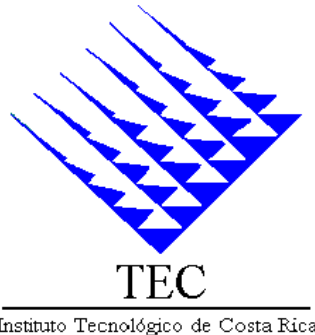


**Instituto Tecnológico de Costa Rica**

**Escuela de Ingeniería en Electrónica**



**Instituto Costarricense de Electricidad - ICE**

***“Diseño e implementación de la simulación del sistema de control automático para una minicentral de generación hidroeléctrica”***

**Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de  
Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura**


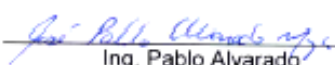


**Mónica Rodríguez Chaves**

**Cartago, Enero de 2006**

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA**  
**ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRONICA**  
**PROYECTO DE GRADUACIÓN**  
**TRIBUNAL EVALUADOR**

Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal

Firma	Firma
	
Ing. Luis Paulino Méndez	Ing. Pablo Alvarado
Profesor lector	Profesor lector
Firma	
	TEC
Ing. Eduardo Interiano S.	Instituto Tecnológico de Costa Rica Escuela de Ingeniería Electrónica
Profesor asesor	

Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica.

Cartago, 31 de enero 2006

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

Cartago, Enero 2006

A handwritten signature in black ink, reading "Rodríguez Chaves". The signature is written in a cursive style with a large initial 'R' and a distinct 'Ch' at the end.

Mónica Rodríguez Chaves

Céd: 2-552-511

## Resumen

La energía eléctrica es uno de los servicios básicos para el desarrollo humano, sin embargo, en zonas rurales de difícil acceso los habitantes no cuentan con este beneficio. El acceso a través de la red nacional de distribución de energía eléctrica, se hace cada vez más costoso y complejo por la lejanía de las poblaciones. Las fuentes de energía renovables como la solar, la eólica y la hidráulica, en una escala adecuada para el lugar establecido, son opciones que han demostrado ser apropiadas para las condiciones de los pueblos rurales.

Por lo tanto, el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) se ha propuesto tratar de resolver esta problemática con proyectos de miniplantas de generación hidroeléctrica. Esto utilizando los recursos hídricos de cada región, involucrando sistemas de la ingeniería civil, eléctrica y mecánica por parte de la empresa con el apoyo del pueblo beneficiado.

Para apoyar esta idea, se necesita realizar un proyecto piloto, con un control automático que permita supervisar los flujos de agua, las variables eléctricas funcionales y físicas del sistema de generación hidroeléctrico; esto con el fin de mantener las variables de control dentro de rangos aceptables en condiciones nominales, además de determinar el comportamiento del sistema ante pruebas ponderando los valores de las variables eléctricas.

El presente documento describe las características matemáticas, eléctricas y de funcionalidad de un control automático de la simulación de una miniplanta semejante a la establecida en el Laboratorio de Hidrología, del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE).

**Palabras clave:** plantas hidroeléctricas, generación de electricidad, generadores eléctricos, turbinas, minicentrales de generación hidroeléctrica.

## **Abstract**

One of the basic services to human development is the electrical energy, but to people who live in rural places it is very difficult to have this benefit. To take this energy through the national net of electric distribution comes expensive and complicated by the distances and complex access to these locations. The renewable energy source like solar, aeolian and the hydraulics, in an appropriate scale for a specific place, are options that have been useful to the condition of rural towns.

Therefore, the ICE tries to resolve this problem with mini plants of hydroelectric generation projects. This can be possible using the hydro-resource of each region, according with systems of civil, electric and mechanic engineers, and with the support of the benefit people.

To hold up this idea, it is necessary to create a pilot project with an automatic control that permits to supervise the water flow, the electrical and physical variables of the hydroelectric generation. All of this, to maintain the control variables in acceptable ranges of nominal conditions, besides to determine the system behaviour in the presence of test to measure the electric variables.

This document describes the mathematical, electrical and functioning characteristics of an automatic control around the simulation of a mini plant, similar to the located in Hydraulic Laboratory.

**Key words:** hydroelectric plants, electricity generation, electric generator, turbines, mini centrals of hydrogenation.

## **Dedicatoria**

A la Familia Rodríguez Chaves,  
por la comprensión que sólo el amor puede ofrecer.

## Agradecimiento

Tú, Señor, eres mi fuerza;

¡Yo te amo!

Amo al Señor porque ha escuchado mis suplicas, porque me ha prestado atención

¡Toda mi vida le invocaré!

La angustia me alcanzó y me hallé preso del miedo y del dolor.

Entonces invoqué el nombre del Señor y le rogué que me salvara.

El Señor es justo y compasivo; nuestro Dios es ternura.

El señor cuida de los sencillos.

Cuando yo estaba sin fuerzas, me salvó.

Ahora sí puedo sentirme tranquilo porque el Señor ha sido bueno conmigo.

Seré obediente al Señor en el mundo de los que viven.

***Salmo 116, 1-9***

## INDICE GENERAL

<b>Capítulo 1: Introducción</b> .....	<b>1</b>
1.1 Problema existente e importancia de su solución .....	1
1.2 Solución seleccionada .....	4
2.1 Meta.....	7
2.2 Objetivo general.....	7
2.3 Objetivos específicos .....	7
2.3.1 Objetivos de <i>hardware</i> .....	7
2.3.2 Objetivos de <i>software</i> .....	7
2.3.3 Objetivos de documentación .....	8
2.3.4 Objetivos de implementación .....	8
<b>Capítulo 3: Marco teórico</b> .....	<b>9</b>
3.1 Descripción del sistema en general .....	9
3.2 Antecedentes Bibliográficos.....	11
3.3 Descripción de los principales principios físicos y/o electrónicos relacionados con la solución del problema .....	12
3.3.1 Potencial del recurso hídrico .....	12
3.3.2 Tipos de turbinas.....	15
3.3.3 El generador de electricidad.....	20
3.3.4 La máquina sincrónica polifásica .....	22
<b>Capítulo 4: Procedimiento metodológico</b> .....	<b>27</b>
4.1 Reconocimiento y definición del problema.....	27
4.2 Obtención y análisis de información .....	28
4.3 Evaluación y síntesis de la solución.....	29
4.4 Implementación de la solución.....	31
4.5 Reevaluación y rediseño.....	32
<b>Capítulo 5: Descripción detallada de la solución</b> .....	<b>34</b>
5.1 Análisis de soluciones y selección final .....	34
5.2 Descripción del <i>hardware</i> .....	35
5.2.1. Diseño del sistema .....	35



5.2.2.	Modelado matemático del generador .....	37
5.2.3.	Sistema prototipo de simulación .....	44
5.3	Descripción del <i>software</i> .....	51
5.3.1	Descripción del algoritmo principal.....	51
5.3.2	Rutina para reloj.....	53
5.3.3	Rutina entrada del sensor .....	53
5.3.4	Rutina para nivel de caudal.....	54
5.3.5	Rutina de características de la turbina .....	55
5.3.6	Rutina de características del generador.....	58
5.3.7	Rutina para el ingreso de valores de carga.....	59
<b>Capítulo 6:</b>	<b>Análisis de Resultados .....</b>	<b>63</b>
<b>Capítulo 7:</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>74</b>
7.1.	Conclusiones .....	74
7.2.	Recomendaciones .....	75
<b>Bibliografía .....</b>		<b>76</b>
<b>Apéndices .....</b>		<b>79</b>
A.1	Glosario, abreviaturas y simbología.....	79
A.2	Cálculos de potencia y carga para el generador.....	84
A.3	Manual de usuario .....	90
A.4	Información sobre la Institución .....	95
<b>Anexos .....</b>		<b>97</b>
B.1	Características del <i>Rabbit SmartCat 2100</i> [25].....	97
B.2	Características Eléctricas del Generador.....	110

## Índice de figuras

<b>Figura 1</b>	Esquema general de la solución seleccionada .....	6
<b>Figura 2</b>	Diagrama de bloques donde se desarrolla el actual proyecto.....	10
<b>Figura 3</b>	Pérdidas de potencia en la transformación de energía [14] .....	13
<b>Figura 4</b>	Rango de aplicación de las turbinas [26].....	15
<b>Figura 5</b>	Dibujos de ejemplos de la turbina de flujo cruzado [3, 22] .....	16
<b>Figura 6</b>	Ejemplo de válvula tipo mariposa [5].....	17
<b>Figura 7</b>	Sistema con pérdida constante [10] .....	18
<b>Figura 8</b>	Circuito equivalente [10].....	19
<b>Figura 9</b>	Determinación de r para válvulas lineales [10].....	20
<b>Figura 10</b>	Sección de un estator elemental y de un rotor de polos salientes [6].....	23
<b>Figura 11</b>	Generador trifásico que muestra las bobinas idénticas de armadura.....	24
<b>Figura 12</b>	Circuito equivalente de la armadura de un generador trifásico .....	25
<b>Figura 13</b>	Circuito equivalente para la fase de un generador sincrónico [1, 4, 6] ...	38
<b>Figura 14</b>	Circuito equivalente de un generador trifásico sincrónico [1, 4, 6] .....	39
<b>Figura 15</b>	Circuito equivalente del generador conectado en delta $\Delta$ [1, 4, 6] .....	40
<b>Figura 16</b>	Diagrama fasorial del generador trifásico, con un $f_p = 0.8$ .....	41
<b>Figura 17</b>	Diagrama fasorial del generador con un $f_p = 0.8$ en atraso.....	43
<b>Figura 18</b>	Diagrama fasorial del generador con $f_p = 0.8$ de adelanto.....	43
<b>Figura 19</b>	Diagrama de bloques del sistema de control [21].....	44
<b>Figura 20</b>	Diagrama de bloques del sistema prototipo .....	45
<b>Figura 21</b>	Circuito de configuración para el motor TEAC [29]. .....	47
<b>Figura 22</b>	Diagrama de la interfaz de potencia para el control del motor TEAC.....	48
<b>Figura 23</b>	Comportamiento del lazo de corriente, TXR101 .....	49
<b>Figura 24</b>	Circuito de configuración para el módulo lazo de corriente.....	50
<b>Figura 25</b>	Diagrama de bloques del programa principal del control del sistema ....	52
<b>Figura 26</b>	Curva características del rendimiento de la turbina y el caudal .....	56
<b>Figura 27</b>	Curva característica para los valores de potencia de la turbina .....	57
<b>Figura 28</b>	Curva características del rendimiento del generador y el caudal .....	58
<b>Figura 29</b>	Curva característica para los valores de potencia del generador.....	59

<b>Figura 30</b>	Curva característica del rendimiento del generador a cargas .....	60
<b>Figura 31</b>	Algoritmo del programa principal para el ingreso de los datos .....	62
<b>Figura 32</b>	Presentación de los datos en la consola, programa principal .....	64
<b>Figura 33</b>	Página <i>html</i> inicial del programa principal .....	65
<b>Figura 34</b>	Página <i>html</i> que acepta los datos introducidos por el usuario .....	67
<b>Figura 35</b>	Curva característica de circuito abierto del generador [2]. .....	87
<b>Figura 36</b>	Diagrama fasorial del generador [2]. .....	88
<b>Figura 37</b>	Diagrama de flujo de potencia en un generador sincrónico [2]. .....	89
<b>Figura 38</b>	Esquema de conexión del <i>Rabbit</i> a la intranet. ....	90
<b>Figura 39</b>	Conexión del cable de programación. ....	90
<b>Figura 40</b>	Conexión del cable de alimentación del <i>Rabbit</i> . ....	91
<b>Figura 41</b>	Ejemplo de la presentación de datos en la consola. ....	92
<b>Figura 42</b>	Ejemplo de configuración del <i>Rabbit</i> para conectarse a la intranet. ....	93
<b>Figura 43</b>	Ejemplos de la presentación de los datos en páginas <i>html</i> . ....	94

## Índice de tablas

<b>Tabla 1</b>	Características eléctricas del generador, tipo alternador [8, 16] .....	21
<b>Tabla 2</b>	Datos técnicos de la turbina.....	36
<b>Tabla 3</b>	Datos técnicos del generador [8] .....	37
<b>Tabla 4</b>	Configuración para el control del motor TEAC [29].....	47
<b>Tabla 5</b>	Eficiencia de la turbina [8].....	55
<b>Tabla 6</b>	Eficiencia del generador [8] .....	58
<b>Tabla 7</b>	Rendimiento del generador para cargas.....	60
<b>Tabla 8</b>	Datos medidos para el sensor de posición .....	69
<b>Tabla 9</b>	Abreviaturas usadas con las unidades SI .....	82
<b>Tabla 10</b>	Nombre de unidades y cantidades eléctricas .....	82
<b>Tabla 11</b>	Conversión de unidades .....	83

## Capítulo 1: Introducción

### 1.1 Problema existente e importancia de su solución

La crisis energética de 1973 y 1979, originada por el alza del petróleo, favoreció el desarrollo de los recursos renovables autóctonos e inextinguibles; en contraposición a los recursos fósiles [11]. Cuando las predicciones acerca del agotamiento de los recursos fósiles resultaron ser pesimistas, la preocupación general por el fenómeno del calentamiento global del planeta, en buena parte debida a las emisiones de CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> en los procesos de generación de energía eléctrica con combustibles fósiles, y las incertidumbres planteadas por el futuro de los residuos nucleares, resaltaron las ventajas de generar electricidad con recursos renovables [11, 22]. He aquí, un antecedente histórico, pues se está viviendo las consecuencias de un manejo erróneo de los recursos naturales; ahora nos corresponde determinar las formas más apropiadas de reorganizar los procesos en equilibrio entre eficiencia y protección al medio.

*“Actualmente el 11.7% del total de la energía eléctrica generada en la Unión Europea es de origen hidroeléctrico, con lo que las emisiones de anhídrido carbónico - uno de los grandes objetivos de la política comunitaria - se reducen en más de 67 millones de toneladas. Ahora bien, así como los aprovechamientos hidroeléctricos convencionales, en los que la importancia de la obra civil y la necesaria inundación de grandes áreas para embalsar el agua y crear la necesaria altura de salto, dan lugar a importantes impactos en el entorno, los pequeños aprovechamientos - considerando como tales los de potencia instalada no superior a 10 MW - , se integran fácilmente en el ecosistema más sensible si están bien diseñados”* [22].

Por lo tanto, es importante buscar nuevas fuentes de energía con el fin de disminuir las emisiones de gases nocivos y contrarrestar la escasez de combustibles fósiles.

Los pequeños aprovechamientos hidroeléctricos no necesitan utilizar grandes represas ni disponer de embalses; este tipo de miniplantas generadoras son del tipo de agua fluyente, o sea que las turbinas generan electricidad mientras pase por ellas un caudal igual o superior a su mínimo técnico y se detienen cuando el caudal desciende por debajo de ese nivel [22, 26]. Este tipo de aprovechamiento se plantea cuando se pretende abastecer una zona eléctricamente aislada, para lo cual se diseña el sistema con una adaptación que prevea la necesidad de trabajar el mayor tiempo posible a lo largo del año, aún en sequía.

La miniplanta de generación hidroeléctrica se refiere a instalaciones con niveles de producción de energía comprendida entre los 10 – 200kW [11]. Sistemas hidroeléctricos de este tamaño gozan de ventajas en términos de costos y simplicidad operativa, comparados con otros de mayor capacidad, debido a distintos procedimientos que se aplican en los pasos de diseño, planificación e instalación.

Recientes innovaciones en la tecnología de minigeneración han hecho que se convierta en una nueva tecnología energética económicamente viable aún en partes del mundo muy pobres e inaccesibles. Algunos de los países que están desarrollando esta metodología se pueden mencionar Pakistán, Zimbabwe, Vietnam, Nepal, Sri-Lanka, Perú, Mozambique, Zambia y China este último cuenta con alrededor de 10.000 miniplantas generadoras a lo largo de su territorio [3, 11, 14].

Este tipo de miniplantas hidroeléctricas pueden generar corriente alterna permitiendo el funcionamiento de equipos eléctricos estándar. Con algunos diseños de minigeneración hidráulica es posible también sacar fuerza mecánica directamente del eje de la turbina, permitiendo el funcionamiento de maquinarias tales como

herramientas para talleres, molinos de granos y otros equipos de procesamiento de productos agrícolas [14, 26].

Estos proyectos se pueden desarrollar sobre una cultura de subsidio entre el gobierno, la industria y los beneficiados; con grandes posibilidades de recuperación de la inversión a un mediano plazo, favoreciendo a los inversionistas y a los usuarios del proyecto. Algunos de los ejemplos más destacables es Perú que cuenta con cerca de 900 miniplantas de generación hidroeléctrica. La planta de mayor potencia es de 200kW y se considera un costo máximo en instalación de \$5630 por kW. Según esta información, la más pequeña se registra en Nepal y entrega una potencia de 25kW con un costo en instalación de \$714 por kW [11]. Estos ejemplos muestran como varía la relación de costo y potencia en cada región según conceptos de geografía, economía, política o incluso culturales.

En cualquier parte del mundo actualmente generar 1kW cuesta alrededor de \$1000, y el usuario debería de pagar del 3 – 5% de este costo por cada kW/h consumido por mes [3, 11, 15]. Se debe recordar sólo como referencia de la aplicación y el beneficio de la potencia que se está tratando, que 1kW alcanza para 20 bombillos de 50W o para lograr un mejor aprovechamiento 66 fluorescentes de 15W.

Con base en la información anterior, el ICE ha establecido como objetivo desarrollar con este proyecto una planta de miniplanta de generación hidroeléctrica, siguiendo el modelo de los países que participan en esta industria, pero con un diseño y características especiales y particulares a nuestro territorio donde los componentes a utilizar estén al alcance de la empresa nacional para mantener y manejar de forma más estable las variables de tiempo, disponibilidad, aplicabilidad y sobre todo costo.

Percibiendo este proyecto como la parte inicial y prototipo de una miniplanta de generación hidroeléctrica, se espera lograr un conjunto de etapas posteriores de

rediseño ligadas a su desarrollo, como sería realizar la conexión física de los sensores en las diferentes partes del sistema mecánico ubicado en los Laboratorios de Hidrología (Unidades Estratégicas de Negocios, UEN - Proyectos y Servicios Asociados del sector energía, PySA) junto con los controladores de carga, que son dispositivos comerciales (origen y manufactura canadienses) que permiten un control efectivo de la frecuencia (Hz) y potencia de salida del generador.

Una vez que se logre poner en marcha el sistema completo de la miniplanta de generación hidroeléctrica en el Laboratorio de Hidrología y tomando tanto sus valores eléctricos como los mecánicos nominales característicos, se requiere colocar minicentrales semejantes en afluentes de diferentes zonas del país. Como etapa final se busca desarrollar proyectos en combinación de fuentes de energía para la generación de electricidad, ya sea hídrico-eólico-diésel o hídrico-solar-diésel, incorporando las fuentes secundarias en la aplicación de potencia para cumplir con la demanda en horas de mayor consumo.

Así, se espera que este proyecto, después de optimizado en sus siguientes etapas de rediseño, sea aprovechado por pueblos alejados y aislados eléctricamente; ya que, llevar electrificación a estas poblaciones con una red de distribución aumentarían significativamente los costos. Por lo tanto, con la minigeneración se mantendría una relación costo-beneficio desplegada en favor de los usuarios, lo cual promovería la industrialización de la zona, generaría soporte técnico a las pequeñas empresas locales, todo esto con el menor impacto ambiental y respaldado por las leyes nacionales de uso de los suelos y el agua.

## **1.2 Solución seleccionada**

Este proyecto es la parte inicial de una serie de ideas tecnológicas para la generación de energía por medio de fuentes alternativas. Los resultados esperados por el Instituto Costarricense de Electricidad, para el funcionamiento de la simulación de la miniplanta y su interacción con el posible control automático, se resumen en aspectos como:



- Implementación de la simulación del control automático de la planta.
- Desarrollo de la protección, generación y aplicación de la potencia adecuada a la carga.
- Implementación de un sistema de adquisición de datos para los sensores de las variables involucradas: frecuencia, f.e.m. y corriente en los generadores, velocidad y posición de las válvulas, flujos de agua, entradas y salidas energéticas.
- Elaboración de un récord de estadísticas para registrar y observar los estados de las variables.
- Configuración de un sistema de toma de decisiones sobre estados de acción automático, manual desde la central o manual local.

El presente proyecto es el desarrollo de la simulación por medio de un sistema de desarrollo, que controla todos los conceptos anteriores.

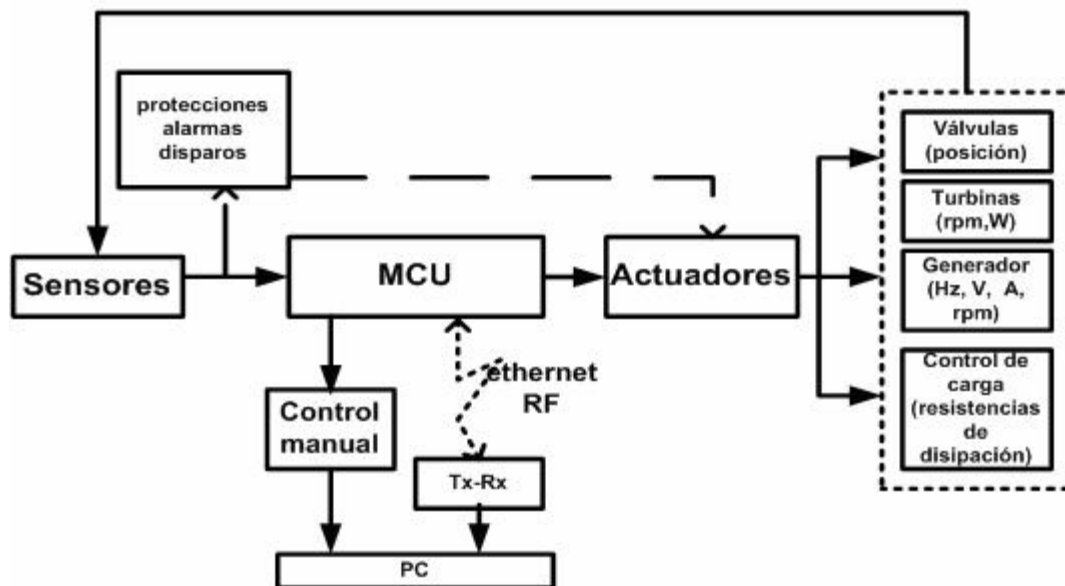
Para el desarrollo del proyecto se estableció por parte del Instituto Costarricense de Electricidad la utilización del procesador *Rabbit 2000* en su presentación con el sistema de desarrollo *SmartCat 2100* (ver descripción en Anexo B.1).

En la figura 1, se muestran la ubicación y la forma en que interactúan los componentes principales del sistema base que se debe simular. Se observa como módulo principal el *Rabbit SmartCat 2100*; con la utilización de este sistema se realiza la lectura de los datos entregados por los sensores, los cuales se comparan con los valores nominales de trabajo accionando los actuadores que abren o cierran la válvula, esto afecta el rendimiento de la turbina y el generador según la demanda energética.

Cuando la demanda de energía aumenta, el generador se sobrecarga de modo que frena las turbinas, las cuales cuentan con un sensor de variación de

velocidad que manda una señal al *Rabbit SmartCat 2100*, esto logra accionar la válvula para modificar la apertura del distribuidor y del rodete, así admitir más agua y por consiguiente más potencia hidráulica. De tal forma, las turbinas pueden satisfacer la demanda energética en “horas pico”. Cuando la demanda se normaliza, la turbina se acelera; por lo tanto, el sensor envía la señal contraria y cierra las válvulas. De manera que se pueda tener un control de carga para no desperdiciar energía.

Como se observa en la figura 1, la entrada principal del controlador es obtenida desde los sensores ubicados en las diferentes posiciones físicas de la planta, para capturar las variables que dominarán el control. Estos datos se ingresan al *Rabbit SmartCat 2100* en forma analógica o digital, según sea el caso de cada sensor, donde se procesa la información y se determinan las decisiones, basadas en los rangos nominales de operación.



**Figura 1** Esquema general de la solución seleccionada

Cuando se simulan las situaciones de sobrecarga, el *Rabbit SmartCat 2100* ejecuta subrutinas que controlan los actuadores, los cuales activan la válvula que permite el ingreso del flujo de agua al sistema; para normalizar la situación o utilizar la potencia residual almacenándola en baterías.

## **Capítulo 2: Meta y Objetivos**

### **2.1 Meta**

El proyecto se realizará para implementar la simulación del funcionamiento de una miniplanta de generación hidroeléctrica.

### **2.2 Objetivo general**

Diseñar e implementar el prototipo de un sistema de control automático para una miniplanta de generación hidroeléctrica.

### **2.3 Objetivos específicos**

#### **2.3.1 Objetivos de *hardware***

- Seleccionar los componentes necesarios y que cumplan con las características requeridas para realizar la programación de las subrutinas y comunicación Ethernet o RF adecuados para la implementación del control automático.
- Al finalizar el proyecto se tendrá un circuito que realice el control de la potencia que entrega el generador, esto por medio de la supervisión y manejo de cargas y turbinas.
- Se implantará el circuito para la adquisición de datos registrados por los sensores en comunicación con el procesador.
- Se proyecta diseñar e implementar el circuito para el funcionamiento correcto de un sistema de alarmas y protecciones, que actúe sobre el manejo erróneo del generador y la turbina.

#### **2.3.2 Objetivos de *software***

- Al concluir el proyecto se contará con el programa de una subrutina para el control de la potencia que entrega el generador, involucrando supervisión y manejo de cargas y turbinas.
- Se obtendrá un programa para control de apertura y cierre de las válvulas, según las indicaciones de los valores de caudal y velocidad de la turbina, registrados por los sensores.

- Se contará con una subrutina de regulación para mantener el funcionamiento nominal de la turbina y evitar su embalamiento, adecuándose a los datos entregados por los sensores.
- Se finalizará el programa con una subrutina que permita al sistema contar con diferentes modos de operación (Automático, remoto y local).
- Finalmente se configurará el sistema para permitir acceder a las acciones realizadas por las subrutinas de control, desde un lugar remoto utilizando una comunicación RF o Ethernet.

### **2.3.3 Objetivos de documentación**

- Al finalizar el proyecto se espera alcanzar un manual de usuario que sintetice los modos de operación, protocolos utilizados, diseño básico y utilización en general.

### **2.3.4 Objetivos de implementación**

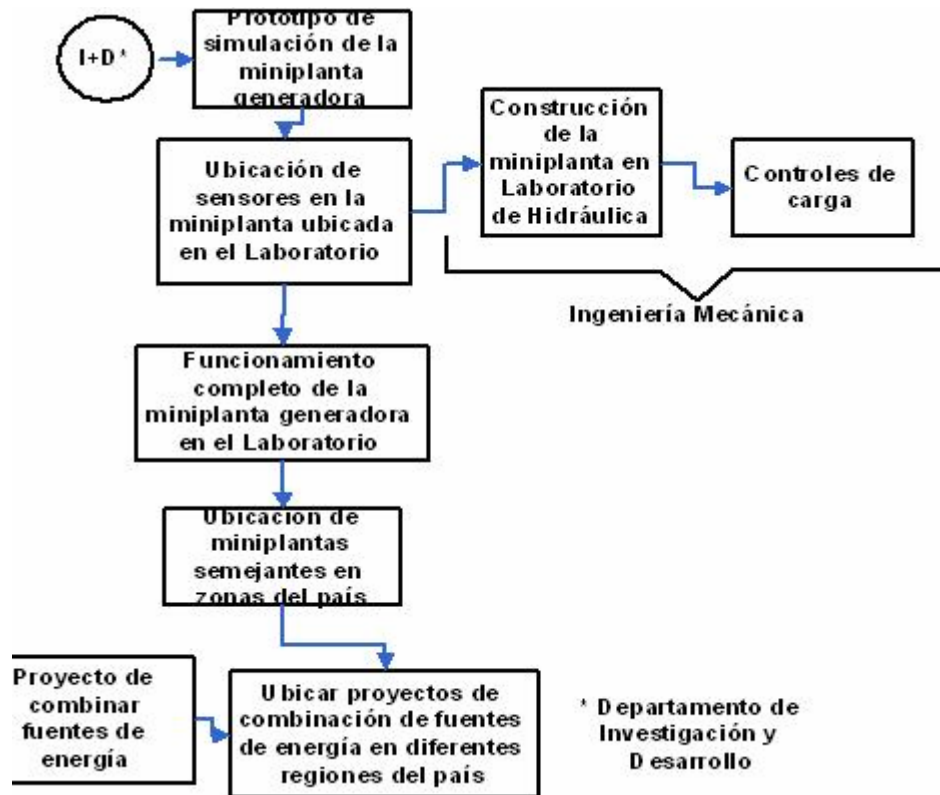
- Ensamblar y lograr la funcionalidad esperada del circuito final como prototipo.
- Finalmente se pretende instalar el prototipo en la unidad de simulación de la miniplanta de generación hidroeléctrica.

## **Capítulo 3: Marco teórico**

En este capítulo, se tratarán los diferentes temas o conceptos relacionados implícitamente con la solución del problema. Se incluyen los diagramas de flujo que muestran la secuencia de las etapas seguidas por el proceso a desarrollar. Igualmente, se pueden encontrar los resultados de las búsquedas realizadas en la literatura reciente o en sitios de Internet, con el fin de establecer el estado de las posibles tecnologías, métodos o procedimientos, antes de emplear la solución propuesta.

### **3.1 Descripción del sistema en general**

La figura 2 ejemplifica cómo inicialmente se desea un método para realizar la simulación del control automatizado de la planta para permitir la toma de decisiones automáticas, o en su defecto acciones manuales, sobre los niveles de agua que deben entrar en las tuberías y válvulas; esto con el fin de manejar correctamente la demanda exigida y distribuir de forma eficiente el “exceso de potencia” cuando la demanda es menor. También determinar los valores nominales de frecuencia (Hz), tensión (V) y corriente (A) con los que trabajan los generadores y mantenerlos estables o indicar alarmas cuando estos se salgan de los límites.



**Figura 2** Diagrama de bloques del contexto donde se desarrolla el actual proyecto.

Se desea ampliar este proyecto y pasar de la etapa de simulación a una etapa de desarrollo del control automático, con la conexión real de los sensores requeridos en la tubería, la válvula, la turbina y el generador; conectándolos en el sistema mecánico que actualmente se encuentra en el Laboratorio de Hidráulica (ICE, UEN PySA).

Una vez que se tenga funcionando completamente la miniplanta de generación hidroeléctrica en el Laboratorio de Hidráulica junto con los controles de carga, el ICE pretende establecer este sistema en aproximadamente 100 lugares escogidos por sus características de distancia, terreno y estrato social; tales determinantes imposibilitan o aumentan el costo de establecer una red de electrificación desde alguna de las fuentes de generación existentes. Finalmente, se pretende establecer proyectos de este tipo en afluentes de Talamanca, Chirripó y zona sur.

Como se observa en el diagrama de la figura 2, el presente proyecto es el inicio de un sistema que pretende combinar fuentes energéticas que trabajen en conjunto, especialmente en las “horas pico”; por ejemplo, utilizar como principal fuente energética la generación hidroeléctrica y secundar la demanda con energía eólica o diésel, incluso solar.

### **3.2 Antecedentes Bibliográficos**

Se reseña en este apartado el resultado de las búsquedas realizadas, en sitios de Internet, revistas y libros, con el fin de establecer el estado del proyecto respecto a las tecnologías y procedimientos actuales; además de las posibles soluciones, en otros países o con otros campos de acción. Se debe recordar que los equipos para realizar esta clase de proyectos ya existen, mas no son en esencia iguales a los que se requieren para la situación particular de las diferentes regiones del país. Los controles de carga encontrados en el mercado mundial son genéricos y no representan las particularidades que se espera, pues están diseñados con otras características. No se registran proyectos de simulación de miniplantas, por lo que a continuación se describe el estado de la miniplanta de generación hidroeléctrica; sistema base del desarrollo del presente proyecto.

La bibliografía [11] muestra básicamente análisis de costos de la instalación de miniplantas de generación hidroeléctrica ubicados por los autores, en conjunto con *London Economics & deLucia Associates, Cambridge Massachusetts, USA*, para *The Departament for Internacional Development, UK* y *The World Bank*. Esta información determina los estudios de factibilidad de los proyectos de hidrología para lugares y países con diferencia en geografía, clima, relieve, cultura y economía. Así mismo, entrega un estudio de los lados extremos de los costos (aquellos que involucran mayor y menor inversión), casos de subsidio con el pueblo beneficiado, el gobierno e involucra la participación de la empresa privada.

El documento [11] extrae información pertinente del cálculo de los costos de operación e instalación, tomando ejemplos de proyectos funcionales en localidades

de Sri-Lanka donde el proyecto que involucra el menor costo de instalación está en Katepoloya con un valor de instalación de \$ 2181 por kW. El proyecto está ubicado en zonas remotas de escasos recursos, con tarifas asequibles, pues esta planta de generación abastece 106 casas de la villa con 200kW de potencia a un precio de \$ 1.43; diseñada para el uso público donde éstos puedan cargar baterías, utilizar hieleras, neveras, molinos y en el área privada abastece una fábrica de té.

En la redacción del documento “*Como llevar a buen fin un proyecto de minicentral hidroeléctrica*” [22], la Dirección General de Energía DG XVII de la Comisión de las Comunidades Europeas, profundiza en el estudio del conocimiento geológico del terreno, así como del recurso hídrico y los principios de mecánica hidráulica en los que se basa el cálculo de los componentes de un aprovechamiento semejante al tratado en este proyecto.

Para informarle al lector acerca de los pasos más convenientes a seguir para llevar a buen término un proyecto de una minicentral de generación con la expresión de los fundamentos y su inicio desde la ubicación del terreno, apoyo y organización de los fondos del pueblo; en los documentos [3, 14, 15] se pueden encontrar lecturas acerca de estos principios, que le ayudan a una región organizada a alcanzar el correcto funcionamiento de una planta que les abastezca de energía eléctrica, sin la ayuda dependiente del estado y a un costo asequible.

### **3.3 Descripción de los principales principios físicos y/o electrónicos relacionados con la solución del problema**

A continuación se describen los principios físicos y electrónicos de la miniplanta de generación hidroeléctrica, pues al conocer el comportamiento característico de ésta se puede desarrollar la simulación del proceso sobre los datos reales.

#### **3.3.1 Potencial del recurso hídrico**

Un aprovechamiento hidráulico necesita, para generar electricidad, un determinado caudal y un cierto desnivel. Se entiende por caudal la masa de agua

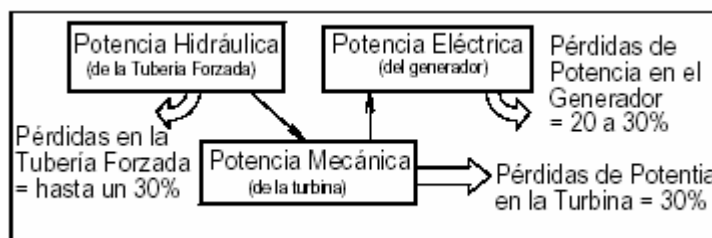


que pasa en un tiempo determinado por una sección del cauce y por desnivel, o salto bruto, la distancia medida en vertical que recorre la masa de agua – diferencia de nivel entre la lámina de agua en la toma y en el punto donde se restituye al río el caudal ya turbinado [14, 15].

El agua, en su caída, puede seguir el cauce del río, en cuyo caso el potencial se disipará en fricción y turbulencia, o puede circular por una tubería en cuya extremidad está instalada una turbina. En el segundo supuesto la masa de agua disipará su potencia en vencer la fricción para poder circular por la tubería y en atravesar los álabes de la turbina. Es precisamente este último componente de la energía potencial el que hace girar la turbina y generar así energía eléctrica.

Para valorar el recurso hídrico hay que conocer cómo evoluciona el caudal a lo largo del año - un solo valor instantáneo del caudal no es significativo - y determinar el salto bruto. En el mejor de los casos, se debe instalar, en el tramo de río en el que piensa emplazarse el aprovechamiento, una estación de aforos con lo que podrá disponerse de una serie temporal de caudales, más válida cuanto más larga sea su historia, y más cuidado se haya dedicado a su lectura.

La potencia hidráulica siempre será mayor que la potencia mecánica y que la potencia eléctrica. Eso se debe al hecho que, al convertirse la potencia de una forma en otra, una parte de la potencia se pierde en cada etapa de la transformación [14], como se ilustra a continuación.



**Figura 3** Demostración de las pérdidas de potencia en la transformación de energía [14]

La mayor pérdida usualmente ocurre en la conversión de la potencia hidráulica en potencia mecánica, cuando el chorro de agua impacta en el rodete de la turbina. En una instalación bien diseñada y construida, aproximadamente un 30% de la potencia del chorro de agua se perderá en esta transformación. Las pérdidas pueden ser aún mucho mayores en instalaciones mal programadas desde un 20% a 30% adicionales se perderán en el generador en la transformación de la potencia mecánica en electricidad [14, 15].

Algo de potencia también se pierde en la tubería forzada. El agua en contacto con las paredes internas de la tubería pierde velocidad y fuerza debido al roce de la fricción. La pérdida de potencia se expresa en metros según su pérdida de desnivel. Su valor típicamente es de entre 20% a 30% del desnivel total. Antes de tomar en cuenta las pérdidas en la tubería, a la caída o el desnivel se le refiere como el desnivel bruto, después de restar las pérdidas se le llama desnivel neto.

## **Eficiencia**

Eficiencia es la palabra que se utiliza para expresar qué tan buena o mala es la conversión de la potencia de un tipo a otro. Una turbina que tiene una eficiencia del 70% convertirá 70% de la potencia hidráulica en potencia mecánica (los restantes 30% se pierden). La eficiencia del sistema resulta de la combinación de las eficiencias de todos los procesos en conjunto. La eficiencia del sistema para la generación de electricidad utilizando tecnología minigeneración típicamente es de entre 40% a 50% [15].

*Ejemplo.* Como estimado preliminar, si hay en un arroyo pequeño, 2.8 kW de potencia hidráulica, la cantidad de electricidad que se podrá generar es aproximadamente:

$$2.8 \times 45\% = 2.8 \times 0.45 = 1.26 \text{ kW}$$

### 3.3.2 Tipos de turbinas

Las turbinas son máquinas que transforman la energía cinética del agua en movimiento en energía mecánica, lo cual sucede al girar por la fuerza del agua. Existen varios tipos de turbinas, se instalan de acuerdo a las condiciones del caudal y la altura de la tubería de presión como se expresan a continuación.

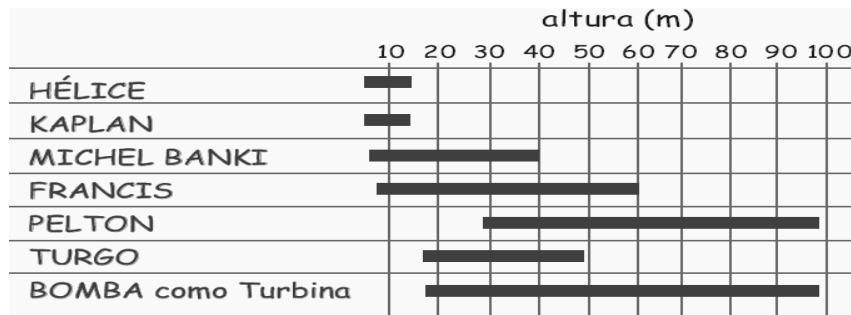


Figura 4 Rango de aplicación de las turbinas [26].

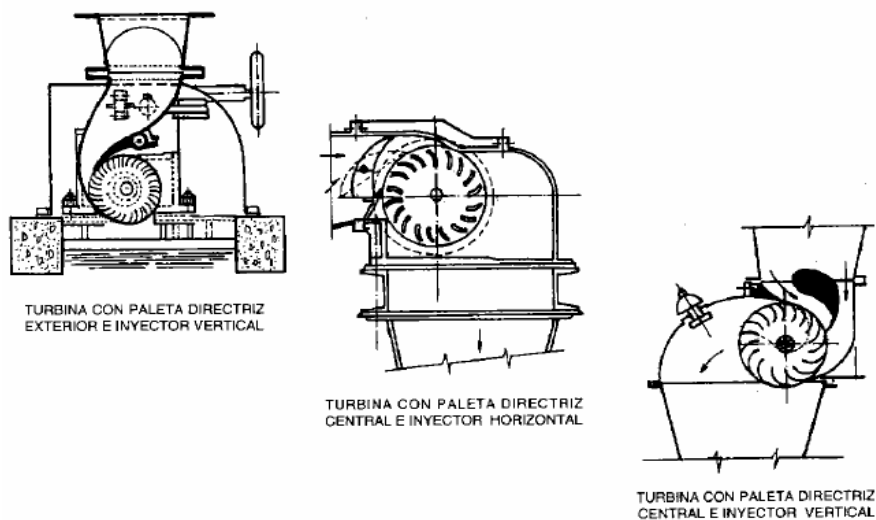
Dado que la turbina que se va a utilizar es el tipo de flujo cruzado o Michel Banki, se presenta información al respecto.

#### Turbinas de flujo cruzado

Conocida también con los nombres de Michell - Banki, en recuerdo de sus inventores, se utiliza con una gama muy amplia de caudales ( entre 20 l/s y 10 000 l/s ) con un rango de salto entre 1 y 40 m. Su rendimiento máximo es inferior al 87%, pero se mantiene casi constante cuando el caudal desciende hasta el 16% del valor nominal, tiene un mínimo técnico para su rendimiento inferior al 10% en relación con el caudal que dispone la tubería (100l/s para este proyecto).

El agua entra en la turbina a través de un distribuidor, y pasa a la etapa de álabes del rodete, que funciona casi completamente sumergido (incluso con un cierto grado de reacción). Después de pasar por esta primera etapa, el flujo cambia de sentido en el centro del rodete y vuelve a cruzarlo en una segunda etapa totalmente de acción. Ese cambio de dirección no resulta fácil y da lugar a una serie de choques que son la causa de su bajo rendimiento nominal.

El rodete consta de dos o más discos paralelos, entre los que se montan, cerca del borde, unas láminas curvadas que hacen el papel de álabes. Estos rodetes se prestan a una construcción artesanal en países en vía de desarrollo, aunque naturalmente nunca alcanzarán los rendimientos de las unidades construidas con los medios técnicos apropiados [3, 22]. La figura 5 muestra algunas variaciones de la configuración de la turbina de flujo cruzado, modelo semejante se encuentra en el Laboratorio de Hidrología.



**Figura 5** Dibujos de ejemplos de la turbina de flujo cruzado [3, 22]

- **Capacidad de las válvulas**

La válvula es un elemento final de control, que varía el caudal del fluido de control y modifica a su vez el valor de la variable controlada, se comporta como un orificio de área continuamente variable.

El tipo de válvula que se encuentra instalada en la minicentral es de mariposa y su cuerpo está formado por un cilindro dentro del cual gira transversalmente un disco (ver figura 6), a continuación se explica la razón para no utilizar ésta en el proyecto. La válvula puede cerrarse herméticamente mediante un anillo de goma encastrado en el cuerpo. Un servomotor exterior debe accionar el eje de giro del disco y ejercer su par máximo cuando la válvula está totalmente abierta; siempre que

la presión diferencial permanezca constante. En la selección de la válvula es importante considerar las presiones diferenciales correspondientes a las posiciones de completa apertura y de cierre, debido a que se necesita una fuerza grande del actuador para accionar la válvula en caso de una caída de presión elevada.



**Figura 6** Ejemplo de válvula tipo mariposa [5]

La principal causa de no utilizar esta válvula es su tipo de accionamiento abierto-cerrado, pues no cumple con las características para utilizar el control automático. A continuación se describen las características para la escogencia de una válvula adecuada para el abastecimiento de la minicentral.

### **Obturador con Característica Lineal.**

Se utiliza un obturador con característica lineal y el caudal es directamente proporcional a la carrera según la ecuación [10]:

$$q = k * l$$

Donde  $q$  : caudal.

$k$  : cte.

$l$  : carrera (lineal o rotacional)

Esta característica se utiliza para el desarrollo de la subrutina de control de caudal y apertura de la válvula. Gráficamente se representa por una línea recta. La capacidad de variación del rango del caudal ( $R$ ) se define como:

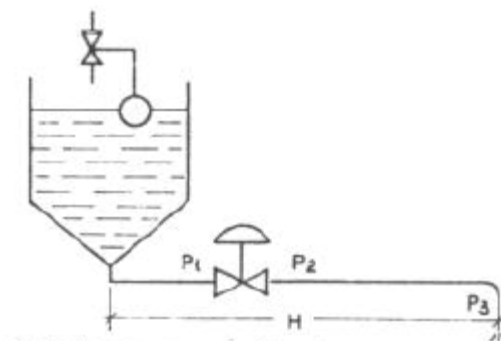
$$R = \frac{qmáx}{qmín} = \frac{100l/s}{5l/s} = 25$$

La R ó campo de control de caudales que la válvula es capaz de regular manteniendo la curva característica inherente es en la válvula lineal de 15 - 1 ó de 30 - 1. Si bien teóricamente ésta podría ser infinita, las dificultades de fabricación la limitan estos valores. El valor de R jamás podrá ser infinito, aunque teóricamente pueda pensarse así.

La presión diferencial variable  $\Delta p$  depende de las combinaciones de la tubería, de las características de las bombas y tanques del proceso. Expresando la pérdida de la presión de la válvula totalmente abierta, con relación a la pérdida de carga del sistema (línea+válvula totalmente abierta) se obtiene un coeficiente "r".

$$r = \frac{\Delta p(\text{de la válvula abierta})}{\Delta p(\text{del sistema})}$$

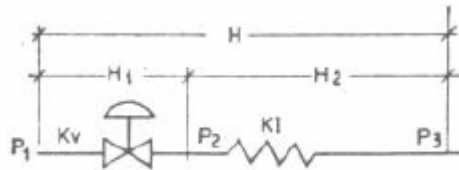
El valor del coeficiente (r) dependerá del tamaño relativo de la válvula con relación al de la tubería y de la resistencia de la tubería con relación al conjunto. Ver el ejemplo del sistema en la siguiente figura.



**Figura 7** Sistema con pérdida constante [10]

- A menor diámetro de válvula => aumento de r.
- A menor resistencia de la tubería => aumento de r.

Para cada valor de  $r$  puede construirse una curva característica efectiva que se apartará de la curva inherente (figura 9) y que coincidirá con ella cuando,  $r=1$  es decir, cuando la línea no absorbe presión y queda toda disponible para la válvula. Donde el circuito equivalente se muestra en la siguiente figura.



**Figura 8** Circuito equivalente [10]

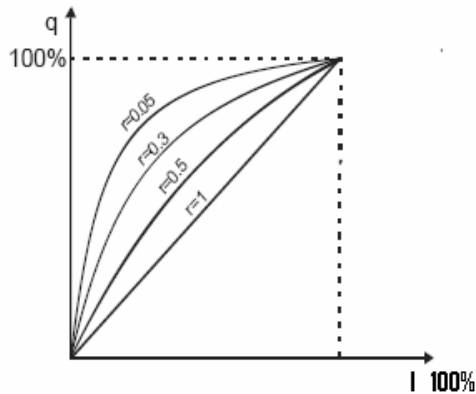
$H_1$  es la pérdida de carga disponible para la válvula,  $H_2$  la producida en la tubería en el tramo comprendido entre  $P_2$  y  $P_3$ , y  $H$  es la caída total en el sistema. Por lo tanto, el valor de  $r$  se calcula como:

$$r = \frac{H_1}{H} = \frac{H_1}{H_1 + H_2}$$

Esta ecuación representa una familia de curvas para cada tipo de válvula, cada una representativa de un valor particular de  $r$ . Un criterio para la selección de válvulas de control es el siguiente:

- Si  $r > 0.5 \Rightarrow$  se selecciona una válvula lineal.
- Si  $0.35 < r < 0.5 \Rightarrow$  la selección debe ser evaluada teniendo en cuenta otras consideraciones.
- Si  $r < 0.35 \Rightarrow$  selecciona una válvula isoporcentual.

Con estas características se determina en la simulación de la válvula mantener un comportamiento lineal. Esto se ejemplifica en el gráfico de la siguiente figura:



**Figura 9** Determinación de  $r$  para válvulas lineales [10]

Se observa que a medida que la pérdida de carga disponible para la válvula disminuye y aumenta la pérdida de carga en la tubería,  $r$  se hace más pequeño y con ello la válvula lineal se aproxima a una *quick-opening* y la válvula isoporcentual a una lineal. Este coeficiente se utiliza para determinar el comportamiento lineal de la válvula que se simula para el prototipo del proyecto desarrollado.

Las válvulas lineales se utilizan para:

- a) Procesos lentos.
- b) Cuando más del 40 % de la caída de presión del sistema cae en la válvula.

Utilizando líquidos incompresibles a través de la válvula de control se siguen las mismas leyes de conservación de masa y energía que expresa la mecánica de fluidos. Cuando éstos pasan a través de una limitación en la tubería deben acelerarse con la energía disponible en la caída o salto del caudal. Luego de la restricción el fluido se frena y parte de esta altura o presión es recuperada, la parte no recuperada se transforma en energía de fricción. Despreciando las pérdidas por fricción se considera el concepto como el Principio de Conservación de Energía (Teorema de Bernoulli).

### 3.3.3 El generador de electricidad

Esta máquina recibe el giro de la turbina y transforma la energía mecánica del eje de la turbina, energía eléctrica. También, se les conoce como alternador, existen varios tipos de generadores [3, 14]:



- Generador sincrónico: son los de mayor aplicación en las centrales hidroeléctricas, pueden ser de eje horizontal o vertical. Se arranca en vacío, actuando sobre la admisión de la turbina para aumentar gradualmente la velocidad. El generador se sincroniza con la red igualando previamente, en la máquina y en la red, las tensiones eficaces, las frecuencias, los desfases y el sentido de rotación.

Cuando el generador alcanza una velocidad próxima al sincronismo, se arranca la excitación y se regula para que la tensión entre bornes sea igual, a la tensión entre barras. En generadores acoplados a una red aislada, el regulador debe mantener un valor predeterminado de la tensión sin importar la carga. Si está acoplado a una red importante, el regulador mantendrá el valor preajustado de la potencia reactiva.

El Laboratorio de Hidrología cuenta con un generador sincrónico sin escobillas tipo alternador, capaz de soportar una velocidad de embalamiento de 2 veces la velocidad nominal de la turbina, con un asilamiento clase H. En la siguiente tabla 1, se determinan los valores característicos del generador *Marathon Electric Generators*, modelo 284PSL1508 (ver anexo B.2)

**Tabla 1** Características eléctricas del generador, tipo alternador [8, 16]

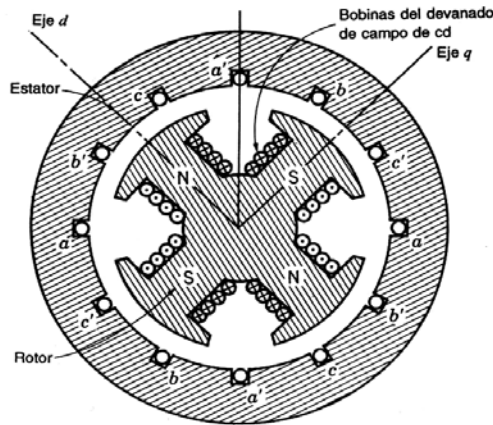
Detalle	valor
Tensión del generador	240 V
Número de fases	3
Frecuencia	60 Hz
Potencia real de salida	20 kW
Potencia reactiva de salida	35 kVA
Velocidad	1800 rpm
Factor de potencia	0.8
Número de polos	4
Xd – reactancia sincrónica	10.458 $\Omega$
Ra – resistencia del rotor	0.875 $\Omega$
Corriente de excitación sin carga	0.52 A
Corriente de excitación con carga máx.	53 A

### 3.3.4 La máquina sincrónica polifásica

La máquina sincrónica polifásica es aquella en la que circula corriente alterna (CA) en el devanado de armadura y se le suministra excitación de corriente directa (CD) al devanado de campo. El devanado de armadura se encuentra en el estator y es trifásico. El devanado de campo está en el rotor [1].

Un generador sincrónico que suministra energía a una impedancia de carga actúa como fuente de tensión cuya frecuencia la determina la velocidad de su máquina prima. La corriente y el factor de potencia se determinan entonces por la excitación del campo del generador, la impedancia de éste, y la carga. Estos generadores se pueden utilizar con facilidad en paralelo.

En la figura 10, se muestra una máquina de polos salientes que tiene cuatro polos como la utilizada en el proyecto, los lados opuestos de una bobina de la armadura están separados  $90^\circ$ , así que hay dos bobinas por cada fase. Los lados de las bobinas a, b y c donde bobinas adyacentes están separadas  $60^\circ$  las dos bobinas de cada fase se pueden conectar en serie o paralelo. Generalmente, las máquinas de polos salientes tienen devanados amortiguadores que consisten en barras de cobre cortocircuitadas y que son similares, a través de la cara polar, a parte de un devanado del tipo “jaula de ardilla” de un motor de inducción. El propósito del devanado amortiguador es el de reducir las oscilaciones mecánicas del rotor hasta la velocidad sincrónica, que es determinada por el número de polos de la máquina y la frecuencia del sistema al que está conectada.



**Figura 10** Sección transversal de un estator elemental y de un rotor de polos salientes [6].

$$f = \frac{P}{2} * \frac{N}{60} = \frac{P}{2} f_m \quad (3.1)$$

Donde  $f$  : frecuencia eléctrica en Hz => 60 Hz

$P$  : número de polos del generador => 4 polos

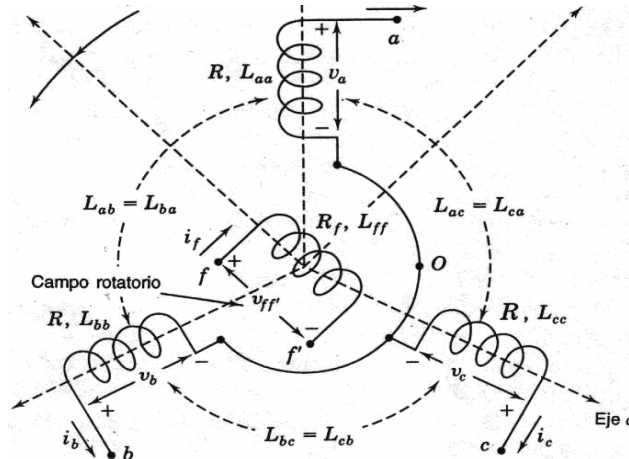
$N$  : velocidad del rotor en rpm => 1800rpm

$f_m$  :  $N/60$ , frecuencia mecánica en rps =>  $1800/60=30$

### Generación trifásica

Los devanados de campo y armadura se distribuyen en ranuras alrededor de la periferia del entrehierro. La figura 11 muestra tres bobinas –a, b y c- que representan los tres devanados de la armadura en el estator de una máquina de rotor cilíndrico de una bobina concentrada  $f$ , que representa el devanado de campo distribuido en el rotor. Las tres bobinas son idénticas y tienen un punto común  $o$ ; el eje de la bobina a se elige  $\theta_d = 0^\circ$ , en sentido contrario a las manecillas del reloj; la bobina b a  $\theta_d = 120^\circ$  y la bobina c a  $\theta_d = 240^\circ$ . Se tienen algunas consideraciones como [1, 6, 27]:

- Cada bobina tiene una inductancia propia  $L_s$ , igual a las propias  $L_{aa}$ ,  $L_{bb}$  y  $L_{cc}$ .
- Las inductancias mutuas  $L_{ab}$ ,  $L_{bc}$  y  $L_{ca}$  entre cada par adyacente de bobinas concentradas son constantes negativas  $-M_s$ .



**Figura 11** Generador trifásico idealizado que muestra las bobinas idénticas de armadura a, b y c, y la bobina de campo f. el eje directo adelanta al de cuadratura en 90° en sentido contrario al de las manecillas del reloj [6].

$$-M_s = L_{ab} = L_{bc} = L_{ca} \quad (3.2)$$

La inductancia mutua entre la bobina de campo f y cada una de las bobinas del estator varía con la posición del rotor  $\theta_d$  en la forma de una función coseno con valor máximo  $M_f$ ,

$$\begin{aligned} L_{af} &= M_f \cos \theta_d \\ L_{bf} &= M_f \cos(\theta_d - 120^\circ) \\ L_{cf} &= M_f \cos(\theta_d - 240^\circ) \end{aligned} \quad (3.3)$$

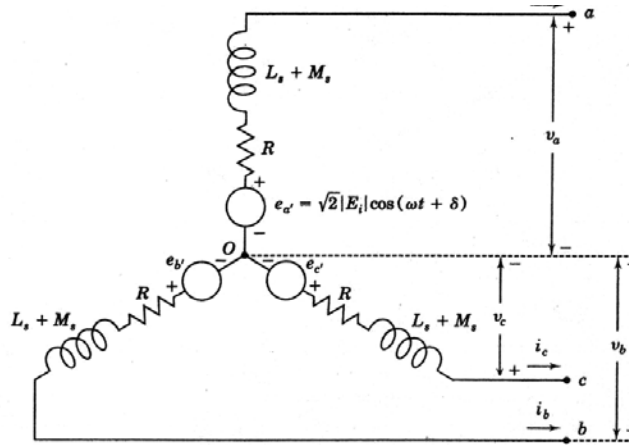
La bobina de campo tiene una inductancia propia constante  $L_{ff}$ . Esto se debe a que en la máquina de rotor cilíndrico (y también en la de polos salientes), el devanado de campo produce sobre el eje  $d$  un flujo a través de una trayectoria magnética similar en el estator para todas las posiciones del rotor (sin considerar el pequeño efecto de las ranuras de la armadura). La fem llamada  $e_a$  se describe por

$$\begin{aligned} e_a &= \sqrt{2} |E_i| \text{sen}(\omega t + \theta_{d0}) \\ |E_i| &= \frac{\omega M_f I_f}{\sqrt{2}} \end{aligned} \quad (3.4)$$

Donde se muestra que  $E_i$  es proporcional a  $I_f$ , la acción de la corriente de campo origina que aparezca  $e_a$  a través de las terminales de la fase a cuando  $i_a = 0$ , lo que se conoce como tensión sin carga. El ángulo  $\theta_{d0}$  indica la posición del devanado de campo relativa a la fase a en  $t = 0$ . De aquí  $\delta = \theta_{d0} - 90^\circ$ , por lo que se observa que  $\sin(\alpha + 90^\circ) = \cos \alpha$ , sustituyendo en 3.4 se tiene.

$$\begin{aligned} e_a &= \sqrt{2}|E_i|\cos(\omega t + \delta) \\ v_a &= -Ri_a - (L_s + Ms)\frac{di_a}{dt} + \sqrt{2}|E_i|\cos(\omega t + \delta) \end{aligned} \quad (3.5)$$

La ecuación 3.5 equivale a la figura 12 donde la fuente es  $e_a$  y la carga externa está balanceada en las tres fases.



**Figura 12** Circuito equivalente de la armadura de un generador trifásico idealizado que muestra las tensiones sin carga balanceadas  $e_a$ ,  $e_b$  y  $e_c$  en estado estable [6].

$$\begin{aligned} i_a &= \sqrt{2}|I_a|\cos(\omega t + \delta - \theta_a) \\ i_b &= \sqrt{2}|I_b|\cos(\omega t + \delta - \theta_a - 120^\circ) \\ i_c &= \sqrt{2}|I_c|\cos(\omega t + \delta - \theta_a - 240^\circ) \end{aligned} \quad (3.6)$$

Donde  $I_a$  es el valor rms de la corriente  $i_a$  y  $\theta_a$  es el ángulo de fase por el que está en retraso con respecto a  $e_a$ . Donde la corriente de cd es

$$i_d = -\sqrt{3}|I_a|\sin \theta_a \quad (3.7)$$

$$|E_i| = \frac{\omega M_f I_f}{\sqrt{2}} \quad (3.8)$$

En la ecuación 3.8 se muestra que el valor numérico de  $i_d$  depende de la magnitud de la corriente de armadura  $I_a$  y de su ángulo de fase  $\theta_a$  en atraso relativo a la tensión interna  $e_a$ .  $\theta_a$  es positivo para factores de potencia en atraso, siendo  $i_d$  negativa, con el efecto combinado de las corrientes de armadura  $i_a$ ,  $i_b$  y  $i_c$  es desmagnetizante; donde  $i_d$  se opone a la influencia magnetizante de la corriente de campo  $I_f$ . Para superar esta influencia, se tiene que incrementar  $I_f$  a través del sistema de excitación del generador. Para factores de potencia en adelanto,  $\theta_a$  toma valores más pequeños, lo que indica que la influencia desmagnetizante de las corrientes de armadura (ecuación 3.7) se reduce y que  $I_f$  puede ser disminuida por el sistema de excitación [1, 6, 27].

## **Capítulo 4: Procedimiento metodológico**

En este capítulo se describen las etapas del método de diseño en ingeniería, seguidas para llegar a la simulación del sistema descrito en el capítulo anterior. Inicialmente, se hace referencia a las actividades realizadas para identificar el problema y el cómo se llegó a definir las restricciones establecidas. Se puede encontrar la información preliminar relevante del problema estudiado, las restricciones y datos técnicos que influenciaron en su análisis; así como el procedimiento referido al plantear las alternativas de solución y como se evaluaron para discriminar entre estas alternativas.

### **4.1 Reconocimiento y definición del problema**

El Departamento de Investigación y Desarrollo, ubicado en el plantel del ICE, Sabana; se encarga del análisis, reconocimiento, indagación y desarrollo de proyectos con nuevas tecnologías de energías alternativas. Además, trabajan respaldando sus investigaciones con los departamentos de geología, hidrología, mecánica, ingeniería civil, ambiente y energía. Por lo tanto, el contar con la asesoría de profesionales de diversas áreas es una herramienta propicia para el desarrollo de los proyectos del departamento.

De esta manera, el Departamento de Investigación y Desarrollo (I+D) determina los pro y los contra de desarrollar proyectos de generación de energía con las fuentes autóctonas. Se elaboran trabajos prototipos sólo para establecer los términos legales, ambientales, políticos, sociales; además de las necesidades que pueden surgir y características que deben adaptarse para ser utilizadas. Evaluando los patrones de comportamiento en proyectos a pequeñas escalas, para luego convertirse en proyectos reales de beneficio social.

Por lo que, en el departamento, después de lograr una comunicación personal por medio de entrevistas con el coordinador de proyectos el Ing. Luis Moya Vargas, y los ingenieros Alexander Mora y Fernando Lizana; se pudo identificar que los planes

presentes en su departamento, más que problemas por resolver, son proyectos por desarrollar.

Así, por recomendación de los anteriores, junto con la asesoría del Departamento de Ingeniería Mecánica dada por el Ing. Mario Alfaro; se determinó el proyecto que se presenta en este documento; el cual se puede definir como la necesidad latente de desarrollar inicialmente la simulación de un control automático para una miniplanta de generación hidroeléctrica, que utilice las señales de entrada de las diferentes variables medidas y registradas de los componentes involucrados (generador, válvulas, turbinas, tubería); que realice los análisis respectivos de los valores nominales y su comportamiento normal; sea éste con diferentes modos de acceso en forma local o remota; además de manejar los anteriores componentes para obtener del sistema el mejor desempeño posible.

#### **4.2 Obtención y análisis de información**

Se cuenta con una miniplanta hidroeléctrica en el Laboratorio de Hidráulica, con un pozo y una tubería de PVC (Cloruro de Polivinilo), que lleva el flujo de agua hacia la turbina y el generador. Mediante entrevistas y visitas analíticas a las áreas de electrónica, investigación y desarrollo, mecánica, hidrología, ambiente y energía se logró establecer los puntos determinantes por desarrollar, los componentes faltantes o de difícil adquisición, así como los objetivos requeridos, y por consiguiente, la metodología de acción para llegar a desarrollar la simulación completa de la minicentral.

Apoyándose en la información obtenida en Internet, libros, revistas y la literatura de la Biblioteca interna del ICE (sector Sabana), acerca del estado del proyecto o similar en otros lugares, se logró detectar sus posibles fallas, prever atrasos e incluir mejoras para establecer un escenario de acción más eficiente.



### 4.3 Evaluación y síntesis de la solución

El Departamento de Investigación y Desarrollo (I+D) por medio de indagaciones en Internet logra determinar la magnitud de los proyectos a nivel nacional, determina como han desarrollado otras regiones del mundo sus sistemas estudiando los beneficios, contratiempos, principales características de diseño, análisis de costos, posibles pruebas controladas que éstos han realizado. Dados estos parámetros se puede identificar las características que se desean obtener del prototipo electrónico para la realización de pruebas.

Basándose en los proyectos estudiados según el capítulo 3, se busca el desarrollo de un prototipo de simulación que trabaje según las características específicas de operación de los componentes dispuestos en el Laboratorio de Hidrología (tanque de agua, válvula, turbina y generador). Enfocadas en la realización de pruebas funcionales adecuadas llevando el sistema a valores extremos y simulando las posibilidades de rango de comportamiento nominal que presenten las variables.

En el capítulo 1 se exponen los objetivos que se deben cumplir por el sistema general, del cual el presente proyecto forma parte. En dicho proyecto se busca utilizar y manejar equipos de *hardware* (microprocesadores, con su sistema de desarrollo), existentes en el departamento, para desarrollar subrutinas de operación y realizar en forma de prototipo y simulación las características reales de los componentes del Laboratorio de hidrología y su interrelación.

El comportamiento de todos los componentes utilizados en el proyecto, se vería reflejado por medio de la observación de la activación de la válvula que permite el ingreso del fluido, las características eléctricas y mecánicas de la turbina y del generador, los valores de potencia de la salida hacia la carga en terminales del generador y finalmente la ubicación de los sensores para registrar las variables antes mencionadas.

El ICE pretende mantener bajo su control y con tecnología nacional el manejo más apropiado para las variables dispuestas que el equipo humano necesite controlar; esto para cumplir con las características ambientales, geográficas y culturales de las regiones donde será instalado e utilizado este proyecto cuando éste completa su fase final.

El Instituto Costarricense de Electricidad, determinó como restricción tecnológica la utilización del sistema de desarrollo, *Rabbit SmartCat 2100* (ver hojas de datos en [24] y su resumen en el anexo B.1), por sus características, apropiadas para cumplir correctamente con los objetivos del proyecto como lo son:

- Microprocesador *Rabbit 2000™* de 22.1 MHz.
- 128K RAM y 256K memoria flash, con la oportunidad de incrementarla a 512K SRAM y 512K en memoria flash.
- 40 I/O digitales: 24 entradas digitales protegidas y 16 salidas de alta corriente con la posibilidad de variar entre fuente o receptor.
- 15 canales análogos: once convertidores A/D de 12-bit que se utilizan como E/S y cuatro convertidores D/A de 0 -10 V de 12-bit los cuales son E/S.
- Un conector RJ-45, puerto para Ethernet, compatible con IEEE 802.3 con el estándar de 10Base-T en protocolo de Ethernet (selección de modos).
- Dos LED del estado de la conexión de Ethernet.
- Cuatro puertos para comunicación en serie (2 RS-232 ó 1 RS-232 con RTS/CTS, 1 RS-485, y 1 CMOS-compatible).
- Batería de respaldo para el reloj en tiempo real.
- *Watchdog* supervisor de efectos.
- Módulo opcional de *display/keypad* con dimensiones de 122 × 32.

Además, este módulo utiliza el *software* Dymanic C versión 8.10 [25], para poder programar las rutinas de desarrollo y cumplir con los objetivos propuestos por el departamento. A continuación se extraen las características del *Rabbit SmartCat BL2100* que se utilizan para la resolución del proyecto; las entradas del convertidor A/D (analógico/digital) y del D/A (digital/analógico) que son utilizadas para ingresar

los datos medidos por los sensores y desarrollar subrutinas de control. También, se utilizan las salidas digitales para controlar los LED indicadores y las entradas digitales para los interruptores ubicados en la tarjeta de pruebas. La conexión de Ethernet, se utiliza principalmente para conectar el dispositivo a la intranet y correr el programa en cualquier computadora ubicada dentro de la red.

Ya que se puede cumplir con lo necesario utilizando recurso humano y tecnológico nacional, se considera esto una ventaja que puede aportar el proyecto, pues el ICE tendría bajo su control todo lo que precisa, bajo el tiempo adecuado y a un mejor precio. Sin tener que depender de tecnología internacional, lo cual es costosa y genérica para los propósitos anteriores.

#### **4.4 Implementación de la solución**

El ICE había planteado principalmente, en la tecnología a utilizar, recurrir al sistema de desarrollo *Rabbit SmartCat 2100*; esta indicación fue dada pues el departamento contaba con el dispositivo; donde se han desarrollado otros proyectos.

Inicialmente, en la etapa de anteproyecto se planteó como objetivo la instalación física de los sensores en las diferentes partes de la miniplanta ubicada en el Laboratorio de Hidrología. Sin embargo, por disposición de los asesores y por lo complicado que se volvió la definición de éstos sensores se decidió mantener el actual proyecto en la fase inicial de simulación y extender tanto la etapa de ubicación de sensores, como conectarlos a la planta principal para etapas posteriores (referirse al capítulo 1). Pues se debía involucrar a ingenieros de otros departamentos y no fue posible organizar los encuentros para seleccionar los componentes adecuados y cumplir con los objetivos propuestos.

Para el desarrollo del presente proyecto se espera contar con un prototipo de pruebas como fase inicial; el cual será la simulación de la miniplanta de generación hidroeléctrica (ubicada en el Laboratorio de Hidrología). Es necesario realizar pruebas de funcionalidad extrema, puesto que se desea llevar el sistema completo al estudio de la respuesta bajo los peores escenarios que se pueda encontrar y a la vez

capturar estos valores de respuesta, estudiarlos y compararlos con los teóricos establecidos en el modelo del sistema; con el fin de determinar el comportamiento de la miniplanta ante diferentes entradas y estímulos.

Para esto se realizarán pruebas sobre la simulación, variando en niveles extremos el flujo de agua, el nivel de carga conectada y la demanda de energía; para forzar al sistema a abrir las válvulas, de modo que permita aumentar o disminuir el flujo de agua y cubrir la demanda sin afectar la turbina y el generador.

El medio de difusión de esta información recopilada, que se ha establecido es un manual de usuario y un informe que permita a otro investigador continuar el proyecto en estudio o realizar mejoras.

#### **4.5 Reevaluación y rediseño**

Como se había comentado en capítulos anteriores, se recomienda realizar las mediciones y registro de otras variables como lo son la temperatura y las vibraciones del bobinado del generador. Esto para mantener las condiciones operativas del generador bajo control y evitar en lo posible fallas o el agotamiento de éste.

Dado que este proyecto es el prototipo inicial en fase de simulación, se utiliza para desarrollar pruebas extremas, obtener parámetros de seguridad y márgenes de funcionamiento; se esperaría tomar las condiciones primordiales del presente diseño, para seguir evolucionando hasta llegar a obtener un sistema adecuado para ser instalado y abastecer una población.

Se entrega en este documento como idea personal la fabricación e instalación del sistema general del cual forma parte este proyecto para cubrir emergencias (inundaciones, temblores, deslizamientos), situaciones que se presentan muy frecuentemente en el país. Ya que, si se contara con una unidad móvil se podría colocar en cualquier lugar que cuente con un río cerca y que sufra de corte parcial o

total de fluido eléctrico; se pautaría como una unidad de abastecimiento de energía sustituto.

Otra posibilidad es colocarla en lugares donde se necesite abastecer de energía temporalmente, como por ejemplo campamentos de cuerpos de socorro, los cuales deben permanecer en una posición estratégica cerca de la emergencia, pero por rasgos de ubicación se encuentran muy lejos de un poblado para suplirse de corriente eléctrica.

## Capítulo 5: Descripción detallada de la solución

Este capítulo explica detalladamente el diseño de la simulación de la miniplanta, se hace referencia a los criterios considerados, fundamentándose en las relaciones matemáticas y físicas expuestas. Se realiza el análisis de las diferentes soluciones propuestas y de la selección final, así, se describen las características tanto del *hardware* como del *software* implementado. Cada uno de estos conceptos se representa por medio de diagramas de bloques y módulos explicativos.

### 5.1 Análisis de soluciones y selección final

Como se mencionó en el capítulo 4, la institución priorizó la utilización del sistema de desarrollo *Rabbit SmartCat 2100* [24] (de *Rabbit Semiconductors*), dado que este módulo fue utilizado anteriormente para el desarrollo de otros sistemas; además, cumplía con las características operativas para la realización del presente proyecto.

Ya que el departamento sólo contaba con el *sistema (SmartCat 2100)*, el cual era utilizado para desarrollar otro proyecto al momento de comenzar éste; el departamento decidió adquirir un nuevo sistema de desarrollo. Este nuevo dispositivo debía ser escogido y recomendado por la estudiante a cargo pero debía cumplir con ciertas características como: una conexión Ethernet, suficientes convertidores A/D, y D/A, I/O digitales, que utilizara una versión mejorada del *software Dynamic C versión 8.10*. Los anteriores fueron los criterios de selección para el nuevo sistema de desarrollo, sin embargo, debía ser de la firma *Rabbit Semiconductors*.

Dado que el proyecto forma parte de un sistema general (descripción en el capítulo 1), se espera que con el material obtenido después de cumplir con los objetivos de éste, se pueda seguir el desarrollo de las etapas siguientes y finalizar el objetivo del sistema general.

De igual manera se había propuesto la ubicación del prototipo en la miniplanta del Laboratorio de Hidrología, pero fue una opción que no se pudo llevar a buen término.

Por las disposiciones antes mencionadas, se determinó entre los asesores y el estudiante a cargo realizar la simulación del prototipo y dejarlo en la fase inicial; observar descripción del sistema en el capítulo 1.

## **5.2 Descripción del *hardware***

### **5.2.1. Diseño del sistema**

A continuación se muestran las características de los componentes que conforman la miniplanta de generación hidroeléctrica, para determinar los valores que fundamentarán el diseño y desarrollo de la simulación.

La miniplanta base del cual la presente simulación representa, está conformada por un tanque de agua subterráneo, una tubería de abastecimiento que se comunica con la válvula de estilo mariposa, pero, se considera mejorar este sistema y cambiar la válvula por otra que permita realizar la automatización del proceso desde el controlador. El límite de suministro es: de la brida de acople a la tubería de presión hasta el tubo de desfogue.

La válvula de acceso está conectada entre la brida de aguas arriba de la tubería de alimentación de la turbina y la brida terminal de aguas debajo de la tubería forzada. Su fin primordial es provocar un cierre de emergencia en caso de un fallo de alimentación [8]. Seguidamente, se utiliza una tubería de PVC SDR 32.5 de 250mm. en su diámetro, para llevar el caudal de flujo de agua a la turbina de tecnología de flujo cruzada (Michel-Banki); con datos técnicos [8]:

**Tabla 2** Datos técnicos de la turbina

Descripción	Valor
Nivel del agua en la toma	
Máximo	3342.25 msnm
Mínimo	3341.75 msnm
Nivel promedio en la restitución	3310.52 msnm
Caída bruta	
Máxima	31.70 m
Mínima	31.20 m
Máxima caída neta	28.60 m
Mínima caída neta	28.10 m
Caída neta de diseño	28.50 m
Caudal nominal	100 l/s
Potencia nominal	20 kW
Velocidad de turbina	1600 rpm
Velocidad de embalamiento	3200 rpm
Diámetro del rodete	320 mm

Una característica que la turbina actual [8] es que no posee regulación de caudal, sin embargo, la posición del álabe directriz puede ser fijada en forma manual.

Seguidamente y con un acople por poleas y faja se encuentra bajo la misma carcasa de la turbina el generador del sistema, el cual cumple con las siguientes características técnicas [8]:

- La forma de onda es sinusoidal.
- Rango de variación de la tensión es de +/- 5%.
- Es sin escobillas del tipo alternador (*brushless*).
- Es capaz de soportar una velocidad de embalamiento de 2 veces la nominal de la turbina.

El generador *Maratón Electric*, clase nema H cuenta con los siguientes datos técnicos (ver apéndice B.2):



**Tabla 3** Datos técnicos del generador [8]

<b>Datos técnicos</b>	<b>Valor</b>
Modelo del conjunto	TB-20/240/CR
Tipo de generador	NEMA MG-1-22.40
Modelo	Maratón, 284 PSL 1508
Tensión	120/240 v
frecuencia	60 Hz
Velocidad del generador	1800 rpm
Potencia del generador	20 kW
Factor de potencia	1.0/0.8
Tipo de aislamiento	H
Grado de protección	IP22
Nivel de ruido a 1m	110 dB

Finalmente, la miniplanta cuenta con un control de carga que utiliza un regulador electrónico que permite disipar en un juego de resistencias la potencia que no se consume por las cargas que alimenta la minicentral, de tal manera que si no existe un consumo de la potencia generada, el juego de resistencias es capaz de disiparla completamente. También, mantiene estable la frecuencia en 60Hz. El sistema de protección se limita a controlar cortocircuitos, sobreintensidad y sobrevelocidad.

Este sistema descrito, actualmente no está conectado ni funcionan correctamente todos sus componentes juntos. Motivo por el cual el objetivo principal es desarrollar la simulación de la minicentral anteriormente descrita.

### **5.2.2. Modelado matemático del generador**

$E_a$  es la caída de tensión interna del generador, en una fase del generador sincrónico; pero no es el que aparece en los terminales de salida, esto sucede ( $E_a = V_\phi$ ) cuando  $I_a = 0$ .

Cuando gira el rotor de un generador, se induce  $E_a$  en las bobinas del estator. Al conectar una carga, fluye corriente, pero el flujo de corriente trifásica estática produce un campo magnético que distorsiona el campo magnético del rotor cambiando la tensión de fase. Este efecto se conoce como reacción del inducido; causa principal de la diferencia entre la  $E_a$  y  $V_\phi$ .

Si se conectara una carga con un factor de potencia en atraso, la corriente de pico ocurrirá a un ángulo atrás de la tensión pico. Con dos tensiones presentes en los devanados estáticos, la tensión total de fase es la suma de la tensión generada  $E_a$  y la tensión del inducido  $E_{stat}$ .

$$V_\phi = E_a + E_{stat}$$

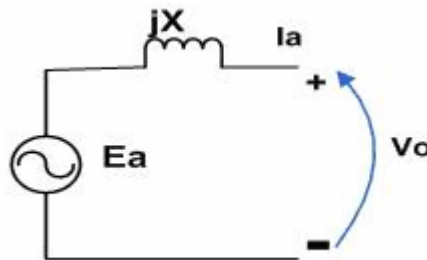
La tensión  $E_{stat}$  está a un ángulo de  $90^\circ$  atrás del plano de la corriente máxima  $I_a$ , ambos valores son directamente proporcionales. Si se toma  $X$  como una constante de proporcionalidad se expresa:

$$E_{stat} = -jX * I_a$$

La tensión en una fase es entonces

$$V_\phi = E_a - jX * I_a$$

Tomando la ecuación anterior como la ley de Kirchhoff, el circuito equivalente lo muestra la siguiente figura,



**Figura 13** Circuito equivalente para la fase de un generador sincrónico [1, 4, 6]

Siendo la figura anterior el modelo eléctrico característico de la fase del inducido. Además de los efectos de la reacción del inducido, los devanados del estator tienen una autoinductancia  $L_a$  y una resistencia  $R_a$ . La ecuación cambia y aumenta por

$$V_\phi = E_a - jX * I_a - jX_a * I_a - R_a * I_a$$

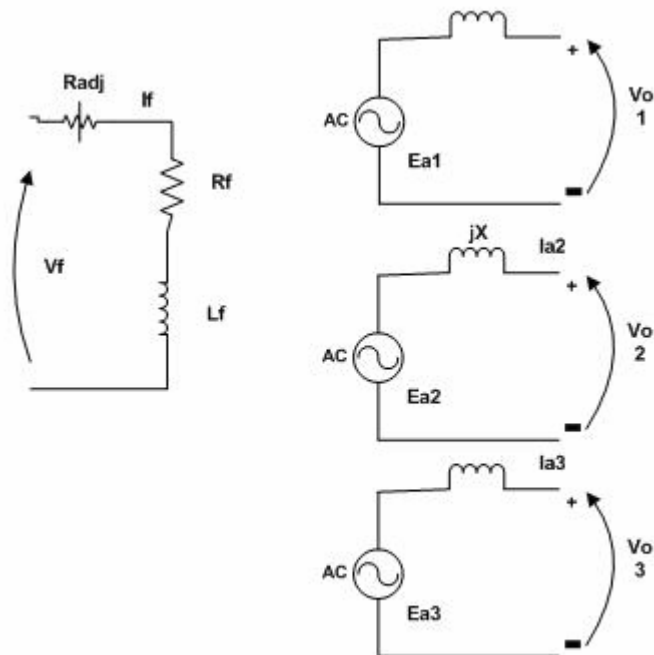
Se pueden juntar en una sola reactancia sincrónica por

$$X_s = X + X_a$$

Para esquematizar el circuito anterior en un generador trifásico sincrónico, se muestra la figura 14 con una fuente de CD alimentando el circuito de campo del rotor, cuyo modelo es la inductancia de la bobina y una resistencia en serie. En serie con  $R_f$  se encuentra una resistencia ajustable  $R_{adj}$  que controla el flujo de corriente de campo; el resto son modelos semejantes para cada fase, de las cuales cada una tiene una inductancia en serie  $X_s$  y una resistencia  $R_a$  además están desfasadas  $120^\circ$  entre sí.

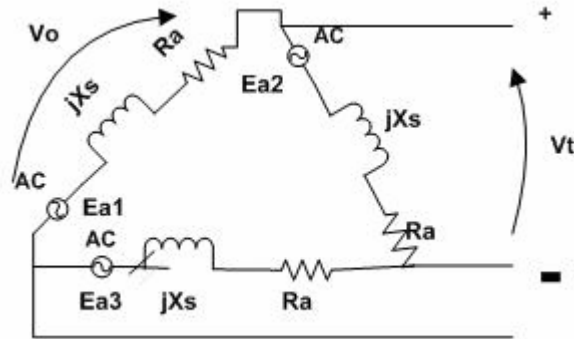
Dado que el generador *Marthon Electric*, está conectado en delta se muestra en la figura 14, el modelo de esta configuración, relacionando sus tensiones de fase por:

$$V_t = V_\phi$$



**Figura 14** Circuito equivalente de un generador trifásico sincrónico [1, 4, 6]

En la figura 15 se muestra la conexión del generador en configuración delta:



**Figura 15** Circuito equivalente del generador conectado en delta  $\Delta$  [1, 4, 6]

Obteniendo las características de cada fase anteriormente descrita, se obtiene las ecuaciones representativas

$$E_a = V_{Ra} + V_{La} + fem$$

$$E_a = i_a * R_a + L_a \frac{di_a}{dt} + K_b * W_m$$

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{E_a}{L_a} - i_a \frac{R_a}{L_a} - K_b \frac{W_m}{L_a}$$

Observando los cálculos del apéndice A.2 y el circuito resultante del modelo anterior se pueden determinar valores como lo son [1, 4, 6, 27]:

El generador cuenta con 4 polos, una frecuencia de trabajo de 60 Hz y 1800 rpm. Tomando las consideraciones de  $R_a = 0$ , y recordando que la máquina tiene valores nominales de 43.75 kVA, FP = 0.9 y 2kV [8]. Se observa que la ecuación para la tensión de línea a neutro sería (ver apéndice A.2 para localizar el desarrollo real de las ecuaciones):

$$v_a = \sqrt{2} \left( \frac{2000}{\sqrt{3}} \right) = 1632.9v \Rightarrow v_a = 1632.9 \cos \omega t$$

$$\theta = \cos^{-1}(0.8) = 36.87$$

$$i_a = \sqrt{2} \left( \frac{43.75}{2 * \sqrt{3}} \right) = 17860 \Rightarrow i_a = 17860 \cos(\omega t - 36.87^\circ)$$

Desarrollando la ecuación 3.4 se observa que la tensión  $E_a$  sería de

$$e_a = \sqrt{2} |Ei| \cos(\omega t + \delta)$$

$$e_a = 28940 \cos(\omega t + 39.46^\circ)v$$

Y la corriente de campo se muestra

$$I_f = \frac{\sqrt{2} |Ei|}{\omega M_f} = \frac{28940}{120 * \pi * 31.695 * 10^{-3}} = 2422A$$

Donde  $\theta_a$  es el ángulo de atraso de  $i_a$  medido con respecto a  $e_a$ . Debido a que  $i_a$  atrasa en  $36.87^\circ$  a  $v_a$ , se observa que atrasa  $39.46^\circ$  con respecto a  $e_a$ :

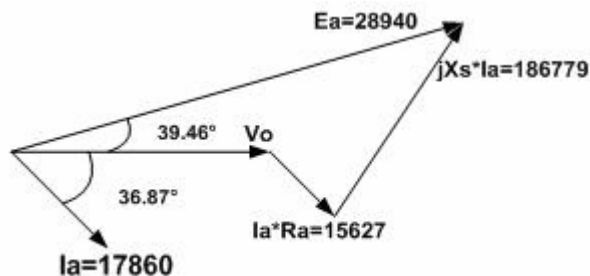
$$\theta_a = 36.87^\circ + 39.46^\circ = 76.33^\circ$$

$$|I_a| \sin \theta_a = \frac{17860}{\sqrt{2}} \sin(76.33^\circ) = 12271A$$

Los enlaces de flujo con el devanado de campo están dados por

$$\lambda_f = L_{ff} I_f - \frac{3M_f}{\sqrt{2}} |I_a| \sin \theta_a = 225.27 \text{Wb} / \text{vuelta}$$

Se muestra a continuación el diagrama fasorial del análisis anterior:



**Figura 16** Diagrama fasorial del generador trifásico, con un  $fp = 0.8$

Con una carga que consuma un factor de potencia unitario,  $FP = 1$ ; se vuelven a obtener los valores de la tensión interna

$$e_a = \sqrt{2}|E_i|\cos(\omega t + \delta)$$

$$e_a = 27978 \cos(\omega t + 3.35^\circ) \text{ V}$$

Debido a que  $E_i$  es directamente proporcional a  $I_f$  resulta:

$$I_f = \frac{e_a|_{FP=1.0}}{e_a|_{FP=0.8}} * I_f|_{FP=0.8} = \frac{27978 \text{ V}}{28940 \text{ V}} * 2422 \text{ A} = 2341 \text{ A}$$

Se muestra que la corriente  $i_a$  está en fase con  $v_a$  y atrasa a  $e_a$  en  $3.35^\circ$ .  
Obteniendo la relación de corriente de armadura y el flujo se presenta

$$|I_a| \text{ sen } \theta_a = 12628 \text{ sen } 3.35^\circ = 737.97 \text{ A}$$

$$\lambda_f = 965.57 \text{ Wb / vuelta}$$

La corriente de campo se reduce de 2422 a 2341 A, cuando se pasa del factor de potencia de la carga de 0.9 a 1.0 bajo condiciones nominales. También el flujo del entrehierro que enlaza al devanado de campo del generador se reduce, al igual que la influencia desmagnetizante de la reacción de armadura.

La corriente de campo que se necesita para mantener en la máquina la tensión nominal en terminales, bajo condiciones de circuito abierto con  $i_a = 0$  se determina de esta forma;

$$I_f = \frac{\sqrt{2}|E_i|}{\omega M_f} = 136.65 \text{ A}$$

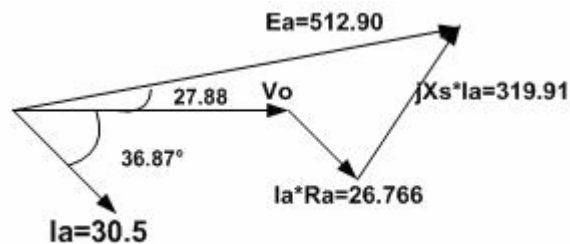
Se había mostrado que para una máquina sincrónica trifásica en configuración delta  $\Delta V_\phi = V_T$ . Suponiendo que el generador está en vacío  $I_a = 0$  y  $E_a = V_\phi$ .

Entonces,  $V_T = V_\phi$  y  $E_a = 240v$ ; de la característica de circuito abierto,  $I_f = 4.5 A$ . Si con estas características, el generador se conecta a una carga de 53 A; pues es la corriente para la carga máxima con  $fp = 0.8$  en atraso, la corriente del inducido es

$$I_a = \frac{53}{\sqrt{3}} = 30.59A \quad \text{Con } V_t = 240v$$

$$I_a = 30.59A$$

$$E_a = V_\phi + R_a I_a + jX_s I_a = 512.90 \angle 27.88^\circ$$



**Figura 17** Diagrama fasorial del generador para una carga con un  $fp = 0.8$  en atraso.

Si la carga se cambia por un  $FP = 0.8$  en adelanto:

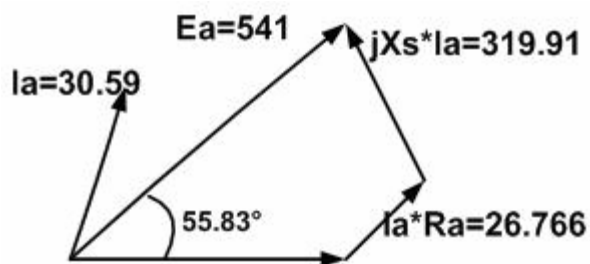
$$I_a = 30.59A$$

$$E_a = V_\phi + R_a I_a + jX_s I_a$$

$$E_a = 240 \angle 0^\circ + 26.766 \angle 36.87^\circ + j319.91 \angle 36.87^\circ$$

$$E_a = 541.29 \angle 55.83^\circ$$

Utilizando los valores anteriores se redibuja el diagrama fasorial del generador en la siguiente figura



**Figura 18** Diagrama fasorial del generador para una carga con  $fp = 0.8$  de adelanto

La potencia suministrada por el generador en este caso es:

$$P_{out} = \sqrt{3}V_t * I_t * \cos \theta = 17625kW$$

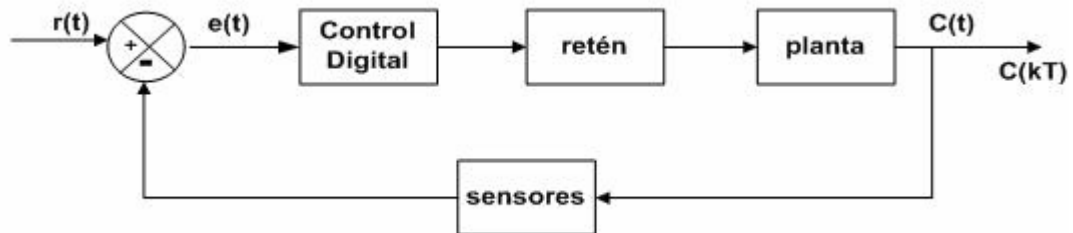
Tomando en cuenta la evaluación de las pérdidas ofrecidas por la potencia residual en el núcleo, las partes mecánicas y las pérdidas dispersas; se obtienen la potencia total de entrada al generador  $P_{in} = 20.381kW$ . Como es de esperarse pues es la potencia máxima de entrega dada por el fabricante para la turbina. Conociendo el análisis de diferencia de potencias de entrada y la de salida se obtiene una eficiencia de

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} * 100\% = 86.47\%$$

En caso de desconectar súbitamente la carga del generador, la corriente  $I_a = 0$  y  $E_a = V_\phi$ . Puesto que la corriente de campo no ha variado,  $E_a$  no varía pues  $V_\phi$  y  $V_t$  deben incrementarse para igualar a  $E_a$ .

### 5.2.3. Sistema prototipo de simulación

El control automático del sistema hidráulico base del cual se necesita realizar la simulación, presenta una estructura como se describe en la siguiente figura



**Figura 19** Diagrama de bloques del sistema de control [21]

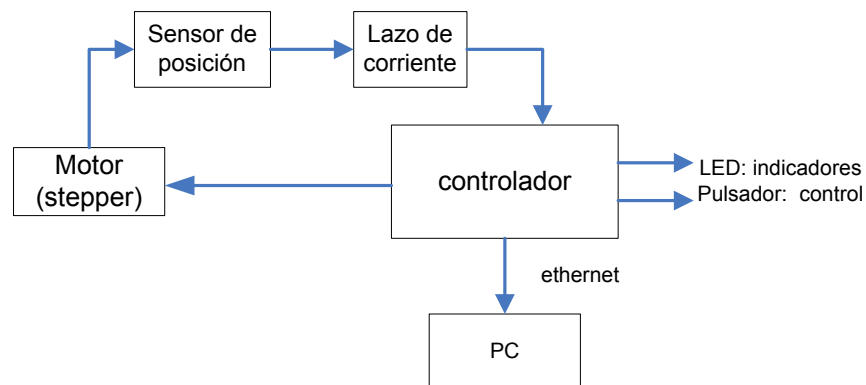
Este sistema consta de un controlador automático, un actuador, una planta y un sensor. El controlador detecta la señal de error actual, la cual posee un nivel de



potencia muy bajo, se establece industrialmente como un lazo de corriente de 4 – 20 mA, por lo que se amplifica para ser procesada y cuantificada. Se coloca en la línea de retroalimentación del sistema de malla cerrada, donde se establece el amplificador para componer la señal entrante del error actuante y producir una mejor señal de control.

Este elemento de medición convierte la variable de salida en una más adecuada (corriente), la cual puede utilizarse para comparar la salida  $c(t)$  con la señal de entrada de referencia  $r(t)$ . El punto de ajuste del controlador debe convertirse en una entrada de referencia con las mismas unidades de la señal realimentada desde el sensor.

Procurando mantener estas características, se decidió realizar el prototipo de simulación con el sistema de desarrollo *Rabbit SmartCat 2100*; para manejar un motor paso a paso conectado al sensor de posición y obtener la señal de error. La figura a continuación ejemplifica el proceso.



**Figura 20** Diagrama de bloques del sistema prototipo

A continuación se describirá cada etapa para determinar su desarrollo y comportamiento:

- **Controlador:**

Está conformado por el procesador *Rabbit 2000* contenido en el *sistema Rabbit Smartcat 2100* (ver hojas de datos en anexo B.1 y en [24]). El procesador se conecta

al computador personal por medio de una tarjeta de red o un *hub* y un cable cruzado; de esta forma, con una conexión Ethernet se comunica el usuario utilizando la interfaz gráfica creada por el *software Dynamic C versión. 8.10*, con el computador para manejar los convertidores A/D y D/A, además de las entradas y salidas digitales. Esta tarjeta controladora se programa por medio de un cable configurado en serie conectado al puerto COM1 de la PC, por el cual se compilan las rutinas antes de ser guardadas en la memoria flash del dispositivo.

Primeramente es necesario describir la configuración específica con la que debe contar el computador donde se conecten los dispositivos. Es necesario enlazar el sistema de desarrollo *Rabbit SmartCat BL2100*, con el cable de programación al puerto serie *COM1* de la PC (ver anexo B.1), conectar el adaptador de corriente, utilizar el cableado para colocar la tarjeta de pruebas con los LED y los pulsadores. En forma independiente ensamblar el motor paso a paso con el sensor de posición y estos al lazo de corriente, que ingresa por medio de una resistencia de  $100\Omega$  en paralelo a la entrada analógica seleccionada.

La rutina principal está encargada del control de todos los dispositivos alternos con base en los cálculos determinados en las secciones anteriores, para obtener las características de comportamiento de estos (válvula, turbina, generador y carga). Para el presente caso, la simulación del sistema general necesita controlar un motor paso a paso, el cual semejaría el motor de acción principal sobre la apertura de la válvula. Esto porque la válvula es la encargada de mantener el flujo inicial que acciona los demás dispositivos. Así, el programa principal posee un caso determinado para el despliegue en pantalla de los valores que determinan el comportamiento de la propia válvula, el caudal, la turbina, el generador y la carga para cada caso de apertura del mecanismo o sea del movimiento del motor.

El controlador también permite la visualización de señales de emergencia o alertas con el accionamiento de LED en la tarjeta de pruebas, este comportamiento se da sólo en casos extremos cuando se le indique al usuario niveles avizores del

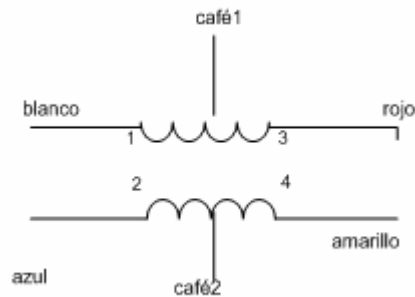
sistema. La tarjeta de pruebas posee un grupo de pulsadores, los cuales se utilizan para interrupciones en el desarrollo del programa.

- **Motor (paso a paso):**

El motor paso a paso es de marca TEAC #147690790-50 tipo 5325e, el cual se maneja con las salidas digitales del controlador, esto según las características que le ofrece el usuario al ingresar el dato de apertura de la válvula o el nivel del caudal ubicado antes de la posición de la propia válvula. La configuración de las conexiones del motor es

**Tabla 4** Configuración para el control del motor TEAC [29]

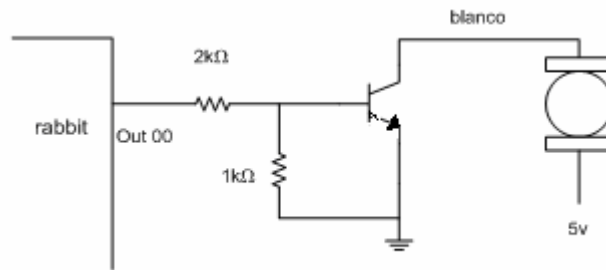
	blanco	azul	rojo	amarillo	Café1	Café2
<b>CW =&gt;</b>	1	0	0	0	5 v	5v
	0	1	0	0		
	0	0	1	0		
	0	0	0	1		
<b>CCW &lt;=</b>	0	0	0	1	5v	5v
	0	0	1	0		
	0	1	0	0		
	1	0	0	0		



**Figura 21** Circuito de configuración para el motor TEAC [29].

Con una subrutina se controlan las salidas digitales las cuales utilizándolas según la configuración anterior se mueve el motor en dirección de las manecillas del reloj para cerrar la válvula (CW) ó al contrario (CCW) para abrirla; esto según el movimiento que se necesite realizar, demandado por el comportamiento del sistema y por las ordenes del usuario.

Para realizar estos movimientos en el motor es necesario conectar una interfaz de potencia entre las salidas digitales del controlador y los cables de conexión del motor; esto pues la corriente de la salida digital del controlador (200mA) no es suficiente para alimentar las bobinas del motor paso a paso, por lo que se coloca un transistor RN2222 o de propósito general y ganancia de  $Q = 100$  para incrementar la corriente, como se muestra en la siguiente figura.



**Figura 22** Diagrama de la interfaz de potencia para el control del motor TEAC

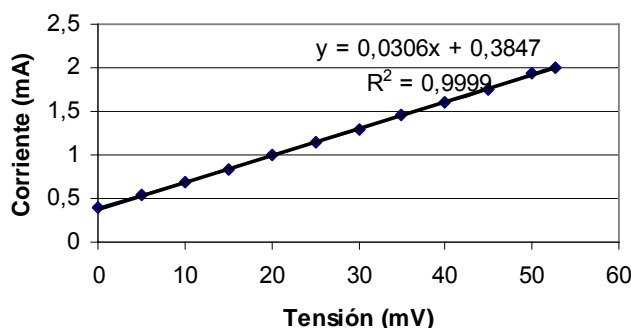
La figura anterior muestra el circuito para una de las cuatro bobinas que abarca el motor; este circuito se debe rehacer para las salidas siguientes con los mismos valores de resistencia utilizando el cable de conexión del motor azul, rojo o amarillo. Se debe colocar el orden de los colores según la configuración de la figura 21.

- **Sensor de posición:**

El sensor colocado para registrar la posición del motor, o sea, la apertura de la válvula, es una resistencia variable de precisión de  $1k\Omega$ , acoplada físicamente de la barra del potenciómetro al eje del motor. Sin embargo, como el potenciómetro no permite un recorrido total de  $360^\circ$ , se calcula la cantidad de pasos necesarios para cubrir completamente el recorrido (40 pasos de  $6^\circ$  cada paso); pues se debe hacer un freno tanto físico como en *software*, para que el motor no siga forzando el dispositivo al realizar más pasos que los que tiene permitido el potenciómetro.

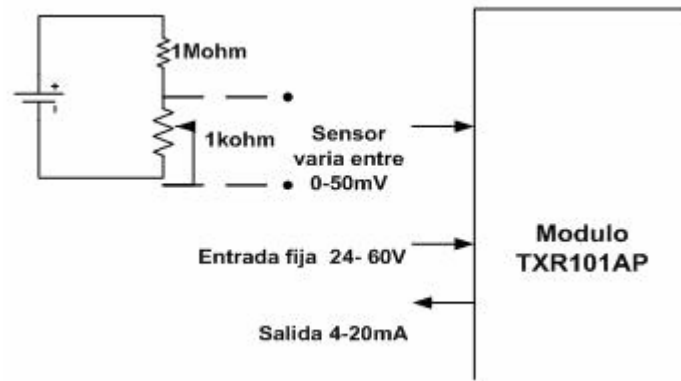
- **Lazo de corriente:**

El lazo de corriente es una disposición industrial para estandarizar los sensores que se utilicen, pues se busca un comportamiento semejante para todos los datos registrados por el controlador; este valor es de 4 – 20mA., en el presente proyecto se utiliza el integrado XTR101AP de BB (Burr - Brown), el cual se encuentra funcionando en un módulo construido por el departamento (I+D). Este módulo posee dos entradas de tensión: una de éstas es fija con un rango de 24 – 60V, la otra es una entrada de tensión variable proveniente del sensor, con un valor de 0 – 50mV y debe manejar una tierra independiente. Por lo tanto, el sensor se debe configurar de manera que entregue en un circuito independiente de todos los dispositivos, el rango de variación exigido (ver figura 23); finalmente el módulo presenta la salida de corriente de 4 - 20mA. Éste varía su comportamiento según la gráfica siguiente



**Figura 23** Comportamiento del lazo de corriente, TXR101

El gráfico muestra como el comportamiento del módulo es lineal en el rango dentro de trabajo del sensor y además, incluye en la información la ecuación característica del comportamiento, que se presenta al utilizar este módulo, con un grado de aproximación de 99.9%. Como a este módulo se le debe conectar el potenciómetro, se debe configurar para obtener el rango necesario lo más aproximado posible como lo muestra el circuito de la figura a continuación.



**Figura 24** Circuito de configuración para el módulo lazo de corriente.

La salida de corriente se conecta directamente a la entrada analógica *ADCIN 0*, para poder ser leída y registrada por el controlador. Como se muestra en la figura 24, para poder ingresar el valor de corriente al controlador sin modificarla, se coloca una resistencia de  $100\Omega$  en paralelo con la salida del módulo para que ingrese un rango de  $0.4 - 2V$ , una vez leído el valor el controlador lo convierte; con la ecuación característica del integrado nombrado, en el porcentaje de apertura de la válvula.

- **PC:**

El computador mantiene en la plataforma del lenguaje C, sobre el *software Dynamic C versión 8.10* [25], el desarrollo del programa principal de control y sus diferentes subrutinas. Para esto toma el valor de la entrada analógica *ADCIN 0*, proveniente del sensor de posición del eje del motor lo lee, almacena y lo convierte en un porcentaje característico de la apertura de la válvula; para luego obtener por medio de los cálculos realizados en las secciones anteriores, el comportamiento de cada dispositivo simulado (válvulas, tubería, turbinas, generador y carga).

El sistema se desarrolla sobre un ambiente simple llamado “consola” la cual es la forma básica de presentar texto y datos en este tipo de lenguaje. El cual solo presenta los datos enlistados sin modificaciones gráficas; otra opción es utilizando una página *web* html anteriormente realizada por otro programa, la cual para poder

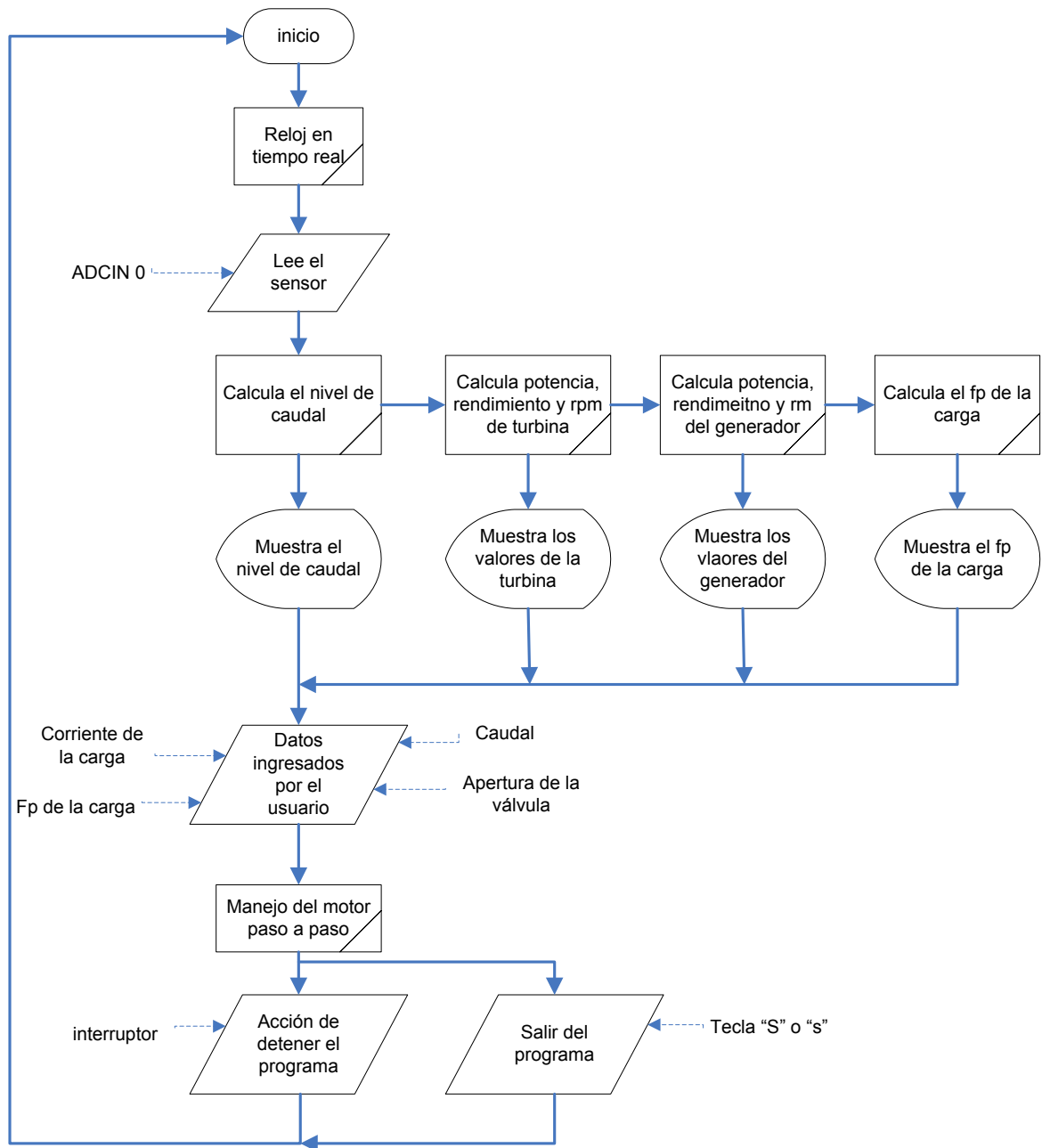
ser cargada y vista por el usuario necesita una conexión de red Ethernet, entre el controlador y el computador, como se mencionó anteriormente.

### **5.3 Descripción del *software***

#### **5.3.1 Descripción del algoritmo principal**

La rutina principal está encargada de compilar las subrutinas para mantener el control del sistema, esto tomando como referencia los datos obtenidos por el *Rabbit*, ya sea desde el sensor o los introducidos por el usuario.

Como se muestra en la figura 25, el programa posee varios estados que actúan paralelamente, principalmente en la elaboración de los cálculos, esto se puede realizar dado que las subrutinas se elaboran bajo la caracterización de multiprocesos o co-estados (*costate*). Esta opción la presenta el *Dynamic C*, de manera que se puedan ejecutar procesos simultáneamente, con el fin de poder establecer acciones en un estado sin que perturbe el siguiente como sería con tiempos de espera, lecturas de variables de entrada o espera de la acción del teclado para realizar otras funciones.



**Figura 25** Diagrama de bloques del algoritmo para el programa principal del control del sistema

La rutina principal ejecuta la subrutina que desarrolla un reloj de tiempo real que es mostrado al usuario, seguidamente lee el dato proveniente del sensor, con este valor calcula el nivel de caudal antes de la válvula y lo muestra en la pantalla. Igualmente los valores de potencia, rendimiento y revoluciones/minuto tanto de la turbina como del generador y los muestra en la consola. Después, presenta al usuario un formulario para que interactúe con el sistema al ingresar los datos de



corriente y factor de potencia de la carga, así como, el nivel del caudal antes de la válvula y finalmente la apertura de ésta.

El sistema toma el valor porcentual calculado de apertura de la válvula, lo compara con el valor introducido y actúa sobre el movimiento del motor paso a paso, ya sea a favor o en contra de las manecillas del reloj (CW ó CCW); se retroalimenta el valor del sensor, con el nuevo valor obtenido. Paralelamente, el sistema toma el dato de apertura de la válvula en porcentaje para derivar los valores característicos de los demás componentes.

Al ingresar los valores de caudal antes de la válvula y los de la carga se modifican los datos calculados por el dato inicial del sensor. El programa principal ejecuta sus resultados sobre una consola o en las páginas *web* con el servidor interno del *Rabbit*. Como se mencionó, el programa principal está conformado por diferentes co-estados los cuales se explicarán seguidamente.

### **5.3.2 Rutina para reloj**

En la consola se establece inicialmente la hora y la fecha actuales, éstas son obtenidas por medio de la lectura de la memoria del *Rabbit*, donde se almacena la información actual de fecha y hora, con la batería de respaldo, además, puede ser configurada y calibrada por el usuario. Esta subrutina se encuentra establecida en el primer co-estado.

### **5.3.3 Rutina entrada del sensor**

En el segundo co-estado, se encuentra la entrada del sensor de la válvula (motor paso a paso), en ésta se obtiene, guarda y analiza el valor obtenido desde la entrada *ADCIN 0*. El programa toma el dato del sensor de la entrada analógica, utiliza el convertidor A/D de 12 bits para leer el valor con un formato de cuatro dígitos decimales el cual representa la corriente de 4 – 20mA, que se encuentra a la salida del XTR101 con la utilización de la ecuación siguiente  $corriente = voltaje * 10$ , se

realiza esta conversión dado que la corriente ingresa al sistema en forma de tensión (0.4 – 2v) por medio de una resistencia de 100Ω.

Se toma el dato de corriente para determinar el valor específico de la tensión del sensor que se está leyendo (0 – 50mV), utilizando la gráfica 1 donde se muestra el comportamiento del integrado TXR101 (ver sección 5.2.5) y la ecuación presente en ésta, se obtiene:  $V_{sensor} = voltage * 12.57$ . Finalmente, para lograr la posición del motor en forma de porcentaje de apertura de la válvula  $porcentaje = V_{sensor} * 2$ ; lo cual indica la apertura en porcentaje que está registrando el sensor de posición.

El dato “voltage” es el dato leído por la entrada analógica del valor registrado por el sensor de posición, sin embargo, uno de principales problemas hasta este punto se ubica en la presencia de ruido en la señal medida, lo cual afecta los cálculos posteriores de los otros dispositivos.

#### **5.3.4 Rutina para nivel de caudal**

El tercer co-estado está destinado al cálculo del caudal que se encuentra antes de la entrada de la válvula. Dado que se utiliza una válvula con obturador de característica lineal (ver sección 3.3.2), la apertura muestra el nivel de caudal existente en una relación lineal; de esta forma una apertura del 100% tendría el caudal máximo de 100 l/s.

Como se demostrará a continuación, cuando el sistema presenta un caudal menor al 40% se esperan problemas en los cálculos de las potencias y rendimientos de los dispositivos, esto se observa en las curvas de comportamiento de la turbina y del generador (figuras 26, 27, 28 y 29). En este caso el sistema envía una señal de error indicativa al usuario por medio de un LED de la tarjeta de pruebas y una indicación escrita en la pantalla; ambas se desactivan cuando el nivel de caudal aumenta.

El valor del caudal puede ser cambiado por el usuario, cuando el sistema pregunta por esta opción. Si el dato del caudal no es introducido, el sistema toma por defecto el valor de la apertura ya sea introducida o registrada. Pero si el valor introducido es diferente se actúa según el algoritmo indica.

### 5.3.5 Rutina de características de la turbina

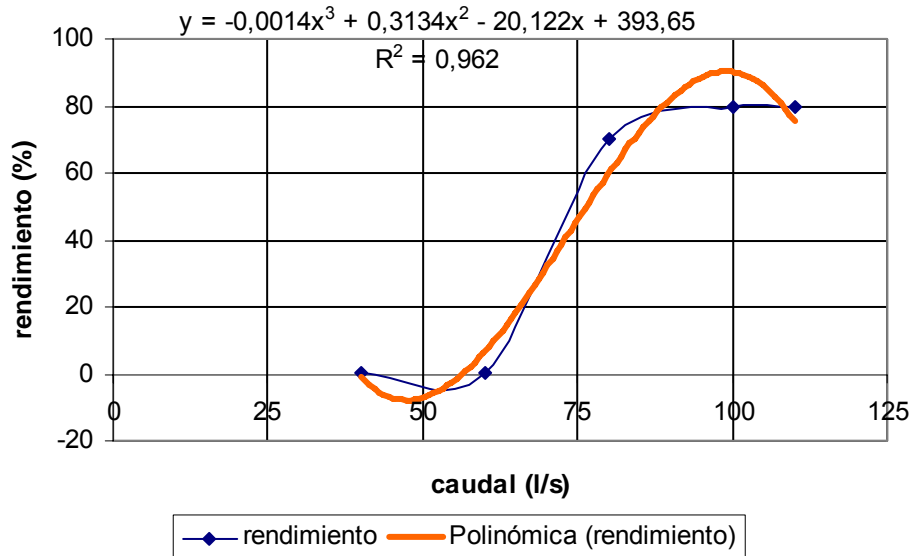
El cuarto *co-estado* se encarga de determinar los niveles de potencia, rendimiento y revoluciones/minuto de la turbina basándose en el porcentaje de apertura de la válvula ya sea el introducido o el registrado.

Inicialmente la presentación de la subrutina muestra los valores nominales de la turbina como lo son la velocidad: 1600rpm, potencia: 20kW, caída neta: 30m, caudal máximo: 100l/s, esto para que el usuario pueda mantener la referencia de los rangos de trabajo de la turbina. Para los demás datos se utiliza el porcentaje de apertura o el valor de caudal para obtener los datos según las características ofrecidas por el fabricante, y se muestran a continuación.

**Tabla 5** Eficiencia de la turbina [8]

<b>Caudal (l/s)</b>	<b>Rendimiento (%)</b>	<b>Potencia (kW)</b>
110	80	22.5
100	80	20
80	70	17.9
60	0.55	11.0
40	0.4	8.0

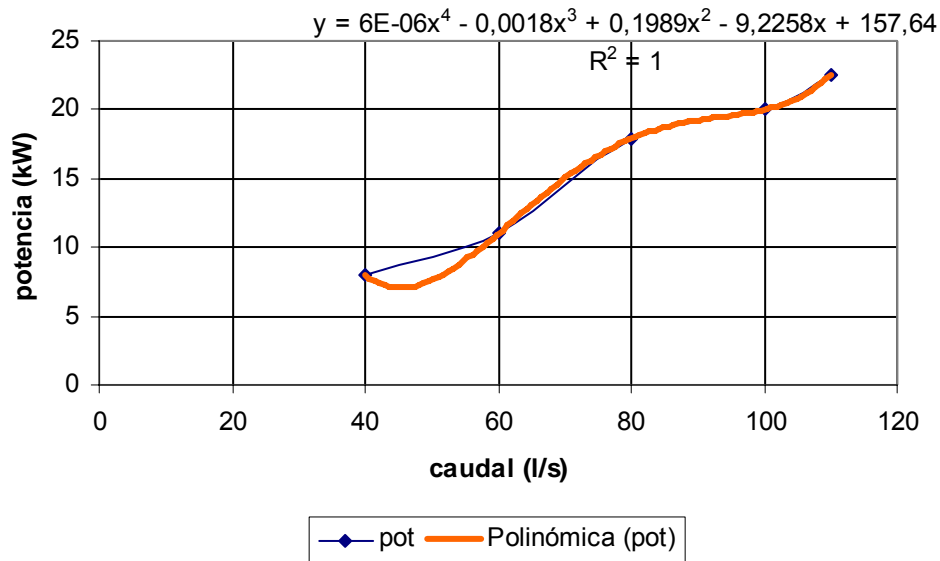
Con la tabla 5 se puede determinar los gráficos que muestren las características para cada valor



**Figura 26** Curva características del rendimiento de la turbina y el caudal

La gráfica muestra el comportamiento del rendimiento de la turbina justamente dentro de los valores principales del caudal. Para caudales de flujo menores de un 60% el rendimiento su comportamiento presenta pérdidas de eficiencia, por esta razón se le indica al usuario los valores de caudal restringidos. La ecuación presente en la gráfica indica el comportamiento de la turbina en rendimiento, ésta se presenta con una precisión de 96.2% descrito por el polinomio para el rango de trabajo establecido; de tal forma que el programa toma como entrada el valor del caudal introducido y lo evalúa en el polinomio de orden 3. La curva de trazo más grueso es el indicado por la aproximación polinomial.

Igual sucede con la gráfica y los datos de la potencia de entrega de la turbina.



**Figura 27** Curva característica para los valores de potencia de la turbina

Esta ecuación muestra igualmente la disminución en la potencia que se da al percibir un valor menor el 60% de caudal. La ecuación descrita en la gráfica es la programada para indicar la potencia entregada por la turbina a ciertos caudales introducidos. El valor de rpm se obtiene una vez que se haya calculado el rendimiento, con el diseño de indicar 1600rpm a 100% de rendimiento.

El programa realiza varias funciones al percibir una disminución de hasta el 40% del caudal para no afectar el funcionamiento del sistema. Como se había descrito se proyectan indicadores de alerta y además el polinomio no ejecuta más cálculos, éste valor es el límite establecido para el sistema. Si el porcentaje de caudal es 40% ó 20% igualmente se evalúa sobre el caudal = 40l/s, se envía el mismo dato de potencia, rendimiento y rpm al usuario, no se encuentra variación esto para no afectar el resto del sistema, con valores de poca efectividad. Se espera que el usuario se dé cuenta del suceso y aumente la apertura o el caudal de entrada, para no forzar el sistema.

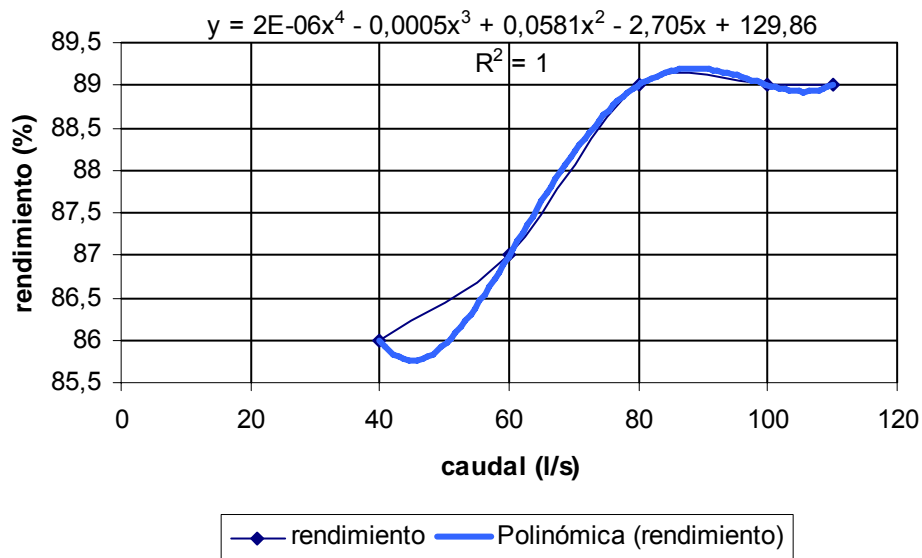
### 5.3.6 Rutina de características del generador

El quinto co-estado está programado para realizar el cálculo de los valores de potencia de entrega, rendimiento y revoluciones/minuto del generador utilizando el dato de caudal ya sea introducido o calculado por la apertura de la válvula. Primeramente, se introduce una guía para el usuario con la velocidad máxima del generador: 1800rpm, potencia de entrega: 20kW, la tensión de fase: 120V, la frecuencia de trabajo: 60Hz y el factor de potencia de trabajo: 1.0/0.8.

También se tienen datos ofrecidos por el fabricante para obtener el comportamiento del generador, a continuación se muestra el gráfico del rendimiento.

**Tabla 6** Eficiencia del generador [8]

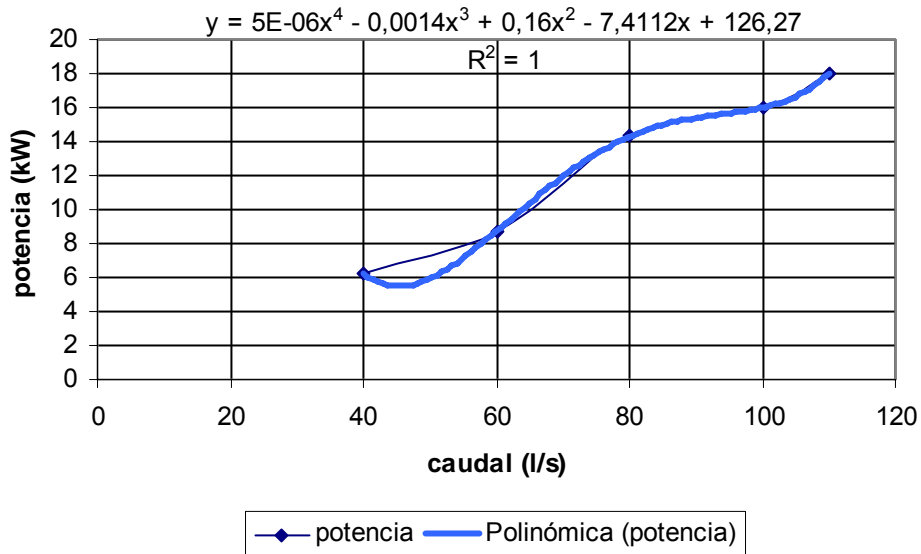
<b>Caudal (l/s)</b>	<b>Rendimiento (%)</b>	<b>Potencia (kW)</b>
110	89	18
100	89	16
80	89	14.3
60	87	8.7
40	86	6.2



**Figura 28** Curva características del rendimiento del generador y el caudal

Igualmente, la ecuación presente en el gráfico anterior se programa en el controlador, mantiene el rango de operación hasta el 40% del caudal aún cuando la apertura sea mayor, pues el dato está evaluado sobre el caudal de entrada.

La siguiente gráfica muestra el comportamiento del generador en cuanto a su potencia de entrega, determina para el usuario lo que finalmente recibirá del sistema.



**Figura 29** Curva característica para los valores de potencia del generador

Esta ecuación de orden 4 descrita en la gráfica, describe la aproximación del comportamiento de los puntos de potencia detallados como entrega para el generador. Se realiza el mismo tipo de análisis para la programación de esta subrutina, pues se consideran los cálculos apropiados hasta el 40% del nivel de caudal registrado. Las revoluciones/minuto son establecidas por el rendimiento del generador calculado.

### 5.3.7 Rutina para el ingreso de valores de carga

Esta subrutina está comprendida en el sexto co-estado, donde se determina lo dispuesto por la carga según el usuario y lo que entrega el generador. Aquí el usuario introduce la corriente y el factor de potencia que consume la carga, para realizar los cálculos de potencia principalmente.

Se determina la potencia real y la potencia reactiva entregadas por el generador, análisis desplegado en la sección 5.2.2 y el apéndice A.2. Donde se obtiene las ecuaciones que se programan en esta subrutina.

$$\theta = \cos^{-1}(fp)$$

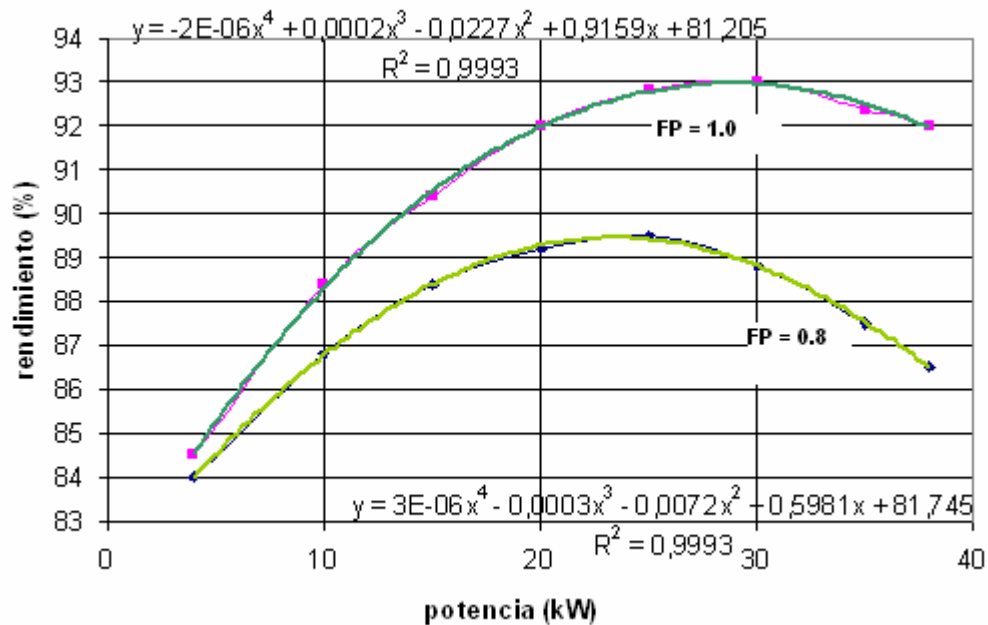
$$P_{entregada} = |I_a * X_d * \cos(\theta)|$$

$$Q_{entregada} = |I_a * X_d * \sin(\theta)|$$

El fabricante del generador ofrece otra gráfica del comportamiento o rendimiento de éste, bajo cargas con diferentes niveles de exigencia de potencia y factor de potencia.

**Tabla 7** Rendimiento del generador para cargas con diferentes niveles de potencia y diferentes factores de potencia [8]

Carga	Potencia	
	FP = 0.8	FP = 1.0
4	84	84,5
10	86,8	88,4
15	88,4	90,4
20	89,2	92
25	89,5	92,8
30	88,8	93
35	87,5	92,4
38	86,5	92



**Figura 30** Curva característica del rendimiento del generador a cargas con diferentes niveles de potencia y factor de potencia



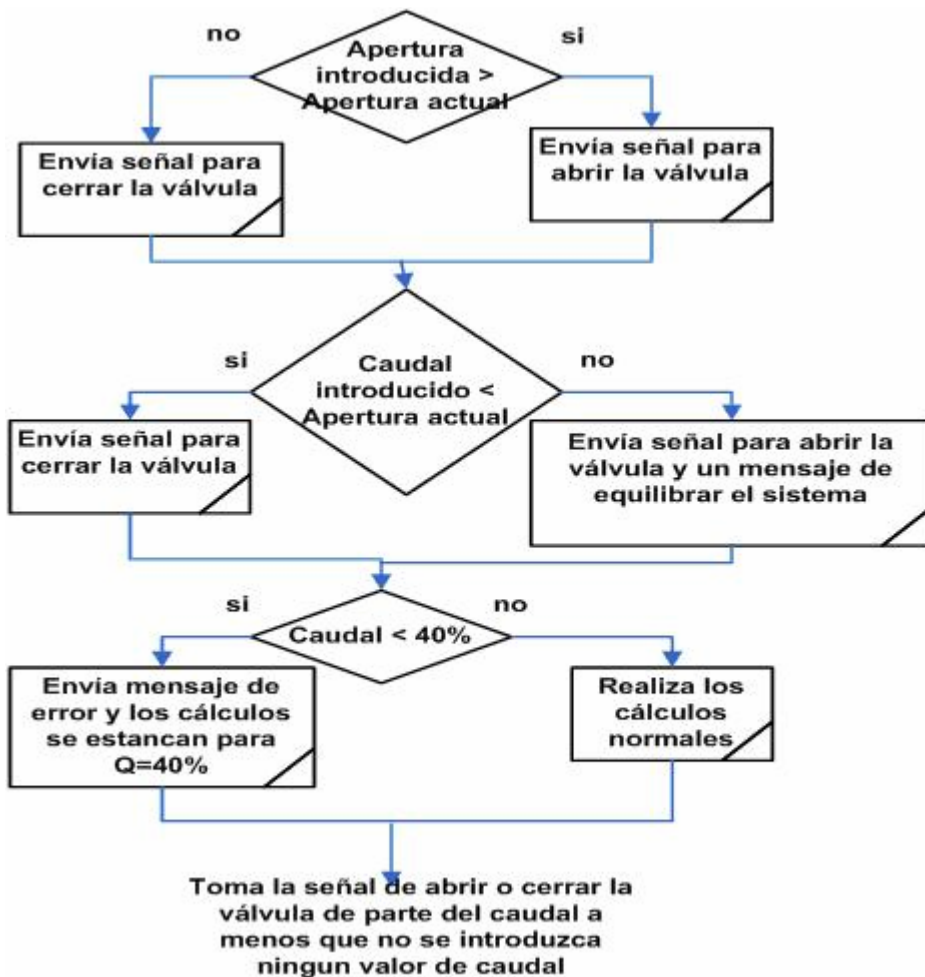
En esta subrutina se realiza el ingreso de los valores por parte del usuario al sistema. Se solicita primero el ingreso de la apertura de la válvula y se compara con la apertura actual registrada por el sensor de posición; si la apertura es diferente se ejecuta el acceso a la subrutina que se encarga de mover el motor paso a paso. Cambiando el valor de apertura actual por el introducido, ya sea cerrando o abriendo la válvula. Como se había mencionado antes no se puede realizar una orden mayor de 40 pasos, ya que es el límite físico del movimiento del motor ofrecido por el sensor de posición. Después, el nuevo valor de variable se puede utilizar por las demás subrutinas para sus cálculos.

El segundo dato a solicitar es el del caudal antes de la entrada de la válvula. Si el usuario no ingresa ningún dato, el sistema toma como caudal el valor de la apertura; pero si el dato introducido de caudal es mayor que la apertura actual el sistema realiza una apertura de la válvula, con el movimiento del motor, para aprovechar el recurso y obtener un mejor rendimiento de los dispositivos. Si en cambio, el valor del caudal es menor que la apertura actual no se realiza ningún cambio en la apertura, solo se activa la alerta en caso de llegar a 40% o menos de caudal.

Los siguientes valores a ingresar son la corriente y el factor de potencia de la carga, la corriente se utiliza como  $I_a$  para calcular los valores de potencia antes descritos (Potencia real y Potencia reactiva).

El algoritmo de la figura 31 muestra como son tratados los datos ingresados por el usuario. Se mantiene una apertura de válvula actual que es la registrada por el sensor, se compara con la introducida por el usuario, si no se ingresa ningún valor se toma por defecto el valor actual para realizar los cálculos; si el valor introducido es mayor que el actual se envía la señal de abrir la válvula, de no ser así se pregunta por el caudal. Si no hay ningún valor introducido se toma la apertura actual, si el valor de caudal introducido es mayor que la apertura actual, se envía la señal de abrir la

válvula y un mensaje de alerta al usuario pues el sistema prefiere mantener una mayor apertura para aprovechar el recurso, así el sistema equilibra los valores.



**Figura 31** Algoritmo del programa principal para el ingreso de los datos por el usuario

Los últimos co-estados están encargados de detener la ejecución del programa, cuando el usuario oprima el pulsadores 1 ó oprima la tecla “S”. Los cuales están latentes hasta que el usuario los utilice sin afectar los procesos anteriores.

## **Capítulo 6: Análisis de Resultados**

A continuación se presentan los resultados obtenidos mediante tablas, gráficos y diagramas, se explican las condiciones en que estos se obtuvieron. Se realiza el análisis de estos resultados basándose en los objetivos propuestos y en la teoría antes establecida. Se muestran a continuación los alcances logrados con el desarrollo del proyecto.

El programa principal posee dos maneras independientes de mostrarse al usuario. La primera se desarrolla en la consola donde se puede determinar que los cálculos son procesados sin afectar el funcionamiento del programa general, ni de los demás procesos de la computadora. La siguiente figura muestra la forma como aparecen los datos en la consola.



La otra manera de mostrarle los datos al usuario es con la presentación de páginas *web html* y mantiene como ventaja la presentación de la información, pues es visualmente más atractiva para el usuario. Otro beneficio es que para poder desplegar estas páginas *web*, se necesita utilizar el cable cruzado de la conexión Ethernet; esto ayuda a ingresar al programa desde cualquier computador dentro de la red donde se haya instalado. Si bien la conexión puede ser con la intranet de la empresa, también se puede conectar a una red conformada solamente por la PC y el *Rabbit*. A continuación se muestra la página *html* principal.



**Figura 33** Página *html* inicial del programa principal

Uno de los problemas de realizar este tipo de interfaz gráfica es la programación, ya que no se pueden utilizar los métodos multitarea y esto afecta la programación de cálculos complejos; no todos las instrucciones para realizar los polinomios y las fórmulas trigonométricas se pueden utilizar. Así, para programar estas fórmulas se debe recurrir a más funciones, esto provoca que el sistema de compilación no lo soporte, cause problemas al cargar las otras páginas *html* y los demás programas del computador generen problemas de aplicación. Este método es más complicado de programar.

Un inconveniente general de utilizar el controlador *Rabbit*, es la aplicación de las fórmulas de análisis que necesiten grados, radianes, ángulos, funciones en forma polar o compleja, funciones trigonométricas en estos formatos y valores absolutos de las funciones; pues sólo es posible programar funciones simples, lo que ocasiona lentitud en el desarrollo de las rutinas.

Se puede especificar que el controlador *Rabbit*, funciona para realizar la lectura de entradas analógicas o digitales, disponer del registro de sensores, mantener el control de las salidas analógicas y digitales, así como la ubicación de la tarjeta de pruebas que brinda un apoyo al usuario; esto tanto en la parte de *hardware* como de *software*. Además, que se pueden calibrar las entradas y salidas al valor que el usuario considere como inicio (0.0000v). Por estar enfocado a sistemas de prototipo el sistema no permite el desarrollo de interfaces gráficas, para mantener un ambiente amigable con un usuario no familiarizado con el programa.

El programa que utiliza la interfaz *html* realiza las mismas preguntas, de solicitar al usuario la apertura, que se desea mantener y el nivel de caudal para determinar los valores de los demás dispositivos, a estas condiciones. Además, requiere de los valores de característicos de la carga (corriente de consumo y factor de potencia).

Introduzca los valores de los datos  
que se solicitan...

DATO	VALOR
<i>Apertura de la valvula</i>	0 <input type="text"/> (%)
<i>Caudal antes de la turbina</i>	0 <input type="text"/> (l/s)
<i>FP de la carga</i>	0 <input type="text"/>
<i>Corriente de consumo de la carga</i>	0 <input type="text"/> (A)

---

**Valores Nominales Turbina**

*Velocidad = 1600rpm.  
 Potencia = 20kW  
 Caida neta = 30m.  
 Caudal nominal = 100l/s*

**Valores Nominales del Generador**

*Velocidad = 1800 rpm  
 Potencia = 20kW  
 Tension = 120/240v  
 Frecuencia = 60Hz  
 FP = 0.8*

[INICIO](#)

**Figura 34** Página *html* que acepta los datos introducidos por el usuario

Una vez que el usuario introduce los datos, éstos son recibidos por el programa principal y analizados para realizar luego los cálculos pertinentes, utilizando el algoritmo (figura 31); recordando que ambos tipos de presentación de los datos realizan internamente los mismos procedimientos de análisis.

Uno de los dispositivos es el motor paso a paso TEAC #147690790-50 tipo 5325e descrito en la sección 5.2.3; conociendo la configuración que permite el movimiento a favor (CW) o en contra (CCW) de las manecillas del reloj. Se realiza un programa que no permite el movimiento del motor mayor de 240° o sea 40 pasos de 6°, esto es comparando la cantidad de porcentaje que debe abrir o cerrar, siendo 40 pasos el máximo de apertura (100%). El generar la alimentación de una bobina, según la configuración de la tabla 4, se logra utilizando *digOut* e indicando el número de la salida digital y el dato que se necesite (1 ó 0). Como se explicó anteriormente se necesita una interfaz de corriente entre el *Rabbit* y el motor (figura 21), para que sea posible el manejo de éste.

Como se describió, el valor de tensión registrado por el controlador proveniente del circuito adaptador a lazo de corriente (0.4 – 2.0V), representa el rango de apertura de la válvula 0 - 100%. Lo cual se identifica internamente por el desarrollo de las ecuaciones características del módulo XTR101AP.

Un inconveniente que presenta la programación de las rutinas bajo un formato multitarea para el manejo del motor, se presenta cuando se está ejecutando la subrutina de manejo del motor, pues sostiene un ciclo mientras se realizan todos los pasos necesarios para alcanzar el nivel de referencia y debe leer la posición actual para compararla con la referencia; mientras la subrutina realiza estas acciones se detienen los demás procesos.

Conectado al eje del motor CD, se encuentra el sensor de posición (potenciómetro de 1k $\Omega$ ), este dispositivo es el que le induce al motor mantener un límite de acción de 240°. Pero antes de ser introducido al *Rabbit* se debe transformar su tensión entregada a un rango de estandarización de 4 – 20mA, con el XTR101AP de BB (Burr - Brown), dispositivo que está dispuesto en módulos de apoyo para la realización de pruebas, en el departamento. Para utilizar estos módulos se introdujo en una entrada 30V para la alimentación del sistema completo, también se configuró el sensor en un circuito con una fuente y tierra aislados, para que se obtuvieran de éste un rango de 0 – 50mV; datos que se ingresan al módulo obteniendo a la salida, los valores del rango 4 – 20mA (ver figura 22).

A continuación se muestran los datos reales obtenidos en el sensor y a la salida del módulo, para determinar si cumplía con lo que establecía el fabricante del dispositivo, además, obtener la gráfica de comportamiento. Los datos se tomaron con dos multímetros, colocados a la salida del sensor y a la salida del módulo de conversión, a través de una resistencia de 100 $\Omega$  en paralelo.



**Tabla 8** Datos medidos para el sensor de posición

<i>Tensión del sensor (mV)</i>	<i>Salida del XTR101 (mA)</i>	<i>A través de la resistencia 100Ω (mV)</i>
0	0,39	39
5	0,54	54
10	0,69	69
15	0,84	84
20	1	100
25	1,15	115
30	1,3	130
35	1,45	145
40	1,6	160
45	1,76	176
50	1,93	193
52,7	2	200

Estos datos muestran la precisión con que trabaja el XTR101, a pesar de esto, puede ser calibrado en el caso de presentarse una salida incorrecta de los datos.

Una vez que se tiene el dato del sensor en el rango permitido, es leído por *analnVolts(1)* lo que indica la entrada analógica que se está utilizando. Como se mencionó antes en este punto se presentan problemas de ruido, por lo que para remediarlo se dieron soluciones tanto en la parte de *hardware* como en *software*. Se dispuso de cable de mayor calibre (calibre #20 y #18) para las conexiones externas y el ingreso de datos al *Rabbit*; se realizó la prueba del sistema general en diferentes ambientes de trabajo supervisados, se utilizó un sensor de posición preciso.

Finalmente, se consideró realizar la lectura de la entrada analógica 10 veces y utilizar un promedio de éstas para los demás cálculos, junto con, el ejecutar el ciclo de lecturas cada 5 segundos. Estableciendo todas las pruebas juntas se obtuvo un valor de “voltaje” de entrada más estable; esto no afectó las demás subrutinas dado que el sistema en co-estados permite que cada proceso sea independiente del siguiente, pero comparten entre los estados las variables declaradas globales. Éstas son las que cambian en todo el sistema, cuando algún valor es dispuesto por el sensor o por el usuario.

En la válvula se utiliza el comportamiento de un obturador lineal, por lo que se determina el valor del caudal según la apertura de la válvula.

El comportamiento de la turbina se establece teóricamente por los datos obtenidos del fabricante, dado que físicamente no es posible tomarlos pues el sistema hidráulico actualmente no funciona. Se extiende este análisis hacia el gráfico de la figura 26 de la sección 5.3.5, para retomar las características que éste muestra.

La gráfica determina el comportamiento del rendimiento de la turbina justamente dentro de los valores principales del caudal; en caudales entrantes menores del 40%, no se determina valor para el rendimiento, por lo que el programa no realiza cálculos para evitar errores de rango en los demás dispositivos.

Para valores de caudal menores del 55%, el rendimiento se desgasta en pérdidas mecánicas o de fricción, entre otras. Estos valores se consideran operativamente restringidos, por lo que el programa principal se lo indica al usuario. Después del 60% de caudal, el rendimiento aumenta linealmente hasta llegar a ingresar un 90% y en el último rango de 90 – 100% de caudal (100 l/s), el comportamiento es cuadrático por lo que el crecimiento de la curva es más rápido. Siguiendo este comportamiento hasta el 100% de caudal, pues como se muestra después de este punto la característica es de disminuir de igual manera. Este comportamiento encontrado en la gráfica está descrito en el programa, por la ecuación que se observa en ésta, con un alto grado de certeza o aproximación (96.2%).

El rendimiento máximo de la turbina es de 87%, manteniendo proporcional su comportamiento mientras el sistema presenta una disminución del caudal hasta el 16%. Lo que indica que mientras el caudal se mantenga entre los 50 -100 l/s el sistema tendrá energía mecánica que entregar. Esta turbina presenta una característica de bajo rendimiento, pero es compensado por el rango tan amplio de caudal bajo el cual puede trabajar. Esta característica se la muestra el sistema al usuario cuando se introducen los datos de apertura de la válvula y caudal promedio.

Se debe indicar con base en estos datos, la aproximación de la velocidad de la turbina en rpm. Igual sucede con la gráfica de la figura 27 (sección 5.3.5 ) y los datos de la potencia de entrega de la turbina.

La ecuación de orden 4 que se introduce en la rutina para obtener la potencia de la turbina, muestra en su comportamiento en lo más bajo del caudal 40 – 60% características semejantes al rendimiento, pues la potencia no aumenta más de 2kW (8 – 10kW) en este rango. Es recomendable utilizar un caudal mayor de 60% para obtener una potencia aceptable, pues la turbina aumenta cerca de 10kW en el rango de 60 – 100%, ya que el crecimiento es más acelerado; además, cuando se sobrepasa el caudal máximo la potencia sigue aumentando aceleradamente.

Se observa que la turbina de flujo cruzado no necesita mucha potencia de entrada (energía hidráulica) para obtener potencia mecánica a la salida, pues la turbina de flujo cruzado toma el caudal entrante y lo retroalimenta internamente, o sea lo vuelve a pasar por el sistema de álabes lo que le da más velocidad de acción y genera mayor potencia. Se indica que esta turbina es indicada para lugares con un salto entre 1 - 40m, lo que indica que si el flujo entrante no es muy potente la turbina lo acelera.

Tomando un caudal de 80 l/s, se tiene una potencia de 18kW y un rendimiento de 70%, para una velocidad de aproximadamente 1120rpm. Mientras que para 40 l/s, el rendimiento es de 0.4% para generar una potencia de 8kW, esto con 7rpm; o sea el movimiento es casi nulo, pero por la realimentación del flujo se acelera y aumenta la potencia de salida. El cálculo de rpm lo realiza la subrutina de control de turbina y del generador, basándose en la característica de rendimiento en forma proporcional.

Extrayendo las gráficas del generador de la sección 5.3.6, se puede realizar el análisis de su comportamiento. El generador presenta para su rendimiento una ecuación de orden 4, que muestra un rápido crecimiento en los valores de caudal del rango entre 60 - 100%, a pesar de esto en los valores críticos presenta un mínimo de

85% pero un máximo de 89% en el rendimiento total del generador. Lo que indica que el rango de variación de rendimiento no es significativo para el rango tan grande de caudal presente (60 – 100 l/s).

Se puede demostrar evaluando las ecuaciones de rendimiento del generador y la turbina que para un caudal de 90 l/s, se tiene en la turbina un rendimiento de 82% y en el generador 89%. Siendo una máquina más eficiente el generador, pero mostrando que ambas trabajando juntas hacen un sistema eficiente.

La gráfica de potencia para el generador de la figura 29 en la sección 5.3.6 presenta la curva de potencia del generador y posee un comportamiento semejante al de potencia de la turbina, con un crecimiento acelerado y un cambio de 10kW en un caudal de 60 – 100 l/s. La ecuación descrita en la gráfica describe adecuadamente el comportamiento de la potencia del generador, para el rango seleccionado según los datos ofrecidos por el fabricante. Como era de esperarse por los demás datos analizados el comportamiento en el rango de 40 – 60 l/s, disminuye significativamente cerca de 3kW.

Finalmente, en el programa principal se introducen los datos de la corriente que consume y el factor de potencia de la carga, según los cálculos expuestos en el apéndice A.2; para la corriente se esperan valores aproximados a 53 A., pues el valor introducido es  $I_a$  (corriente de armadura), y los cálculos determinan que es la carga máxima con  $\text{fp} = 0.8$  en atraso, donde la tensión del inducido es 240v. Si bien se muestra en la sección 5.2.3, que  $V_t = V_\phi$  por la configuración en delta del bobinado, en caso de desconectar súbitamente la carga del generador, la corriente  $I_a = 0$  y  $E_a = V_\phi$ . Puesto que la corriente de campo no ha variado,  $E_a$  no varía y tanto  $V_\phi$  como  $V_t$  deben incrementarse para igualar a  $E_a$ .

El factor de potencia en la carga afecta significativamente los niveles de potencia y el comportamiento del generador, ya que puede mantener una característica de generador sobreexcitado entregando  $I_a$  en atraso, pues entrega

potencia reactiva  $Q$  al sistema o sea el sistema actúa como un condensador. La característica de motor subexcitado alimentándose de  $I_a$  en atraso, suministra igual cantidad de potencia real a una corriente en adelanto al sistema o sea toma la potencia reactiva del sistema y actúa como un inductor. Sin embargo, la potencia entregada por el generador es igual en ambos casos. La potencia reactiva es positiva para factores de potencia en atraso, ya que el ángulo del factor de potencia es positivo.

Teniendo una vez los valores de potencia real y reactiva entregada por el sistema, se puede determinar el valor de potencia sobrante, o sea que si el sistema entrega 20kW a su máxima transferencia de potencia, se puede introducir la carga en un circuito junto con resistencias de disipación o mejor con baterías de carga. Así, si se coloca para una potencia máxima entregada de (20kW), una carga de 15kW se entregaría 5kW para las baterías; para mantener energía almacenada, la cual pueda ser utilizada posteriormente.

## Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones

### 7.1. Conclusiones

- Para el desarrollo de un proyecto enfocado en *hardware* (adquisición de datos, manejo de actuadores, lectura de sensores, entradas y salidas digitales o analógicas, uso de teclados, pantallas, conexión Ethernet, etc) se debe utilizar el *Rabbit SmartCat BL2100*, por las características que presenta.
- Al desarrollar interfaz gráficas para el manejo de otros usuarios con el *Rabbit SmartCat BL2100*, se debe programar en otro lenguaje de alto nivel y adaptarlo internamente a los cálculos del controlador.
- La aplicación y realización de cálculos complejos con el *Rabbit SmartCat BL2100*, provoca problemas de ejecución de la rutina principal y de los demás programas instalados.
- Una ventaja importante de utilizar el *Rabbit SmartCat BL2100* en el desarrollo de *software* es implementar el modo multitarea, para la ejecución de subrutinas.
- La conexión de Ethernet del *Rabbit SmartCat BL2100* ofrece la oportunidad de realizar acceso remoto desde cualquier PC de la intranet, que tenga instalado el programa principal.
- Se utiliza la característica de lazo de corriente para estandarizar los valores de los sensores.
- El desarrollo del sistema de simulación muestra que no es posible utilizar la válvula tipo mariposa para el desarrollo de un control automático de la planta.
- Dependiendo el consumo de la carga el sistema de simulación permite mantener baterías, para almacenar energía.
- Se han cumplido satisfactoriamente los objetivos y metas propuestas para este proyecto.

## 7.2. Recomendaciones

- El sistema *Rabbit SmartCat BL2100*, no se puede utilizar para realizar una interfaz gráfica, cuando se va a desarrollar cálculos matemáticos por lo que se recomienda no esperar realizar proyectos enfocados en el desarrollo de *software* con este dispositivo.
- Por parte del departamento (I+D), adquirir los módulos adaptadores complementarios del *Rabbit Coyote BL2500* para completar el desarrollo del sistema general.
- La adquisición inmediata de los dispositivos faltantes para proceder a la finalización del sistema general. Como lo son la válvula de acceso, el motor de manejo de ésta, dispositivos de control; sensores de presión, frecuencia, tensión, corriente, posición, rpm., temperatura y flujo. Así, como la instrumentación adecuada para el manejo de todos los dispositivos, arreglar al parte física de la tubería y del armazón completo. Poner a funcionar toda la miniplanta del laboratorio y los controles de frecuencia y carga respectivos.
- Se realiza el comentario de extender la necesidad de terminar este sistema general de la miniplanta hidroeléctrica, para colocarla prontamente en las comunidades, con la combinación de fuentes energéticas alternas como sería eólica-hidráulica-diésel ó solar-hidráulica-diésel.

## Bibliografía

- [1] A. V. Ivanov-Smolenski; "Máquinas Eléctricas"; tomo 2; editorial Mir. Moscú; 1984; URSS.
- [2] Ayesa, Eduardo; de Gracia, Mónica; "Modelado Matemático de Sistemas Hidráulicos"; [en línea]; Escuela Superior de Ingenieros; Dpto. de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Automática; 2004; [visitado noviembre 2005]; Disponible en [www1.ceit.es/Asignaturas/ingsistemas1/hidraulicos.pdf](http://www1.ceit.es/Asignaturas/ingsistemas1/hidraulicos.pdf).
- [3] Coz, Federico... [et. al.]; "Manual de mini y micro centrales hidroeléctricas: una guía para el desarrollo de proyectos"; ITGD; Lima; Perú; 1995.
- [4] Chapman, Stephen J; "Máquinas Eléctricas"; 3° ed.; Mc Graw Hill; Colombia; 2000.
- [5] GiCi-Grupo de Investigación en Control Industrial; "Control de válvulas"; [en línea]; 2000; [visitado septiembre 2005]; Disponible en [www.univalle.edu.co](http://www.univalle.edu.co)
- [6] Grainger, John y Stevenson, William Jr; "Análisis de sistemas de Potencia"; 1° ed.; Mc Graw Hill; México; 1996.
- [7] H.W.King y E.F. Brater; "Handbook of Hydraulics"; McGraw-Hill Book Co.; New York; 1963.
- [8] Instituto Costarricense de electricidad; "Cartel de contratación directa #1001-3166-2004"; 2004; Departamento de Ingeniería Mecánica; San José; Costa Rica.
- [9] Instituto Costarricense de electricidad; "Historia: ¿Cómo Nacimos?"; [en línea]; 2005; [visitado Julio 2005]; Disponible en [www.ice.go.cr](http://www.ice.go.cr)
- [10] Iriarte, Eduardo; "Control de Válvula"; Departamento de Ingeniería Industrial; [en línea]; 2003; [visitado diciembre 2005]; Disponible en [ftp://fing.uncu.edu.ar/catedras/industrial/control/archivos/control](http://fing.uncu.edu.ar/catedras/industrial/control/archivos/control)
- [11] Khennas, Smail y Barnnett, Andrew; "Best practices for sustainable development of micro hydro power in developing countries"; Department for International Development, UK and The World Bank; [en línea]; Marzo 2000; [visitado Julio 2005]; Disponible en [www.oneworld.org/itdg](http://www.oneworld.org/itdg)
- [12] Kuo, Benjamín C.; "Sistemas de Control Automático"; séptima edición; editorial Prentice Hall; México; 1996.



- [13] Microsoft encarta 2002; "Densidad del agua"; [en línea]; 2002; [visitado octubre 2005]; Disponible en [www.microsoft.com](http://www.microsoft.com)
- [14] Maher, Phillip y Smith, Nigel; "Pico Hidro: potencia para aldeas"; Departamento para el desarrollo local de Gran Bretaña; 2° edición; mayo; 2001.
- [15] Maher, Phillip; "The pico power pack"; 2° version; mayo; 2001.
- [16] Marathon Electric; "Magnaplug Generator, Installation and Operation"; [en línea]; [visitado Julio 2005]; Disponible en [www.marathonelectric.com](http://www.marathonelectric.com)
- [17] Maresa; "Técnicas"; [en línea]; [visitado diciembre 2005]; Disponible en [www.maresa.com/pdf/00%20varias/](http://www.maresa.com/pdf/00%20varias/)
- [18] New, Dan; "Intro to Hydropower, Part 1: Systems Overview"; [en línea]; octubre 2004; [visitado Julio 2005]; Disponible en [www.homepower.com](http://www.homepower.com)
- [19] New, Dan; "Intro to Hydropower, Part 2: Measuring Head & Flow"; [en línea]; diciembre 2004; [visitado Julio 2005]; Disponible en [www.homepower.com](http://www.homepower.com)
- [20] Ogata, Katsuhiko; "Sistemas de Control en Tiempo Discreto"; segunda edición; editorial Pearson Educación; México; 1995.
- [21] Ogata, Katsuhiko; "Dinámica de sistemas"; editorial Prentice Hall; México; 1987.
- [22] Penche, Celso; "Manual de la pequeña hidráulica: Como llevar a un buen fin una minicentral hidroeléctrica"; Universidad Politécnica de Madrid; Dirección General de Energía (DG XVII); [en línea]; 1998; [visitado Julio 2005]; Disponible en [html://europa.eu.int/en/comm/dg17/dg17home.htm](http://html://europa.eu.int/en/comm/dg17/dg17home.htm).
- [23] R. Silvester; "Specific Energy and Force Equations in Open-Channel Flow, Water y Power"; March; 1961.
- [24] Rabbit Semiconductors; "Smartcat (BL2100), C-Programmable Single-Board Computer with Ethernet and Operator Interface, User's Manual"; [en línea]; 2003; [visitado Julio 2005]; Disponible en [www.rabbitsemiconductors.com/products](http://www.rabbitsemiconductors.com/products) ó [www.zworld.com/products](http://www.zworld.com/products).
- [25] Rabbit Semiconductors; "Dynamic C function Reference for Rabbit Semiconductor Microprocessors Integrated C Development System"; [en línea]; 2003; [visitado Julio 2005]; Disponible en [www.rabbitsemiconductors.com/products](http://www.rabbitsemiconductors.com/products) ó [www.zworld.com/products](http://www.zworld.com/products).

- [26] Ramírez, Saúl...[et. al.]; “Micro Centrales Hidroeléctricas: Una alternativa para el desarrollo rural ”; ITDG Programa de energía, infraestructura y servicios básicos; Lima; Perú; 2004.
- [27] Umans, Stephen D y Kingsley Charles; “Máquinas Eléctricas”; 5° ed.; Mc Graw Hill; México; 1992.
- [28] V.L. Streeter y E.B. Wylie; “Fluid Mechanics”; McGraw-Hill Book Co.; New York; 1975.
- [29] White, Mark; “PIC stepper motor controller”; [en línea]; 1995;[visitado Julio 2005]; Disponible en [www.markwhite.com](http://www.markwhite.com)

## Apéndices

### A.1 Glosario, abreviaturas y simbología

**Aforo:** Efecto de aforar (valuar o medir).

**Álabes:** Palas o hojas de la turbina impulsadas por agua a presión donde que baja del pozo o tubería y logra mover el eje central.

**Batería:** Usado para almacenar electricidad; baterías recargables (Plomo-Acido o Niquel-Cadmio) pueden usarse para iluminar casas que están demasiado distantes del generador para conectarse a la red de distribución.

**Carga:** Cualquier dispositivo que consume la potencia producida por el generador (o por la turbina).

**Carga Mecánica:** Se refiere a una máquina la cual se conecta al eje de la turbina, a menudo por medio de un sistema de poleas, de manera que se extrae potencia mecánica directamente de la turbina. La fuerza giratoria del rodete de la turbina puede utilizarse directamente para hacer girar maquinarias tales como molinos de granos, equipos de carpintería, etc.

**Caudal:** Cantidad de agua que circula por un curso de agua ya sea en forma natural o no natural.

**Corriente:** Movimiento de las cargas en un conductor. Su unidad es amperios (A).

**Eficiencia:** Eficiencia es la palabra que se utiliza para expresar qué tan buena o mala es la conversión de la potencia de un tipo a otro. Una turbina que tiene una eficiencia del 70% convertirá 70% de la potencia hidráulica en potencia mecánica (los restantes 30% se pierden). La eficiencia del sistema resulta de la combinación de las eficiencias de todos los procesos en conjunto.

**Energía cinética:** La energía asociada al movimiento.

**Energía potencial:** Está relacionada con la posición.

**Energía:** capacidad de un sistema físico para realizar trabajo. La materia posee energía como resultado de su movimiento o de su posición en relación con las fuerzas que actúan sobre ella.

**Estación de aforo:** Nombre con el que se conoce a las instalaciones que se destinan a la medición de flujos.

**Factor de potencia:** El cociente de dividir la potencia real medida en kW, por la potencia aparente medida en kVA.

**Fuente de agua:** Arroyo o a veces un canal de irrigación. Pequeños caudales también pueden ser derivados de los caudales grandes ríos. Lo importante es que la fuente de agua sea confiable en cuanto al caudal, y que el agua no sea requerida por otras personas para otros propósitos. Los ojos de agua son excelentes fuentes, visto que se puede contar con ellos aún en la temporada de sequía, donde usualmente su agua es limpia.

**Generador:** Máquina que transforma la energía mecánica en eléctrica.

**Golpe de ariete:** El agua que se dirige hacia la entrada de la turbina a gran velocidad resulta parcialmente comprimida por el llamado efecto de presión dinámica o efecto ariete.

**Minigeneración hidráulica:** Sistemas de potencia hidráulica con generación eléctrica en un rango de 5 - 20kW.

**Potencia:** Fuerza motora de una máquina; Fuerza que se aplica a una palanca, polea, torno, etc., para vencer la resistencia. Energía que suministra un generador en cada unidad de tiempo. Trabajo producido en la unidad de tiempo.

**Rendimiento de una turbina:** Tiene en cuenta las pérdidas por fricción y turbulencia en la caja espiral, el anillo distribuidor, los álabes distribuidores, el rodete y el tubo de aspiración de una turbina, así como la energía cinética que se pierde a la salida de este último.

**Sistema de Distribución:** Transmite la electricidad desde el generador hacia las casas de los usuarios.

**Tensión:** Para mover una partícula cargada de un punto a otro del conductor hay que realizar trabajo. La cantidad de energía necesaria para efectuar ese trabajo sobre una partícula de carga unidad se conoce como diferencia de potencial entre ambos puntos. Esta magnitud se mide en voltios (v).

**Turbina:** Motor hidráulico consistente en una rueda encerrada en un tambor y provista de paletas curvas sobre las cuales actúa la presión del agua que llega con velocidad de un nivel superior.

**Válvula:** Dispositivo usado para regular el flujo de agua en la tubería forzada; se prefiere una válvula de bola.

**Tabla 9** Abreviaturas usadas con las unidades SI

<i>Prefijo</i>	<i>Abreviatura</i>	<i>Significado</i>	<i>Prefijo</i>	<i>Abreviatura</i>	<i>Significado</i>
atto	a	$10^{-18}$	deca	da	$10^1$
femto	f	$10^{-15}$	hecto	h	$10^2$
pico	p	$10^{-12}$	kilo	k	$10^3$
nano	n	$10^{-9}$	mega	M	$10^6$
micro	$\mu$	$10^{-6}$	giga	G	$10^9$
mili	m	$10^{-3}$	tera	T	$10^{12}$
centi	c	$10^{-2}$	peta	P	$10^{15}$
deci	d	$10^{-1}$	exa	E	$10^{18}$

**Tabla 10** Nombre de unidades y cantidades eléctricas

<i>Símbolo</i>	<i>Nombre</i>	<i>Unidad</i>	<i>Abreviatura</i>
v	Velocidad	metro/segundo	m/s
F	Fuerza	newton	N
v	Volumen	metro <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>
W	Trabajo, energía	joule	J
C	Capacidad	faradio	F
H	Intensidad de campo magnético	amperio/metro	A/m
T	Torsión	newton-metro	N*m
L	Inductancia	henrio	H
$\omega$	Frecuencia angular	radián/segundo	rad/s
c	Velocidad de la luz	metro/segundo	m/s
$\lambda$	Longitud de onda	metro	m
f	Frecuencia	hercio	Hz
L	Longitud	metro	m
P	Potencia	vatio	W
V	Potencial	voltio	V
I	Corriente	amperio	A
R	Resistencia	ohmios	$\Omega$

**Tabla 11** Conversión de unidades

<b>Valor</b>	<b>Equivalencia</b>	
1 Pa	1 N/m <sup>2</sup>	
1 Kg/cm <sup>2</sup>	0.9807x10 <sup>5</sup> N/m <sup>2</sup>	0.09807 MPa
1 mm <sup>3</sup>	10 <sup>-3</sup> cm <sup>3</sup>	
1 gal	3.785 litros	2.381x10 <sup>-2</sup> barriles
1 cm <sup>2</sup>	10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup>	
1 in.	25.4 mm	
1 g	10 <sup>-3</sup> Kg	2.205x10 <sup>-3</sup> lb

## A.2 Cálculos de potencia y carga para el generador

Generador Maratón, modelo 284-psl-1508

Tensión del generador: 240 V

Número de fases: 3

Frecuencia: 60 Hz

Potencia real de salida: 20 kW

Potencia reactiva de salida: 43.75 kVA

Velocidad: 1800 rpm

Factor de potencia: 0.8

Número de polos: 4

$X_d$  – reactancia sincrónica: 10.458  $\Omega$

$R_a$  – resistencia del rotor: 0.875  $\Omega$

Corriente de excitación sin carga: 0.52 A

Corriente de excitación con carga máx.: 53 A

Para determinar el número de polos de la máquina, según la ecuación 3.1;

$$f_e = \frac{n_m * P}{120} \Rightarrow P = \frac{f_e * 120}{n_m} = \frac{60 * 120}{1800} = 4 \text{ polos}$$

Un generador sincrónico trifásico de 60 Hz, con resistencia de armadura despreciable  $R_a = 0$ , con los valores de inductancias:

$$L_{aa} = L_s = 2.7656 \text{ mH}$$

$$L_{ab} = M_s = 1.3828 \text{ mH}$$

$$L_{ff} = 433.6569 \text{ mH}$$

$$M_f = 31.695 \text{ mH}$$



La máquina tiene valores nominales de 43.75 kVA, FP = 0.9, rpm = 1800, y 2kV. Cuando se opera en condiciones de carga nominal, la tensión línea a neutro en las terminales y la corriente de línea de la fase a se determinan:

$$v_a = \sqrt{2} \left( \frac{2000}{\sqrt{3}} \right) = 1632.9v \Rightarrow v_a = 1632.9 \cos \omega t$$

$$\theta = \cos^{-1}(0.8) = 36.87$$

$$i_a = \sqrt{2} \left( \frac{43.75}{2 * \sqrt{3}} \right) = 17860 \Rightarrow i_a = 17860 \cos(\omega t - 36.87^\circ)$$

Se presenta el desarrollo para encontrar la magnitud de la tensión interna sincrónica, la corriente de campo  $I_f$  y el flujo del devanado de campo:

Con  $R = 0$ , ecuación 3.22 y estableciendo que  $\omega = 120 * \pi$ ;

$$e_a = \sqrt{2} |Ei| \cos(\omega t + \delta)$$

$$v_a = -Ri_a - (Ls + Ms) \frac{di_a}{dt} + \sqrt{2} |Ei| \cos(\omega t + \delta)$$

$$e_a = v_a + (Ls + Ms) \frac{di_a}{dt} = v_a + (2.7656 + 1.3828) 10^{-3} \frac{di_a}{dt}$$

$$e_a = 1632.9 \cos \omega t - (4.1484) 10^{-3} * 120 \pi * 17860 \text{sen}(\omega t - 36.87^\circ)$$

$$e_a = 1632.9 \cos \omega t - 27931 \text{sen}(\omega t - 36.87^\circ) = 18391 \cos \omega t - 22344 \text{sen} \omega t$$

$$e_a = 28940 \cos(\omega t + 39.46^\circ) v$$

Por lo tanto, la tensión interna sincrónica tiene una magnitud de  $\sqrt{2} |Ei| = 28940$ , y un ángulo  $\delta = 39.46^\circ$ . De la ecuación 3.8 se encuentra

$$I_f = \frac{\sqrt{2} |Ei|}{\omega M_f} = \frac{28940}{120 * \pi * 31.695 * 10^{-3}} = 2422 A$$

Donde  $\theta_a$  es el ángulo de atraso de  $i_a$  medido con respecto a  $e_a$ . Debido a que  $i_a$  atrasa en  $36.87^\circ$  a  $v_a$ , lo que atrasa  $39.46^\circ$  con respecto a  $e_a$ :

$$\theta_a = 36.87^\circ + 39.46^\circ = 76.33^\circ$$

$$|I_a| \text{sen} \theta_a = \frac{17860}{\sqrt{2}} \text{sen} 76.33^\circ = 12271 \text{ A}$$

Los enlaces de flujo con el devanado de campo están dados por

$$\lambda_f = L_{ff} I_f - \frac{3M_f}{\sqrt{2}} |I_a| \text{sen} \theta_a = 433.656 \times 10^{-3} * 2422 - \frac{3 * 31.695 \times 10^{-3}}{\sqrt{2}} * 12271 = 225.27 \text{ Wb / vuelta}$$

Con FP = 1;

$$e_a = \sqrt{2} |E_i| \cos(\omega t + \delta)$$

$$v_a = -R i_a - (L_s + M_s) \frac{di_a}{dt} + \sqrt{2} |E_i| \cos(\omega t + \delta)$$

$$e_a = v_a + (L_s + M_s) \frac{di_a}{dt} = v_a + (2.7656 + 1.3828) \times 10^{-3} \frac{di_a}{dt}$$

$$e_a = 1632.9 \cos \omega t - (4.1484) \times 10^{-3} * 120\pi * 17860 \text{sen}(\omega t)$$

$$e_a = 1632.9 \cos \omega t - 27931 \text{sen}(\omega t)$$

$$e_a = 27978 \cos(\omega t + 3.35^\circ) \text{ V}$$

Debido a que  $E_i$  es directamente proporcional a  $I_f$  resulta:

$$I_f = \frac{27978}{28940} * 2422 = 2341 \text{ A}$$

La corriente  $i_a$  está en fase con  $v_a$  y atrasa a  $e_a$  en  $3.35^\circ$

$$|I_a| \text{sen} \theta_a = 12628 \text{sen} 3.35^\circ = 737.97 \text{ A}$$

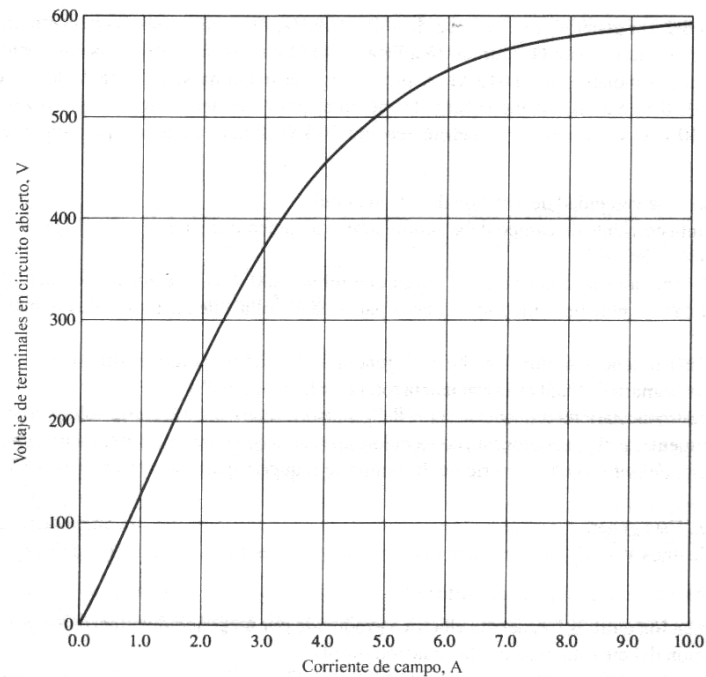
$$\lambda_f = (433.656 \times 10^{-3}) 2341 - \frac{3 * 31.695 \times 10^{-3}}{\sqrt{2}} 737.97 = 965.57 \text{ Wb / vuelta}$$

La corriente de campo se reduce de 2422 a 2341 A, cuando se pasa del factor de potencia de la carga de 0.9 a 1.0 bajo condiciones nominales. También el flujo del entrehierro que enlaza al devanado de campo del generador se reduce al igual que la influencia desmagnetizante de la reacción de armadura.

La corriente de campo que se necesita para mantener en la máquina la tensión nominal en terminales, bajo condiciones de circuito abierto con la ecuación 3.8 con  $i_a = 0$ ;

$$I_f = \frac{\sqrt{2}|Ei|}{\omega M_f} = \frac{1632.9}{120 * \pi * 31.695 \times 10^{-3}} = 136.65 \text{ A}$$

En esta máquina  $V_\theta = V_T$ . Suponiendo que el generador está en vacío  $I_a = 0$  y  $E_a = V_\theta$ . Entonces,  $V_T = V_\theta$   $E_a = 240\text{v}$  y de la característica de circuito abierto,  $I_f = 4.5\text{A}$ . de la curva mostrada en la siguiente figura:



**Figura 35** Curva característica de circuito abierto del generador [2].

Si el generador se conecta a una carga de 53 A; pues es la corriente para la carga máxima con  $\text{fp} = 0.8$  en atraso, la corriente del inducido es

$$I_a = \frac{53}{\sqrt{3}} = 30.59 \text{ A} \quad \text{Con } V_t = 240\text{v}$$

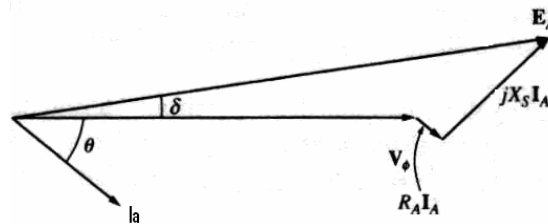
$$I_a = 30.59A$$

$$E_a = V_\phi + R_a I_a + jX_s I_a$$

$$E_a = 240\angle 0^\circ + 0.875 * 30.59\angle -36.87^\circ + j10.458 * 30.59\angle -36.87^\circ$$

$$E_a = 240\angle 0^\circ + 26.766\angle -36.87^\circ + j319.91\angle -36.87^\circ$$

$$E_a = 512.90\angle 27.88^\circ$$



**Figura 36** Diagrama fasorial del generador [2].

Si la carga se cambia por un FP = 0.8 en adelante:

$$I_a = 30.59A$$

$$E_a = V_\phi + R_a I_a + jX_s I_a$$

$$E_a = 240\angle 0^\circ + 0.875 * 30.59\angle 36.87^\circ + j10.458 * 30.59\angle 36.87^\circ$$

$$E_a = 240\angle 0^\circ + 26.766\angle 36.87^\circ + j319.91\angle 36.87^\circ$$

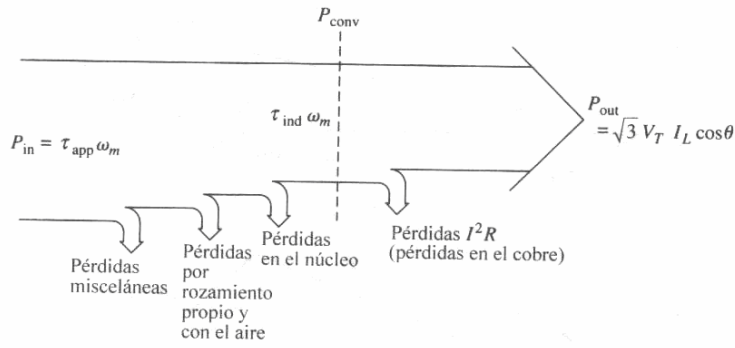
$$E_a = 541.29\angle 55.83^\circ$$

La potencia suministrada en este caso por el generador es

$$P_{out} = \sqrt{3} * V_t * I_t * \cos \theta$$

$$P_{out} = \sqrt{3} * 240 * 53 * \cos 36.87^\circ = 17625kW$$

Para determinar la potencia de entrada al generador se utiliza el diagrama de flujo de potencia, siguiente:



**Figura 37** Diagrama de flujo de potencia en un generador sincrónico [2].

En el diagrama de flujo de potencia anterior, la potencia mecánica de entrada está dada por

$$P_{in} = P_{out} + P_{pérd.eléctricas} + P_{pérd.núcleo} + P_{pérd.mecánicas} + P_{pérd.dispersas}$$

Las pérdidas misceláneas se ignoran. Las pérdidas eléctricas serían:

$$P_{pérd.eléctricas} = 3 * I_a^2 * R_a = 3(30.59)^2 (0.875) = 2.456kW$$

Dado que las pérdidas en el núcleo, las de fricción propia y fricción con el aire son 300W, la potencia total de entrada al generador es

$$P_{in} = 17625 + 2456 + 300 = 20.381kW$$

Entonces la eficiencia de la máquina es

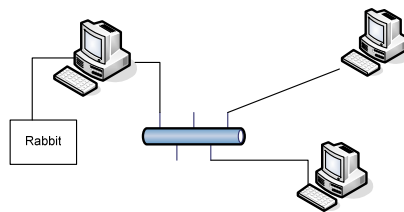
$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} * 100\% = \frac{17625}{20381} * 100\% = 86.47\%$$

En caso de desconectar súbitamente la carga del generador, la corriente  $I_a = 0$  y  $E_a = V_\phi$ . Puesto que la corriente de campo no ha variado,  $E_a$  no varía por lo que  $V_\phi$  y  $V_t$  deben incrementarse para igualar a  $E_a$ .

### A.3 Manual de usuario

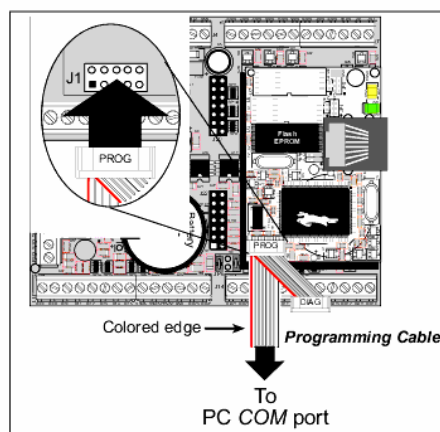
A continuación se muestra detalladamente la configuración del computador, las principales conexiones de los dispositivos para ejecutar los programas de la simulación de la miniplanta hidroeléctrica:

1. Primeramente se debe instalar el programa *Dynamic C versión.8.10* o superior, en las unidades que se desea conectar el dispositivo; ya que se puede conectar en una máquina el *Rabbit*, poner a correr el programa desde ésta y a la vez desde cualquier otra que forme parte de la red y tenga el programa instalado.



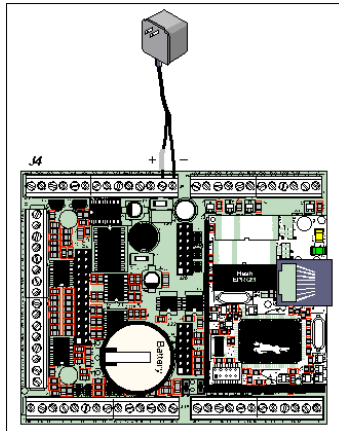
**Figura 38** Esquema de conexión del *Rabbit* a la intranet.

2. La conexión del *Rabbit* al computador, se realiza por medio del cable de programación; como se muestra a continuación. Conectando el indicador *PROG* en los pines J1 del *Rabbit* y en el COM1 de la PC, el conector DB-9.





**Figura 39** Conexión del cable de programación.

3. Seguidamente se conecta el adaptador de corriente para la alimentación del *Rabbit*.



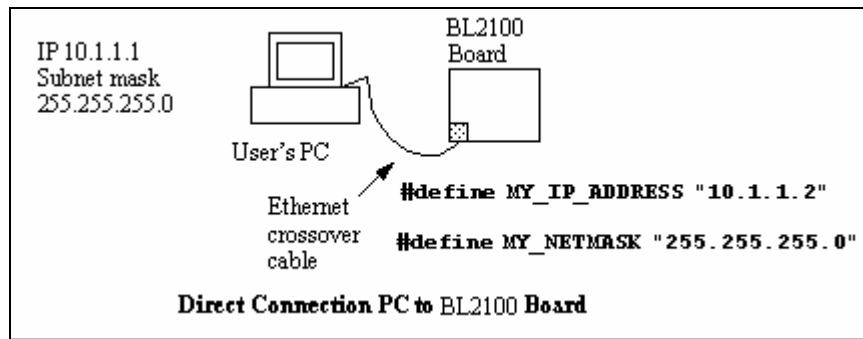
**Figura 40** Conexión del cable de alimentación del *Rabbit*.

4. Para confirmar las conexiones anteriores, se abre el programa *Dynamic C*, y se carga el programa de ejemplo, cualquier programa de la carpeta de ejemplos `C:\DCRABBIT_8.10\Samples\BL2100\`. Una vez ahí se puede cargar cualquier programa de ejemplo ya sea de ADC, DAC, IO, RS232, RS485, TCPIP. El programa debe ejecutarse sin problemas a menos que alguno de los cables anteriores no se encuentre conectado apropiadamente.
5. Una vez que se confirme el correcto funcionamiento del *Rabbit*, se puede cargar el programa de simulación **minigeneración.c**, el cual despliega la información en la consola.
6. Compilar, es el siguiente paso. Para esto se puede seleccionar el ícono con la imagen de un rayo  ó presionar la tecla F5. Si el programa presenta algún error o advertencia, el sistema se lo indica al usuario; realiza esto antes de bajar el código en hexadecimal, hasta la memoria.
7. Si no presenta ningún problema, se presiona F9 ó el ícono con un triángulo verde . Al presionar el ícono se puede saltar el paso de compilar pues ejecuta las dos labores, o sea, se puede utilizar la compilación solo para buscar errores





9. Se puede cargar el otro programa, **minigeneración\_web.c**, pero antes se debe cambiar los datos de la biblioteca *html* localizada en C:\DCRABBIT\_8.10\Lib\tcpip\tcp\_config.lib.



```
#define MY_IP_ADDRESS "10.1.1.2"  
#define MY_NETMASK "255.255.255.0"  
#define MY_GATEWAY "10.10.6.1"  
#define MY_NAMESERVER "10.10.6.1"
```

**Figura 42** Ejemplo de configuración del *Rabbit* para conectarse a la intranet.

Cuando el *Rabbit* está conectado directamente a la PC vía Ethernet, se necesita asignar una dirección IP al computador (10.1.1.1), con la máscara (255.255.255.0). Antes de esto se debe conectar el cable de Ethernet cruzado de la tarjeta de red al *Rabbit*.

10. Una vez que se ejecute sin problemas la rutina, se debe abrir una ventana del explorador de Internet, y colocar la dirección de la página principal direccionada en el *Rabbit* (html://10.10.6.1).

11. La página principal guía al usuario para los pasos que debe seguir para ingresar los datos y obtener los resultados de los cálculos.



## Control Automatizado para Miniplantas de Hidrogeneración

### Apertura de válvula de entrada

- Introduce un porcentaje de apertura para la válvula de entrada de flujo de agua

### Caudal

- Introduce un nivel de caudal (l/s) antes de la válvula

### Corriente y FP de la carga

- Introduce el valor de corriente que consume la carga conectada
  - Introduce el valor de FP de la carga conectada

Mónica Rodríguez Chaves - ITCR

(a)

Introduzca los valores de los datos  
que se solicitan...

DATO	VALOR
Apertura de la válvula	0 <input type="text"/> (%)
Caudal antes de la turbina	0 <input type="text"/> (l/s)
FP de la carga	0 <input type="text"/>
Corriente de consumo de la carga	0 <input type="text"/> (A)

### Valores Nominales Turbina

Velocidad = 1600rpm.  
Potencia = 20kW  
Caida neta = 30m.  
Caudal nominal = 100 l/s

### Valores Nominales del Generador

Velocidad = 1800 rpm  
Potencia = 20kW  
Tensión = 120/240 v  
Frecuencia = 60Hz.  
FP = 0,8

(b)

**Figura 43** Ejemplos de la presentación de los datos en páginas html.  
(a) Página principal (b) Página ingreso de datos.

#### **A.4 Información sobre la Institución**

El Instituto Costarricense de Electricidad fue creado como una institución autónoma, bajo el decreto n° 449, el 8 de abril de 1949, promulgado por la Junta Fundadora de la Segunda República, con el objetivo de crear una empresa nacional que se encargara de la generación y transmisión de electricidad en Costa Rica, que pudiera llevar el desarrollo eléctrico a todos los rincones del país, ya que las compañías eléctricas instaladas en el país en ese entonces estaban en manos privadas, algunas de ellas, extranjeras.

Actualmente el ICE, junto con sus empresas subsidiarias (RACSA y la Compañía Nacional de Fuerza y Luz) proveen de energía eléctrica a la mayor parte del territorio nacional, y poseen el monopolio de las telecomunicaciones en el país.

El ICE se divide en dos grandes sectores: Energía y Telecomunicaciones. Estos a su vez, se dividen en Unidades Estratégicas de Negocios (UEN). A su vez, el sector energía lo conforman las siguientes UEN: Proyectos y servicios asociados, Servicio al cliente, Producción de electricidad, Transporte de electricidad, Centro Nacional de Control de Energía y Centro Nacional de Planificación Eléctrica.

El proyecto aquí planteado, se realizó en la UEN de Proyectos y Servicios Asociados del sector energía específicamente en el Centro de Servicio de Investigación y Desarrollo. Este centro de servicio, como lo indica su nombre, se encarga de investigar nuevas tecnologías y desarrollar soluciones que se puedan aplicar al sector energía del ICE, o buscar alternativas a soluciones existentes en el mercado, cuyo costo haga necesario desarrollarlas a lo interno.

Esta UEN es un área estratégica del ICE Energía, en la cual se llevan a cabo proyectos que le permiten al ICE continuar siendo líder en el desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional y Regional, proyectando su capacidad dentro y fuera de las fronteras de Costa Rica, comprometido con el medio ambiente.

Los proyectos incluyen el diseño y construcción de *hardware* electrónico y también el desarrollo de aplicaciones de *software* en diferentes plataformas de desarrollo (Unix, Dos, Windows, Palm OS).

Este Centro de Servicio cuenta con los siguientes laboratorios: electrónica de corrosión, circuitos impresos y sistemas de potencia.

En esta dependencia trabajan alrededor de 50 personas, casi todos ingenieros, eléctricos, electrónicos e informáticos. Esta dependencia está a cargo del Ing. Ronald Jiménez.

## Anexos

### B.1 Características del *Rabbit SmartCat 2100* [25].

The BL2100 is a high-performance, C-programmable singleboard computer that offers built-in digital and analog I/O combined with Ethernet connectivity in a compact form factor. A Rabbit 2000® microprocessor operating at 22.1 MHz provides fast data processing. An optional plastic enclosure and LCD/keypad module is available, and may be wall-mounted [25].

#### **BL2100 Description**

The BL2100 is an advanced single-board computer that incorporates the powerful Rabbit 2000 microprocessor, flash memory, static RAM, digital I/O ports, A/D converter inputs, D/A converter outputs, RS-232/RS-485 serial ports, and a 10Base-T Ethernet port.

#### **BL2100 Features**

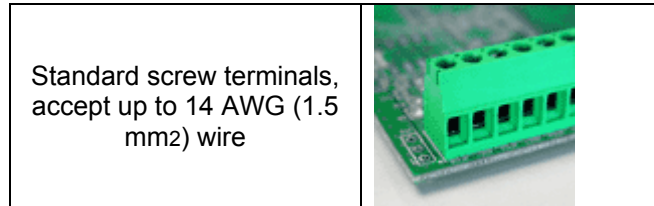
- Rabbit 2000™ microprocessor operating at 22.1 MHz.
- 128K static RAM and 256K flash memory standard may be increased to 512K SRAM and 512K flash memory.
- 40 digital I/O: 24 protected digital inputs and 16 high-current digital outputs provide sinking and sourcing outputs.
- 15 analog channels: eleven 12-bit A/D converter inputs, four 12-bit D/A converter 0–10 V outputs (selected models).
- One RJ-45 Ethernet port compliant with IEEE 802.3 standard for 10Base-T Ethernet protocol (selected models).
- Two Ethernet status LED (selected models).
- Four serial ports (2 RS-232 or 1 RS-232 with RTS/CTS, 1 RS-485, and 1 CMOS-compatible programming port).
- Battery-backed real-time clock.
- Watchdog supervisor.
- Optional backlit 122 × 32 graphic display/keypad module.
- Remote program downloading and debugging capability via RabbitLink.
- Boards with the CE mark on their RabbitCore module are CE-compliant.

**Table 1. BL2100 Models**

Feature	BL2100	BL2110	BL2120	BL2130
Microprocessor	Rabbit 2000 running at 22.1 MHz			
Static RAM	128K			
Flash Memory	256K			
RJ-45 Ethernet Connector, Filter Capacitors, and LED	Yes		No	
A/D Converter Inputs (-10 V to + 10 V)	Yes	No	Yes	No
D/A Converter Outputs (0 V to +10 V)	Yes	No	Yes	No
RabbitCore Module Used	RCM2200		RCM2300	

### Connector Options

In addition to the standard screw-terminal connectors supplied on BL2100 boards, IDC headers, bottom-mount sockets, and polarized friction-lock terminals may be factory installed instead. Visit our Web site at [www.zworld.com](http://www.zworld.com) or contact your Z-World sales representative or authorized distributor for further information.

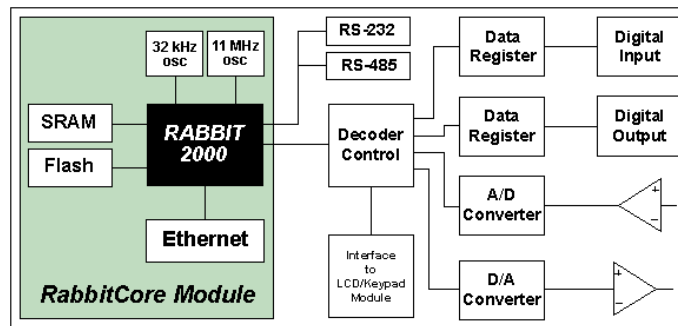


### Software

The BL2100 is programmed using version 7.06 or later of Z-World's Dynamic C. A compatible version is included on the Tool System CD-ROM.

Z-World also offers add-on Dynamic C modules containing the popular  $\mu$ C/OS-II real-time operating system, as well as PPP, Advanced Encryption Standard (AES), and other select libraries. In addition to the Web-based technical support included at no extra charge, a one-year telephone-based technical support module is also available for purchase. Visit our Web site at [www.zworld.com](http://www.zworld.com) or contact your Z-World sales representative or authorized distributor for further information.

[Figure 7](#) shows these Rabbit-based subsystems designed into the BL2100.



**Figure 7. BL2100 Subsystems**

### BL2100 Pinouts Headers and Screw Terminals

Standard BL2100 models are equipped with two 1 × 12 screw terminal strips (J7 and J13), and two 1 × 14 screw terminal strips (J4 and J10). The BL2100 and BL2110 also have the RJ-45 Ethernet jack and one 1 × 16 screw terminal strip (J1). There is provision on the circuit board to accommodate 2 × 17, 2 × 20, and 2 × 25 IDC headers or 1 × 17, 1 × 20, and 1 × 25 friction-lock connectors with a pitch of 0.1" instead of the screw terminal strips. The pinouts for these connectors are shown in [Figure 8\(b\)](#).

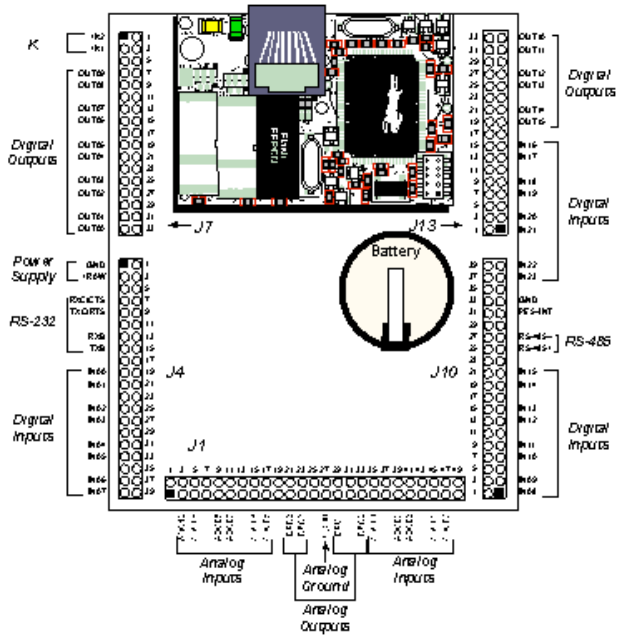


Figure 8(b). BL2100 Pinouts (other 0.1" headers)

- Digital I/O

### Digital Inputs

The BL2100 has 24 digital inputs, IN00-IN23, each of which is protected over a range of -36 V to +36 V. The inputs are factory-configured to be pulled up to +5 V, but they can also be pulled up to +K2 or down to 0 V in banks of eight by changing a surface-mounted 0  $\square$  resistor as shown in [Figure 9](#).

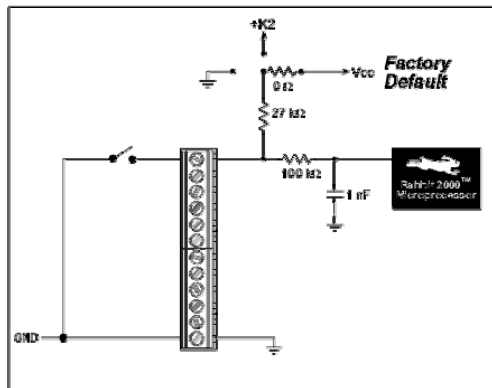


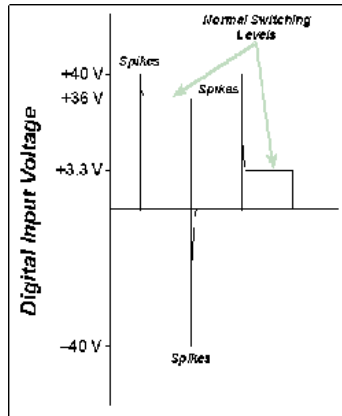
Figure 9. BL2100 Digital Inputs [Pulled Up--Factory Default]

### NOTE

If the inputs are pulled up to +K2, the voltage range over which the digital inputs are protected changes to K2 - 36 V to +36 V.

The actual switching threshold is approximately 2.40 V. Anything below this value is a logic 0, and anything above is a logic 1. The BL2100 has been designed to allow the reconfiguration of inputs IN16-IN23 as outputs, resulting in a unit with 16 inputs and 24 outputs. Although this is not a standard

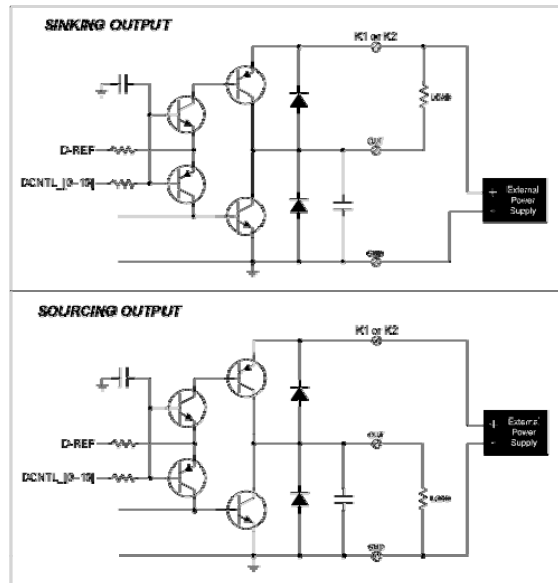
off-the-shelf configuration, this version is available on special request for large-volume orders (lead times and setup charges will apply). Contact your Z-World Sales Representative at +1(530)757-3737 for more information. The digital inputs are each fully protected over a range of -36 V to +36 V, and can handle short spikes of  $\pm 40$  V.



**Figure 10. BL2100 Digital Input Protected Range**

- **Digital Outputs**

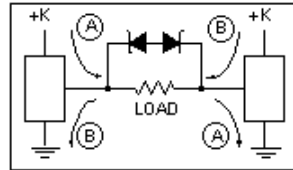
The BL2100 has 16 digital outputs, OUT0-OUT15, which can each sink or source up to 200 mA. [Figure 11](#) shows a wiring diagram for using the digital outputs in a sinking or a sourcing configuration. All the digital outputs sink and source actively. They can be used as high-side drivers, low-side drivers, or as an H-bridge driver. When the BL2100 is first powered up or reset, all the outputs are disabled, that is, at a high-impedance status, until the **digoutConfig** software function call is made. The **digoutConfig** call sets the initial state of each digital output according to the configuration specified by the user, and enables the digital outputs to their initial status.



**Figure 11. BL2100 Digital Outputs**

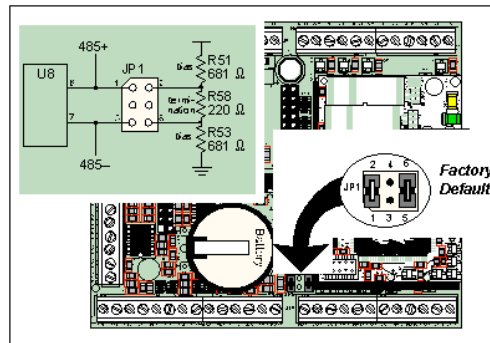


OUT00-OUT07 are powered by to +K1, and OUT08-OUT15 are powered by +K2. K1 and K2 can each be up to 36 V. They don't have to be same. All the sinking current, which could be up to 3.2 A, is returned through the GND pins. Be sure to use a suitably sized GND and keep the distance to the power supply as short as possible. Since there are two GND terminals (pin 1, screw-terminal header J4, and pin 12, screw-terminal header J11), it is highly recommend that you split the GND returns according to the two banks of digital outputs. For the H bridge, which is shown in [Figure 12](#), K1 and K2 should be the same if two digital outputs used for the H bridge are on different banks.



**Figure 12. H Bridge**

The BL2100 comes with a 220Ω termination resistor and two 681Ω bias resistors installed and enabled with jumpers across pins 1-2 and 5-6 on header JP1, as shown in [Figure 14](#).



**Figure 14. RS-485 Termination and Bias Resistors**

For best performance, the bias and termination resistors in a multidrop network should only be enabled on both end nodes of the network. Disable the termination and bias resistors on any intervening BL2100 units in the network by removing both jumpers from header JP1.

- **Programming Port**

The RabbitCore module on the BL2100 has a 10-pin programming header. The programming port uses the Rabbit 2000's Serial Port A for communication, and is used for the following operations.

- Programming/debugging
- Cloning
- Remote program download/debug over an Ethernet connection via the RabbitLink EG2100

The programming port is used to start the BL2100 in a mode where the BL2100 will download a program from the port and then execute the program. The programming port transmits information to and from a PC while a program is being debugged. The Rabbit 2000 startup-mode pins (SMODE0, SMODE1) are presented to the programming port so that an externally connected device can force the BL2100 to start up in an external bootstrap mode. The BL2100 can be reset from the programming port

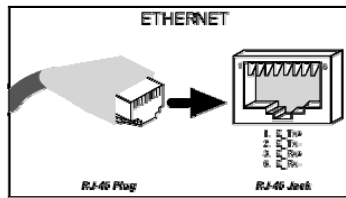
via the /EXT\_RSTIN line. The Rabbit 2000 status pin is also presented to the programming port. The status pin is an output that can be used to send a general digital signal.

**NOTE**

Refer to the *Rabbit 2000 Microprocessor User's Manual* for more information related to the bootstrap mode.

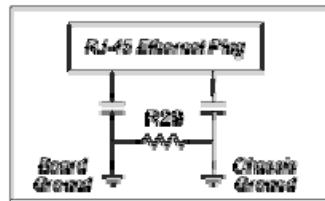
- **Ethernet Port**

[Figure 15](#) shows the pinout for the Ethernet port (J2 on the BL2100 module). Note that there are two standards for numbering the pins on this connector--the convention used here, and numbering in reverse to that shown. Regardless of the numbering convention followed, the pin positions relative to the spring tab position (located at the bottom of the RJ-45 jack in [Figure 15](#)) are always absolute, and the RJ-45 connector will work properly with off-the-shelf Ethernet cables.



**Figure 15. RJ-45 Ethernet Port Pinout**

RJ-45 pinouts are sometimes numbered opposite to the way shown in [Figure 15](#). Two LED are placed next to the RJ-45 Ethernet jack, one to indicate an Ethernet link (**LNK**) and one to indicate Ethernet activity (**ACT**). The transformer/connector assembly ground is connected to the BL2100 module printed circuit board digital ground via a 0 Ω resistor "jumper," R29, as shown in [Figure 16](#).

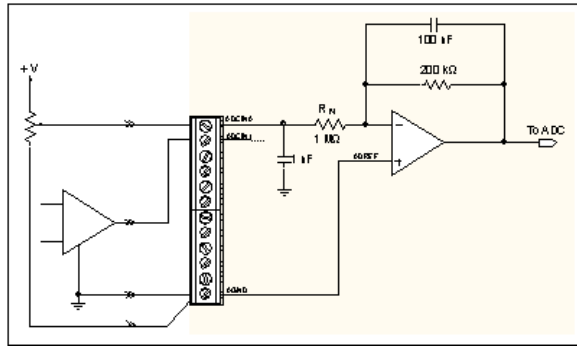


**Figure 16. Isolation Resistor R29**

The factory default is for the 0Ω resistor "jumper" at R29 to be installed. In high-noise environments, remove R29 and ground the transformer/connector assembly directly through the chassis ground. This will be especially helpful to minimize ESD and/or EMI problems.

- **A/D Converter Inputs**

The single 14-channel A/D converter chip used in the BL2100 has a resolution of 12 bits (models BL2100 and BL2120 only). Eleven of the 14 channels are available externally, and three are used internally for the reference voltages: 4.096 V (Vref), 2.048 V (Vref/2), and Analog Ground. These internal voltages can be used to check the functioning of the A/D converter chip. The A/D converter chip only measures voltages between 0 V and the applied reference voltage. Therefore, each external input has circuitry that provides scaling and buffering. All 11 external inputs are scaled and buffered to provide the user with an input impedance of 1 MΩ and a range of -10.24 V to +10.24 V. [Figure 17](#) shows the buffered A/D converter inputs.



**Figure 17. Buffered A/D Converter Inputs**

The op-amp is powered from the +V supply. The 1 MΩ and 200 kΩ resistors set the gain (scale factor), which is 0.2 in this case. This results in a dynamic input range of  $0.2 \times 20.48 \text{ V}$  or 4.096 V. The center point of this range is set by the 1.707 V reference voltage. With the reference set to 1.707 V, the center point is at 0 V and the input voltage can range from -10.24 V to +10.24 V. To maintain the best accuracy, the input range should be limited to -10.0 V to +10.0 V.

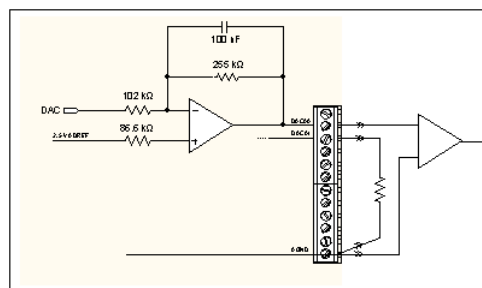
The A/D converter inputs are factory-calibrated and the calibration constants are stored in flash memory. You may calibrate the A/D converter inputs at a later time using the software functions described in [Section 4.5.4, "A/D Converter Inputs."](#) The **GETCALIB.C** and the **SAVECALIB.C** sample programs in the Dynamic C **SAMPLES\BL2100\Calib\_Save\_Retrieve** folder illustrate how to retrieve and save calibration data.

- **D/A Converter Outputs**

Only the BL2100 and the BL2120 models are stuffed with D/A converters. The D/A converter outputs are buffered and scaled to provide an output from 0 V to +10 V.

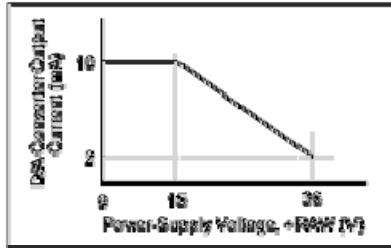
**NOTE** The D/A converter output voltage depends on the original power-supply voltage, +RAW, so if +RAW < 13 V, the maximum D/A converter output will be +RAW - 3 V.

[Figure 18](#) shows the D/A converter outputs.



**Figure 18. D/A Converter Outputs**

To stay within the maximum power dissipation of the D/A converter circuit, the maximum D/A converter output current is 10 mA per channel for a power-supply voltage, +RAW, up to 15 V, and drops to 2 mA per channel for a power-supply voltage of 36 V.



**Figure 19. Maximum D/A Converter Output Current vs. Power-Supply Voltage**

The D/A converter inputs are factory-calibrated and the calibration constants are stored in flash memory. You may calibrate the A/D converter inputs at a later time using the software functions described in [Section 4.5.5, "D/A Converter Outputs."](#) The **GETCALIB.C** and the **SAVECALIB.C** sample programs in the Dynamic C **SAMPLES\BL2100\Calib\_Save\_Retrieve** folder illustrate how to retrieve and save calibration data.

- **Memory**

**SRAM**

The BL2100 module is designed to accept 128K to 512K of SRAM packaged in an SOIC case. The standard BL2100 modules come with 128K of SRAM.

**Flash Memory**

The BL2100 is also designed to accept 128K to 512K of flash memory packaged in a TSOP case. The standard BL2100 modules comes with one 256K flash memory.

**NOTE** Z-World recommends that any customer applications should not be constrained by the sector size of the flash memory since it may be necessary to change the sector size in the future.

A Flash Memory Bank Select jumper configuration option based on 0Ω surface-mounted resistors exists at header JP2 on the RabbitCore module. This option, used in conjunction with some configuration macros, allows Dynamic C to compile two different co-resident programs for the upper and lower halves of the 256K flash in such a way that both programs start at logical address 0000. This is useful for applications that require a resident download manager and a separate downloaded program. See Technical Note 218, Implementing a Serial Download Manager for a 256K Flash, for details.

[Table A-1](#) lists the electrical, mechanical, and environmental specifications for the BL2100 without the optional LCD/keypad module plugged in. [Appendix C](#) provides specifications for the LCD/keypad.

<b>Table A-1. BL2100 Specifications</b>				
<b>Feature</b>	<b>BL2100</b>	<b>BL2110</b>	<b>BL2120</b>	<b>BL2130</b>
Microprocessor	Rabbit 2000™ at 22.1 MHz			
Ethernet Port	10Base-T, <b>LNK</b> and <b>ACT</b> LED		None	
Flash Memory	256K (standard)			
SRAM	128K (standard)			
Backup Battery	Panasonic CR2330 or equivalent 3 V lithium coin type, 265 mA·h standard using onboard battery holder; optional 3 V, 950 mA·h solder-in battery available			
Digital Inputs	24 inputs hardware-configurable pull-up or pull-down, ± 36 V DC, switching threshold 2.4 V typical			
Digital Outputs	16 outputs software toggled as sinking or sourcing, +36 V DC, 200 mA maximum per channel			
Analog Inputs	Eleven 12-bit res., ± 10 V DC, 1 MΩ, up to 4,100 samples/s	None	Eleven 12-bit res., ± 10 V DC, 1 MΩ, up to 4,100 samples/s	None
Analog Outputs	Four 12-bit res., 0-10 V DC, update rate 12 kHz	None	Four 12-bit res., 0-10 V DC, update rate 12 kHz	None
Serial Ports	4 serial ports: <ul style="list-style-type: none"> <li>• two RS-232 or one RS-232 (with CTS/RTS)</li> <li>• one RS-485, onboard network termination and bias resistors</li> <li>• one 5 V CMOS-compatible programming port</li> </ul>			
Serial Rate	Max. burst rate = CLK/32 Max. sustained rate = CLK/64			
Connectors	one RJ-45 (Ethernet)  one 2 × 5, 2 mm pitch (serial programming port)  one power jack for AC adapter  five screw-terminal connectors (accept up to 14 AWG/1.5 mm <sup>2</sup> wire)  (option for 0.1" IDC or friction-lock connectors)			
Real-Time Clock	Yes			
Timers	Five 8-bit timers (four are cascadable from the first) and one 10-bit timer with two match registers			
Watchdog/Supervisor	Yes			

Power	9-36 V DC <sup>1</sup> , 1.5 W max. (without display), 3 W max. (with display)
Operating Temperature	-40°C to +70°C
Humidity	5-95%, noncondensing
Board Size	3.41" × 4.14" × 0.93" (87 mm × 105 mm × 24 mm)

<sup>1</sup> 13 V to 36 V DC supply voltage required to support full 0-10 V DC output range of D/A converter

[Table A-2](#) lists the configuration options.

<b>Table A-2. BL2100 Jumper Configurations</b>				
<b>Header</b>	<b>Description</b>	<b>Pins Connected</b>		<b>Factory Default</b>
JP1	RS-485 Bias and Termination Resistors	1-2	Bias and termination resistors connected	×
		5-6		
JP2	Software I/O Configuration Option	1-3	Bias and termination resistors not connected <sup>1</sup>	
		4-6		
JP2	Software I/O Configuration Option	1-2	Standard	×
		2-3	Custom (IN16-IN23 are configured as digital sinking outputs)	
JP3	Analog Circuit Option	1-2	Installed	BL2100 BL2120
		2-3	Not installed	BL2110 BL2130
--	IN00-IN07	R56	Pulled up to Vcc	×
		R57	Pulled up to +K2	
		R54	Pulled down	
--	IN08-IN15	R60	Pulled up to Vcc	×
		R61	Pulled up to +K2	
		R59	Pulled down	
--	IN16-IN23	R69	Pulled up to Vcc	×
		R70	Pulled up to +K2	
		R71	Pulled down	

<sup>1</sup> Although pins 1-3 and 4-6 of header JP1 are shown "jumpered" for the termination and bias resistors not connected, pins 3 and 4 are not actually connected to anything, and this configuration is a "parking" configuration for the jumpers so that they will be readily available should you need to enable the termination and bias resistors in the future.

## Use of Rabbit 2000 Parallel Ports

Figure A-6 shows the Rabbit 2000 parallel ports.

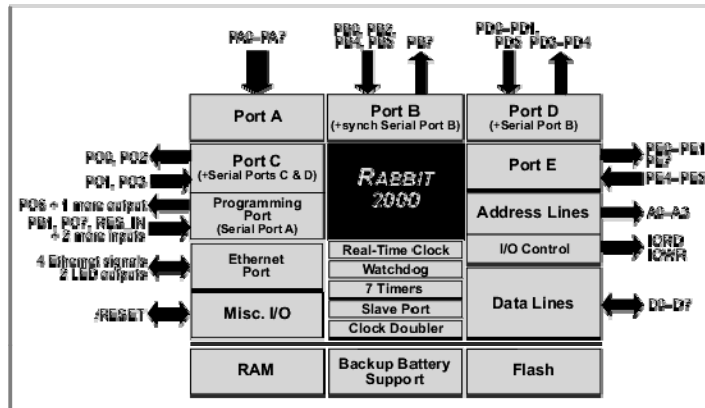


Figure A-6. BL2100 Rabbit-Based Subsystems

Table A-3 lists the Rabbit 2000 parallel ports and their use in the BL2100.

Port	I/O	Signal	Output Function State
PA0	Input	IN16	Pulled up
PA1	Input	IN17	Pulled up
PA2	Input	IN18	Pulled up
PA3	Input	IN19	Pulled up
PA4	Input	IN20	Pulled up
PA5	Input	IN21	Pulled up
PA6	Input	IN22	Pulled up
PA7	Input	IN23	Pulled up
PB0	Input	DAC_ADC_SDO	Pulled up
PB1	Input	Not Used	Pulled up
PB2	Input	ADC_EOC	Driven by A/D converter
PB3	Input	Not Used	Pulled up
PB4	Input	I/O Configuration Option (header JP2)	1 = standard (JP2:1-2) 0 = custom <sup>1</sup> (JP2:2-3)
PB5	Input	Analog Circuit Option (header JP3)	1 = BL2100/BL2120 (JP3:1-2) 0 = BL2110/BL2130 (JP3:2-3)

PB6	Output	Not Used		Off
PB7	Output	DAC_ADC_SDI		Inactive high
PC0	Output	TXD RS-485	Serial Port D	Inactive high
PC1	Input	RXD RS-485		Inactive high
PC2	Output	RTS/TXC RS-232	Serial Port C	Inactive high
PC3	Input	CTS/RXC RS-232		Inactive high
PC4	Output	TPOUT- (Realtek reset)		Initialized by sock_init
PC5	Input	TPOUT+ (Realtek INT0)		Pulled up
PC6	Output	TXA Programming Port	Serial Port A	Inactive high
PC7	Input	RXA Programming Port		Inactive high
PD0	Input	Realtek CLK		Initialized by sock_init
PD1	Input	Realtek SDO		Initialized by sock_init
PD2	Output	Not used		Inactive high
PD3	Output	DAC CLK Line		Inactive high
PD4	Output	ATXB RS-232	Serial Port B	Inactive high
PD5	Input	ARXB RS-232		Inactive high
PD6	Output	Not used		Inactive high
PD7	Output	Not used		Inactive high
PE0	Output	Digital I/O strobe		Inactive high
PE1	Output	External I/O enable		Inactive high
PE2	N/A	Realtek IORB strobe		Initialized by sock_init
PE3	N/A	Realtek SDI line		Initialized by sock_init
PE4	Input	INT0B		Tied to PE5 by 1 k $\Omega$ resistor
PE5	Input	INT1B		User interrupt input <sup>2</sup>
PE6	N/A	Realtek IOWB strobe		Initialized by sock_init
PE7	Output	LCD_KEYPAD strobe		Inactive high

<sup>1</sup> IN16-IN23 are sinking outputs in this custom configuration

<sup>2</sup> PE5 is driven by PE4 if the interrupt is not being used.

### I/O Address Assignments

[Table A-4](#) lists the external I/O addresses for the digital inputs and outputs.



<b>External Address</b>	<b>Name</b>	<b>Function</b>
0000	<b>DIPA</b>	Digital inputs IN00-07, read only
0001	<b>DOPA</b>	Digital outputs OUT00-OUT07, write only
0002	<b>DIPB</b>	Digital inputs IN08-15, read only
0003	<b>DOPB</b>	Digital outputs OUT08-OUT15, write only

PE1 serves as a system-enable control. When PE1 is high or in a high-impedance status, all BL2100 outputs are disabled (digital outputs and analog outputs are disabled, and RS-485 is at listen status). PE0 is configured as a strobe and is used for digital inputs, digital outputs, and the control register. The control register is located at 0xx4-0xx7, write only. The function of each bit is listed in [Table A-5](#).

<b>Bit</b>	<b>Name</b>	<b>Function</b>
0	<b>485_SEND</b>	RS-485 send/receive
1	<b>DO_CS0</b>	Digital output 0-08, enable low active
2	<b>DO_CS1</b>	Digital output 09-16, enable low active
3	Not used	Not used
4	<b>AO_CS</b>	Analog output 00-04, enable low active
5	<b>DAC_CS0</b>	Chip select for analog ch 00 and 01
6	<b>DAC_CS1</b>	Chip select for analog ch 02 and 03
7	<b>ADC_CS</b>	Chip select for A/D converter

PA0-PA7 are used with IN16-IN23, which may be reconfigured as sinking digital outputs OUT16-OUT23 by installing/removing components as reflected in the schematic. All analog inputs and outputs are accessed by a series connection. PD3 is served as a clock line while PB0 and PB7 are used for data in and data out, respectively. PD4 and PD5 are used for RS-485 communication. The direction of the communication is controlled by the control register. PC0, PC1, and PC2, PC3 are used for RS-232 communication. They can be used separately as two, 3-wire RS-232, or they may be combined to work as a 5-wire RS-232 port.

