

**Instituto Tecnológico de Costa Rica**  
**Escuela de Ingeniería en Electrónica**



**Medición de flujo de vapor geotérmico producido en el complejo Miravalles  
contemplando variaciones de temperatura, presión y diferencial de presión**

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

**Adams Ramón Hernández Jiménez**

**Guanacaste, 11 de Setiembre, 2006**

**INSTITUTO TECNOLOGICO 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

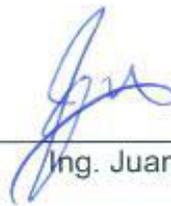
Firma



Ing. Eduardo Interiano

Profesor lector

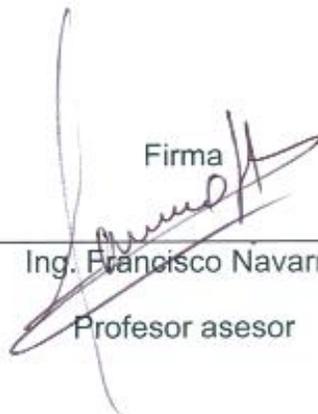
Firma



Ing. Juan Carlos Jiménez

Profesor lector

Firma



Ing. Francisco Navarro

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, 11 de setiembre de 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.

11 de Setiembre, 2006

A handwritten signature in purple ink, appearing to read 'Adams', with a large flourish extending from the bottom right.

Adams Ramón Hernández Jiménez

Céd: 5 – 333 – 672

## Resumen

El Campo Geotérmico Miravalles se encarga de obtener energía geotérmica y convertirla en energía eléctrica.

Esta energía geotérmica es una mezcla de líquido y vapor, por lo que es necesario enviarlo a una Estación de Separación (Satélite). Una vez separado el líquido y el vapor, éste último es enviado a las centrales de generación.

Uno de los parámetros más importantes en este proceso es la cantidad de flujo de vapor enviado a las unidades de generación, por lo que se debe tener una medición precisa sobre la cantidad que se envía.

Actualmente, todo el proceso de medición de flujo se realiza utilizando un tubo Venturi mediante la medición del diferencial de presión, sin contemplar variaciones de temperatura y presión; todos el sistema se encuentra orientado a este método y debido a que no se contemplan estas variaciones, la medida de flujo contiene un alto grado de incertidumbre lo que aumenta el error en la medición.

Es aquí donde nace el problema, ya que el nivel de error presentado en la medición de flujo no es el óptimo, lo que induce a interpretaciones erróneas de la producción de los pozos.

Por esto se pretende desarrollar un algoritmo para realizar los cálculos necesarios y así presentar la medición de flujo de vapor contemplando las variaciones de temperatura y presión. Además, debido a que el sistema actual se encuentra orientado a este proceso se deben realizar modificaciones al programa actual del Touch Screen, a la configuración del SCADA, de los instrumentos de medición y de los transmisores.

Se debe también, determinar la factibilidad de implementar dicho modelo en los demás sistemas de medición y dar cuenta de los beneficios económicos que se obtienen al llevar a cabo el proyecto.

Palabras clave: Geotermia; Proyecto Geotérmico Miravalles; Flujo de Vapor; PLC.

## **Abstract**

The Miravalles Geothermic Field has to made electric energy based in geothermic energy.

This geothermic energy is vapor, a mix of water and steam, so is necessary to send to Station of Separation, named Satellite. When the vapor was separate in liquid and steam, the vapor was send to generation workstation.

One of the most important parameter in this process is the quantity of steam fluid send to generation workstation, so the measure of the fluid has to be very accurately.

Actually, all the process of fluid measure was made by a Venturi pipe using a pressure differential, without contemplating a temperature and pressure variations. All the systems ware focus to this process of measurement and because of that the measure has a considerable error percent and inexactitude.

That's the reason of the problem, because the exactitude level of the measure is not the best, which induce to erroneous interpretations about the production of the wells.

Because of that, we pretend to develop an algorithm to do all the necessaries calculations and show the steam fluid measurement contemplating the temperature and pressure variations. By the way, because all the measure process doesn't contemplate those variations, the programs of the touch screen, the SCADA and the configuration of the measure instruments have to be modified.

Also, have to determinate the possibility to implement this model in the other measure systems and give the economics benefits that wins the CSRG when the problem is solved.

Keywords: Miravalles Geothermic Field, Steam Fluid, PLC.

## **Dedicatoria**

*Dedico este triunfo en mi vida a Dios por darme las fuerzas necesarias e iluminarme en cada uno de mis pasos.*

*A mis padres, Ramón y Bithinia, que con su dedicación, su amor y su apoyo son mi gran fuente de inspiración para seguir siempre adelante.*

*A mis hermanos, Guillermo, María y Martha, por apoyarme y motivarme día con día.*

## **Agradecimiento**

*Agradezco a Dios por iluminarme todos los días y dejar terminar una etapa tan importante en mi vida.*

*A mis padres por darme el apoyo para poder llegar tan lejos.*

*A mis compañeros y profesores del ITCR por compartir sus conocimientos.*

*Y todas las personas que me respaldan, ayudan y dan confianza en mis sueños.*

## INDICE

|   |    |
|---|----|
| Resumen.....  | 3  |
| Abstract.....   | 4  |
| Dedicatoria.....  | 5  |
| Agradecimiento.....   | 6  |
| Capítulo 1. Introducción.....   | 13 |
| 1.1. Problema existente e importancia de su solución.....   | 13 |
| 1.2. Solución Seleccionada.....   | 17 |
| 1.2.1. Requerimientos.....  | 17 |
| 1.2.2. Solución Seleccionada.....   | 17 |
| Capítulo 2. Metas y Objetivos.....  | 19 |
| 2.1. Meta.....  | 19 |
| 2.2. Objetivo General.....  | 19 |
| 2.3. Objetivos Específicos.....   | 19 |
| a. Objetivos de Hardware.....   | 19 |
| b. Objetivos de Software.....   | 19 |
| c. Objetivos de documentación.....  | 20 |
| d. Objetivos de implementación.....   | 20 |
| Capítulo 3. Marco Teórico.....  | 21 |
| 3.1. Proceso de extracción de energía geotérmica <sup>1,5</sup> .....   | 21 |
| 3.2. Antecedentes Bibliográficos.....   | 24 |
| 3.3. Descripción de los principales principios físicos y electrónicos<br>relacionados con la solución del problema..... | 25 |
| 3.3.1. Tubo Venturi <sup>6, 12, 13</sup> .....  | 25 |
| 3.3.2. PLC C200HS <sup>8, 9, 10</sup> .....   | 28 |
| 3.3.3. Modelo para el equipo de medición de flujo de vapor <sup>6, 7, 11</sup> .....                                    | 31 |
| 3.3.4. Pantalla NT631C de OMRON <sup>4</sup> .....  | 34 |
| 3.3.5. Transmisor 3051 de Rosemount <sup>2, 3</sup> .....   | 35 |

|  |    |
|--|----|
| Capítulo 4. Procedimiento Metodológico.....  | 36 |
| 4.1. Reconocimiento y definición del problema .....                                      | 36 |
| 4.2. Obtención de la información .....   | 37 |
| 4.3. Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución .....                     | 38 |
| 4.4. Implementación de la solución.....  | 39 |
| 4.5. Reevaluación y rediseño .....   | 41 |
| Capítulo 5. Descripción detallada de la solución.....                                    | 42 |
| 5.1. Análisis de soluciones y selección final .....                                      | 42 |
| 5.2. Descripción del Hardware.....   | 44 |
| 5.2.1. Tubo Venturi.....   | 44 |
| 5.2.2. Transmisores de presión.....  | 46 |
| 5.3. Descripción del Software .....  | 47 |
| 5.3.1. Modelo de medición .....  | 47 |
| 5.3.2. Pantallas de tacto.....   | 58 |
| 5.3.3. SCADA.....  | 60 |
| Capítulo 6. Análisis de Resultados.....  | 62 |
| 6.1. Satélite 1.....   | 62 |
| 6.2. Satélite 7.....   | 65 |
| Capítulo 7. Conclusiones y recomendaciones .....   | 72 |
| 7.1. Conclusiones .....  | 72 |
| 7.2. Recomendaciones.....  | 73 |
| Bibliografía .....   | 74 |
| Apéndice A.1. Glosario, Abreviaturas y simbología .....                                  | 76 |
| Apéndice A.2. Protocolos de medición y puesta en marcha .....                            | 77 |
| Apéndice A.3. Información sobre la Institución .....                                     | 79 |
| A.3.1. Descripción del CSRG .....  | 79 |
| A.3.2. Descripción del departamento de Mantenimiento de Instrumentación<br>de Campo..... | 81 |

|   |    |
|---|----|
| A.3.3. Antecedentes Prácticos.....  | 82 |
| A.3.3.1. Modelos y Simulaciones para equipo de medición de flujo de vapor geotérmico (Venturi) en el complejo Miravalles..... | 83 |
| A.3.3.2. Sistema de medición de Vapor para la Planta Geotérmica Miravalles III.....   | 84 |
| A.3.3.3. Otros antecedentes .....   | 86 |
| Apéndice A.4. Hoja de Información.....  | 87 |
| Apéndice A.5. Programas de elaboración de figuras y tablas .....  | 88 |

## INDICE DE FIGURAS

|                     |  |    |
|---------------------|--|----|
| <b>Figura 1.1.</b>  | Ubicación del tubo Venturi.....  | 15 |
| <b>Figura 1.2.</b>  | Diagrama de bloques del proceso de extracción de vapor.....                                    | 15 |
| <b>Figura 1.3.</b>  | Diagrama del proceso de medición de flujo.....   | 16 |
| <b>Figura 3.1.</b>  | Unidad de separación .....   | 22 |
| <b>Figura 3.2.</b>  | Sistema de trasiego de vapor en Miravalles, Satélite 1 .....                                   | 23 |
| <b>Figura 3.3.</b>  | Secciones del tubo de venturi <sup>13</sup> .....  | 26 |
| <b>Figura 3.4.</b>  | Gráfica de flujo en función de $\Delta P$ .....  | 27 |
| <b>Figura 5.1.</b>  | Curva característica del Tubo Venturi .....  | 44 |
| <b>Figura 5.2.</b>  | Curva característica del Tubo Venturi con escalas modificadas ..                               | 45 |
| <b>Figura 5.3.</b>  | Descomposición del modelo de medición .....  | 47 |
| <b>Figura 5.4.</b>  | Diagrama de flujo del factor de expansión térmica.....   | 48 |
| <b>Figura 5.5.</b>  | Diagrama de flujo para el cálculo de $F_{DP}$ y el diámetro de la tubería<br>.....             | 50 |
| <b>Figura 5.6.</b>  | Diagrama de flujo para el cálculo de $F_{\Delta P}$ y el diámetro del cuello                   | 51 |
| <b>Figura 5.7.</b>  | Variación de la densidad con respecto a la presión .....                                       | 54 |
| <b>Figura 5.8.</b>  | Diagrama de flujo para el cálculo de densidad.....   | 55 |
| <b>Figura 5.9.</b>  | Diagrama de flujo del desarrollo del modelo .....  | 56 |
| <b>Figura 5.10.</b> | Pantalla de Operación .....  | 58 |
| <b>Figura 5.11.</b> | Pantalla de Proceso de Separación .....  | 59 |
| <b>Figura 5.12.</b> | Tabla Numérica .....   | 59 |
| <b>Figura 5.13.</b> | Histórico 22/07/2006 – Prueba Satélite 7 .....   | 61 |
| <b>Figura 6.1.</b>  | Histórico del Satélite 1.....  | 64 |
| <b>Figura 6.2.</b>  | Datos 23 de julio del 2006 – Satélite 7 .....  | 66 |
| <b>Figura 6.3.</b>  | Comportamiento de Flujo de Vapor del día 22/07/2006 .....                                      | 68 |
| <b>Figura 6.4.</b>  | Datos de Flujo de Vapor del día 22/07/2006 .....   | 69 |
| <b>Figura 6.5.</b>  | Porcentaje de error de las mediciones del día 22/07/2006 .....                                 | 70 |
| <b>Figura 6.6.</b>  | Porcentaje de error de acuerdo a las variaciones de flujo de vapor<br>del día 22/07/2006 ..... | 70 |

|                      |  |    |
|----------------------|--|----|
| <b>Figura A.3.1.</b> | Organización Interna del CSRG .....  | 80 |
| <b>Figura A.3.2.</b> | Departamento de Instrumentación.....   | 81 |
| <b>Figura A.3.3.</b> | Organización del Departamento de Mantenimiento de Instrumentación de Campo ..... | 82 |

## INDICE DE TABLAS

|                   |  |    |
|-------------------|--|----|
| <b>Tabla 3.1.</b> | Constantes del tubo venturi .....                                | 28 |
| <b>Tabla 3.2.</b> | Tiempo de refrescamiento de puertos I/O .....                    | 29 |
| <b>Tabla 3.3.</b> | Funciones mejoradas del PLC C200HS .....                         | 29 |
| <b>Tabla 3.4.</b> | Nuevas funciones asignadas al PLC C200HS .....                   | 30 |
| <b>Tabla 3.5.</b> | Nomenclatura utilizada en el modelo de medición .....            | 33 |
| <b>Tabla 3.5.</b> | Nomenclatura utilizada en el modelo de medición (Continuación).  | 34 |
| <b>Tabla 5.1.</b> | Datos de densidad según condiciones de saturación de vapor ..... | 53 |
| <b>Tabla 6.1.</b> | Datos del día 20 de junio del 2006 .....                         | 62 |
| <b>Tabla 6.2.</b> | Valores comparados con datos de Operación de Campo .....         | 63 |
| <b>Tabla 6.3.</b> | Datos del día 21 de junio del 2006 – Satélite 7 .....            | 65 |

## **Capítulo 1. Introducción**

Debido a que el Campo Geotérmico Miravalles se centra en la generación de energía eléctrica a partir de energía geotérmica extraída de los pozos en forma de vapor, es necesario realizar una medida de flujo de vapor de la forma más exacta posible.

Es por esto que se pretende implementar un modelo de medición que contemple las variaciones de temperatura, presión, densidad y diferencial de presión presentes en el proceso de medición de flujo de vapor, para así con esto realizar una medida más precisa de la cantidad de vapor que es entregado por los pozos a las centrales de generación de energía eléctrica.

### **1.1. Problema existente e importancia de su solución**

El Proyecto Geotérmico Miravalles surge como la posibilidad de obtener energía geotérmica proveniente del interior del Volcán Miravalles y transformarla en energía eléctrica.

Los pozos de donde se extrae ésta energía en forma de flujo bifásico, líquido y vapor, se encuentran conectados a una central separadora denominada satélite donde se lleva a cabo el proceso de separación.

Una vez realizada la separación, el líquido es reinyectado a la fuente de extracción de energía o reservorio geotérmico, aunque existe una segunda línea de emergencia que se activa dependiendo del nivel del líquido. El vapor separado es enviado a las centrales de generación donde se utiliza para la producción de energía eléctrica, aunque, al igual que el líquido térmico separado, existe una línea de emergencia que en caso de presentarse problemas con el envío, se abre y da paso hacia un colector para luego ser liberado mediante los silenciadores.

Actualmente en el Campo Geotérmico Miravalles existen varias unidades de procesamiento de vapor que pertenecen al ICE y que se encargan de generar energía eléctrica. Aunque existe otra unidad de procesamiento de vapor que no pertenece al ICE sino que es de capital extranjero, la cuál le compra al ICE el vapor producido por los pozos para procesarlo y generar energía eléctrica. Ésta energía eléctrica es de nuevo vendida al ICE para su uso. Debido a esto se tiene que llevar un registro de la cantidad de vapor que se está produciendo.

El proceso de extracción del flujo bifásico de los pozos, la separación de éste en líquido térmico y vapor, y el envío de vapor a las unidades de procesamiento se monitorean mediante unidades de control en conjunto con una gran cantidad de instrumentos de medición.

Debido a que el vapor es el producto de más importancia del Centro de Servicio Recursos Geotérmicos, ya que éste se procesa para la generación de energía eléctrica, es necesario tener un registro detallado de la producción por parte de los pozos.

Este registro se realiza mediante la medición de la cantidad de flujo de vapor que es enviado a Casa Máquinas y a Miravalles III. Actualmente, este valor es obtenido mediante un Tubo Venturi, el cuál mide la cantidad de flujo tomando en cuenta el diferencial de presión entre dos puntos sin contemplar las variaciones de temperatura y de presión, por ende, los valores de flujo de vapor medido contienen un alto grado de incertidumbre.

La figura 1.1 muestra la ubicación donde se encuentra el tubo venturi para el proceso de medición del nivel de flujo.

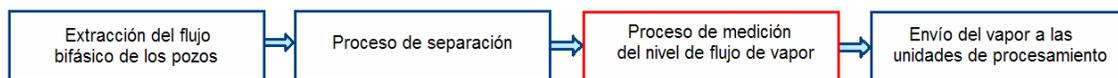


**Figura 1.1.** Ubicación del tubo Venturi

Así, el problema consiste en el error de la medición que se realiza al flujo de vapor que es enviado a las unidades de procesamiento para la generación de energía eléctrica.

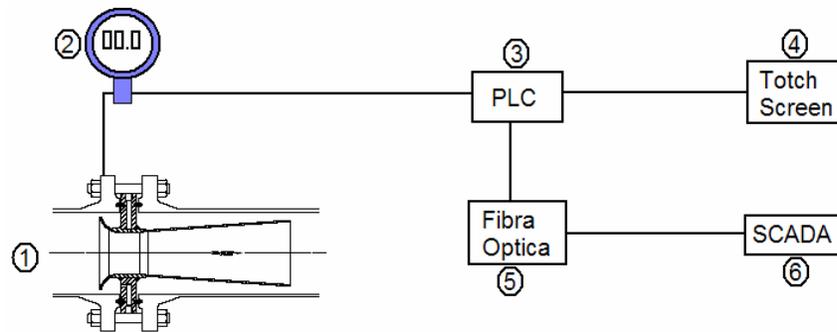
Este error en la medición induce a valores no exactos sobre la producción de vapor que se da en los pozos, lo que podría implicar pérdidas económicas y de producción para el campo. Esto se debe a que el CGM opera basándose en la rentabilidad de producir energía eléctrica mediante el procesamiento de la energía geotérmica, además de vender vapor a Miravalles 3.

El proceso de extracción de vapor que se lleva a cabo se puede apreciar en el diagrama de bloques que se presenta en la figura 1.2.



**Figura 1.2.** Diagrama de bloques del proceso de extracción de vapor

El bloque resaltado en rojo representa la etapa donde se llevará a cabo el proyecto ya que es acá donde se presenta el problema. Esta etapa puede a su vez subdividirse para un mejor análisis como se muestra en la figura 1.3.



1. Tubo Venturi
2. Transmisor de Presión 3051 de Rosemount
3. PLC CS200H
4. Touch Screen
5. Fibra Óptica
6. SCADA

**Figura 1.3.** Diagrama del proceso de medición de flujo

La importancia de dar solución al problema conlleva a mejorar el proceso de medición del flujo de vapor, haciendo la medición más exacta, por lo que el registro de producción tendrá una mayor validez ante cualquier problema que pueda generarse en el CGM.

Dentro de los beneficios que trae al Campo Geotérmico Miravalles el resolver el problema se pueden citar:

- Mayor exactitud en el registro de producción de vapor, por lo que tendrá una mayor validez ante cualquier circunstancia que se presente.
- Conocer la cantidad exacta de vapor que se entrega a las unidades de generación.
- Evitar posibles sanciones económicas debido a un error en la medición de la producción de los pozos.
- Al obtener una medición más precisa sobre el nivel de flujo de vapor enviado a las unidades de procesamiento, es posible, desarrollar un mejor estudio sobre los procedimientos de explotación del reservorio geotérmico y las consecuencias que pueda generar en los pozos el proceso de producción actual.

## **1.2. Solución Seleccionada**

### **1.2.1. Requerimientos**

- a. Analizar y desarrollar un algoritmo de simplificación del modelo propuesto para la medición del flujo de vapor.
- b. Implementar un modelo en uno de los satélites que permita mejorar la precisión de la medición del flujo de vapor.
- c. Reprogramar los transmisores de presión que se encuentran a la salida de los Venturi para obtener la medición del diferencial de presión.
- d. Modificar la programación del Touch Screen para poder visualizar el flujo de vapor medido.
- e. Luego de realizar la implementación, determinar la factibilidad de implementar dicho modelo en los demás sistemas de medición que se encuentran actualmente en el proceso de producción de vapor.
- f. Configurar el SCADA para realizar la lectura de datos desde el PLC mediante fibra óptica.

### **1.2.2. Solución Seleccionada**

Debido a que este proyecto responde a una necesidad importante dentro del proceso de producción de vapor y a que se han realizado investigaciones con el fin de darle solución a este problema, se desarrolló un modelo para el cálculo de flujo de vapor contemplando las variables que afectan la precisión de la medida.

El nuevo modelo es más completo y complejo que el anterior, por lo se debe realizar un estudio a fondo para conocer las características principales que lo acompañan.

La solución seleccionada se basa en la implementación de éste modelo, ya desarrollado, dentro de las unidades de control actuales, esto contempla el desarrollo de un algoritmo de programación, la configuración del equipo de medición y de los transmisores, la modificación del programa actual del Touch Screen y la configuración del programa actual del SCADA, debido a que todo este sistema se encuentra orientado al anterior proceso de medición.

Además, se debe realizar un estudio sobre la factibilidad de implementar dicho modelo dentro de los demás satélites que operen con el mismo PLC y analizar los beneficios económicos que puede traer a la compañía el desarrollo del proyecto.

El modelo planteado incluye las variables correspondientes a diferencial de presión, presión, temperatura y densidad; además debido a que la unidad de control que se utiliza actualmente posee un set de funciones muy limitado, se debe llevar a cabo un análisis matemático del modelo que permita simplificarlo.

Para este caso se realizará un estudio detallado del modelo que permita plantear la ecuación en funciones simples. Además se dividirá el modelo en diferentes secciones con la finalidad de poder facilitar su implementación y poder simplificar el análisis del mismo.

Una vez que se ha establecido el modelo del cálculo de flujo de vapor en funciones simples se procede a desarrollar el algoritmo de programación para luego implementar el programa en las unidades de control. Para esto se debe también realizar las modificaciones de los transmisores de diferencial de presión para obtener la medida correspondiente al diferencial de presión y no al flujo de vapor como lo realiza actualmente.

Se debe modificar la lectura de las pantallas de tacto y el sistema de monitoreo debido que estas se encuentran orientadas al anterior modelo de medición.

Una vez realizadas todas las modificaciones necesarias y encontrarse implementado el modelo dentro de las unidades de control se procede a obtener los resultados necesarios para luego realizar un análisis acerca del desempeño del mismo.

## **Capítulo 2. Metas y Objetivos**

### **2.1. Meta**

Disminuir el error de la medición de flujo de vapor que es enviado a las unidades de procesamiento a un 3% mediante un nuevo modelo de medición que involucra los parámetros más importantes que afectan las mediciones actuales.

### **2.2. Objetivo General**

Implementar un modelo para medición de flujo de vapor en el proceso actual de los satélites que funcionan con el PLC C200HS, que permita tomar en cuenta los cambios en los parámetros que afectan la exactitud en la medición actual.

### **2.3. Objetivos Específicos**

#### **a. Objetivos de Hardware**

1. Obtener los parámetros necesarios para el desarrollo del modelo.
2. Obtener el porcentaje de error que presentan en las mediciones cada uno de los instrumentos de medición utilizados.

#### **b. Objetivos de Software**

1. Desarrollar un algoritmo de programación del modelo de medición de flujo de vapor teniendo en cuenta las funciones que puede ejecutar el PLC a utilizar.
2. Reconfigurar los transmisores para realizar la lectura de los parámetros involucrados en el desarrollo del modelo de medición.
3. Implementar el algoritmo desarrollado para la medición de flujo de vapor dentro de los satélites que funcionan con el PLC C200HS.

4. Configurar el programa de la pantalla de tacto NT631C de OMRON para realizar el despliegue de información.
5. Configurar el programa del SCADA para recibir los datos desde los satélites mediante fibra óptica, desplegar gráfica y numéricamente estos valores y almacenarlos en una base de datos.
6. Realizar un análisis de los datos obtenidos para verificar si se cumplió o no con los objetivos propuestos.

**c. Objetivos de documentación**

1. Redactar un informe en el que se describa el proceso de solución del proyecto, así como las consideraciones más importantes que se deben tener en cuenta.
2. Redactar un informe de pruebas en el que se detallen los resultados obtenidos con respecto a los resultados esperados.
3. Actualizar las modificaciones realizadas al PLC en el registro que se utiliza a nivel interno dentro del departamento de Instrumentación.
4. Actualizar las modificaciones realizadas al Touch Screen en el registro que se lleva a nivel interno dentro del departamento de Instrumentación.

**d. Objetivos de implementación**

1. Implementar el nuevo modelo de medición de flujo de vapor en el proceso de medición que existe actualmente en el satélite.
2. Puesta en marcha del nuevo sistema de medición de flujo de vapor enviado a las unidades de procesamiento.

### **Capítulo 3. Marco Teórico**

El proyecto a desarrollar comprende la modificación del método actual de medición de flujo de vapor, uno de los cálculos más importantes dentro de la tarea que cumple el Campo Geotérmico Miravalles.

Es por esto que es importante tener un conocimiento básico sobre el cómo se obtiene la energía geotérmica para la generación de energía eléctrica. Además conocer que instrumentos y equipos son utilizados tanto para el desarrollo del proyecto como para el proceso en general.

Esto comprende los instrumentos de medición de presión y temperatura, así como las unidades de control y pantallas de tacto en cada uno de los Satélites, además del sistema de monitoreo SCADA que se encuentra en el plantel del CSRG y que se utiliza para monitorear todo el proceso de producción de vapor.

#### **3.1. Proceso de extracción de energía geotérmica <sup>1,5</sup>**

El aporte de la energía geotérmica ha sido muy significativo para el país. Su condición de energía base le ha permitido dar confiabilidad a la red del Sistema Eléctrico Nacional aportando un 12.8% de la energía generada por el Sistema Nacional Interconectado durante el año 2000.

El proceso de extracción de energía geotérmica se desarrolla mediante la excavación de pozos productores de los cuales se obtiene un flujo bifásico, el cuál se compone de líquido y vapor.

Éste es transportado a las Estaciones Separadoras, por medio de una tubería la cuál está cubierta de un material aislante. El flujo bifásico de los pozos se une antes de llegar al satélite, entrando en una sola línea al separador y, al ser el vapor más liviano que el líquido, éste se tiende a ir hacia arriba y el líquido térmico queda en la parte inferior.



**Figura 3.1.** Unidad de separación

Luego el líquido es enviado a un tanque para agua donde por medio de un visor se mide la cantidad de agua trasegada del sistema.

Dentro de este proceso de separación se deben tomar en cuenta diferentes parámetros importantes, uno de estos es la presión la cual se utiliza como indicativo de los niveles de seguridad del proceso; es decir, se establecen diferentes niveles de presión que no deben ser sobrepasados y si estos se sobrepasan se activan mecanismos de seguridad que permiten descenderlo a niveles óptimos.

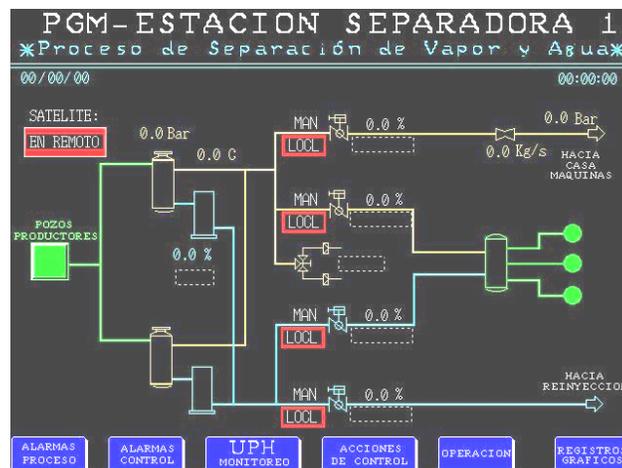
El nivel de líquido separado del flujo bifásico indica la amenaza de un posible pase de líquido a la línea de vapor dentro del separador y se utiliza para definir el manejo y establecimiento de la reinyección del satélite. También la temperatura a la cuál se encuentra el separador es otro de los parámetros importantes.

Son también parámetros importantes la temperatura y la cantidad de flujo de vapor que es enviado a Casa Máquina luego de la separación. El flujo de vapor, es uno de los parámetros más importantes porque es el que indica la cantidad de producción de los pozos, y siendo el vapor la materia prima para la generación de energía eléctrica indica también la rentabilidad que ofrece el Campo Geotérmico Miravalles.

Todos estos parámetros son constantemente monitoreados y almacenados por unidades de control que se encuentran en cada uno de los 7 satélites existentes. Para tal caso existen dos tipos de controladores, el PLC C200HS y el PLC C2000H.

Cabe recalcar que el PLC C200HS es el más nuevo y más completo, ya que posee mayor cantidad de memoria y un set de funciones más completo. Es por esto que se procederá a realizar la implementación del algoritmo en él.

La figura 3.2 muestra el proceso de separación del flujo bifásico en líquido y vapor, y el envío del vapor a Casa Máquinas en la pantalla de tacto de la Estación Separadora 1. Las líneas verdes corresponden a tuberías bifásicas, las líneas amarillas corresponden a tuberías de conducción de vapor y las líneas celestes a tuberías de conducción de líquido térmico.



**Figura 3.2.** Sistema de trasiego de vapor en Miravalles, Satélite 1

Como se observa, las tuberías de flujo bifásico entran a los separadores, los cuáles, como su nombre lo dice, se encargan de realizar la separación en vapor y líquido. El líquido es transportado a los tanques de medición de nivel para luego ser reinyectado; mientras que el vapor es enviado hacia las plantas de producción de energía eléctrica.

Aunque, como se observa, tanto para el líquido como para el vapor existe una segunda línea de salida, la cuál es una línea de emergencia que se encarga de liberar el exceso de alguno de estos dos fluidos mediante los silenciadores.

### **3.2. Antecedentes Bibliográficos**

La información referente al proyecto se obtuvo de documentos aportados por la institución, entrevistas realizadas e investigaciones externas. Algunos de los documentos aportados por la institución fueron libros y documentos acerca del proceso de extracción de energía geotérmica, manuales de operación de los PLC, hojas de datos del tubo venturi, de los transmisores de presión, de la pantalla de tacto y del HART que se utiliza para la configuración del transmisor.

También se utilizó documentos acerca de investigaciones realizadas anteriormente con el fin de corregir el problema. Uno de estos documentos explica ampliamente el desarrollo del nuevo modelo para la medición de flujo de vapor.

También se usó un informe donde se explica el proceso de medición del flujo de vapor utilizado en la Planta Geotérmica Miravalles III. En este documento se explica el método empleado por esta planta para la medición utilizando un modelo semejante al modelo planteado.

Dentro de las entrevistas realizadas, una fue hecha al Ing. Rodrigo Mora asesor del proyecto. Esta entrevista se basó en la explicación del proceso de separación del flujo bifásico extraído en los pozos y en el modelo utilizado actualmente en las mediciones de vapor.

La otra entrevista se realizó al Ing. Federico Nietzen, principal desarrollador del nuevo modelo de medición. En esta entrevista se aclararon ciertas dudas con respecto al modelo desarrollado, su nomenclatura y a consideraciones que se deben tener en cuenta en su desarrollo.

Las investigaciones externas que se realizaron se basaron en la operación del tubo Venturi con el fin de conocer el método que emplea para la medición del diferencial de presión, además de asesoría brindada por el personal encargado para conocer la programación tanto de la pantalla de tacto como del sistema SCADA.

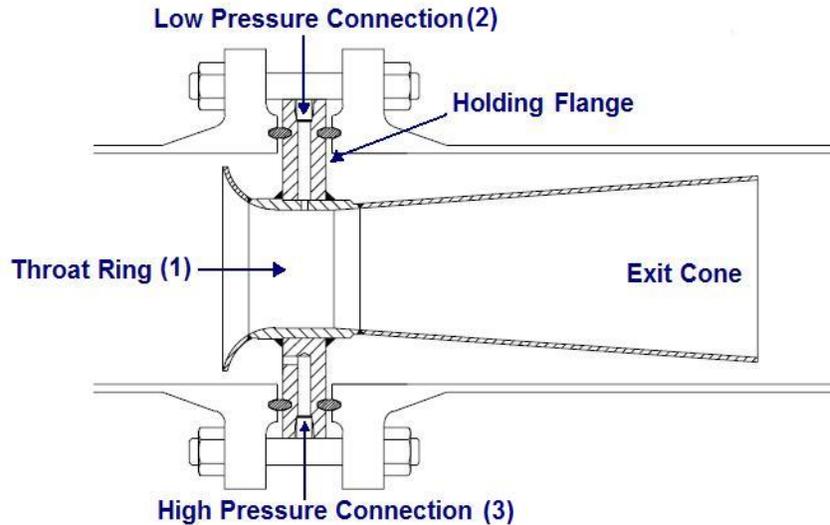
Otra fuente de información importante es el aporte realizado por las personas cercanas al proyecto sobre el cómo enfrentar el problema y las consideraciones importantes para el desarrollo de su solución.

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

#### **3.3.1. Tubo Venturi**<sup>6, 12, 13</sup>

El instrumento de medición del flujo de vapor que se utiliza actualmente es el tubo Venturi, debido a que es la forma más eficaz para medir el flujo de vapor ya que por sus características de operación presenta menos pérdidas en la presión de línea y posee una medición más confiable que otros instrumentos, esto se consigue por el cono divergente que desacelera la corriente.

El tubo Venturi es una tubería corta, entre dos tramos cónicos que origina una pérdida de presión al pasar por él un fluido. La presión varía en la proximidad de la sección estrecha (Figura 3.3, punto 1); así, se colocan dos medidores de presión, uno que mida dentro del cuello (Figura 3.3, punto 2) y el otro que mida la presión antes de entrar en el tubo (Figura 3.3, punto 3) para de esta manera obtener el diferencial de presión y calcular el valor de flujo instantáneo.



**Figura 3.3.** Secciones del tubo de venturi <sup>13</sup>

En la figura 3.3 se muestran las secciones más importantes dentro del tubo Venturi. La primera es el cuello (Throat Ring), que se encarga de generar un cambio de presión dentro del flujo que genera una diferencia de presiones que se utilizan para calcular el nivel del flujo. El diámetro del cuello varía desde un tercio a tres cuartos del diámetro de la tubería.

Las siguientes dos secciones corresponden a las aberturas que se utilizan para medir tanto el nivel de presión que precede al cuello como la presión dentro de la garganta. Estas presiones son transmitidas a dos aberturas anulares llamadas anillos piezométricos. Estos anillos son conectados a un medidor diferencial de presión.

Otra sección importante es el cono de salida. Éste funciona como un largo cono divergente, que restaura la presión y expande el fluido al diámetro de la tubería.

Para la construcción de un tubo venturi se debe conocer la relación existente entre los dos distintos diámetros que tiene el tubo, ya que de estos dependen los valores de presión que se desean a la entrada y a la salida del mismo. Esta relación entre diámetros y distancias es la base para realizar los cálculos para la construcción del tubo venturi, además de los conocimientos del caudal que se desee pasar a través de él.

Una vez definidas las secciones más importantes dentro del diseño de un tubo venturi procedemos a explicar su funcionamiento.

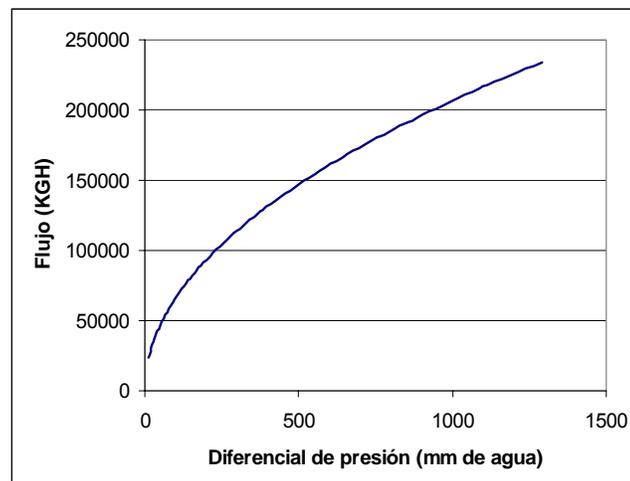
Primero, el flujo que viene desde la tubería principal se hace acelerar a través de la sección angosta (cuello) donde disminuye la presión del fluido. Luego, mediante el cono de salida el flujo es expandido hasta alcanzar de nuevo el diámetro de la tubería principal.

Tanto en la pared de la tubería como en el cuello del tubo venturi se encuentran ubicadas dos aberturas para sensar presión, estas dos aberturas se encuentran unidas a los dos lados de un medidor diferencial que indica la magnitud de la diferencia de ambas presiones.

Una vez obtenido el diferencial de presión  $\Delta P$ , se utiliza este dato para calcular el nivel de flujo que pasa a través de la tubería.

Los tubos venturi utilizados en las instalaciones del Campo Geotérmico Miravalles son del modelo BVT-IF de Badger Meter. En el anexo B.1 se encuentra la hoja de datos que brinda el fabricante.

La medición del nivel de flujo mediante este tubo venturi se realiza utilizando una tabla de relaciones entre el diferencial de presión y el nivel flujo. Esta relación puede observarse gráficamente en la figura 3.4.



**Figura 3.4.** Gráfica de flujo en función de  $\Delta P$

Como se observa, la gráfica tiene un comportamiento exponencial, este comportamiento puede ser modelado según la siguiente ecuación.

$$f(x) = k \cdot \sqrt{x} \quad (3.1)$$

Donde x es la variable independiente, en este caso el diferencial de presión, f(x) es el nivel de flujo de vapor y k es una constante que relaciona ambos valores.

Algunas constantes importantes del tubo venturi utilizado se encuentran en la tabla 3.1.

**Tabla 3.1.** Constantes del tubo venturi

| Constante  | Valor                 | Unidad       |
|------------|-----------------------|--------------|
| $\mu_P$    | 0.3                   | Adimensional |
| $\mu_{PE}$ | 0.3                   | Adimensional |
| $E_P$      | 193                   | GPa          |
| $E_{PE}$   | 193                   | GPa          |
| $t_P$      | 3.02                  | Mm           |
| $t_{PE}$   | 3.02                  | Mm           |
| $D_{f20}$  | 692.15                | Mm           |
| $d_{f20}$  | 503.47                | Mm           |
| $\alpha_P$ | $16.2 \times 10^{-6}$ | $K^{-1}$     |

### 3.3.2. PLC C200HS<sup>8, 9, 10</sup>

El PLC C200HS es uno de los PLC que se utiliza dentro en los satélites para el monitoreo, este PLC cuenta con un set de funciones más completo que el otro PLC utilizado, el C2000H.

Algunas características importantes de este PLC se enumeran a continuación:

1. Memoria Interna (UM): Viene equipado con 16KW de memoria RAM en el PLC, esta capacidad de memoria permite al PLC prescindir de un módulo de memoria externo.

2. Clock Function: El diseño del C200HS se encuentra orientado a la temporización, por lo que no es necesario agregar un módulo de memoria equipado con temporizador.
3. Tiempo de ejecución de instrucciones: Las instrucciones básicas son ejecutadas de 0.375 $\mu$ s a 1.313 $\mu$ s y las instrucciones de aplicación son ejecutadas de 8.5 $\mu$ s a 181 $\mu$ s. El tiempo común de procesamiento es de 0.7ms.
4. Tiempo de refrescamiento de puertos I/O: El tiempo de refrescamiento de los puertos I/O han sido reducidos para todas las unidades como se observa en la tabla 4.1.

**Tabla 3.2.** Tiempo de refrescamiento de puertos I/O

| Módulos de I/O                  | Tiempo requerido de refrescamiento |
|---------------------------------|------------------------------------|
| Módulos de I/O estándar         | 0.013 a 0.023 ms / 8bits           |
| Módulos de I/O de alta densidad | 0.113 a 0.286 ms / unidad          |
| Módulos de I/O especiales       | 0.64 a 5.2 ms / unidad             |

5. Mayor set de instrucciones: Posee un mayor set de instrucciones, actualmente 239, mejorando algunas funciones como las puestas en la tabla 3.3 y se han incluido nuevas funciones que se encuentran en la tabla 3.4.

**Tabla 3.3.** Funciones mejoradas del PLC C200HS

| Instrucciones | Funciones adicionales  |
|---------------|--|
| DIST(80)      | Stack Operation. Ahora el Stack puede almacenar más de 999 palabras.                                     |
| COLL(81)      | FIFO/LIFO Stack Operation. Ahora el Stack puede almacenar más de 999 palabras.                           |
| MLPX(76)      | Capacidad de decodificación de 4-256.  |
| DMPX(77)      | Capacidad de codificación de 4-256.  |
| ADB(50)       | Dato binario con signo puede ser incrementado.   |
| SBB(51)       | Dato binario con signo puede ser restado.  |
| INT(89)       | Puede ser utilizada para establecer interrupciones temporizadas en 1ms y para control de interrupciones. |

**Tabla 3.4.** Nuevas funciones asignadas al PLC C200HS

| Mnemónico | Función                       | Mnemónico | Función                      |
|-----------|-------------------------------|-----------|------------------------------|
| TRSM(45)  | Trace Memory Transfer         | MSB(--)   | Signed Binary Multiply       |
| MCRO(99)  | Macro                         | DSB(--)   | Signed Binary Divide         |
| MAX(--)   | Find Maximum                  | FCS(--)   | Frame Checksum               |
| MIN(--)   | Find Minimum                  | 7SEG(--)  | 7-Segment Display Output     |
| SUM(--)   | Sum                           | RXD(--)   | Receive                      |
| SRCH(--)  | Data Search                   | TXD(--)   | Transmit                     |
| FDP(--)   | Failure Point Detection       | CPS(--)   | Signed Binary Compare        |
| PID(--)   | PID Control                   | CPSL(--)  | Signed Double Binary Compare |
| HEX(--)   | ASCII to hex                  | NEG(--)   | 2's Complement               |
| XDMR(--)  | Expansion DM Read             | NEGL(--)  | Double 2's Complement        |
| DSW(--)   | Digital Switch Input          | ZCPL(--)  | Double Area Range Compare    |
| TKY(--)   | Ten-Key Input                 | AVG(--)   | Average Value                |
| MTR(--)   | Matriz Input                  | SCL(--)   | Scale                        |
| HKY(--)   | 16-Key Input                  | SET       | Set                          |
| ADBL(--)  | Double Binary Add             | RSET      | Reset                        |
| SBBL(--)  | Double Signed Binary Subtract | TTIM(--)  | Totalizing Timer             |
| MBSL(--)  | Double Signed Binary Multiply | XFRB(--)  | Transfer Bits                |
| DBSL(--)  | Double Signed Binary Divide   | ZCP(--)   | Area Range Compare           |

6. Posee un mayor ancho de selección de módulos de I/O.
7. Posee funciones de interrupción mejoradas.

### 3.3.3. Modelo para el equipo de medición de flujo de vapor <sup>6, 7, 11</sup>

El nuevo modelo planteado para la medición del flujo de vapor está definido por la ecuación 3.2. Para el uso de este modelo se deben tener algunas consideraciones, una de ellas es el considerar el vapor saturado de agua en equilibrio térmico.

$$q[\text{kg} / \text{s}] = \frac{\pi}{4} \cdot \sqrt{2g_c} \cdot \frac{C \cdot Y \cdot (d_f)^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{d_f}{D_f}\right)^4}} \cdot \sqrt{\rho_{f1}} \cdot \sqrt{\Delta P} \quad (3.2)$$

Otra consideración importante es considerar el fluido que pasa a través del tubo venturi como puro, es decir que no contenga ningún contaminante o traza.

Analizando las variables del modelo por separado se encuentra que una de las variables más afectadas por la presión y la temperatura es la densidad. Es por esto que se presta especial atención a los métodos para calcularla.

La densidad es calculada utilizando un modelo basado en tablas termodinámicas, donde se le considera que posee un comportamiento lineal basado en la presión.

Además de la densidad, existen otras variables involucradas en el desarrollo del modelo que se ven afectadas por la temperatura tales como los diámetros de la tubería y del cuello del tubo venturi, así como del factor adiabático de expansión térmica.

Donde la corrección del diámetro de la tubería viene dada por:

$$D_f = F_{aD} \cdot F_{Dp} \cdot D_M \quad (3.3)$$

Donde  $F_{ad}$  es el factor de corrección por expansión térmica y  $F_{DP}$  es el factor de corrección por presión. Las ecuaciones 3.4 y 3.5 muestran el detalle de estos factores.

$$F_{ad} = 1 + \alpha_P (T_K - T_{D,ref}) \quad (3.4)$$

$$F_{DP} = \frac{1}{1 - \frac{P_f \cdot D_M \cdot \left(1 - \frac{\mu_P}{2}\right)}{2 \cdot E_P \cdot t_p}} \quad (3.5)$$

Por lo que una función más generalizada del diámetro de la tubería es:

$$D_f = \left(1 + \alpha_P (T_K - T_{D,ref})\right) \cdot \left( \frac{1}{1 - \frac{P_f \cdot D_M \cdot \left(1 - \frac{\mu_P}{2}\right)}{2 \cdot E_P \cdot t_p}} \right) \cdot D_M \quad (3.6)$$

La corrección del diámetro del cuello del tubo venturi viene dada por:

$$d_f = F_{ad} \cdot F_{\Delta P} \cdot d_m \quad (3.7)$$

Donde  $F_{ad}$  es el término de expansión térmica y  $F_{\Delta P}$  es el factor de corrección por diferencial de presión y se muestran en detalle en las ecuaciones 3.8 y 3.9.

$$F_{ad} = 1 + \alpha_{PE} (T_K - T_{D,ref}) \quad (3.8)$$

$$F_{dP} = \frac{1}{1 - \frac{(P_f - \Delta P) \cdot d_M \cdot \left(1 - \frac{\mu_{PE}}{2}\right)}{2 \cdot E_{PE} \cdot t_{PE}}} \quad (3.9)$$

Por lo que la expresión completa de la corrección del diámetro del cuello del tubo queda de la siguiente manera:

$$d_f = (1 + \alpha_{PE}(T_K - T_{D,ref})) \cdot \left( \frac{1}{(P_f - \Delta P) \cdot d_M \cdot \left(1 - \frac{\mu_{PE}}{2}\right)} \cdot d_m \right) \cdot \left( 1 - \frac{1}{2 \cdot E_{PE} \cdot t_{PE}} \right) \quad (3.10)$$

Otro parámetro dentro del modelo es el factor adiabático de expansión térmica, dado por la ecuación 3.11.

$$Y = \sqrt{r^{2/k} \cdot \left(\frac{k}{k-1}\right) \cdot \left(\frac{1-r^{(k-1)/k}}{1-r}\right) \cdot \left(\frac{1-\beta^4}{1-\beta^4 \cdot r^{2/k}}\right)} \quad (3.11)$$

En la tabla 3.5 se muestra la nomenclatura utilizada en el modelo de medición del flujo de vapor.

**Tabla 3.5.** Nomenclatura utilizada en el modelo de medición

| Parámetro   | Definición   | Unidades |
|-------------|--|----------|
| $D_M$       | Medida del diámetro según la temperatura de referencia                           | m        |
| $F_{aD}$    | Expansión térmica de la tubería  | Adim.    |
| $F_{DP}$    | Factor de corrección por presión de la tubería                                   | Adim.    |
| $\alpha_P$  | Factor de expansión térmica del material de la tubería                           | m/(m.K)  |
| $T_K$       | Temperatura absoluta del flujo   | K        |
| $T_{D,ref}$ | Temperatura de referencia a la cuál se toma la medida del diámetro de la tubería | K        |
| $P_f$       | Presión del fluido   | Pa       |
| $t_p$       | Espesor de la pared de la tubería a la temperatura de referencia                 | m        |
| $E_P$       | Módulo de elasticidad del material de la tubería a la temperatura del fluido     | Pa       |
| $\mu_P$     | Relación de Poisson del material de la tubería                                   | m/m      |

**Tabla 3.5.** Nomenclatura utilizada en el modelo de medición (Continuación)

| Parámetro      | Definición   | Unidades |
|----------------|--|----------|
| $d_M$          | Medida del diámetro del cuello según la temperatura de referencia                                  | m        |
| $F_{ad}$       | Expansión térmica del cuello   | Adim.    |
| $F_{\Delta P}$ | Factor de corrección por diferencial de presión  | Adim.    |
| $\alpha_{PE}$  | Elemento primario del factor de expansión térmica del material de la tubería                       | m/(m.K)  |
| $t_{pE}$       | Espesor de la pared del elemento primario a la temperatura de referencia                           | m        |
| $E_{PE}$       | Módulo de elasticidad del material de la tubería del elemento primario a la temperatura del fluido | Pa       |
| $\Delta P$     | Diferencial de presión   | Pa       |
| $\mu_{PE}$     | Relación de Poisson del material del elemento primario   | m/m      |
| K              | Coefficiente isentrópico ( $k = 0.0118P + 1.3056$ )  | Adim.    |
| B              | Relación de los diámetros ( $d_f / D_f$ )  | Adim.    |
| R              | Relación de las densidades ( $\rho_1 / \rho_2$ )   | Adim.    |

### 3.3.4. Pantalla NT631C de OMRON <sup>4</sup>

La pantalla de tacto que se encuentra en los satélites es la NT631C de OMRON. Ésta se encarga de presentar al usuario una interfaz gráfica amigable que le permita observar todo el proceso de extracción de energía geotérmica.

En ella se monitorea el proceso de separación del flujo bifásico, además de monitorear constantemente parámetros como la presión, la temperatura, el flujo de vapor, entre otros.

Entre las características más importantes que posee se pueden citar:

- Es delgada (50mm de profundidad)
- Display de colores de alto contraste
- Posee dos puertos de comunicación, uno con el PLC y otro para conectarse a un ordenador para realizar cambios en su software
- Capacidad de almacenamiento de datos de 1Mbyte
- Posee función multiventanas

El programa actual de esta pantalla deberá ser modificado para realizar el despliegue de datos del flujo de vapor y el almacenamiento en el historial mediante un ordenador.

### **3.3.5. Transmisor 3051 de Rosemount<sup>2,3</sup>**

El transmisor 3051 de Rosemount es un transmisor inteligente de presión que se encarga de enviar los datos de presión en un lazo analógico de 4 a 20mA desde el tubo Venturi hasta el PLC.

Actualmente, el transmisor se encuentra configurado para realizar el envío de datos correspondiente al flujo de vapor, es por esto que se debe configurar para que los datos enviados mantengan una relación lineal con el diferencial de presión medido y no una relación cuadrática como actualmente lo realiza.

Para la configuración del transmisor se utiliza el HART 295 de Fisher – Rosemount. Este comunicador HART es una interfaz de mano que provee un acceso directo de comunicación con el transmisor, mediante él se puede tener acceso a todos los menús y variables de programación del transmisor.

## **Capítulo 4. Procedimiento Metodológico**

El desarrollo del proyecto conlleva un método de diseño de en ingeniería, de esta manera debe conocerse los pasos necesarios para llegar a dar solución al problema.

A continuación se presentan las etapas que se llevaron a cabo tanto para el nacimiento del proyecto como para su desarrollo y puesta en marcha.

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

El Campo Geotérmico Miravalles se encarga de la generación de energía eléctrica mediante el procesamiento de energía geotérmica. Esta energía geotérmica viene dada en forma de vapor y es extraída mediante pozos.

Debido a que toda la producción de energía eléctrica se basa en la cantidad de vapor que se procesa, es necesario conocer la cantidad, de manera precisa, que es entregada por las unidades separadoras y los pozos a las unidades de generación.

Así el problema principal incide en que el registro actual de la producción de vapor que se lleva a cabo actualmente carece de precisión.

Para el reconocimiento del problema se llevó a cabo una visita a uno de los satélites y a algunos pozos de producción de vapor. En estas visitas se observó el proceso de separación del flujo extraído de los pozos y los mecanismos de seguridad existentes.

Además, se analizó el sistema de monitoreo de la producción, desde los instrumentos de medición utilizados y sus respectivas posiciones, entre estos el tubo venturi utilizado para la medición de flujo; hasta el funcionamiento y ubicación de la unidad de control que se utiliza, además del funcionamiento actual del software utilizado.

Otro factor importante en el reconocimiento del problema fue la explicación brindada por parte del asesor dentro de la institución, así como de documentos brindados sobre el estudio por parte de diferentes especialistas en esta área.

En cuanto a las metas que se pretenden alcanzar y a las restricciones generales de la solución propuesta, éstas fueron analizadas en conjunto con el ingeniero asesor.

#### **4.2. Obtención de la información**

Toda la información obtenida fue facilitada por parte del CSRG. Una de las fuentes más importantes que se va a usar es la retroalimentación de información recibida por parte de los compañeros y el asesor en el campo de trabajo.

Otra fuente importante que se utilizará es el informe sobre el nuevo modelo desarrollado para la medición de flujo de vapor; para este caso se efectuó también una entrevista con el Ing. Federico Nietzen para conocer más a fondo las implicaciones del modelo desarrollado.

Se utilizará además un informe acerca del desarrollo de un sistema de medición de vapor implementado en la Planta Geotérmica Miravalles III, el cual ha traído resultados satisfactorios en el cálculo de medición del nivel de flujo.

Otras fuentes de información que se utilizarán son el manual de operación del PLC C200HS, de la pantalla de tacto NT631C, del transmisor de presión 3051 de Rosemount, del HART 275 y de hojas de datos de los tubos venturi utilizados. En el manual de operación se encuentra información sobre el manejo del PLC e información importante con respecto a su programación. En cuanto a la hoja de datos de los tubos venturi, en ella se encuentran todas las características necesarias para los cálculos del modelo de medición.

También se incluye dentro de las fuentes de información a utilizar el Internet y el correo electrónico, esto con el fin de realizar búsquedas complementarias para el desarrollo del proyecto y para mantener un lazo de comunicación constante con los compañeros del departamento y con el personal de otras áreas del CSRG.

#### **4.3. Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución**

Para plantear la solución se realizó un estudio sobre las funcionalidades actuales de los satélites que operan en el CGM en cuanto a los instrumentos de medición, los controladores y a los métodos de cálculo utilizados en las mediciones.

La solución propuesta fue planteada por el asesor del proyecto basándose en estudios realizados anteriormente para el cálculo del nivel de flujo.

Debido a que se tiene referencia a estudios anteriores para la solución del problema planteado, se realizó una investigación bibliográfica donde se analizó informes que hablan sobre la solución encontrada en la Planta Geotérmica Miravalles III y el desarrollo matemático del nuevo modelo de medición de vapor.

Basándose en estos estudios se optó por la implementación del nuevo modelo dentro del proceso de medición de flujo de vapor, debido a que los resultados obtenidos en las mediciones de vapor de la planta Miravalles III son muy precisos, y además que un análisis teórico del nuevo modelo comprueba que los cálculos realizados haciendo uso de este modelo son más precisos que el método actual.

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

La implementación de la solución se llevó a cabo mediante el análisis completo del modelo de medición de flujo de vapor; para tal caso se fragmentó en diferentes partes con el fin de poder simplificar su programación.

Una vez simplificado el modelo se procedió a desarrollar un algoritmo de programación el cuál se tomó como referencia para realizar el programa e implementarlo dentro del PLC.

Dentro de la implementación del modelo en los satélites se tuvo que realizar modificaciones tanto a los instrumentos de medición como a las pantallas de tacto en cada Estación Separadora y al sistema SCADA.

Los instrumentos de medición que debieron ser reconfigurados fueron los transmisores de presión que se encuentran en los tubos venturi y que se encargan de enviar el valor del diferencial de presión mediante un lazo analógico 4 – 20mA. La modificación de estos transmisores de presión consistió en la configuración del envío de datos tanto al PLC como al LCD que se encuentra en el propio transmisor.

Las pantallas de tacto dentro de los satélites fueron modificadas para desplegar el valor del flujo de vapor desde otra posición de memoria del PLC.

El sistema SCADA fue reconfigurado para que al igual que las pantallas de tacto, la lectura del flujo de vapor se realizara desde otra posición de memoria del PLC; además se realizó modificaciones a la base de datos del sistema con el fin de realizar el despliegue gráfico y numérico del flujo de vapor, el despliegue gráfico de diferencial de presión y el almacenamiento de los datos.

Estas modificaciones se realizaron para cada uno de los cuatro satélites donde se implementó el modelo.

Para conocer el desempeño de la implementación se procedió a realizar pruebas de campo. Una de estas pruebas consistió en la comparación del valor de flujo de vapor calculado por medio del PLC y el valor calculo mediante una tabla de cálculo en Excel.

Otra prueba consistió en la comparación de los valores obtenidos con los valores calculados por el personal del departamento de Operación de Campo, aunque estos datos no son tomados en cuenta para conocer con exactitud el desempeño del sistema ya que son promedios diarios y no medidos en tiempo real.

Por último se llevó a cabo una prueba de campo coordinada tanto por el departamento de Mantenimiento de Instrumentación de Campo como por el departamento de Operación de Campo y el personal de Miravalles 3. Ésta prueba consistió en la comparación de las medidas de flujo de vapor que realiza Miravalles 3 y el valor obtenido por el PLC en el Satélite 7, para esto se eliminó el aporte que brinda el Satélite 1 a la planta de producción Miravalles 3. Estos datos se tomaron como referencia para conocer el desempeño del sistema ya que el flujómetro que se encuentra en la planta de producción Miravalles 3 es un equipo totalmente calibrado de alta precisión.

Además una vez realizadas todas estas pruebas se realizó un informe de resultados que fue analizado junto con el Ing. Rodrigo Mora Salas con la finalidad de conocer si el desempeño del sistema alcanzó la meta y los objetivos propuestos.

Para la difusión del sistema implementado se creó un informe con los resultados obtenidos y un informe completo del proyecto del cuál se le entregará una copia al departamento de Mantenimiento de Instrumentación de Campo. Además se desarrolló una guía que explica el algoritmo y el programa, así como las modificaciones que se realizaron al PLC, a las pantallas de tacto y al sistema SCADA.

#### **4.5. Reevaluación y rediseño**

La solución propuesta involucra la implementación de un nuevo modelo de medición de flujo de vapor en los controladores por lo que el algoritmo desarrollado está orientado a las características que acompañan al PLC tales como las posiciones de memoria, el set de instrucciones y la lectura de puertos.

También debe tomarse en cuenta que se encuentran diferentes instrumentos de medición que se utilizan como transmisores de presión, de temperatura, tubos venturi, entre otros.

Es por esto, que si se cambia el tipo de controlador utilizado, el programa del modelo podría no ejecutarse satisfactoriamente; al igual que si se cambian los instrumentos de medición y los transmisores utilizados, ya que la exactitud en la medición por parte del modelo depende de la precisión con que los aparatos sensen los parámetros necesarios.

Además, se deberá dar un mantenimiento debido a los instrumentos de medición actuales para mantener el sistema en buenas condiciones.

## **Capítulo 5. Descripción detallada de la solución**

Anteriormente la medición de flujo de vapor se realizaba directamente desde los transmisores de presión. Estos tomaban la medición de presión de los tubos venturi y realizaban una conversión a equivalente al flujo de vapor. La conversión la realizaban de manera cuadrática y basándose en un escalado fijado con anterioridad.

Debido a esto se presentaban ciertos problemas de precisión ya que las mediciones se ven afectadas por los cambio de presión, temperatura y densidad.

La solución fue propuesta por el Ing. Rodrigo Mora y el Ing. Federico Nietzen, ésta consistía en la implementación del nuevo modelo de medición que involucrará los cambios en los parámetros ya mencionados, la implementación se realizaría en los PLC's que se encuentran en los satélites e involucraría no sólo la programación del PLC sino también la reconfiguración de los equipos de medición y de despliegue de datos tales como las pantallas de tacto y el sistema SCADA.

### **5.1. Análisis de soluciones y selección final**

El proyecto se basó en la solución planteada por los ingenieros Rodrigo Mora y Federico Nietzen, como se dijo, ésta consiste en la implementación de un modelo de medición que involucre los cambios en los parámetros más importantes que afectan las medidas tales como la presión, la temperatura, la densidad y el diferencial de presión.

El nuevo modelo fue desarrollado conjuntamente por el Ing. Federico Nietzen y el estudiante francés Romain Martin. Para este modelo se tienen dos consideraciones, la primera es considerar al vapor saturado de agua en equilibrio térmico y la segunda considerar al líquido a través del tubo venturi como puro.

El modelo fue sometido a un análisis por parte de estas dos personas, donde se obtuvo un porcentaje de error en el cálculo no mayor a un 1.11% para un máximo de flujo de vapor de 65Kg/s. De esta manera se optó por su implementación como solución al problema planteado.

La implementación debió ser dentro de los PLC's que se encuentran en los satélites, actualmente se cuenta con 2 tipos de PLC's el C200HS y el C2000H ambos de OMRON. Estos PLC's, poseen un set de funciones muy limitado y debido a la complejidad del modelo se debió analizar si es posible o no programar la ecuación dentro de ellos.

Al realizar el análisis de su set de funciones, se llegó a la conclusión que la implementación se realizaría en los PLC's C200HS los cuáles se encuentran en los satélites 1, 2, 3 y 7. La escogencia de este PLC se basó en el hecho de que el PLC C2000H posee un set de funciones muy limitado lo que imposibilita su programación.

Otro factor importante es que el desarrollo del proyecto se debe llevar a cabo con los instrumentos que se encuentran actualmente dentro del Campo Geotérmico Miravalles.

La solución comprende cinco etapas importantes:

- a. Configuración de los transmisores de presión.
- b. Análisis del comportamiento del Tubo Venturi.
- c. Programación de las unidades de control.
- d. Programación de las pantallas de tacto.
- e. Configuración del sistema SCADA.

Estas etapas pueden agruparse basándose en su desarrollo, así podemos decir que la configuración de los transmisores de presión y el análisis del comportamiento del Tubo Venturi forman parte del desarrollo del Hardware y que la programación de las unidades de control, de las pantallas de tacto y la configuración del sistema SCADA forman parte del desarrollo del Software.

## 5.2. Descripción del Hardware

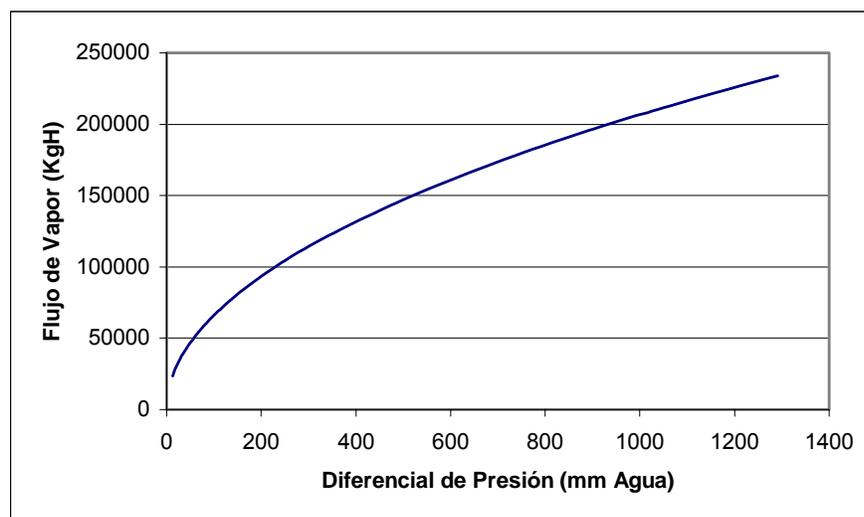
La implementación de la solución seleccionada se basa en la programación tanto de las unidades de control como de las pantallas de tacto y del sistema SCADA. Es por esto que desde el punto de vista de Hardware no se presenta ningún proceso de diseño.

Dentro del Hardware se puede considerar el análisis del comportamiento del tubo venturi y la configuración de los transmisores de presión encargados de realizar la lectura del diferencial de presión.

### 5.2.1. Tubo Venturi

Es el instrumento de medición de flujo de vapor que se utiliza actualmente. Como se mencionó en el Capítulo 3, el tubo venturi genera un diferencial de presión debido a su estructura, este diferencial de presión es proporcional a la cantidad de vapor que fluye en ese instante por él.

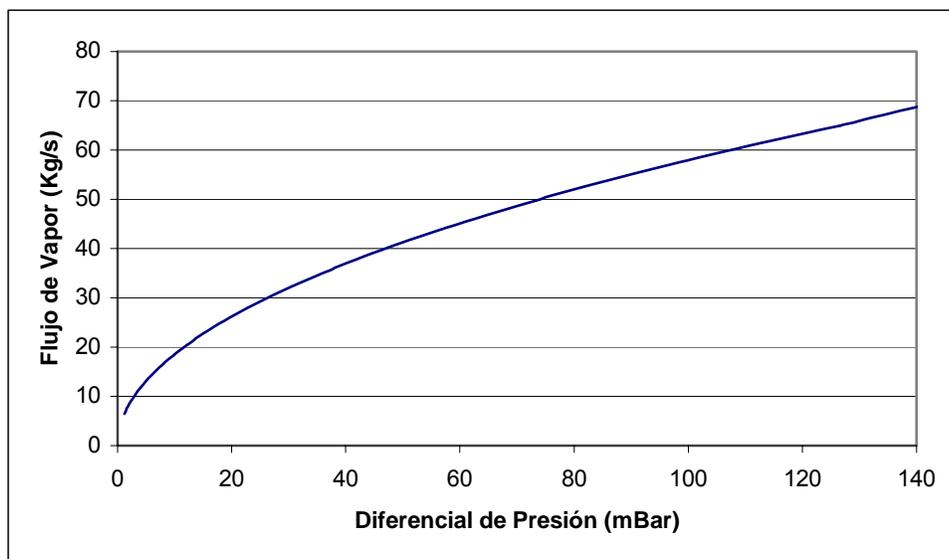
El fabricante brinda una curva característica del comportamiento del tubo venturi en la cuál presenta los valores de diferencial de presión correspondientes al flujo vapor. Esta curva se puede observar en la gráfica 5.1.



**Figura 5.1.** Curva característica del Tubo Venturi

La gráfica anterior muestra la curva característica que brinda el fabricante como se observa la relación entre el diferencial de presión y el flujo de vapor es cuadrática.

La escala de presión se encuentra en mm de agua y la escala de flujo se encuentra en KgH, para nuestro caso se modificaron las escalas a Bar y Kg/s, respectivamente, debido a que son las unidades con que operan los equipos del campo. De esta la gráfica 5.2 muestra la curva característica del tubo venturi con las escalas modificadas.



**Figura 5.2.** Curva característica del Tubo Venturi con escalas modificadas

Basándose en esta gráfica se obtuvo que el comportamiento del flujo de vapor con respecto al diferencial de presión está definido por la siguiente expresión.

$$q\left(\frac{Kg}{s}\right) = 5.9 \cdot \Delta P^{0.4967} \quad (5.1)$$

De acuerdo a esta fórmula se establecieron los escalados bajo los cuales operarían los transmisores de presión.

### 5.2.2. Transmisores de presión

Los transmisores de presión utilizados son los 3051 de Rosemount, estos transmisores generan una señal analógica de 4 – 20 mA proporcional a la presión que sensen. Anteriormente, estos transmisores mantenían una relación cuadrática en su salida analógica de corriente de acuerdo al diferencial de presión presentado, y mediante un escalado establecido tanto en el transmisor como en el PLC se obtenía la medida de flujo de vapor.

De esta forma, la lectura de flujo de vapor se realizaba desde el transmisor de presión contemplando sólo los cambios en el diferencial de presión sin contemplar otros parámetros que afectan la medida.

La reconfiguración de estos transmisores se basó en el cambio del comportamiento de su salida analógica y en el LCD que utiliza el transmisor para realizar el despliegue de información.

En cuanto al LCD del transmisor se realizaron las siguientes modificaciones:

- a. La información que se despliega corresponde al diferencial de presión y no al flujo de vapor.
- b. La relación entre la presión leída y la información desplegada es de manera lineal.
- c. Para los satélites 1, 2 y 3 el escalado se estableció de 0 mBar para el nivel bajo y de 124.4 mBar para el nivel alto.
- d. Para el Satélite 7 el escalado quedó de 0mBar para el nivel bajo y de 144.3 mBar para el nivel alto.
- e. Las unidades que utiliza se cambiaron a mBar.

En cuanto a la salida analógica de corriente los cambios fueron los siguientes:

- a. La relación entre la salida analógica y la presión sensada es lineal.
- b. Para los satélites 1, 2 y 3 el escalado se estableció de 0mBar para el nivel bajo y de 124.4 mBar para el nivel alto.
- c. Para el Satélite 7 el escalado quedó de 0 mBar para el nivel bajo y de 144.3mBar para el nivel alto.

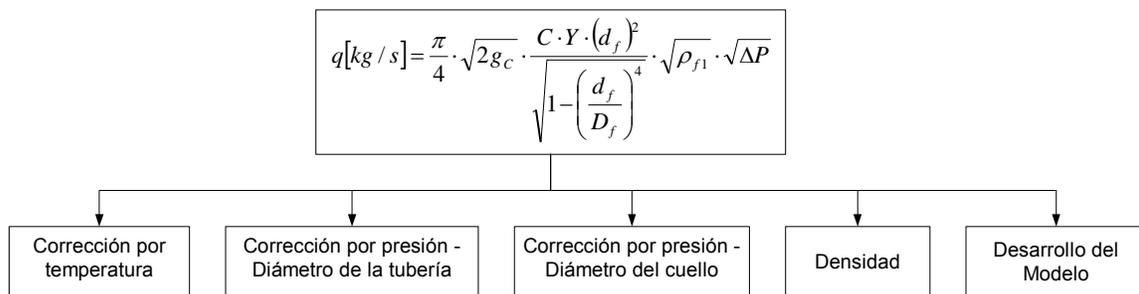
Las diferencias entre el escalado del Satélite 7 y los satélites 1, 2 y 3 se basa en que el rango de flujo de vapor que mide el Satélite 7 va de 0 a 70 Kg/s mientras que en los demás satélite el rango va de 0 a 65 Kg/s.

### 5.3. Descripción del Software

El desarrollo de la etapa del software comprende la programación del modelo de medición de flujo de vapor dentro del PLC, la modificación al programa de las pantallas de tacto y la modificación al programa del SCADA.

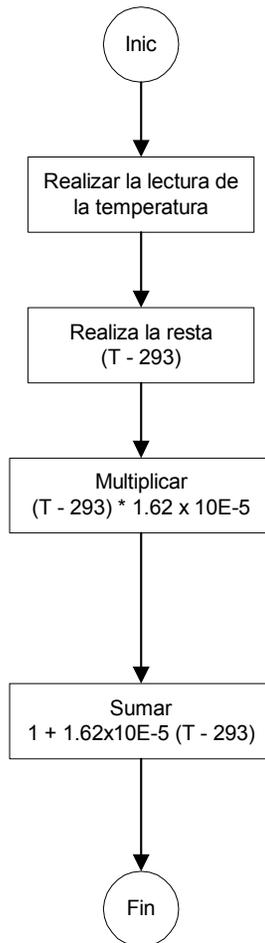
#### 5.3.1. Modelo de medición

Para poder facilitar la implementación del modelo de medición dentro del PLC éste se descompuso en diferentes secciones como se muestra en la figura 5.3.



**Figura 5.3.** Descomposición del modelo de medición

La primera parte se basó en el cálculo del factor de corrección por expansión térmica, éste método se utiliza tanto para la corrección del diámetro del cuello como para la corrección del diámetro de la tubería debido a que ambas partes están hechas con el mismo material. La figura 5.4 muestra el diagrama de flujo que se utilizó para realizar este cálculo.



**Figura 5.4.** Diagrama de flujo del factor de expansión térmica

El diagrama anterior se basó en la ecuación 5.1. Primeramente se realiza la lectura de la temperatura de separación, ésta se encuentra medida en °C y se pasa a grados kelvin. Luego se realiza la resta  $(T - 293)$ , donde T es la temperatura de separación medida en kelvin.

$$F_{aD} = 1 + \alpha_p (T_K - T_{D,ref}) \quad (5.1)$$

Una vez realizada la resta se procede a multiplicar el resultado por el factor de expansión térmica del material de la tubería que tiene un valor constante de  $16.2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Una vez obtenido el producto de la multiplicación se procede a sumarle una unidad.

El segundo paso fue el cálculo del factor de corrección por presión en el diámetro de la tubería del tubo venturi el cuál se encuentra definido por la ecuación 5.2.

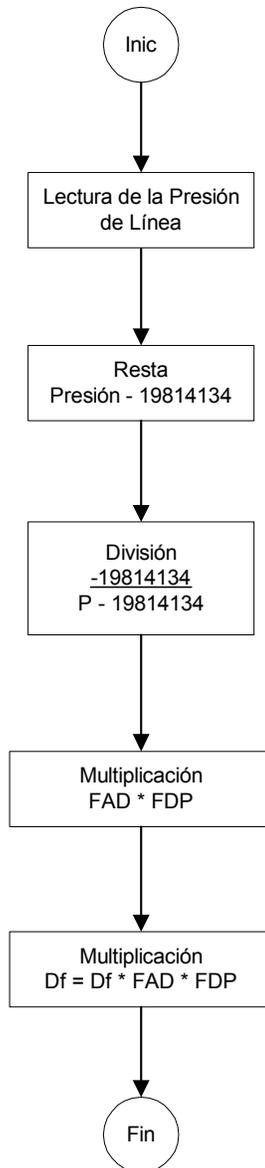
$$F_{DP} = \frac{1}{1 - \frac{P_f \cdot D_M \cdot \left(1 - \frac{\mu_P}{2}\right)}{2 \cdot E_P \cdot t_P}} \quad (5.2)$$

Este cálculo sólo depende de la presión de línea por lo que el primer paso es realizar la lectura de la presión en Bar. Los demás parámetros involucrados como el espesor de la pared de la tubería  $t_P$ , el módulo de elasticidad del material de la tubería  $E_P$ , la relación de Poisson del material de la tubería  $\mu_P$  son valores constantes por lo que se puede llevar a cabo el cálculo anterior con una expresión más simple como se muestra en la ecuación 5.3, donde P es la presión de línea medida en mBar.

$$F_{DP} = \frac{-19814134}{P - 19814134} \quad (5.3)$$

La figura 5.5 muestra el diagrama de flujo seguido para la programación del factor de corrección por presión y el cálculo del diámetro de la tubería del tubo venturi corregido.

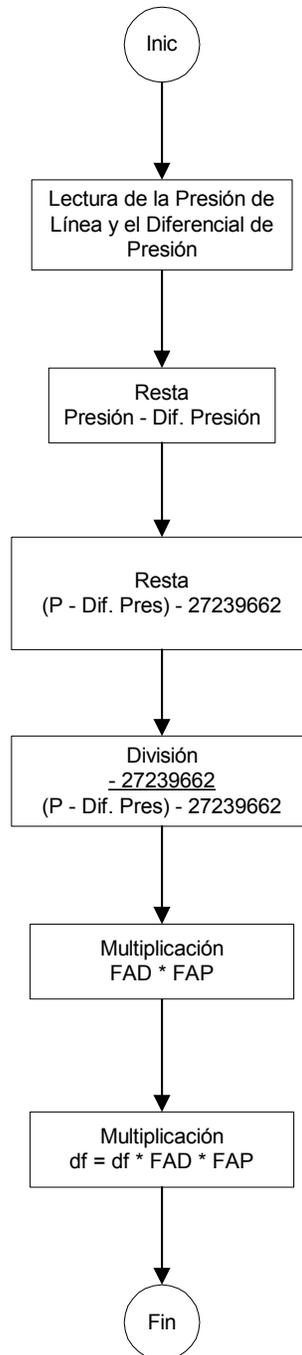
El primer paso es la lectura de la presión de línea, ésta lectura se realiza en Bar aunque luego se convierte a mBar para poder llevar a cabo la operación. Luego se procede a desarrollar la ecuación 5.3 y el resultado es el término  $F_{DP}$ .



**Figura 5.5.** Diagrama de flujo para el cálculo de  $F_{DP}$  y el diámetro de la tubería

Una vez obtenidos ambos factores se multiplican entre sí, el producto resultante se multiplica por el diámetro de la tubería a temperatura ambiente, un dato que brinda el fabricante, para así obtener el valor del diámetro de la tubería corregido.

Un proceso semejante se lleva a cabo para la corrección del diámetro del cuello del tubo venturi, como se dijo anteriormente el factor de corrección por expansión térmica es igual al calculado para el diámetro de la tubería. Es por esto que el diagrama de la figura 5.6 es similar al de la figura 5.5.



**Figura 5.6.** Diagrama de flujo para el cálculo de  $F_{\Delta P}$  y el diámetro del cuello

El primer paso es la lectura de la presión de línea y del diferencial de presión, luego se obtiene la diferencia entre ambas presiones para dar con el valor de presión en el cuello del tubo venturi.

Una vez que se obtiene la presión en el cuello del tubo venturi, se procede a realizar el cálculo del factor de corrección por diferencial de presión, siguiendo la ecuación 5.4.

$$F_{\Delta P} = \frac{-27239662}{(P - \Delta P) - 27239662} \quad (5.4)$$

La ecuación anterior al igual que la ecuación 5.3 es una expresión más simple para el cálculo de  $F_{\Delta P}$  debido a que todos los demás parámetros involucrados son constantes.

Una vez obtenido este factor se realiza la multiplicación  $F_{\Delta P} * F_{aD}$ , el resultado se multiplica por el diámetro del cuello del tubo venturi a temperatura ambiente para así obtener el valor del diámetro con las correcciones por temperatura y presión.

Otro cálculo importante que se realiza para la implementación del modelo es la densidad. La densidad del fluido depende tanto de la temperatura como de la presión a la que se encuentre por lo que se debe analizar un método que permita calcularlo.

El vapor de agua que se produce en el Campo Geotérmico Miravalles mantiene una temperatura alrededor de los 160 a 165 °C; debido a esta característica podemos conocer el comportamiento de la densidad ante cualquier cambio de los parámetros de presión y temperatura.

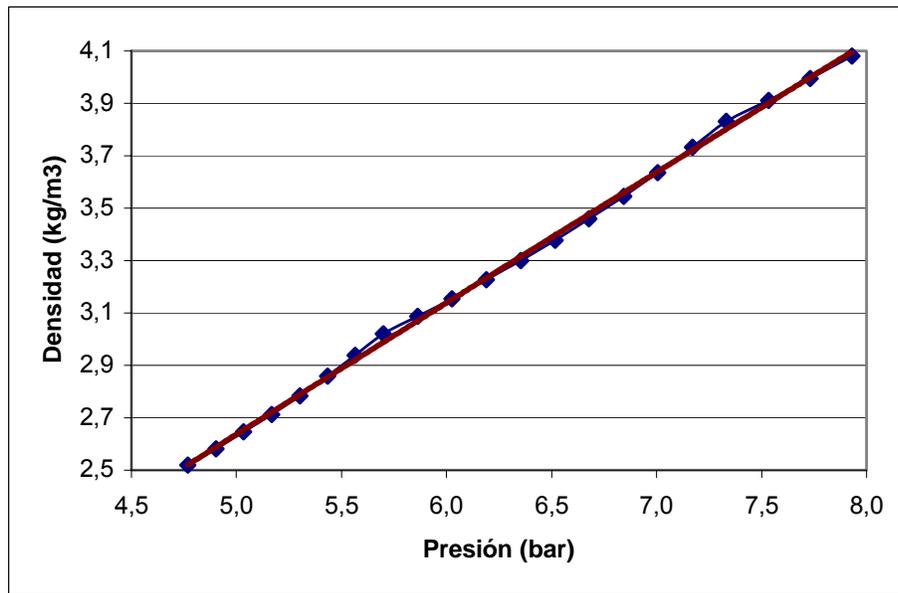
La tabla 5.1 muestra los datos extraídos de las tablas termodinámicas para calcular la densidad, estos datos se mantienen en un rango de temperatura de 150 a 170°C y en un rango de presión que va de 4.769 a 7.929 Bar.

**Tabla 5.1.** Datos de densidad según condiciones de saturación de vapor

| <b>Presión<br/>(Bar)</b> | <b>Temperatura<br/>(°C)</b> | <b>Densidad<br/>(Kg/m<sup>3</sup>)</b> |
|--------------------------|-----------------------------|--|
| 4.769                    | 150                         | 2.5202                                 |
| 4.902                    | 151                         | 2.5813                                 |
| 5.035                    | 152                         | 2.6455                                 |
| 5.168                    | 153                         | 2.7130                                 |
| 5.301                    | 154                         | 2.7840                                 |
| 5.434                    | 155                         | 2.8588                                 |
| 5.566                    | 156                         | 2.9377                                 |
| 5.699                    | 157                         | 3.0211                                 |
| 5.862                    | 158                         | 3.0864                                 |
| 6.025                    | 159                         | 3.1546                                 |
| 6.189                    | 160                         | 3.2258                                 |
| 6.352                    | 161                         | 3.3003                                 |
| 6.516                    | 162                         | 3.3784                                 |
| 6.679                    | 163                         | 3.4602                                 |
| 6.843                    | 164                         | 3.5461                                 |
| 7.006                    | 165                         | 3.6364                                 |
| 7.170                    | 166                         | 3.7313                                 |
| 7.333                    | 167                         | 3.8314                                 |
| 7.532                    | 168                         | 3.9108                                 |
| 7.731                    | 169                         | 3.9936                                 |
| 7.929                    | 170                         | 4.0800                                 |

Como se observa la densidad es más sensible a cambios de presión que a cambios de temperatura, además debido a que la temperatura se mantiene con variaciones pequeñas, de aproximadamente 5 °C, se desprecia el efecto que ésta pueda producir sobre la densidad.

De esta forma se planteó que la densidad va a depender solamente de los cambios de presión. La densidad posee un comportamiento exponencial de acuerdo a las variaciones de presión, pero para los rangos de temperatura ya establecidos este comportamiento es casi lineal, esto se observa mejor en la figura 5.7.

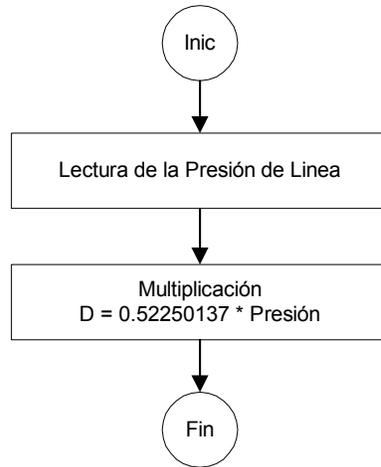


**Figura 5.7.** Variación de la densidad con respecto a la presión

El gráfico muestra el comportamiento lineal de la densidad ante cambios de temperatura, mediante la línea de tendencia y el análisis de los datos tabulados se puede presentar el cálculo de la densidad según la ecuación 5.5.

$$\rho = 0.52250137 \cdot P \quad (5.5)$$

Así el diagrama de flujo utilizado para el cálculo de la densidad se presenta en la figura 5.8, el desarrollo de este cálculo sólo involucra la lectura de la presión de línea y la multiplicación de este valor por la constante 0.52250137.



**Figura 5.8.** Diagrama de flujo para el cálculo de densidad

El modelo implementado tiene una variación de acuerdo al modelo propuesto; ésta variación comprende la eliminación del factor adiabático de expansión térmica representado en la ecuación por la letra Y.

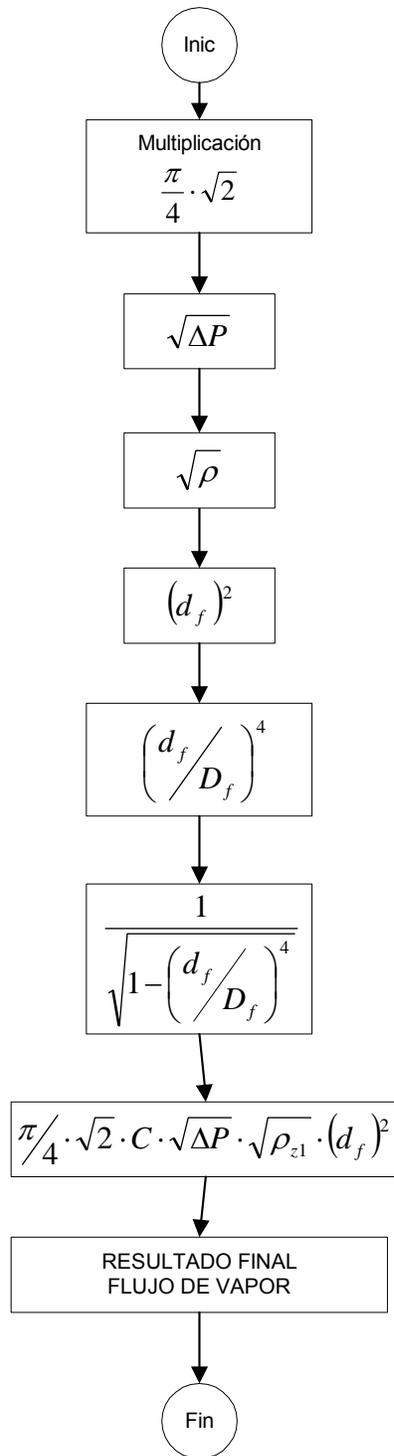
Este factor fue eliminado debido a que representa un cálculo muy complejo, el factor se encuentra definido por la ecuación 5.6.

$$Y = \sqrt{r^{2/k} \cdot \left(\frac{k}{k-1}\right) \cdot \left(\frac{1-r^{(k-1)/k}}{1-r}\right) \cdot \left(\frac{1-\beta^4}{1-\beta^4 \cdot r^{2/k}}\right)} \quad (5.6)$$

La complejidad de este factor radica en que posee potencias no enteras sino fraccionarias, además debido al set de instrucciones que maneja el PLC la programación de este factor hace que el sistema se vuelva muy lento; afectando todo el funcionamiento de separación que se lleva a cabo en los satélites.

Además, el descartar este factor se induce en un error en el cálculo de flujo de vapor de aproximadamente 0.5%, esto se debe a que su valor es muy cercano a la unidad.

Una vez obtenidos los factores necesarios se procede a desarrollar el modelo completo, el diagrama utilizado se muestra en la figura 5.9.



**Figura 5.9.** Diagrama de flujo del desarrollo del modelo

La primera parte para el desarrollo del modelo es obtener el valor del producto de las constantes  $\frac{\pi}{2} \cdot \sqrt{2}$ , El siguiente paso es obtener la raíz del diferencial de presión. Luego se procede a calcular la raíz de la densidad y después se eleva al cuadrado el valor del diámetro del cuello corregido. Una vez tenido estos cuatro resultados se almacenan en diferentes registros para su posterior utilización.

Posteriormente, se calcula la relación entre los diámetros y se eleva el resultado a la cuarta potencia; para este caso el cálculo se realizó por partes. Primero se obtuvo el cociente de la división de los diámetros, luego se multiplicó este valor por sí mismo y por último el producto obtenido fue también multiplicado por si mismo.

Luego se realiza la resta de uno menos el valor obtenido de elevar la relación de diámetros a la cuarta potencia; después se obtiene la raíz del resultado anterior y se utiliza este último resultado como denominador del modelo completo.

Una vez realizados estos cálculos se procede a realizar la multiplicación de las constantes, la raíz del diferencial de presión, la raíz de la densidad, el cuadrado del diámetro del cuello corregido y el coeficiente de descarga con un valor de 1.91988.

El producto de esta multiplicación es dividido entre el factor

$$\sqrt{1 - \left( \frac{d_f}{D_f} \right)^2}.$$

El resultado de todo este cálculo es el valor de flujo de vapor y se almacena en un registro para ser leído por las pantallas de tacto y el sistema SCADA.

### 5.3.2. Pantallas de tacto

Dentro de cada satélite se cuenta con una interfaz de usuario que permite monitorear el proceso de separación del flujo bifásico, el equipo utilizado para este propósito son las pantallas NT631C de OMRON. Las pantallas se encargan de desplegar la información correspondiente a temperatura de separación, presión de cabezal de los pozos, presión de separación, nivel de líquido separado, flujo de vapor entregado y otra gran cantidad de parámetros que son necesarios para el proceso de separación.

La operación de estas pantallas estaba orientada al anterior método para el cálculo de flujo de vapor, por lo que al modificar el proceso de medición fue necesario modificar también el programa con el cuál operaban las pantallas.

Las modificaciones en las pantallas de tacto involucraron la modificación de 2 de sus pantallas, la pantalla de Operación figura 5.10 y la pantalla de Proceso de Separación figura 5.11.

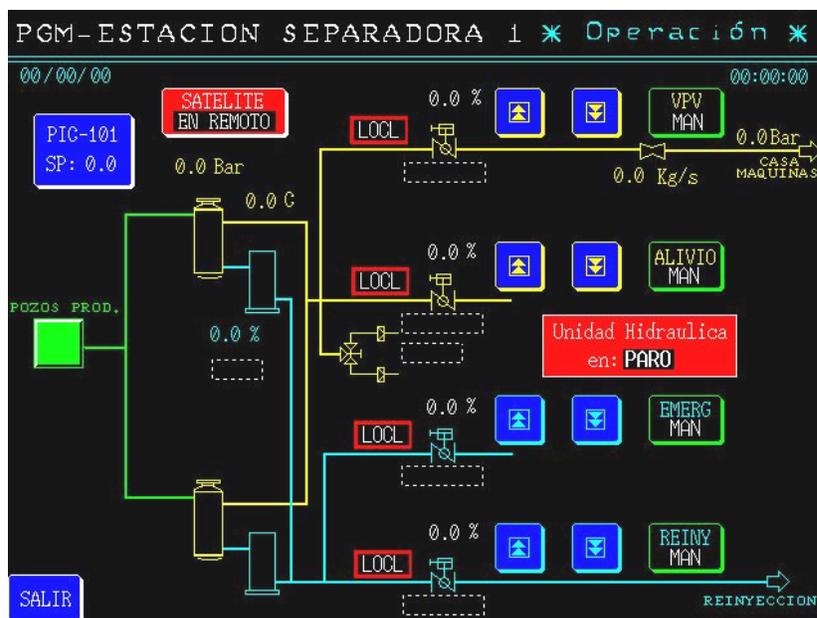
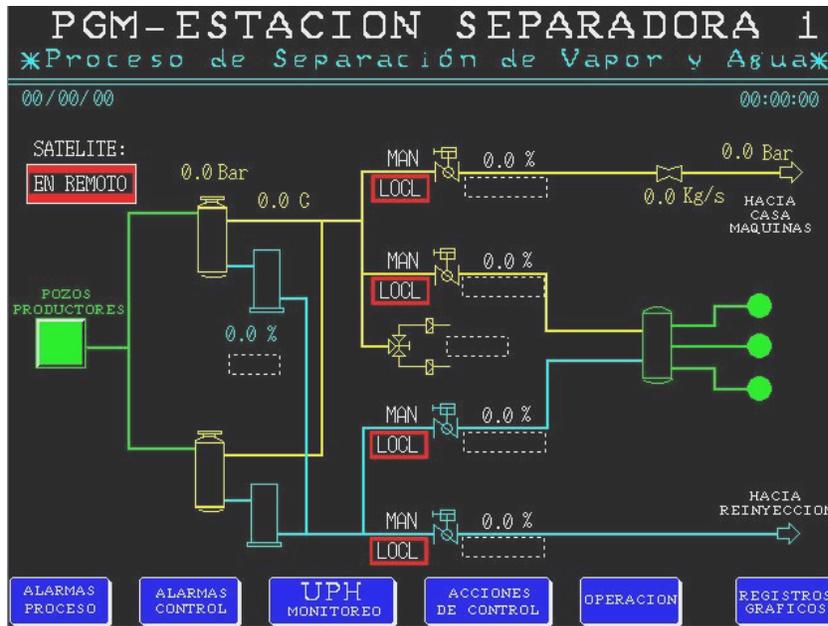


Figura 5.10. Pantalla de Operación



**Figura 5.11.** Pantalla de Proceso de Separación

A cada pantalla se le modificó la posición de memoria donde se realiza la lectura del flujo de vapor, ya que el valor se encuentra almacenado en otro registro. La figura 5.12 muestra la tabla numérica donde se modificó la entrada de datos, ésta tabla se encarga de definir que posiciones de memoria son leídas.

| No. | Value | Initial                  | Words | PLC Adresse | I/O Comment    | Ref. |
|-----|-------|--------------------------|-------|-------------|----------------|------|
| 39  | 0     | <input type="checkbox"/> | 1     | 00362       | SP del LIC-700 | Yes  |
| 40  | 0     | <input type="checkbox"/> | 1     | 00363       | P del LIC-700  | Yes  |
| 41  | 0     | <input type="checkbox"/> | 1     | 00364       | I del LIC-700  | Yes  |
| 42  | 0     | <input type="checkbox"/> | 1     | 00365       | D del LIC-700  | Yes  |
| 43  | 0     | <input type="checkbox"/> | 1     | 00108       | Presion UPH    | Yes  |
| 44  | 0     | <input type="checkbox"/> | 0     | --          |                | No   |
| 45  | 0     | <input type="checkbox"/> | 2     | D00315      | Flujo de vapor | Yes  |
| 46  | 0     | <input type="checkbox"/> | 0     | --          |                | No   |
| 47  | 0     | <input type="checkbox"/> | 0     | --          |                | No   |
| 48  | 0     | <input type="checkbox"/> | 0     | --          |                | No   |
| 49  | 0     | <input type="checkbox"/> | 0     | --          |                | No   |

**Figura 5.12.** Tabla Numérica

Como se observa en la figura anterior en la posición 45 se realiza la lectura del registro DM315, la cuál es la posición de memoria donde se almacena el valor del flujo de vapor calculado.

Estos cambios en la programación se realizaron para las pantallas de los satélites 1, 2, 3 y 7.

### **5.3.3. SCADA**

Al igual que la pantalla de tacto el sistema SCADA debe ser reconfigurado para realizar la lectura de flujo de vapor de vapor desde otra posición de memoria. El sistema debe desplegar la información en forma numérica y gráfica correspondiente al flujo de vapor entregado a las plantas de producción y además de almacenar los datos medidos.

El SCADA cuenta con una base de datos desde la cuál se definen las posiciones de memoria del PLC que son monitoreadas, al igual que la pantalla de tacto se encarga de brindar información al usuario acerca del proceso de producción de vapor.

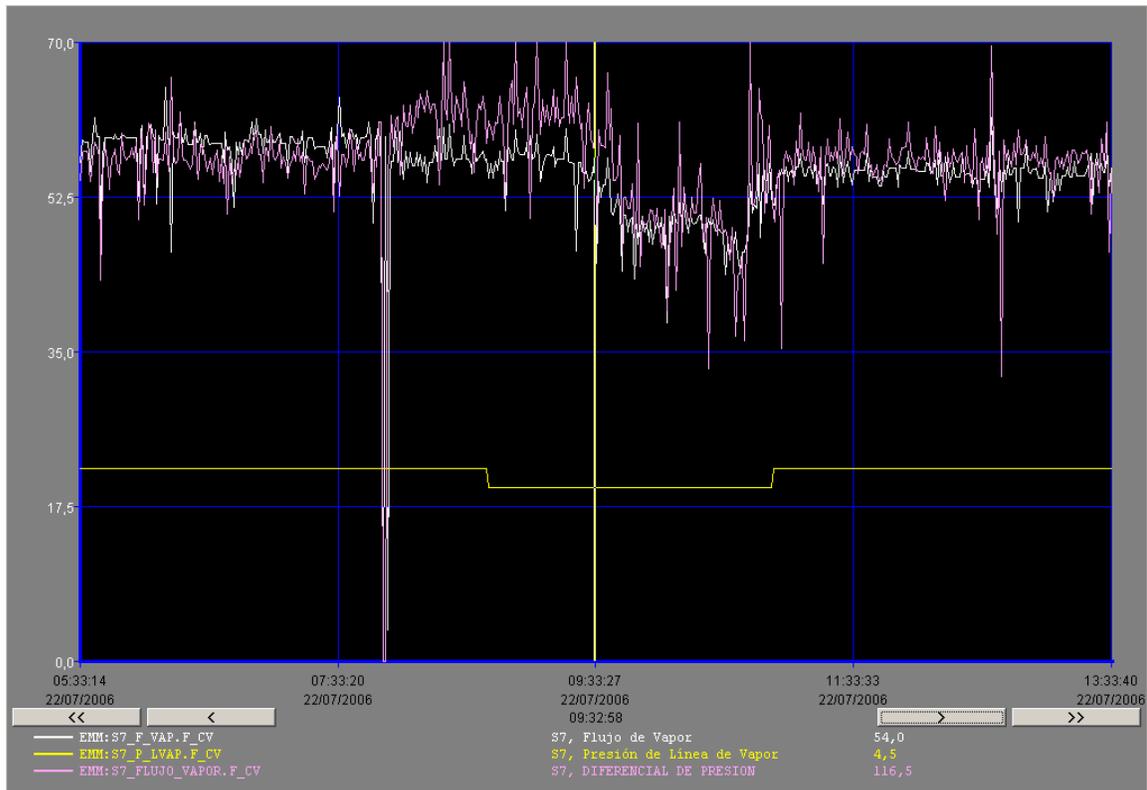
Además cuenta con un historial gráfico donde se muestran las variaciones en el tiempo de los parámetros más importantes.

Al igual que las pantallas de tacto las modificaciones se realizaron a la lectura en los satélites 1, 2, 3 y 7.

En la base de datos se modificó la posición de memoria desde donde se realiza la lectura de flujo de vapor para cada satélite, mientras que la anterior posición de memoria se utiliza para monitorear el diferencial de presión en el caso del Satélite 7.

En el historial se despliega la información correspondiente al flujo de vapor medido en el tiempo mediante el nuevo modelo además de otros parámetros que son importantes de visualizar en el proceso de separación.

La figura 5.13 muestra el historial gráfico diseñado para la prueba que se realizó el día 22 de julio del 2006.



**Figura 5.13.** Histórico 22/07/2006 – Prueba Satélite 7

La figura anterior muestra los parámetros medidos el día de la prueba en el Satélite 7, la línea blanca corresponde al flujo de vapor mediante el nuevo modelo de medición, la línea rosa corresponde al diferencial de presión medido por el transmisor y la línea amarilla corresponde a la presión de línea.

## Capítulo 6. Análisis de Resultados

### 6.1. Satélite 1

**Tabla 6.1.** Datos del día 20 de junio del 2006

| Flujo de Vapor<br>PLC(kg/s) | Flujo de Vapor<br>PC (kg/s) | % error<br>(%) | Diferencia<br>(Kg/s) |
|-----------------------------|-----------------------------|----------------|----------------------|
| 17,0                        | 17,3                        | 1,83%          | 0,32                 |
| 17,4                        | 17,5                        | 0,85%          | 0,15                 |
| 20,3                        | 20,7                        | 1,85%          | 0,38                 |
| 18,1                        | 18,4                        | 1,74%          | 0,32                 |
| 16,8                        | 17,1                        | 1,97%          | 0,34                 |
| 18,6                        | 18,8                        | 1,09%          | 0,20                 |
| 17,8                        | 18,2                        | 2,12%          | 0,39                 |
| 17,2                        | 17,6                        | 2,37%          | 0,42                 |
| 19,2                        | 19,6                        | 2,25%          | 0,44                 |
| 17,4                        | 17,8                        | 2,20%          | 0,39                 |
| 20,1                        | 20,4                        | 1,66%          | 0,34                 |
| 20,1                        | 20,6                        | 2,33%          | 0,48                 |
| 17,4                        | 17,7                        | 1,70%          | 0,30                 |
| 19,1                        | 19,5                        | 2,02%          | 0,39                 |
| 19,6                        | 19,9                        | 1,68%          | 0,34                 |
| 18,5                        | 18,8                        | 1,66%          | 0,31                 |
| 19,9                        | 20,3                        | 1,95%          | 0,40                 |
| 18,7                        | 19,0                        | 1,80%          | 0,34                 |
| 18,0                        | 18,3                        | 1,88%          | 0,34                 |
| 19,6                        | 19,9                        | 1,68%          | 0,34                 |
| 16,9                        | 17,2                        | 1,75%          | 0,30                 |
| 17,6                        | 18,0                        | 1,96%          | 0,35                 |
| 18,4                        | 18,7                        | 1,75%          | 0,33                 |
| 18,6                        | 19,0                        | 1,88%          | 0,36                 |
| 16,9                        | 17,2                        | 1,75%          | 0,30                 |
| 17,6                        | 17,9                        | 1,92%          | 0,34                 |
| 20,1                        | 20,4                        | 1,66%          | 0,34                 |
| 20,3                        | 20,7                        | 1,70%          | 0,35                 |
| 17,8                        | 18,1                        | 1,69%          | 0,31                 |
| 18,2                        | 18,7                        | 2,45%          | 0,46                 |
| 17,6                        | 17,9                        | 1,92%          | 0,34                 |
| 19,0                        | 19,4                        | 2,16%          | 0,42                 |
| 18,7                        | 19,1                        | 2,19%          | 0,42                 |

Los datos tabulados en la tabla 6.1 corresponden a valores de Flujo de Vapor obtenidos en el PLC a la hora de implementar el modelo de medición.

Esta tabla muestra el porcentaje de error obtenido entre el cálculo realizado por el PLC y el cálculo realizado mediante una hoja de cálculo en Excel.

Al observar el porcentaje de error obtenido, esto muestra un error no mayor a un 2.5% lo que indica una diferencia en las medidas no mayor a 0.5Kg/s. Con esto se corrobora que el cálculo dentro del PLC se realiza en forma efectiva cumpliendo con la meta planteada.

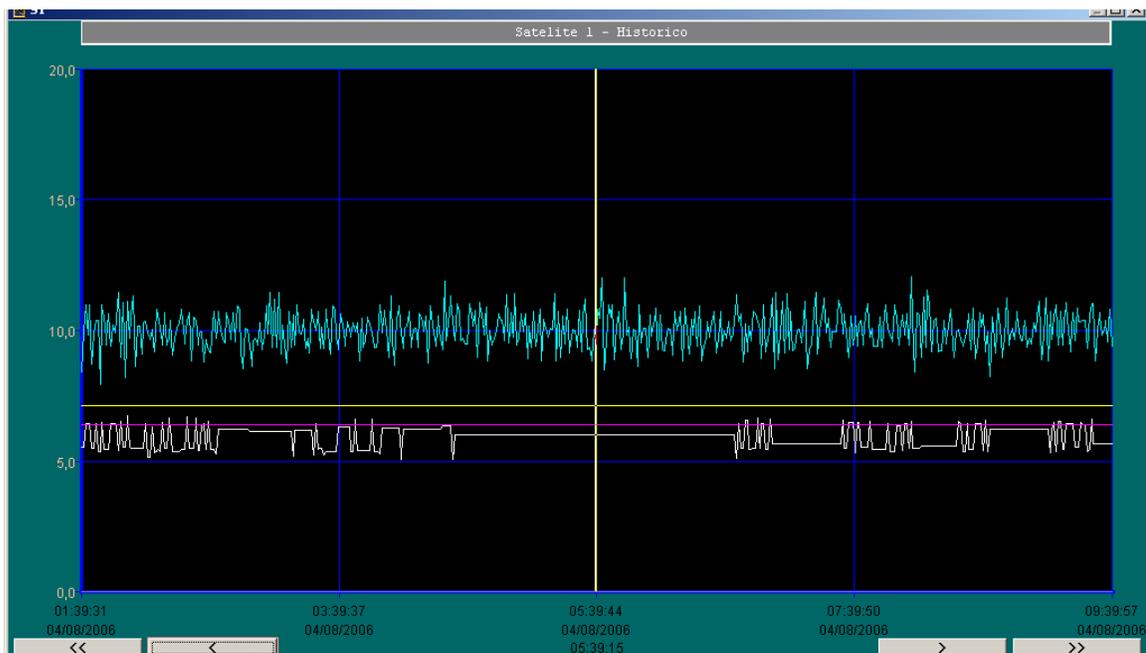
Este error obtenido muestra la imprecisión del PLC en la medida debido a que al no trabajar con decimales y no tener funciones complejas que faciliten el cálculo induce a valores poco precisos.

**Tabla 6.2.** Valores comparados con datos de Operación de Campo

| <b>Día</b> | <b>Flujo de Vapor Operación de Campo (Kg/s)</b> | <b>Flujo PLC (Kg/s)</b> | <b>% error (%)</b> | <b>Diferencia (Kg/s)</b> |
|------------|---|-------------------------|--------------------|--------------------------|
| 21-Jun-06  | 19,80   | 19,4623                 | 1,71%              | 0,3387                   |
| 22-Jun-06  | 19,93   | 18,9234                 | 5,07%              | 1,0109                   |
| 23-Jun-06  | 19,93   | 19,0239                 | 4,56%              | 0,9103                   |
| 24-Jun-06  | 20,16   | 18,8019                 | 6,73%              | 1,3570                   |
| 25-Jun-06  | 20,16   | 19,1148                 | 5,17%              | 1,0440                   |
| 26-Jun-06  | 20,16   | 19,2542                 | 4,48%              | 0,9046                   |
| 27-Jun-06  | 20,07   | 19,2687                 | 3,98%              | 0,7996                   |
| 28-Jun-06  | 20,07   | 19,3855                 | 3,40%              | 0,6827                   |
| 29-Jun-06  | 20,07   | 19,4118                 | 3,27%              | 0,6564                   |
| 30-Jun-06  | 20,07   | 19,2612                 | 4,02%              | 0,8071                   |

La tabla 6.2 muestra los valores de Flujo de Vapor que obtiene el Departamento de Operación de Campo del CSRG, estos datos son tomados una vez al día y se basan en la presión de cabezal de cada uno de los pozos productores conectados al Satélite.

Para este caso se obtuvo un promedio diario de las mediciones realizadas por el PLC, el error obtenido es considerable, con un máximo de 6.73%. Por lo que es necesario recalcar que los valores otorgados por el departamento de Operación de Campo no se utilizan como referencia para conocer el desempeño del modelo implementado. Estos datos se utilizan para conocer la semejanza que existe entre ambas mediciones con el fin de saber la diferencia entre las medidas.



**Figura 6.1.** Histórico del Satélite 1

La figura anterior muestra el desempeño en el Satélite 1, la línea blanca corresponde al Flujo de Vapor medido en Kg/s, como se observa por trazos se mantiene constante y por trazos oscila, ese comportamiento se debe a los pozos productores conectados. Otros parámetros que se presentan son la presión de línea (línea amarilla), la presión de cabezal del pozo 31 (línea rosa) y el nivel de agua en los tanques (línea verde).

Esta gráfica corresponde al día 4 de agosto del 2006 de 1:39 a.m. a 9:39 a.m.

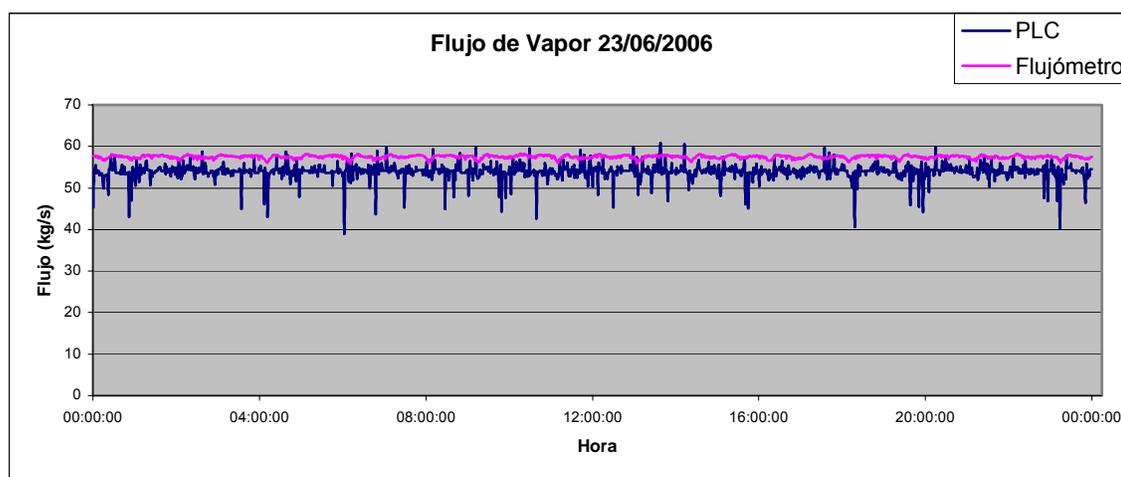
## 6.2. Satélite 7

Tabla 6.3. Datos del día 21 de junio del 2006 – Satélite 7

| Flujo de Vapor – PLC<br>(Kg/s) | Flujo de Vapor con el modelo<br>(Kg/s) | % error<br>(%) | Diferencia<br>(Kg/s) |
|--------------------------------|--|----------------|----------------------|
| 52,20                          | 53,31                                  | 2,08%          | 1,11                 |
| 54,20                          | 55,14                                  | 1,70%          | 0,94                 |
| 55,40                          | 55,77                                  | 0,66%          | 0,37                 |
| 56,20                          | 56,40                                  | 0,35%          | 0,20                 |
| 53,70                          | 53,94                                  | 0,45%          | 0,24                 |
| 54,50                          | 54,88                                  | 0,69%          | 0,38                 |
| 54,70                          | 55,14                                  | 0,79%          | 0,44                 |
| 54,10                          | 54,80                                  | 1,29%          | 0,70                 |
| 54,70                          | 54,88                                  | 0,32%          | 0,18                 |
| 54,40                          | 54,78                                  | 0,70%          | 0,38                 |
| 54,60                          | 54,98                                  | 0,70%          | 0,38                 |
| 55,10                          | 55,51                                  | 0,74%          | 0,41                 |
| 55,00                          | 55,82                                  | 1,47%          | 0,82                 |
| 54,50                          | 54,71                                  | 0,38%          | 0,21                 |
| 54,50                          | 54,78                                  | 0,51%          | 0,28                 |
| 54,50                          | 54,64                                  | 0,25%          | 0,14                 |
| 54,50                          | 54,14                                  | -0,67%         | -0,36                |
| 53,50                          | 55,03                                  | 2,78%          | 1,53                 |
| 53,90                          | 54,99                                  | 1,99%          | 1,09                 |
| 53,50                          | 53,36                                  | -0,26%         | -0,14                |
| 53,50                          | 53,72                                  | 0,42%          | 0,22                 |
| 53,80                          | 53,99                                  | 0,35%          | 0,19                 |
| 53,80                          | 53,99                                  | 0,35%          | 0,19                 |
| 53,90                          | 53,12                                  | -1,48%         | -0,78                |
| 54,30                          | 54,47                                  | 0,31%          | 0,17                 |
| 54,70                          | 54,92                                  | 0,41%          | 0,22                 |
| 54,40                          | 54,78                                  | 0,70%          | 0,38                 |
| 50,90                          | 50,15                                  | -1,50%         | -0,75                |
| 54,90                          | 54,80                                  | -0,17%         | -0,10                |
| 54,20                          | 54,40                                  | 0,37%          | 0,20                 |
| 54,80                          | 55,02                                  | 0,40%          | 0,22                 |
| 54,80                          | 54,99                                  | 0,35%          | 0,19                 |
| 55,60                          | 55,86                                  | 0,47%          | 0,26                 |
| 54,30                          | 54,47                                  | 0,31%          | 0,17                 |
| 53,10                          | 53,38                                  | 0,53%          | 0,28                 |
| 53,60                          | 53,82                                  | 0,41%          | 0,22                 |
| 54,00                          | 54,23                                  | 0,43%          | 0,23                 |
| 54,10                          | 54,95                                  | 1,54%          | 0,85                 |
| 54,10                          | 54,33                                  | 0,42%          | 0,23                 |
| 54,10                          | 54,33                                  | 0,42%          | 0,23                 |

Los datos presentados en la tabla 6.3 corresponden a la medición de Flujo de Vapor obtenida en el Satélite 7 mediante la implementación del modelo, en esta tabla se muestra el porcentaje de error obtenido entre el cálculo que realiza el PLC y el cálculo realizado mediante la PC tomando todos los valores decimales de los parámetros involucrados.

Se puede observar que el error obtenido no es mayor a un 3%, cumpliendo con la meta propuesta; esto representa una diferencia no mayor a 1.6Kg/s en las mediciones. Este error obtenido se debe a la imprecisión del PLC debido a que no realiza cálculos con decimales y a que no posee funciones complejas que permitan un cálculo más exacto.



**Figura 6.2.** Datos 23 de julio del 2006 – Satélite 7

La gráfica anterior muestra los datos del día 23 de julio del 2006, estos datos corresponden a la medición de flujo de vapor que realiza el PLC dentro del Satélite 7 y el flujómetro dentro de la Planta de Producción Miravalles 3.

Como se puede observar el comportamiento de las mediciones realizadas con el PLC dentro del Satélite 7 poseen un comportamiento poco constante, mientras que las mediciones realizadas por el flujómetro presentan un comportamiento un poco más estable.

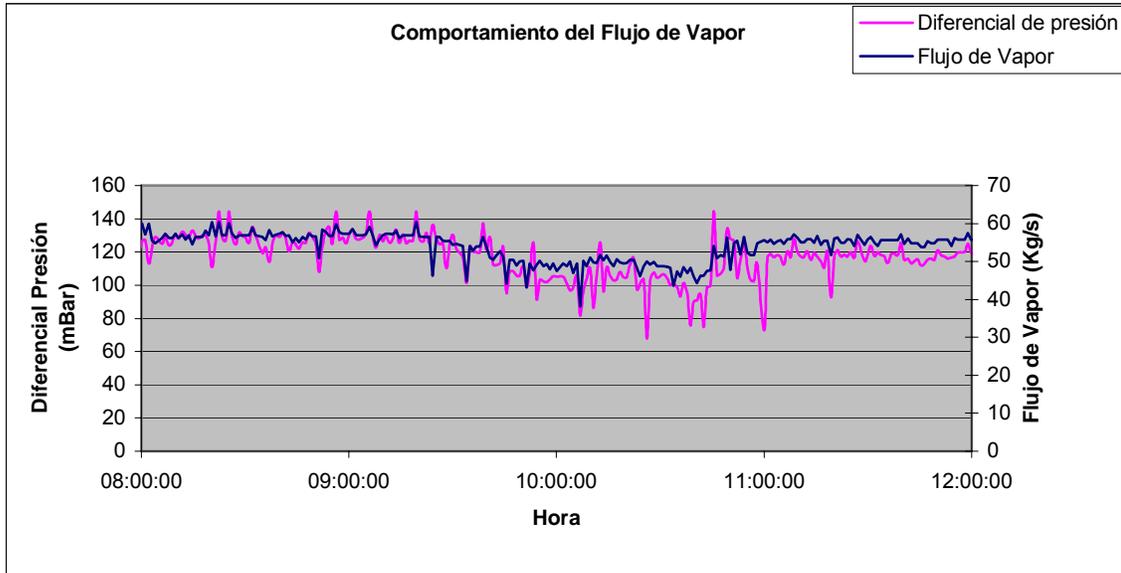
Esto se debe al comportamiento de los pozos productores dentro del satélite, ya que poseen un comportamiento inestable lo que genera esta variación en la medición de flujo. En las siguientes gráficas se analizará con más detalle este punto.

Otra variación importante es la diferencia entre los ejes de ambas gráficas, ésta es de aproximadamente 3Kg/s. Esta variación corresponde a que la Planta de Producción Miravalles 3 no solo es alimentada por el Satélite 7 sino también por el Satélite 1, por lo que las medidas realizadas en ambos instrumentos no coincide.

Para este caso se realizó una prueba coordinada por el Departamento de Mantenimiento de Instrumentación de Campo, el Departamento de Operación de Campo y el personal de Miravalles 3, la prueba consistió en eliminar el aporte del Satélite 1 a Miravalles 3 y realizar las medidas correspondientes a flujo de vapor, diferencial de presión y presión de línea. La prueba tuvo una duración de aproximadamente 3 horas.

Las mediciones realizadas en estas pruebas se utilizaron como referencia para conocer el comportamiento del modelo implementado dentro del PLC, ya que el flujómetro dentro de Miravalles 3 es el único medio de medición actual, que se encuentra calibrado y posee un porcentaje de error no mayor a un 2%. La implementación del modelo dentro de los demás satélites corresponde al comportamiento obtenido en esta prueba.

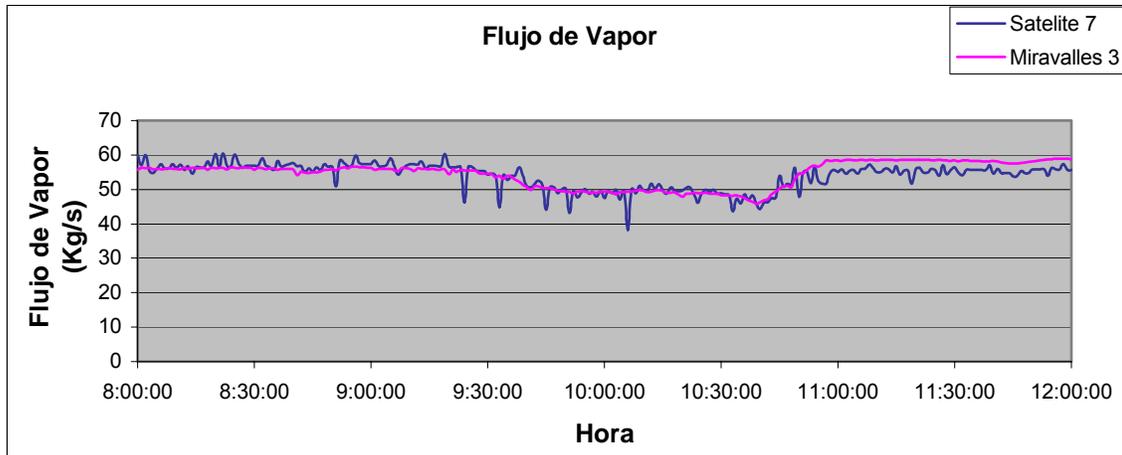
Los datos siguientes corresponden a los resultados obtenidos en la prueba del día 22 de julio del 2006.



**Figura 6.3.** Comportamiento de Flujo de Vapor del día 22/07/2006

La gráfica anterior muestra el comportamiento del flujo de vapor de acuerdo al diferencial de presión medido por el tubo Venturi. Como se puede observar, las variaciones que presenta el diferencial de presión corresponden a las variaciones en el cálculo de flujo de vapor. Lo que indica que el comportamiento oscilante del flujo de vapor responde a las características de los pozos productores.

Aunque existen algunos puntos dentro de los cuales no coincide el comportamiento de ambos, esto se debe a que el tiempo de muestreo que realiza el PLC no es el mismo tiempo de muestreo que realiza el transmisor de presión que se encarga de realizar la lectura del diferencial dentro del Tubo Venturi. Es por esto, que en pocos casos el comportamiento en ambas gráficas no concuerda.



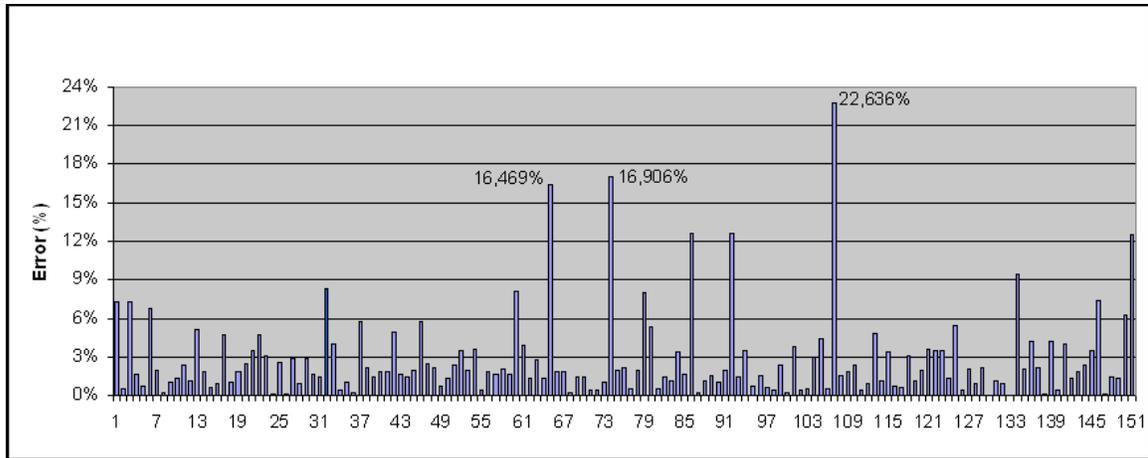
**Figura 6.4.** Datos de Flujo de Vapor del día 22/07/2006

La gráfica 4 muestra el comportamiento del flujo de vapor medido en el PLC del Satélite 7 y el flujo de vapor medido por el flujómetro del personal de Miravalles 3.

Como se observa el comportamiento de ambas gráficas es semejante, aunque las oscilaciones que presentan las medidas en el satélite 7 siguen siendo mayores. Estas oscilaciones corresponden a que el efecto de los pozos en el satélite 7 es más visible que en Miravalles 3.

Además, es posible obtener un comportamiento más estable en las medidas configurando el sistema SCADA para que suavice la gráfica, aunque esta opción se dejó de lado debido a que las mediciones presentadas dentro del satélite tendrían cierta incongruencia con las mediciones que se presentan en el SCADA.

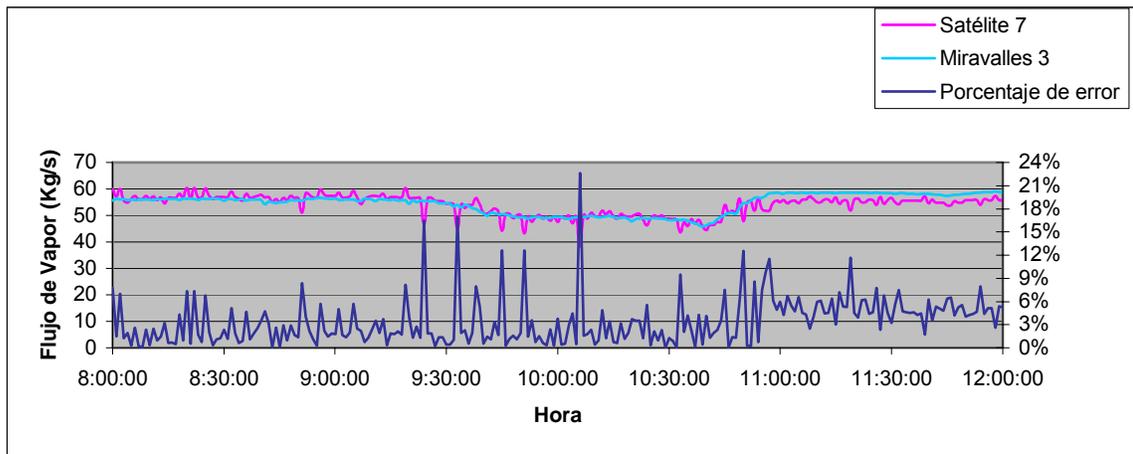
Se puede observar también que cerca de las 11:00 a.m. el flujo de vapor medido en Miravalles 3 y el flujo de vapor medido en el Satélite 7 presentan una diferencia, esto se debe a que a esa hora se abrieron las válvulas que dan paso al aporte de vapor que brinda el Satélite 1.



**Figura 6.5.** Porcentaje de error de las mediciones del día 22/07/2006

La figura 6.5 muestra el porcentaje de error obtenido en la prueba realizada. Como se observa la mayoría de los datos se mantienen dentro de un 3% de error, aunque varias medidas presentan un porcentaje de error considerable. Las medidas que no permanecen dentro del error deseado corresponden a un 18% de las mediciones.

Esto se debe a las oscilaciones que presenta el diferencial de presión dentro del Satélite 7 y que no se presentan tan considerablemente en Miravalles 3. Para un mejor análisis se puede observar la gráfica 6.6, que presenta el comportamiento del porcentaje de error de acuerdo al Flujo de Vapor.



**Figura 6.6.** Porcentaje de error de acuerdo a las variaciones de flujo de vapor del día 22/07/2006

La figura anterior muestra el comportamiento del porcentaje de error debido a los datos de flujo de vapor medidos tanto en Miravalles 3 como en el Satélite 7.

Como se dijo anteriormente las oscilaciones que presentan las mediciones en el satélite 7 corresponden a las variaciones que se presentan en el diferencial de presión medido por el tubo Venturi. Debido a que en Miravalles 3 estas oscilaciones no son tan considerables se presentan errores de gran magnitud. Este comportamiento variable en el Satélite 7 no pudo ser resuelto debido a que es el comportamiento de los pozos los que lo originan y no problemas en la lectura de los parámetros.

Es por esto, que de acuerdo a los resultados obtenidos se puede afirmar que el sistema se desempeña satisfactoriamente cumpliendo en la mayoría de los casos con el objetivo y la meta propuestos. Así, tomando como referencia el análisis anterior se afirma que no es necesario un factor de corrección dentro del modelo y que es factible implementarlo dentro de los Satélites 1, 2 y 3 que operan con el PLC C200HS de OMRON.

## Capítulo 7. Conclusiones y recomendaciones

### 7.1. Conclusiones

1. Se mejoró sustancialmente la exactitud en las mediciones de flujo de manteniendo errores inferiores al 3% en más de un 80% de los cálculos realizados.
2. La imprecisión en las mediciones que introduce el PLC mantienen una diferencia no mayor a 2Kg/s con respecto a los cálculos realizados mediante una hoja de cálculo de Excel.
3. Basándose en los resultados de la prueba del 22 de julio del 2006 en el Satélite 7 se puede concluir que no es necesario un factor de corrección en las mediciones que se llevan a cabo.
4. Los porcentajes de error mayores a un 3% se debieron a altas fluctuaciones en las mediciones del Satélite 7 debido al comportamiento de los pozos productores.
5. Una de las limitantes del proyecto desarrollado es el no poder realizar la implementación en los restantes 3 satélites debido a que el PLC con el que operan no permite la programación de una ecuación tan compleja.
6. Otra limitante del proyecto son las fluctuaciones de las medidas de flujo de vapor debido al comportamiento de los pozos, los cuáles presentan diferencias considerables de acuerdo con las mediciones que realiza el personal de Miravalles 3.
7. El obtener mayor exactitud en las mediciones de flujo de vapor se pueden llevar a cabo estudios con el fin de conocer que consecuencias generan los procedimientos actuales de explotación del reservorio geotérmico.
8. Una mayor precisión en las medidas realizadas permite conocer la producción de vapor que es entregado a la planta de Miravalles con mayor veracidad, para así evitar posibles sanciones económicas.

## 7.2. Recomendaciones

1. Para un funcionamiento correcto y confiable en el cálculo de las mediciones de flujo de vapor es necesario mantener el equipo de medición y los transmisores en correcto funcionamiento al igual que la comunicación que existente entre estos y las unidades de control.
2. Se debe tener en consideración que el espacio de memoria asignado para realizar los cálculos de flujo de vapor no deben ser modificados en ninguna otra parte del programa, ya que esto induciría en errores en la medición.
3. Es necesario llevar a cabo un estudio sobre las oscilaciones que presentan las mediciones de flujo de vapor en el Satélite 7 y que no se presentan en el flujómetro de Miravalles 3, esto debido a que genera diferencias considerables en más de un 15% de los cálculos que se realizan.
4. Para poder realizar una implementación del modelo en los satélites restantes es necesario cambiar las unidades de control actuales, para esto es preferible que se tome en cuenta que los nuevos PLC sean compatibles en su programación con los PLC C200HS de OMRON.

## Bibliografía

### Documentos:

1. Costa Rica, Instituto Costarricense de Electricidad. **“Energía y Telecomunicaciones”**. Tecnología – ICE. v.11 (1): 62-72, diciembre, 2001.
2. Fisher Rosemount. **Model 3051 Smart Pressure Transmitter Family**. Rosemount Inc, 1999.
3. Fisher Rosemount. **HART Communicator**. ELVATRON S.A.
4. NT631 Series. **Setup Manual**. OMRON, 2000.
5. López, Peter. **Reseña descriptiva Campo Geotérmico Miravalles**. Guanacaste, Costa Rica. ICE, 1997.
6. Martin, Romain. **Modelo y simulaciones para equipo de medición de flujo de vapor geotérmico (venturi) en el complejo Miravalles**. Guanacaste, Costa Rica. ICE, 2005.
7. Nietzen, Federico. **Explicación del modelo para la medición de flujo de vapor geotérmico**. Entrevista, Centro de Servicios de Recursos Geotérmicos, 4 de marzo de 2006.
8. Sysmac Programmable Controllers. **C200HS Operation Manual**. OMRON, 1996.
9. Sysmac Programmable Controllers. **C200HS Installation Guide**. OMRON, 1993.
10. Sysmac C200H-AD002. **Analog Input Unit Operation Manual**. OMRON, 1993.
11. Zúñiga, Alejandro. **Sistema de medición de vapor para la Planta Geotérmica Miravalles III**. Costa Rica. ICE, 2005.

**Internet:**

12. [www.monografias.com/trabajos6/tube/tube.html](http://www.monografias.com/trabajos6/tube/tube.html)

Información acerca del funcionamiento general de los tubo venturi y la forma en que calculan el nivel de flujo de vapor. Además de las características más importantes dentro de su diseño.

13. [www.tpub.com/content/doe/h1013v1/css/h1013v1\\_94.html](http://www.tpub.com/content/doe/h1013v1/css/h1013v1_94.html)

Información acerca de la estructura interna de los tubos venturi.

## **Apéndice A.1. Glosario, Abreviaturas y simbología**

**Casa Máquina** = Estación donde llega el vapor luego de ser separado del flujo bifásico para ser procesado y poder generar energía eléctrica.

**CGM** = Campo Geotérmico Miravalles.

**CSRG** = Centro de Servicios de Recursos Geotérmicos.

**DCS** = Sistema de Control Distribuido.

**Flujo Bifásico** = Mezcla de líquido y vapor a altas temperaturas que se obtienen de los pozos.

**KW** = K-Word. Medida que indica la cantidad de memoria interna del PLC.

**LPA** = Área de programación en escalera. Es el área de memoria asignada para la programación por medio de diagramas de escalera.

**Pozo** = Excavación por donde se obtiene la mezcla de líquido y vapor que es enviada al Satélite.

**Satélite** = Estación de separación a la cual se encuentran conectados varios pozos y que se encarga de realizar la separación entre el líquido y el vapor.

**SCADA** = Central información que se encuentra en el departamento de instrumentación, desde la cual se monitorea el proceso de extracción y separación de flujo de vapor que se lleva a cabo en cada uno de los pozos y satélites que conforman el Campo Geotérmico Miravalles.

## **Apéndice A.2. Protocolos de medición y puesta en marcha**

Para poder realizar las pruebas se debió llevar un cierto orden y coordinar con el equipo técnico, con el asesor del proyecto, con otros departamentos y con personal de la Unidad de Producción de Miravalles 3, debido a que cualquier falla que se presentara significaría pérdidas de producción de energía eléctrica y por ende pérdidas económicas.

Cada prueba realizada consistió en implementar el modelo de medición dentro de cada satélite con todas las modificaciones que esto requiere.

La implementación del modelo se efectuó de la siguiente manera:

1. Se preparó el programa del PLC y la pantalla de tacto dentro del departamento de Instrumentación de Campo para realizar la implementación de la manera más rápida posible dentro del satélite.
2. La visita a cada satélite se realizó con personal técnico del departamento de Instrumentación de Campo y operarios del departamento de Operación de Campo con el fin de prevenir cualquier problema que se pueda presentar.
3. Dentro del satélite se modificó la configuración de los transmisores de presión diferencial para luego descargar los programas del PLC y de la pantalla de tacto. Para esto se pasó el funcionamiento de los satélites a manual.
4. Luego del paso anterior se observó si el sistema funcionaba correctamente para dejarlo funcionando de esta forma y recolectar los datos dentro del sistema SCADA.
5. Luego de la implementación en los satélites se realizaron los cambios necesarios al SCADA para recolectar los datos concernientes al flujo de vapor y poder proceder a realizar el análisis respectivo.

La mayor parte de las pruebas realizadas fueron efectuadas de esta forma, aunque se realizó una prueba el día 22 de julio del 2006 en el Satélite 7 que siguió un proceso diferente. Para este caso se siguió el siguiente protocolo:

1. La prueba fue coordinada no solo por el personal del departamento de Instrumentación de Campo y de Operación de Campo, sino también con el personal de Miravalles 3. Esto debido a que la prueba consistió en afectar el envío de vapor a Miravalles 3, disminuyendo su producción en un 80%.
2. Luego de coordinar el día, la hora y la duración de la prueba se procedió a implementar el sistema en el Satélite 7.
3. Para la prueba fue necesario cerrar el aporte del Satélite 1 a la planta de producción Miravalles 3 con el fin de comparar los datos de flujo de vapor del Satélite 7 y del flujómetro que se encuentra en esta unidad de producción.
4. Luego de almacenar los datos al 100% de la producción durante 1 hora se bajó la producción a un 80% con el fin de conocer el desempeño del modelo.
5. Luego de realizada la prueba se subió la producción de nuevo al 100% y se dio paso al aporte del Satélite 1.

Los datos medidos por el flujómetro en Miravalles 3 fueron aportados por personal que labora en esa empresa.

## **Apéndice A.3. Información sobre la Institución**

### **A.3.1. Descripción del CSRG**

El proyecto se va a desarrollar en el departamento de Mantenimiento de Instrumentación de Campo del Centro de Servicios Recursos Geotérmicos del ICE.

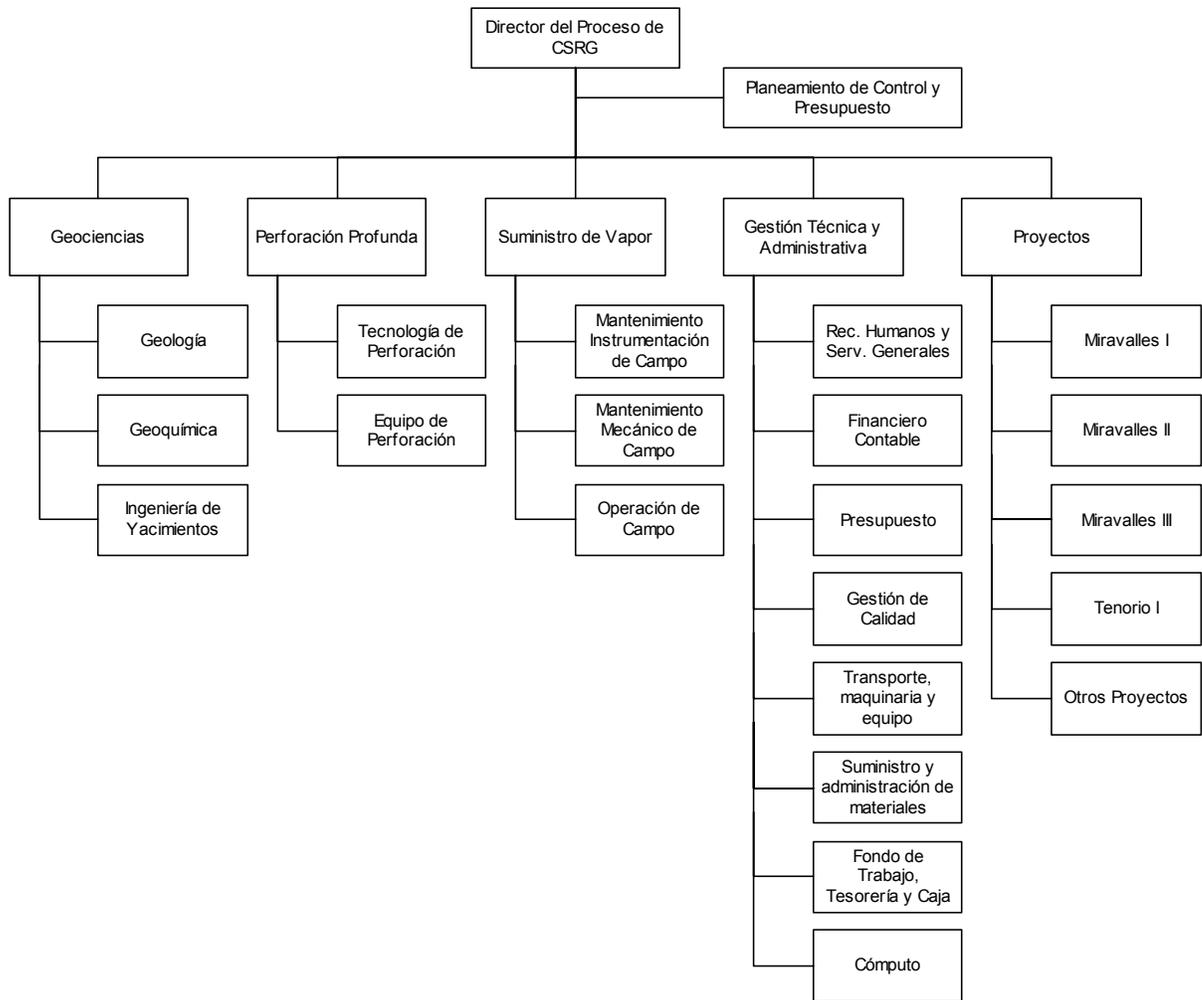
El CSRG es un departamento del Campo Geotérmico Miravalles. La función principal del Campo Geotérmico Miravalles es el obtener energía geotérmica proveniente del Volcán Miravalles para poder generar energía eléctrica.

El Campo Geotérmico Miravalles nace de la necesidad de fuentes de energía con bajo costo y alta productividad. Hoy en día el proyecto cuenta con 7 satélites y aproximadamente 30 pozos productores con una capacidad instalada de aproximadamente 165MW.

Además se cuenta con una tercera unidad de procesamiento de vapor la cual se encuentra en manos de capital extranjero mediante un convenio BOT (Build, Operate and Transfer). Esta unidad le compra al ICE el vapor producido en los pozos y luego de procesarlo le vende al ICE la energía eléctrica producida. Según este convenio la unidad de procesamiento de vapor pasará a manos del ICE luego de 15 años de haber entrado en operación.

Una de las funciones principales del CSRG se basa en el mantenimiento del proceso de producción y separación del vapor, además, tiene como producto principal el vapor de agua que se utiliza para hacer girar las turbinas para producir electricidad. Aunque existen otros productos y servicios que está en capacidad de producir cuando alguno de sus clientes internos o externos así lo soliciten, como lo son análisis geoquímicos, servicios geológicos, registros geotérmicos, calibración de equipo de medición de vapor y temperatura, modelaje de yacimientos, entre otros.

En la figura A.3.1 se puede apreciar la organización interna del CSRG.



**Figura A.3.1.** Organización Interna del CSRG

### **A.3.2. Descripción del departamento de Mantenimiento de Instrumentación de Campo**

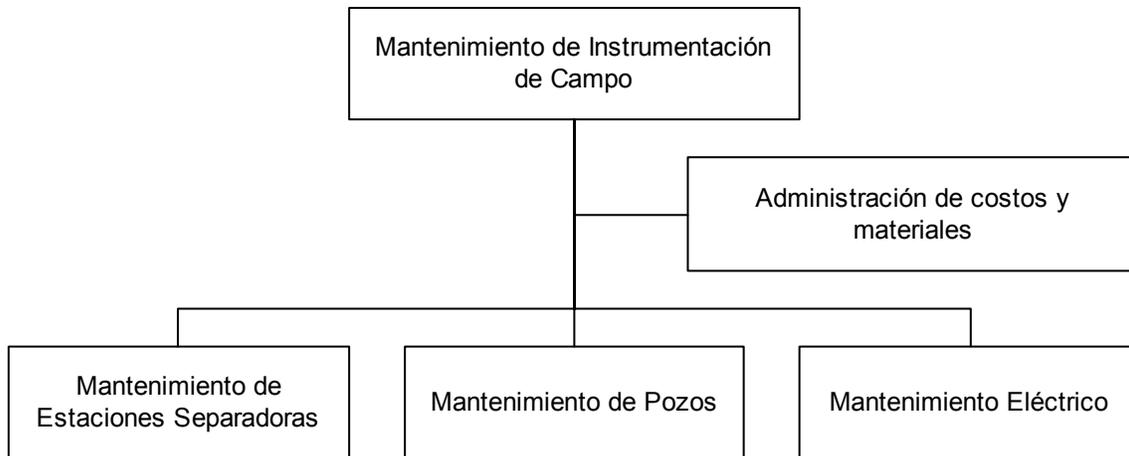
El departamento de Mantenimiento de Instrumentación de Campo, figura A.3.2, se encarga principalmente del mantenimiento del equipo de instrumentación y control así como equipo eléctrico y electromecánico que se encuentra en los satélites y en los pozos productores. Esto comprende el equipo de medición que se utiliza como los medidores de presión, de temperatura, de flujo entre otros.



**Figura A.3.2.** Departamento de Instrumentación

Además de encargarse del mantenimiento del equipo y realizar mejoras a este. Tomando en cuenta costos de materiales y la necesidad de llevarlas a cabo.

El departamento de Mantenimiento de Instrumentación de Campo se encuentra a su vez subdividido en diferentes sectores con el fin de realizar las tareas de manera más óptima y eficaz. La subdivisión del departamento se puede apreciar en la figura A.3.3



**Figura A.3.3.** Organización del Departamento de Mantenimiento de Instrumentación de Campo

### **A.3.3. Antecedentes Prácticos**

El proyecto nace de la necesidad de corregir el error en la medición de flujo de vapor que es enviado a las unidades de generación.

Con él se pretende mejorar el método de medición actual realizado mediante el Tubo Venturi, el cual realiza una medición de flujo basándose en el diferencial de presión presente en dos puntos separados del instrumento. Esta medición actualmente solo contempla la caída en la presión del vapor dentro del tubo Venturi, como se observa en la ecuación A.4.1, obviando variables importantes como la temperatura, la expansión térmica, la presión atmosférica y la densidad.

$$q = \frac{60 \cdot \sqrt{\Delta P}}{\sqrt{124}} \quad (\text{A.3.1})$$

Debido a la importancia del problema se han efectuado diferentes estudios con el fin de encontrar solución al problema, uno de ellos ha sido el desarrollo de un modelo que permite conocer la cantidad de flujo de vapor tomando en cuenta las variables necesarias.

A continuación se presenta un resumen de algunas de las investigaciones realizadas y sus respectivos resultados.

### A.3.3.1. Modelos y Simulaciones para equipo de medición de flujo de vapor geotérmico (Venturi) en el complejo Miravalles

Esta investigación fue realizada conjuntamente por el Ingeniero Federico Nietzen y el estudiante francés Romain Martin. El Ing. Federico Nietzen funge como Encargado de Operación de Campo en el CSRG.

La investigación realizada comprende el análisis de un nuevo modelo de medición de flujo que contempla factores externos que pueden afectar la exactitud de la medición.

El modelo planteado corresponde a la ecuación A.4.2.

$$q[\text{kg/s}] = \frac{\pi}{4} \cdot \sqrt{2g_c} \cdot \frac{C \cdot Y \cdot (d_f)^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{d_f}{D_f}\right)^4}} \cdot \sqrt{\rho_{f1}} \cdot \sqrt{\Delta P} \quad (\text{A.3.2})$$

Donde :

$q$  = Flujo másico de vapor  $\left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right]$

$Y$  = Factor de expansión térmica  $[a \text{ dim ensional}]$

$C$  = Coeficiente de descarga  $[a \text{ dim ensional}]$

$g_c$  = Constante de homogeneidad, con valor de  $1 \left[\frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{N} \cdot \text{s}^2}\right]$

$D_f$  = Diámetro de la tubería  $[m]$

$d_f$  = Diámetro de la estrangulación  $[m]$

$\rho_{f1}$  = Densidad del vapor en la tubería  $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$

$\Delta P$  = Caída de presión en el Venturi  $[Pa]$

Como se puede observar el modelo es más completo que el utilizado actualmente.

Dentro del análisis de este modelo se considera que el vapor saturado de agua, es decir la mezcla bifásica de vapor y líquido térmico obtenido en los pozos, se encuentra en equilibrio termodinámico. Además se considera al vapor que fluye por el tubo Venturi como puro.

Este estudio realizado también analiza las variables involucradas por separado, como por ejemplo la corrección del diámetro de la tubería ( $D_f$ ), la corrección del diámetro de la estrangulación ( $d_f$ ) y la densidad.

### **A.3.3.2. Sistema de medición de Vapor para la Planta Geotérmica Miravalles III**

La Planta Geotérmica Miravalles III es una unidad de procesamiento de vapor de capital extranjero, la cual compra al ICE el vapor extraído de los pozos para la generación de energía eléctrica.

Debido a que las mediciones del flujo de vapor que entra a la unidad de procesamiento forman parte del sistema de facturación de energía que el contratista realiza para su respectivo pago al ICE, estas mediciones deben ser lo más confiables posible.

Es por esto, que en esta unidad se implementó un sistema de medición que utiliza una ecuación de flujo que incluye las correcciones necesarias, como las correcciones por expansión térmica, el contenido de gases no condensables, la presión y la temperatura.

El principal instrumento de medición sigue siendo el Tubo Venturi debido a que por sus características de operación presenta menos pérdidas en la presión de la línea y tiene una precisión más confiable que otros instrumentos de medición de flujo.

El sistema de medición utilizado está dividido en tres partes importantes, el equipo de medición de campo, el equipo de control distribuido de la planta (DCS) y el sistema de monitoreo remoto en las salas de control de las unidades de procesamiento I y II.

El equipo de medición de campo está compuesto por el tubo venturi universal para la medición de la presión diferencial y por los diferentes sensores y transmisores encargados de obtener las mediciones de presión, temperatura, presión diferencial y presión atmosférica.

En cuanto al equipo de control distribuido, dentro de este se realizan todos los cálculos para determinar el flujo consumido por la planta. En éste fueron programadas las ecuaciones de corrección, las cuales utilizan los valores medidos por los instrumentos de campo y las constantes introducidas manualmente por un operador.

Las ecuaciones implementadas fueron obtenidas de la tabla de vapor por medio de ecuaciones de ajuste y se compararon con los datos de las tablas de vapor utilizadas normalmente. Los datos obtenidos fueron muy precisos con errores inferiores al 0.02% en el punto de operación de la planta.

Durante las pruebas de eficiencia se realizó una verificación detallada de los cálculos realizados por el DCS para verificar la validez de los datos obtenidos por el equipo de control. Estas pruebas se hicieron simulando condiciones de presión y temperatura constantes. El valor de la presión diferencial se varió para simular distintas situaciones de consumo de vapor, también en una de las pruebas se varió el contenido de gases no condensables y la calidad de vapor. El error obtenido entre los valores calculados por el DCS y la hoja de calculo estuvieron entre el 0.01% y 0.03%.

En cuanto a la confiabilidad de estas mediciones se debe tomar en cuenta que la precisión asociada al tubo venturi y sus sensores se encuentra entre el 1% y el 2%. Además que la precisión de los sensores no es mayor al 0.1%.

#### **A.3.3.3. Otros antecedentes**

Debido a la importancia de la medición del flujo de vapor, se han investigado otras posibles soluciones para corregir el problema de inexactitud de la medición.

Una de estas es la instalación de un nuevo instrumento de medición que realiza el cálculo de la medición tomando en cuenta diferentes variables. El problema con la compra e instalación de este equipo es el alto precio que tiene ya que no se encuentra dentro del actual presupuesto de la institución.

Otra solución propuesta se da debido a que todo el proceso de producción de vapor se encuentra interconectado a un sistema SCADA el cuál se encarga de realizar un monitoreo general del proceso de producción de vapor. Por lo que una alternativa propuesta es implementar el modelo completo en la programación de este sistema de monitoreo.

La limitante que existe, es que la comunicación entre las centrales separadoras y el servidor podrían cortarse, por lo que los datos de producción de vapor se perderían. Esto no ocurre si el sistema es implementado en cada una de las centrales, ya que aquí mismo se lleva a cabo un registro de la producción de vapor.

## **Apéndice A.4. Hoja de Información**

### **Información del Estudiante**

**Nombre:** Adams Ramón Hernández Jiménez

**Cédula:** 5 – 333 – 672

**Carné ITCR:** 200124908

**Dirección de su residencia en época lectiva:** Bagaces, Cartago

**Dirección de su residencia en época no lectiva:** Liberia, Guanacaste

**Teléfono en época lectiva:** 371 55 31

**Teléfono época no lectiva:** 371 55 31 – 666 25 04

**Email:** [adamsh@costarricense.cr](mailto:adamsh@costarricense.cr)

**Fax:** 666 25 04

### **Información del Proyecto**

**Nombre del Proyecto:** Medición de flujo de vapor geotérmico producido en el complejo Miravalles contemplando variaciones de temperatura, presión y diferencial de presión

**Profesor Asesor:** Ing. Francisco Navarro

**Horario de trabajo del estudiante:** Bisemanal de 7:00am a 5pm

### **Información de la Empresa**

**Nombre:** Centro de Servicios de Recursos Geotérmico – ICE

**Zona:** Bagaces, Guanacaste

**Dirección:** 100m Sur de la Iglesia de Guayabo de Bagaces

**Teléfono:** 673 01 00

**Fax:** 673 01 00

**Apartado:** 10032-1000

**Actividad Principal:** Exploración y Explotación de Energía Geotérmica

## Apéndice A.5. Programas de elaboración de figuras y tablas

### Figuras

|              |                 |
|--------------|-----------------|
| Figura 1.1   | Fotografía      |
| Figura 1.2   | PAINT           |
| Figura 1.3   | PAINT           |
| Figura 3.1   | Fotografía      |
| Figura 3.2   | NT – PROGRAMMER |
| Figura 3.3   | Bibliografía 13 |
| Figura 3.4   | EXCEL           |
| Figura 5.1   | EXCEL           |
| Figura 5.2   | EXCEL           |
| Figura 5.3   | MICROSOFT VISIO |
| Figura 5.4   | MICROSOFT VISIO |
| Figura 5.5   | MICROSOFT VISIO |
| Figura 5.6   | MICROSOFT VISIO |
| Figura 5.7   | EXCEL           |
| Figura 5.8   | MICROSOFT VISIO |
| Figura 5.9   | MICROSOFT VISIO |
| Figura 5.10  | NT – PROGRAMMER |
| Figura 5.11  | NT – PROGRAMMER |
| Figura 5.12  | NT – PROGRAMMER |
| Figura 5.13  | SCADA           |
| Figura 6.1   | SCADA           |
| Figura 6.2   | EXCEL           |
| Figura 6.3   | EXCEL           |
| Figura 6.4   | EXCEL           |
| Figura 6.5   | EXCEL           |
| Figura 6.6   | EXCEL           |
| Figura A.3.1 | MICROSOFT VISIO |
| Figura A.3.2 | Fotografía      |
| Figura A.3.3 | MICROSOFT VISIO |

### Tablas

Todas las tablas fueron tabuladas utilizando Microsoft Word.