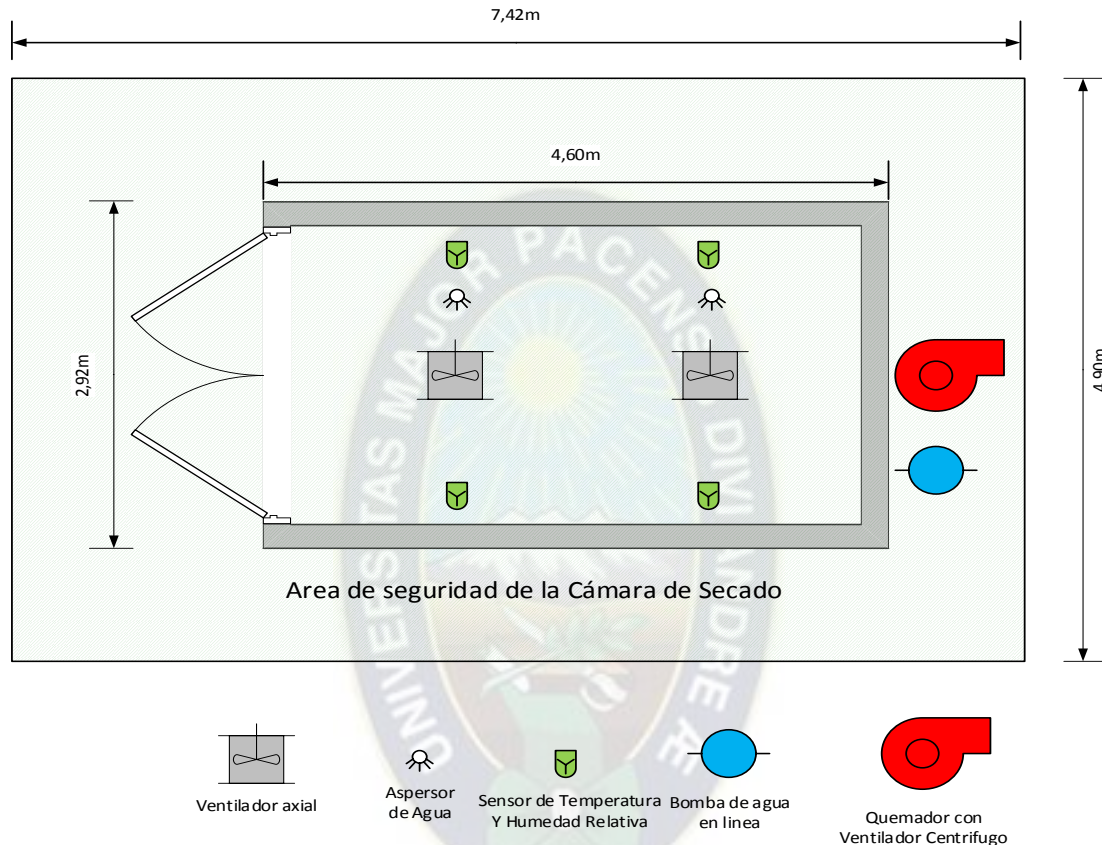


Figura 2.29: Disposición de sensores y actuadores, vista de planta de la cámara de secado.

Fuente: Elaboración propia

La superficie total que ocupa la cámara de secado es de 4,4m x 2,9m, más una franja de un metro alrededor, para realizar la instalación de conductos de energía eléctrica, conductos para comunicaciones, conductos de agua, conducto de gas y para realizar el mantenimiento preventivo y correctivo de la infraestructura de la cámara.

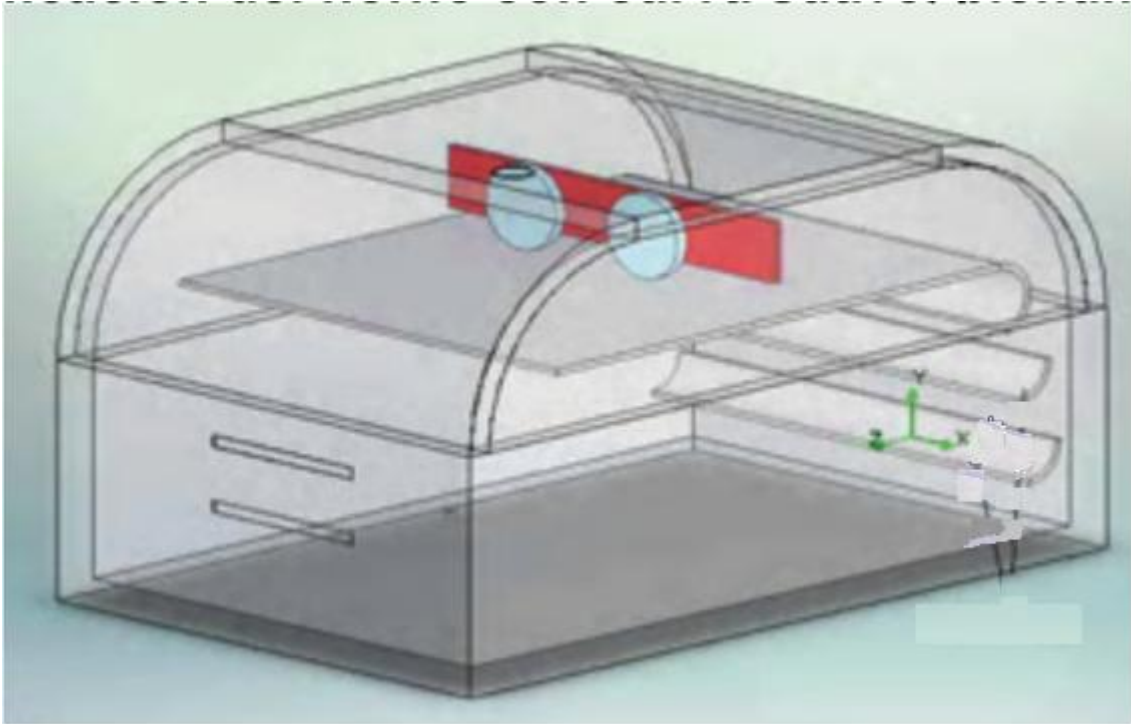


Figura 2.30: Disposición de ventiladores en la cámara de secado.

Fuente: Elaboración propia

2.2.4.3 Instalación de tablero de control y distribución:

En la figura 2.31 se muestra el tablero de control en el que se encuentran alojados los periféricos de control de potencia de los ventiladores, quemador y control de gas.

También se encuentran alojados interruptores Termo-magnéticos que, en conjunto a un contactor, controlan el flujo de corriente de todo el sistema de secado de madera a través de un botón de parada de emergencia montado en la compuerta del tablero.



Figura 2.31: Tablero de control principal.

Fuente: Scala Design S.R.L.

En el tablero de control y distribución, se tienen implementados 4 contactores que son los encargados de invertir el sentido de giro de los ventiladores, controlados por el periférico de ventilador. Fig. 2.32



Figura 2.32: Periféricos de control de ventiladores.

Fuente: Scala Design S.R.L.



Figura 2.33: Periféricos de control de quemador, humidificador y control de gas.
Fuente: Scala Design S.R.L.

Los periféricos de control alojados en el tablero de control principal, están conectados entre sí mediante un bus de datos implementado a través de dos HUB-RJ45

2.2.4.4 Instalación de tablero de control de gas:

En la figura 2.34 se observa el tablero de control apertura de la llave de gas, implementado mediante el periférico de motor paso para tener un control más fino de la apertura y cierre de la llave de gas y así controlar la cantidad de calor que ingresa al horno de secado.



Figura 2.34: Tablero de control de apertura de Gas.
Fuente: Scala Design S.R.L.

2.2.4.5 Programa de secado:

El programa de secado, consta de varias etapas, para el caso específico del Roble, cuenta de 12 etapas en las que se varía la temperatura y humedad relativa, el programa se mantiene en cada etapa hasta alcanzar el contenido de humedad prefijado para cada etapa, para luego pasar a la siguiente etapa de secado. En la tabla 2.4 se observa la secuencia de etapas de secado para la especie Roble.

Etapas	%CH	%HR	T
0	-	100	76,6
1	100-70	60	76,6
2	70-60	52	76,6
3	60-50	45	76,6
4	50-40	39	76,6
5	40-35	39	76,6
6	35-30	39	76,6
7	30-25	41	82,2
8	25-20	41	82,2
9	20-15	43	87,7
10	15	28	87,7
11	5	66	87,7
12	10	88	87,7

Tabla 2.10: Etapas de secado para la especie Roble.

Fuente: Guía práctica para el secado de madera

Para calcular el contenido de humedad en forma porcentual, por comparación de su peso, se debe realizar el cociente del peso de madera contenida de agua y el peso de la madera totalmente seca expresado en tanto por ciento de acuerdo a la ecuación 2.34

$$CH = \frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100\% \quad (2.34)$$

Donde:

CH: Contenido de Humedad

P_h : Peso de la madera húmeda

P_s : Peso de la madera completamente seca

En la figura 2.35, se puede observar el diagrama de flujo del programa de secado de madera que se ejecuta en el computador central. El programa inicialmente solicita el porcentaje de contenido de humedad final para luego variar los niveles de humedad relativa, la apertura de gas del quemador y la velocidad de giro de los ventiladores, con el objetivo de reducir el contenido de humedad de la madera hasta un valor preestablecido de acuerdo a la tabla 2.4.



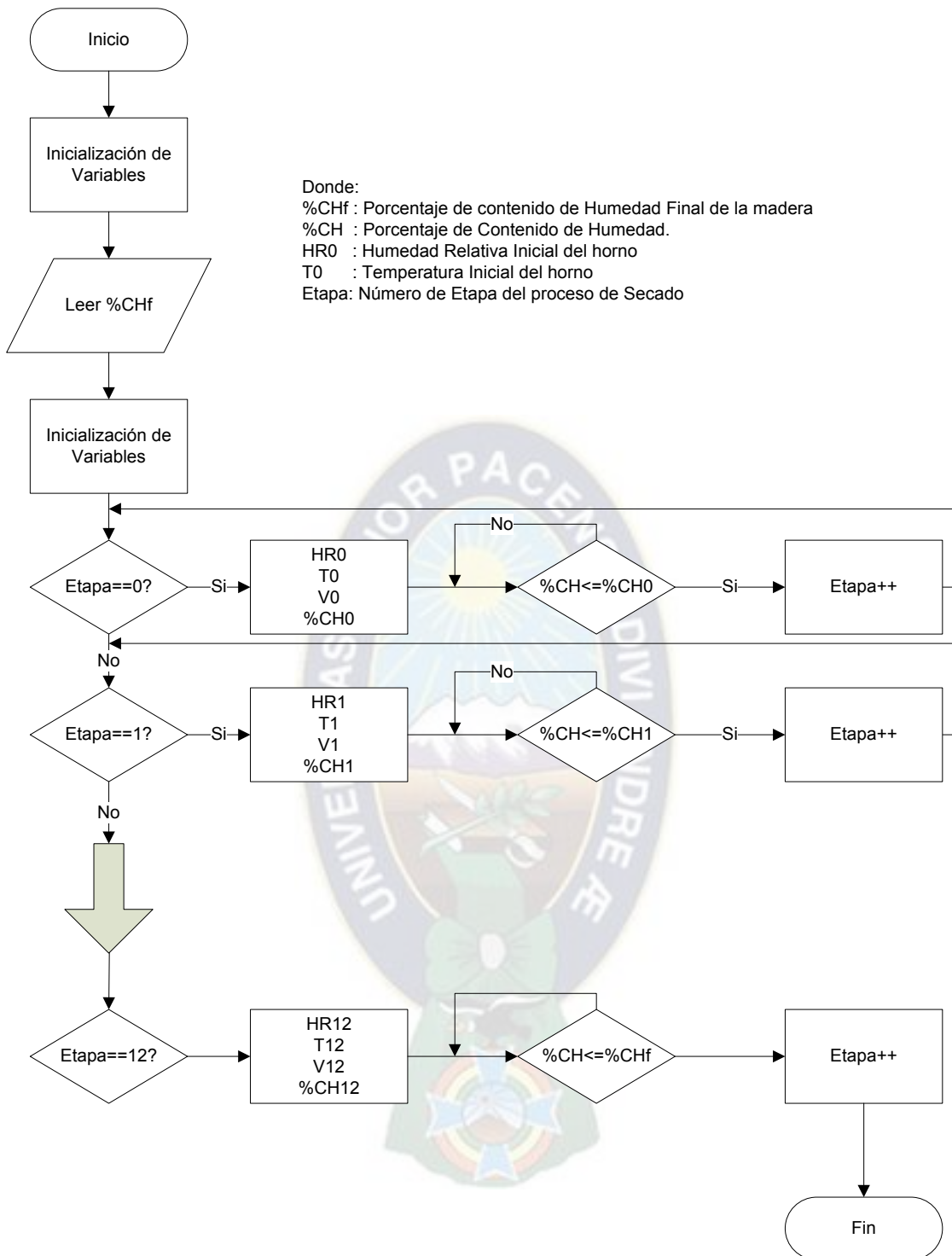


Figura 2.35: Programa de secado.
 Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, en la figura 2.36, se observa el diagrama general del sistema de control de secado de madera, en los modos automático y manual de tal forma que se pueda escoger el tipo de proceso de secado que se ejecutara en el computador central.

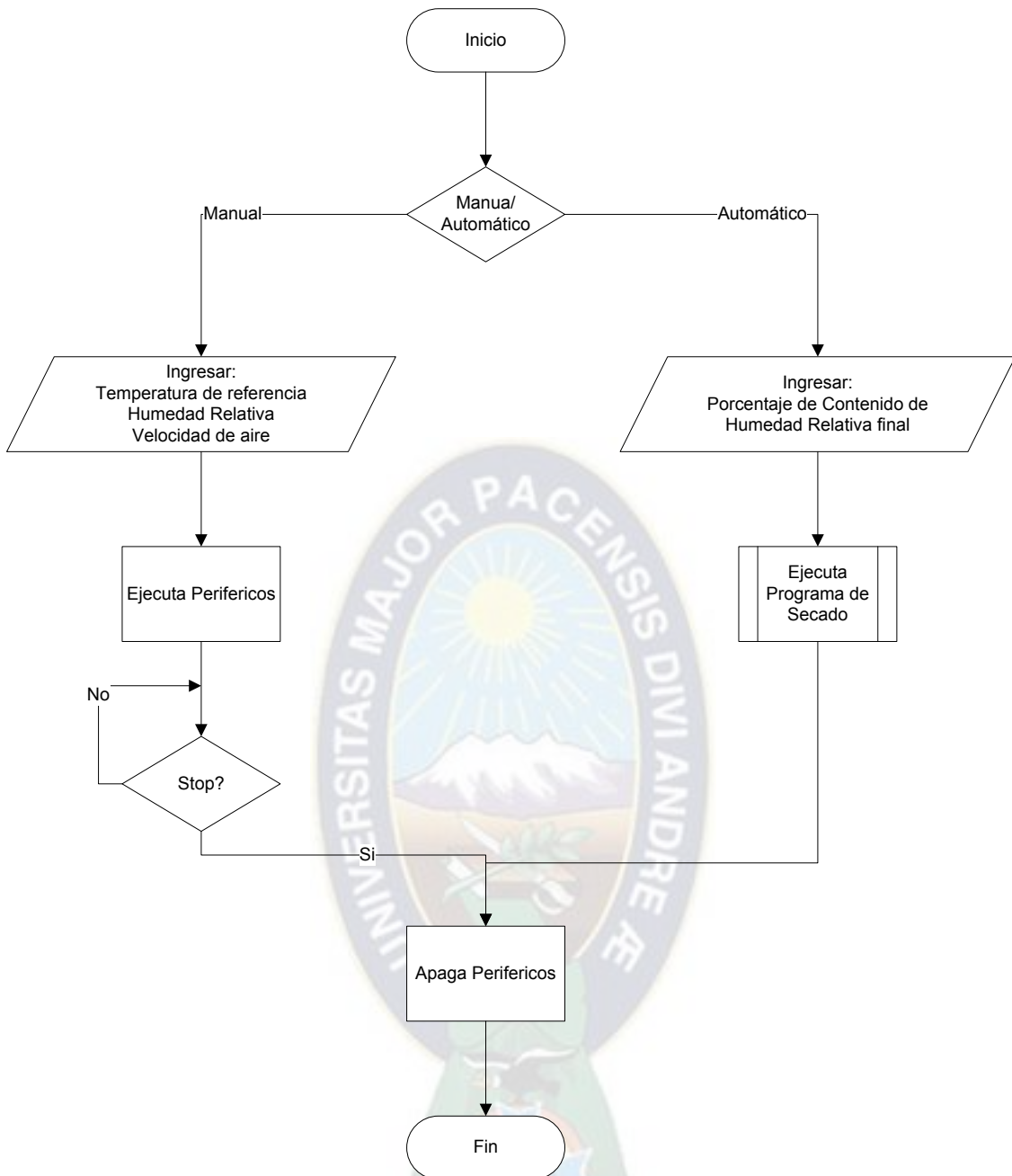


Figura 2.36: Programa de control principal.
Fuente: Elaboración propia.

2.2.4.6 Interface HMI:

La interface de control en el computador central fue diseñada en el software de programación gráfico LabView, el cual ayuda a obtener una presentación amigable al usuario final.

De acuerdo al diagrama de la figura 2.36, el programa de control tiene dos modos de Funcionamiento:

- **Modo Automático.** En este modo, el programa de control únicamente necesita el porcentaje de contenido de humedad final que se busca que tenga la pila de madera a ser tratada.

El programa de control, inicia el proceso de secado, una vez presionado el botón “Play” y habiendo, configurado el porcentaje de contenido de humedad final deseado, el programa internamente el programa de control, ejecuta el sub-programa de secado automático, en el que se configuran de forma automática valores iniciales de temperatura, humedad relativa, y velocidad de los ventiladores al interior de la cámara de secado.

Al mismo tiempo, el programa de control, se encarga de monitorear y presentar en los indicadores todas las variables controladas que intervienen en el proceso de secado, también se muestran el estado de las variables manipuladas, se muestra el tiempo transcurrido desde el inicio del proceso de secado y la etapa de secado en el que se encontraba el sistema.

El programa de control, posee un botón de parada de emergencia “Stop” el cual detiene el proceso de secado en el momento que sea presionado, en caso de presentarse alguna anomalía durante el proceso de secado.

En caso que los periféricos, de control y sensores, presentasen fallas en su funcionamiento tales como dejar de entregar las lecturas de temperatura y humedad relativa, dejasen de responder a las solicitudes de datos o confirmación de tareas encomendadas, el panel dispone de un botón de “Reset” que envía un pulso” uno lógico” a través de la línea reset que disponen todos los periféricos de control y sensores, para reiniciar todos los periféricos de forma remota.

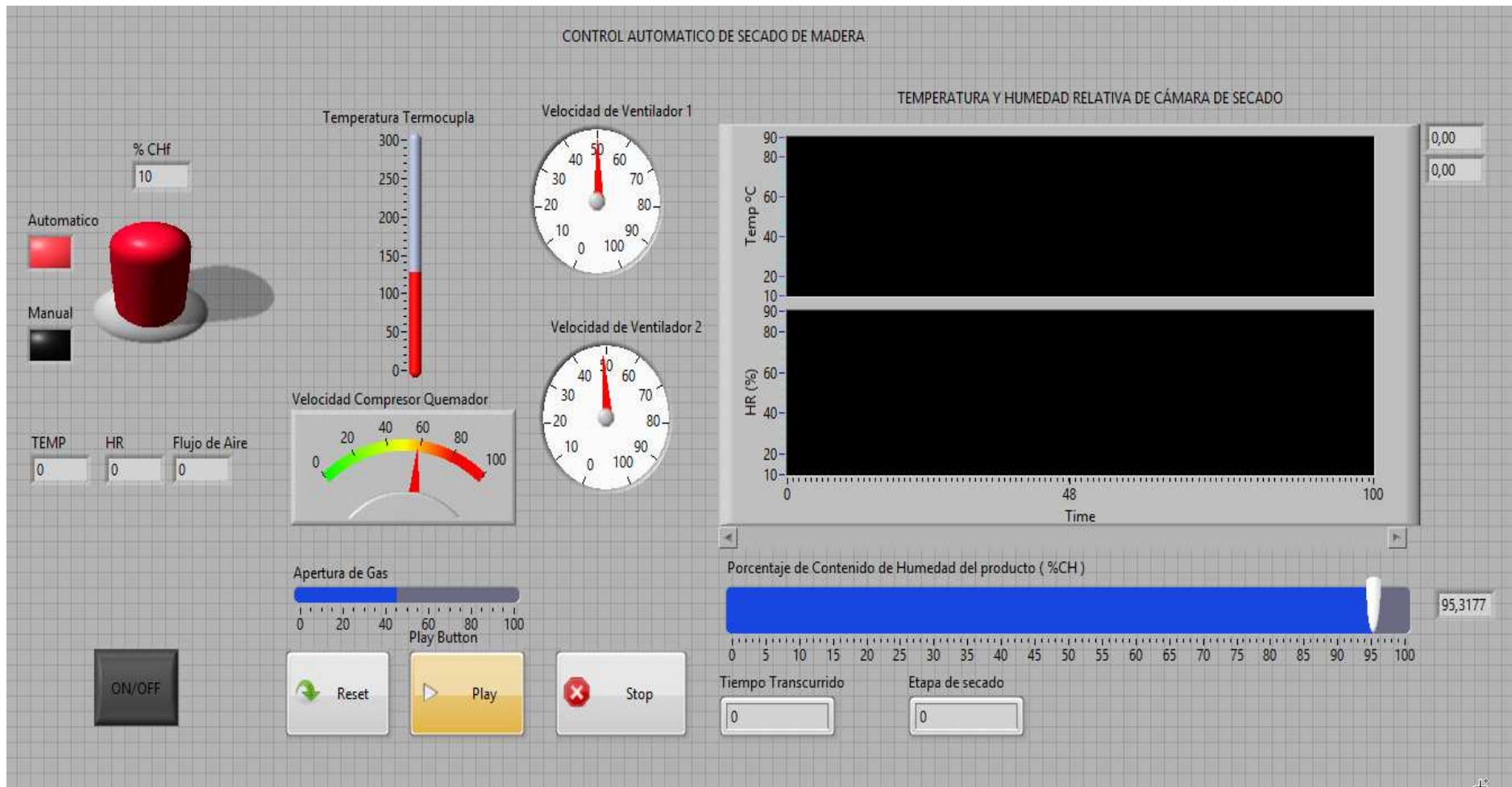


Figura 2.37: HMI del programa de control principal.
Fuente: Elaboración propia.

- **Modo Manual.** El modo manual que posee el sistema de control, fue implementado para realizar el proceso de secado de madera de forma supervisada, este modo de trabajo requiere que se pueda ingresar los valores de Temperatura, Humedad Relativa y Flujo de Aire.

El modo manual se inicia al presionar el botón de “Play” y se detiene al presionar “Stop”, al igual que en el modo automático, en el modo manual el programa de control muestra el estado de las variables controladas, las variables manipuladas y el estado de los actuadores, en el modo manual también se muestra el porcentaje del contenido de humedad de la pila de madera, y el operador en función de este valor, puede configurar nuevos valores de Temperatura, Humedad Relativa y Flujo de Aire.

El uso de este modo de trabajo del programa de secado, requiere constante supervisión por parte del operador, ya que si no se hace variar los valores de las variables manipuladas la madera podría sufrir daños irreversibles como rajaduras.

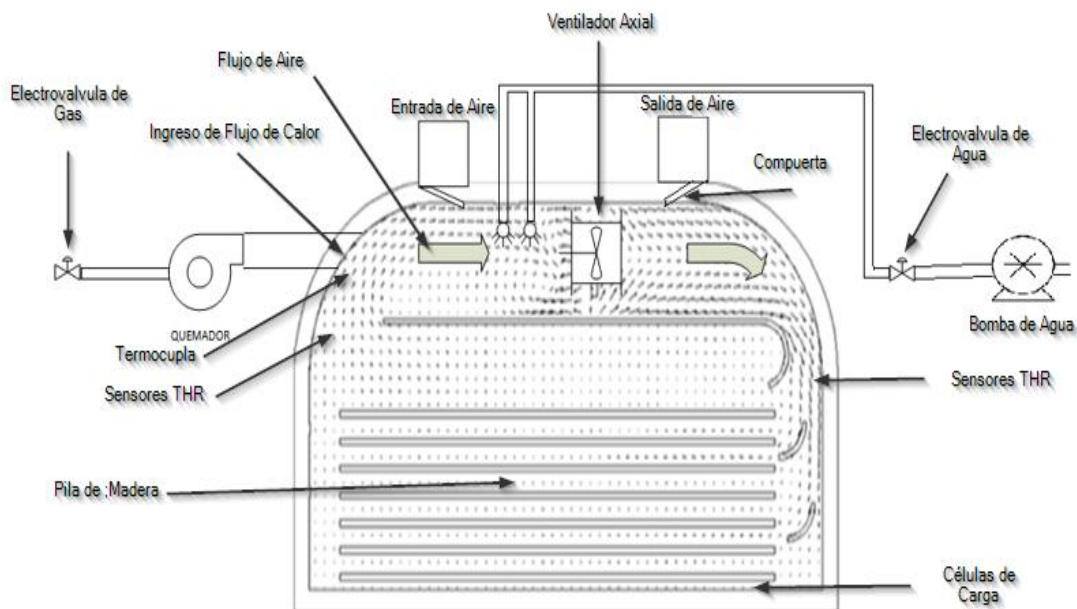


Figura 2.38: Disposición de sensores y actuadores de la cámara de secado.
Fuente: Elaboración propia.

2.3 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

2.3.1 Resultados principales.:

El proyecto de diseño e implementación del horno de secado de madera para la micro-empresa Scala Design S.R.L. desde la elección y construcción de la estructura de la cámara de secado, elección de sensores y actuadores, diseño e implementación de periféricos actuadores y sensores, diseño del controlador para las variables controladas, diseño del programa de control, instalación de sensores y actuadores, hasta la puesta en marcha y pruebas piloto fueron cumplidos satisfactoriamente, ya que una vez implementado el sistema de control de secado, el primer lote de madera procesado en el horno de secado de madera, concluyó el proceso de secado en 20 días calendario lo que representaba una notoria reducción en el tiempo de secado comparado con el tiempo que se necesitaba para esta misma operación por medios naturales que era de entre 4 a 5 meses.

El producto obtenido, presentaba un color similar al color de la materia prima sin procesar, únicamente se presentaban rajaduras en los extremos de la pila de madera y no así en el cuerpo central, gracias a la utilización de cadenas para fijar la madera a la base de la cámara de secado, un alto porcentaje de la materia prima mantenía su forma original.

Es así que la micro empresa Scala Design S.R.L contaba con una cámara de secado, en la que se podía secar la materia prima de forma artificial en un periodo corto en comparación al periodo utilizado para secar la madera de forma natural, por consiguiente, se disponía de madera preparada y apta para la elaboración de muebles de buena calidad en periodos de tiempo más cortos. Beneficiando así la productividad de la micro empresa.

2.3.2 Recomendaciones:

Para mantener el correcto funcionamiento del horno de secado de madera, se deben realizar mantenimientos periódicos de los sistemas que intervienen en el proceso de secado como ser:

- Realizar mantenimientos periódicos a los componentes que componen el sistema de humidificación, como ser la bomba de agua, verificar que las tuberías de agua no tengan fugas, puesto que esto afectaría a la presión necesaria para el correcto funcionamiento de los humidificadores.
- Realizar una verificación periódica después de cada ciclo de secado de madera a los ventiladores axiales, debido a que la excesiva vibración de los motores podría generar que la estructura de la cámara de secado se debilite o sufra rajaduras por las que se generen pérdidas de calor interno.
- Verificar periódicamente los conductos de salida de gas del quemador, ya que si estas salidas resultaran obstruidas no se lograría una correcta combustión generando un consumo excesivo del combustible y bajo rendimiento en el sistema de calefacción.
- Para garantizar un correcto funcionamiento de la cámara de secado, no se debe exceder la carga de madera a ser procesada, esto para garantizar los espacios necesarios para el flujo de aire caliente a través de la pila de madera.

El cuidado de todos los aspectos mencionados ayudará al correcto y continuo funcionamiento de la cámara de secado, brindando materia prima de buena calidad para la elaboración de muebles.

3 ANALISIS DE LA ACTIVIDAD:

3.1 Desempeño laboral.

Durante el tiempo que se prestó servicios en la microempresa Proleña S.R.L, se desempeñaron diversas funciones con ditintos grados de responsabilidad, gracias a las

tareas encomendadas a mi persona para su desarrollo, fui adquiriendo una diversidad de conocimientos y aptitudes gracias al razonamiento lógico adquirido durante mi paso por la universidad.

Es así que, como Técnico electrónico, durante el desarrollo del proyecto descrito en esta memoria laboral, consistió en el diseño de circuitos de control y lectura de datos de una forma sistemática, brindando alternativas de solución para cada problema planteado en el diseño de circuitos tanto para circuitos de actuadores como para circuitos de lectura de sensores.

La falta de experiencia al principio me trajo problemas de coordinación con los compañeros de trabajo ya que, en mi paso por la universidad, mi persona estaba acostumbrada a trabajar solo, con el tiempo, fui corrigiendo este comportamiento logrando trabajar en equipo y con esto mejorando el rendimiento de mis funciones. Con las experiencias adquiridas en el tiempo de trabajo, pude comprender que todo problema que se presenta es una fuente de conocimiento y autodescubrimiento, ayudándome a desarrollar nuevas capacidades para enfrentar problemas con distintos niveles de dificultad y presión. Es en este sentido que, al afrontar diversos problemas, pude crecer profesionalmente y de forma gradual hacerme cargo de responsabilidades más delicadas, aportando al crecimiento de la empresa en la que trabajo y así también aportando al crecimiento de nuestro país.

3.2 Formación Recibida En La UMSA:

Gracias a la formación recibida en mi paso por la universidad, pude desarrollar un pensamiento lógico y procedimental, el cual me ayuda en gran manera en el desempeño de mis funciones actuales.

Con el apoyo de cursos de capacitación y actualización, continuamente se van reforzando las aptitudes adquiridas en la universidad, por lo que considero que nunca es tarde para seguir aprendiendo, en mi primer trabajo, fue fundamental las enseñanzas y capacidades adquiridas sobre programación y diseño de circuitos aprendidos en las

materias de *PROGRAMACION I, ELECTRONICA I, SISTEMAS DIGITALES II, MICROPROCESADORES, TEORIA DE CONTROL I Y TECNICAS DE APLICACIÓN DE CONTROL.*

La alegría que siento de haber pasado por las aulas de la carrera de electrónica, es indescriptible, ya que cada día trabajo en lo que me apasiona, y cada que se presenta un nuevo reto, lo puedo superar gracias a las enseñanzas recibidas de los docentes, aunque a veces estos problemas generen frustración pero el regocijo es mayor al superar los problemas, y al comparar el nivel de conocimiento y habilidades que tengo con profesionales de otras universidades, puedo afirmar sin miedo a equivocarme que La facultad de ingeniería saca profesionales de calidad y competitivos.

4 BIBLIOGRAFÍA

- Arturo Rojas Moreno: Control De Procesos Práctico Y Avanzado TECSUP.
- UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA: Comunicaciones Industriales Profibus.
- Silverio Viscarra: Guía Práctica Para El Secado De Madera Santa Cruz – Bolivia 1998.
- Agr. Alberto D. Calderón: Secado De La Madera
- Rubén Ananias, Rodrigo Venegas: SECADO INDUSTRIAL DEL PINO RADIATA. TIEMPO DE ESTERILIZACIÓN CON CALOR Y EVOLUCION TEMPORAL DE LA TEMPERATURA. URL:
https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-221X2005000300003%20-%20f4