

Facultad de  
Ingenierías  
Físico  
Mecánicas



Escuela de Ingenierías  
Eléctrica, Electrónica y  
Telecomunicaciones



Trabajo de Grado

**Trabajo de Grado**  
***“SISTEMA DE GESTIÓN PARA UN PROTOTIPO  
DE SISTEMA SCADA EN EL LABORATORIO DE  
INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA DE LA  
E3T”***

**PRESENTADO ANTE:**

**Comité de Trabajos de Grado**

**Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y  
Telecomunicaciones**

**Por**

**DIEGO HERNAN RAMÍREZ VEGA  
EDGAR ERNESTO TORRES SÁNCHEZ**

**Bucaramanga, Noviembre de 2007**



Facultad de  
Ingenierías  
Físico  
Mecánicas



Escuela de Ingenierías  
Eléctrica, Electrónica y  
Telecomunicaciones



---

Trabajo de Grado

**AUTORES:**

---

Diego Hernán Ramírez Vega

---

Edgar Ernesto Torres Sánchez

**DIRECTOR**

---

Ing. José Alejandro Amaya Palacio





### **AGRADECIMIENTOS**

A todas aquellas personas que hicieron posible llevar a feliz término la consolidación del presente proyecto, en especial a nuestros padres, profesores y asesores, pues gracias a su apoyo durante todo nuestro proceso de aprendizaje hemos logrado nuestras metas.





### **DEDICATORIA DIEGO**

Este trabajo fue posible gracias al respaldo y sabiduría de Dios, que sobrepasa toda sabiduría humana. Los créditos humanos son numerosos, por lo que les agradezco de forma muy general pero sincera y de todo corazón. Mis padres, mis tíos, profesores, amigos y todos aquellos que están cerca en las buenas y en las malas, todos se merecen los mejores agradecimientos.

### **DEDICATORIA EDGAR**

Este proyecto esta dedicado a mis padres, José Solón Torres y Maria Doris Ana Sánchez, por su apoyo incondicional para el logro de este sueño.  
A mi hermano Rolando José Torres por sus consejos y complicidad, a mis profesores por sus conocimientos y a todos mis amigos y compañeros, pero especialmente a Ruth Santamaría y Edgar Santamaría.





## RESUMEN

- **TITULO:** *SISTEMA DE GESTIÓN PARA UN PROTOTIPO DE SISTEMA SCADA EN EL LABORATORIO DE INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA DE LA E3T\**
- **AUTORES:** DIEGO HERNÁN RAMÍREZ VEGA  
EDGAR ERNESTO TORRES SÁNCHEZ\*\*
- **PALABRAS CLAVES:** SCADA, sistema de gestión, supervisión, visualización, simulación, Labview, Realidad Virtual, 3D, Automatización, Nivel, Presión, Flujo.
- **CONTENIDO**

En este documento se presenta el desarrollo de una primera versión de un sistema de gestión para un prototipo de supervisión y adquisición de datos, para la presión, el flujo de gases y el nivel de líquidos que satisface, como herramienta pedagógica, las necesidades actuales del laboratorio de Instrumentación de la E3T, siendo a su vez compatible con el sistema de instrumentación existente en el mismo.

Inicialmente, se hace un marco teórico sobre el concepto de SCADA, sus objetivos, características, niveles de organización y ventajas, relacionándolo con el concepto de sistema de gestión. Asimismo, se hace una descripción física del laboratorio; la solución propuesta se divide en módulos estratégicos, ubicando cada uno dentro de la estructura general junto con sus interrelaciones, haciendo énfasis especial en los aspectos que respaldan la escalabilidad del sistema. Se detalla el modelado matemático de cada uno de los fenómenos físicos que intervienen en el mismo, los datos tomados para su definición, su correspondiente análisis y se propone su relación matemática.

Se plantean los puntos importantes a tener en cuenta en el diseño del sistema de adquisición. Se construyeron diagramas de flujo, que describen rutinas para la supervisión (local o remota) y para Realidad Virtual (RV). También se describe la integración de estos diagramas con los modelos matemáticos en las herramientas de software, definiendo las características y la configuración de red, necesarias para la comunicación remota y la visualización en RV. Se describen algunas características del modelo desarrollado para RV, la forma como se interconectaron los distintos bloques para la visualización y simulación; se conceptualiza la interacción entre el usuario y el sistema. Finalmente, se generan conclusiones y observaciones que sintetizan el trabajo realizado, así como recomendaciones para el correcto funcionamiento del sistema por parte del usuario y sugerencias para un eventual acondicionamiento de nuevos dispositivos.

---

\* Proyecto de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: José Alejandro Amaya Palacio.





## ABSTRACT

- **TITLE:** *HANDLING'S SYSTEM TO A SCADA SYSTEM PROTOTYPE IN THE E3T'S ELECTRONIC INSTRUMENTATION LABORATORY* \*.
- **AUTHORS:** DIEGO HERNÁN RAMÍREZ VEGA  
EDGAR ERNESTO TORRES SÁNCHEZ\*\*
- **KEYWORDS:**  
SCADA, handling system, supervision, visualization, simulation, Labview, Virtual Reality, 3D, Automation, Level, Pressure, Flow.
- **CONTENT**

In this document is presented the development of a first version of a handling system to a supervision and data acquisition prototype, to the pressure, flow of gases and level of liquids that satisfy, as pedagogic tool, the actual necessities of the E3T's electronic instrumentation laboratory, being compatible in turn with its instrumentation system existent.

First, a theory about SCADA is made: objectives, features, organization levels and advantages, relating that with the definition of handling system. Also, it is described the laboratory physically. The proposed troubleshooting is divided in strategic modules, setting each one within the general structure together their interrelations, emphasizing in the aspects that support the scalability of the system. The modeling mathematician is detailed of each one of the physical phenomena that intervene in the same one, as well as the data taken for its definition and corresponding analysis, intending its mathematical relationship.

The important points to take in account are proposed in the acquisition system design. Flow charts were built, which describes routines to the supervision (local or remote) and to Virtual Reality (VR). Also, the integration of these charts with the mathematician models in the software tools is described, defining its features and the configuration of the network, which are necessary to the remote communication and the visualization in VR. Some characteristics are described, according to the form as the different blocks were interconnected for the visualization and simulation; the interrelation between the user and the system is conceptualized. Finally, conclusions and observations are generated, synthesizing the developed work, as well as recommendations to the correct operation of the system on the par of the user and suggests to an eventual incorporation of new devices.

---

\* Thesis

\*\* Physichal – mechanics Engineerings Faculty. Electricity, Electronics and Telecommunications Engineerings School. Manager: Eng. José Alejandro Amaya Palacio.





## TABLA DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCION.....</b>	<b>8</b>
<b>1. CONCEPTOS PRELIMINARES .....</b>	<b>11</b>
1.1 INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS SCADA.....	11
1.1.1 <i>Objetivos de los sistemas SCADA</i> .....	11
1.1.2 <i>Características generales</i> .....	12
1.1.3 <i>Niveles</i> .....	12
1.1.4 <i>Ventajas</i> .....	13
1.2 SISTEMA DE GESTIÓN (SG).....	13
1.3 DESCRIPCIÓN FÍSICA DEL LABORATORIO DE INSTRUMENTACIÓN DE LA E3T	14
1.3.1 <i>Sistema de transmisión de gas</i> .....	15
1.3.2 <i>Sistema de medición de nivel</i> .....	18
1.4 SOLUCIÓN PLANTEADA .....	19
1.4.1 <i>Sistema de instrumentación</i> .....	20
1.4.2 <i>Sistema de Adquisición</i> .....	20
<b>2. FASES DE DESARROLLO .....</b>	<b>23</b>
2.1 PLANTEAMIENTO DE LOS SISTEMAS DE INSTRUMENTACIÓN Y ADQUISICIÓN .....	23
2.2 DESARROLLO DEL SISTEMA DE GESTIÓN.....	25
2.3 PRUEBAS Y DISEÑO DEFINITIVO.....	25
<b>3. MODELO FUNCIONAL GENERAL DEL SISTEMA DE GESTION.....</b>	<b>27</b>
3.1 COMUNICACIÓN SERIAL .....	28
3.1.1 <i>Estructura de la comunicación</i> .....	29
3.1.2 <i>Conversión decimal:</i> .....	29
3.1.3 <i>Ponderación:</i> .....	29
3.2 MÓDULO DE MODELADO MATEMÁTICO Y LÓGICA DE SUPERVISIÓN .....	30
3.2.1 <i>Valores predeterminados:</i> .....	31
3.2.2 <i>Modelado matemático</i> .....	31
3.2.3 <i>Lógica de supervisión</i> .....	32
3.3 COMUNICACIÓN TCP/IP.....	33
3.4 INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO (GUI) .....	34
3.4.1 <i>Constantes de configuración</i> .....	34
3.4.2 <i>Variables de proceso</i> .....	35
3.4.3 <i>Pantalla</i> .....	35
3.4.4 <i>Rutinas de usuario</i> .....	35
3.4.5 <i>Indicadores</i> .....	35
3.5 ESCALABILIDAD DEL SISTEMA DE GESTIÓN .....	35
3.5.1 <i>Estructura modular</i> .....	36
3.5.2 <i>Comunicación Serial (Sistema de Adquisición – Sistema de Gestión)</i> .....	36
3.5.3 <i>Acceso a los datos</i> .....	36
3.5.4 <i>Programación de realidad virtual</i> .....	37





<b>4. MODELADO MATEMÁTICO .....</b>	<b>38</b>
4.1 MODELO DE LA TUBERÍA DE TRANSMISIÓN DE GASES.....	38
4.1.1 <i>Características básicas de los medidores de platina de orificio</i> .....	38
4.1.2 <i>Toma de datos</i> .....	42
4.1.3 <i>Análisis y definición del modelo</i> .....	43
4.2 MODELO DE TANQUE DE NIVEL DE LIQUIDO.....	44
4.2.1 <i>Modelo matemático Presión – Nivel</i> .....	44
4.2.2 <i>Toma de datos</i> .....	44
4.2.3 <i>Análisis de datos y modelo final</i> .....	46
4.3 MODELOS UTILIZADOS PARA SIMULACIÓN EN REALIDAD VIRTUAL ....	47
4.3.1 <i>Modelo matemático Nivel – tiempo de descarga</i> .....	47
4.3.2 <i>Modelo matemático nivel – tiempo de carga</i> .....	49
<b>5. ESTRATEGIA PROPUESTA PARA EL SISTEMA DE ADQUISICION DE DATOS.....</b>	<b>51</b>
5.1 CAPTACIÓN DE LA SEÑAL.....	52
5.2 ACONDICIONAMIENTO.....	52
5.3 CONVERSIÓN A/D.....	53
5.4 TRANSMISIÓN – RECEPCIÓN .....	53
<b>6. ALGORITMO DE SUPERVISION.....</b>	<b>54</b>
6.1 SUPERVISIÓN DEL OPERADOR LOCAL.....	54
6.1.1 <i>Descripción de entradas y salidas</i> .....	54
6.1.2 <i>Diagrama de flujo</i> .....	57
6.2 LÓGICA DE SUPERVISIÓN PARA EL OPERADOR REMOTO.....	60
6.2.1 <i>Descripción de entradas y salidas</i> .....	60
6.2.2 <i>Diagrama de flujo</i> .....	63
6.3 MODELO DE SUPERVISIÓN EN REALIDAD VIRTUAL .....	64
<b>7. INTEGRACION DEL MODELADO MATEMÁTICO Y LA LÓGICA DE SUPERVISIÓN .....</b>	<b>68</b>
7.1 SELECCIÓN DEL SOFTWARE.....	68
7.2 IMPLEMENTACIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS Y EL ALGORITMO DE SUPERVISIÓN EN LABVIEW 7.0 .....	70
7.2.1 <i>Modelos matemáticos</i> .....	70
7.2.2 <i>Supervisión de presión absoluta y nivel</i> .....	71
7.2.3 <i>Opciones de mando</i> .....	71
7.2.4 <i>Rutina de comunicación TCP/IP</i> .....	71
7.2.5 <i>Generación De Historiales</i> .....	72
7.3 IMPLEMENTACIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS Y EL ALGORITMO DE SUPERVISIÓN EN SIMULINK DE MATLAB 6.5.....	73
<b>8. IMPLEMENTACION DE TCP/IP EN LABVIEW 7.0 Y EN MATLAB 6.5 PARA LA HERRAMIENTA DE REALIDAD VIRTUAL .....</b>	<b>76</b>
8.1 INTRODUCCIÓN AL PROTOCOLO .....	76
8.1.1 <i>Transferencia de datos de la lógica de supervisión –implementada en Labview-vía TCP/IP.</i> .....	77
8.2 IMPLEMENTACIÓN DE TCP/IP EN SIMULINK DE MATLAB.....	81





<b>9.</b>	<b>DESCRIPCION DEL ENTORNO DE REALIDAD VIRTUAL.....</b>	<b>82</b>
<b>10.</b>	<b>PRUEBAS REALIZADAS.....</b>	<b>87</b>
10.1	PRUEBAS DE CONECTIVIDAD TCP/IP:.....	87
10.2	PRUEBAS DE CONECTIVIDAD DEL PUERTO SERIAL.....	87
<b>11.</b>	<b>OBSERVACIONES, CONCLUSIONES .....</b>	<b>89</b>
11.1	CONCLUSIONES.....	89
11.2	OBSERVACIONES .....	90
<b>12.</b>	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>93</b>
12.1	PARA LOS OPERADORES LOCALES Y REMOTOS.....	93
12.2	PARA LA HERRAMIENTA DE REALIDAD VIRTUAL .....	93
12.3	PARA ACTUALIZACIONES, MEJORAS Y PROYECTOS FUTUROS.....	93
<b>13.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>95</b>
<b>14.</b>	<b>ANEXO A. FUNDAMENTOS DE MEDICIÓN DE CAUDAL EN GASES Y DE NIVEL EN LÍQUIDOS EN EL ÁMBITO INDUSTRIAL .....</b>	<b>98</b>
14.1	CAUDAL.....	98
14.1.1	<i>Definición .....</i>	<i>98</i>
14.1.2	<i>Importancia de la medición de caudal.....</i>	<i>98</i>
14.1.3	<i>Tipos de medición de caudal.....</i>	<i>99</i>
14.1.4	<i>Leyes físicas que permiten la deducción de la expresión de caudal volumétrico a partir de una diferencia de presión.....</i>	<i>101</i>
14.1.5	<i>NORMAS AGA DE MEDICIÓN DE GAS: ASPECTOS IMPORTANTES</i>	<i>105</i>
14.2	NIVEL DE LÍQUIDOS.....	108
14.2.1	<i>Definición .....</i>	<i>108</i>
14.2.2	<i>Importancia de la medición de nivel.....</i>	<i>108</i>
14.2.3	<i>Tipos de medición de caudal.....</i>	<i>108</i>
14.2.4	<i>Leyes físicas que rigen la medición de nivel de líquidos.....</i>	<i>110</i>





**LISTA DE FIGURAS**

FIGURA 1: TUBERÍA PARA LA MEDICIÓN DE FLUJO DE GASES. FUENTE: AUTORES.....	14
FIGURA 2: TANQUE DE AGUA. FUENTE: AUTORES.....	15
FIGURA 3. SISTEMA MEDIDOR DE ORIFICIO, CON SU RESPECTIVA PLATINA. FUENTE: AUTORES ..	15
FIGURA 4. TRANSMISOR INTELIGENTE DE PRESIÓN. FUENTE: AUTORES.....	16
FIGURA 5. MEDIDOR DE PRESIÓN ABSOLUTA. FUENTE: AUTORES.....	17
FIGURA 6. SWITCH ON/OFF DE PRESIÓN. FUENTE: AUTORES. ....	17
FIGURA 7. VÁLVULA SOLENOIDE DE TRES VÍAS. FUENTE: AUTORES. ....	18
FIGURA 8. MEDIDOR INTELIGENTE DE PRESIÓN DIFERENCIAL. FUENTE: AUTORES.....	18
FIGURA 9. VÁLVULA DE LLENADO. FUENTE: AUTORES. ....	19
FIGURA 10. VÁLVULA DE DESAGÜE. FUENTE: AUTORES.....	19
FIGURA 11. SECUENCIA DE LAS SEÑALES. FUENTE: HENRY ANTONIO MENDIBURU DÍAZ.....	20
FIGURA 12. MANTENIMIENTO DEL SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN .....	24
FIGURA 13. MÓDULO DE COMUNICACIÓN SERIAL. FUENTE: AUTORES.....	28
FIGURA 14. MÓDULO DE MODELADO Y LÓGICA. FUENTE: AUTORES.....	31
FIGURA 15. ESTRUCTURA DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS. FUENTE: AUTORES. ....	32
FIGURA 16. ESQUEMA GENERAL DE COMUNICACIÓN TCP/IP. FUENTE: AUTORES. ....	33
FIGURA 17. MÓDULO GUI. FUENTE: AUTORES.....	34
FIGURA 18. CONEXIÓN ELÉCTRICA DEL TRANSMISOR DIFERENCIAL. FUENTE: AUTORES. ....	43
FIGURA 19. REGRESIÓN LINEAL CURVA $H-v$ . FUENTE: AUTORES.....	46
FIGURA 20. REGRESIÓN CUADRÁTICA DATOS DE DESCARGA. FUENTE: AUTORES .....	49
FIGURA 21. REGRESIÓN LINEAL DATOS DE DESCARGA. FUENTE: AUTORES .....	50
FIGURA 22. MODELOS MATEMÁTICOS IMPLEMENTADOS EN LABVIEW 7.0. FUENTE: AUTORES ..	70
FIGURA 23. LÓGICA DE SUPERVISIÓN EN LABVIEW 7.0. FUENTE: AUTORES.....	71
FIGURA 24. GENERACIÓN DE HISTORIALES EN LABVIEW. FUENTE: AUTORES.....	72
FIGURA 25. INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO PARA LA LÓGICA DE SUPERVISIÓN. FUENTE: AUTORES.....	73
FIGURA 26. BLOQUE FINAL DEL CALCULO DEL FLUJO. FUENTE: AUTORES. ....	74
FIGURA 27. BLOQUES FINALES COMPLEMENTARIOS. FUENTE: AUTORES. ....	74
FIGURA 28. BLOQUES DE SINCRONIZACIÓN DEL TIEMPO REAL. FUENTE: AUTORES.....	75
FIGURA 29. ESQUEMA DE CONEXIÓN TCP/IP ENTRE DOS ESTACIONES. FUENTE: TCP-IP IBM REDBOOK.....	77
FIGURA 30. BLOQUE Y PUERTOS PARA EL ESTABLECIMIENTO DE LA COMUNICACIÓN TCP/IP EN LABVIEW. FUENTE: AUTORES. ....	78
FIGURA 31. TRANSFERENCIA DE DATOS PRINCIPAL – RECEPCIÓN. FUENTE: AUTORES.....	80
FIGURA 32. TRANSFERENCIA DE DATOS RECEPCIÓN – PRINCIPAL. FUENTE: AUTORES.....	80
FIGURA 33. TRANSFERENCIA DE DATOS LÓGICA DE SUPERVISIÓN – VISUALIZACIÓN REALIDAD VIRTUAL .....	80
FIGURA 34. CÓDIGO DE COMUNICACIÓN TCP/IP Y TIEMPO REAL. FUENTE: AUTORES .....	82
FIGURA 35. DIAGRAMA GENERAL DE SIMULACIÓN SOBRE MATLAB. FUENTE: AUTORES .....	83
FIGURA 36. DIAGRAMA GENERAL DE VISUALIZACIÓN SOBRE MATLAB. FUENTE: AUTORES.....	83
FIGURA 37. DIAGRAMA CONCEPTUAL DE ENTRADAS Y SALIDAS PARA SIMULACIÓN. FUENTE: AUTORES.....	84
FIGURA 38. DIAGRAMA CONCEPTUAL DE ENTRADAS PARA VISUALIZACIÓN. FUENTE: AUTORES	85
FIGURA 39. DETALLES DEL INSTRUMENTAL EN EL ENTORNO DE REALIDAD VIRTUAL. FUENTE: AUTORES.....	86
FIGURA 40. DETALLES DE LA INTERFASE DE USUARIO DE REALIDAD VIRTUAL. FUENTE: AUTORES.....	86





---

**Trabajo de Grado, 5 de 128**

FIGURA 41 CONFIGURACIÓN Y CONFIGURACIÓN DEL PUNTO DE RED. FUENTE: AUTORES .....	87
FIGURA 42. PRUEBA DE COMUNICACIÓN SERIAL CON UN PROTOTIPO. FUENTE: AUTORES .....	88
FIGURA 43 ANEXO COMPORTAMIENTO DE UN FLUIDO AL EXPERIMENTAR UNA DIFERENCIA DE PRESIÓN. FUENTE: ANTONIO CREUS.....	101
FIGURA 44. ANEXO: NIVELES DE PRESIÓN A LO LARGO DE UNA TUBERÍA CON PLATINA DE ORIFICIO. FUENTE: ANTONIO CREUS. ....	102
FIGURA 45 ANEXO PLATINA DE ORIFICIO TIPO UNIVERSAL. FUENTE: ORIFICE PLATES AND PLATE SEALING UNITS. DANIEL ®-EMERSON™.....	107
FIGURA 46 ANEXO TIPOS DE PLATINAS DE ORIFICIO. FUENTE: MANUAL ECOPETROL .....	107





## LISTA DE ESQUEMAS

ESQUEMA 1. DIAGRAMA DE FLUJO DE LAS ETAPAS DE DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO. FUENTE: AUTORES. ....	26
ESQUEMA 2. MODELO FUNCIONAL GENERAL DE LOS SISTEMAS INTEGRADOS. FUENTE: AUTORES. .....	27
ESQUEMA 3. ESCALABILIDAD DE LA COMUNICACIÓN SERIAL. FUENTE: AUTORES. ....	36
ESQUEMA 4. ESCALABILIDAD POR ACCESO A LOS DATOS. FUENTE: AUTORES. ....	37
ESQUEMA 5. PROCESO DE ADQUISICIÓN DE DATOS. FUENTE: AUTORES. ....	52
ESQUEMA 6. DIAGRAMA DE FLUJO GENERAL DEL PROCESO DESDE EL OPERADOR LOCAL. FUENTE: AUTORES. ....	60
ESQUEMA 7. DIAGRAMA DE FLUJO GENERAL DEL PROCESO DESDE EL OPERADOR REMOTO. FUENTE: AUTORES. ....	64
ESQUEMA 8. DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO PARA LA SIMULACIÓN EN RV DE LA MEDICIÓN DE NIVEL. FUENTE: AUTORES. ....	66
ESQUEMA 9. DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO PARA LA SIMULACIÓN EN RV DE LA MEDICIÓN DE FLUJO. FUENTE: AUTORES. ....	67
ESQUEMA 10. SECUENCIA DEL ESTABLECIMIENTO DE LA CONEXIÓN TCP/IP. FUENTE: TCP-IP IBM REDBOOK. ....	78
ESQUEMA 11 ANEXO CLASIFICACIÓN DE LOS MEDIDORES DE CAUDAL. FUENTE AMAYA J .ALEJANDRO. ....	99
ESQUEMA 12 ANEXO CONTINUACIÓN DEL ESQUEMA 11 FUENTE AMAYA J .ALEJANDRO. ....	100
ESQUEMA 13 ANEXO CONTINUACIÓN DEL ESQUEMA 11 FUENTE AMAYA J .ALEJANDRO. ....	101
ESQUEMA 14 ANEXO: CLASIFICACIÓN DE MEDIDORES DE CAUDAL. FUENTE: JOSÉ AMAYA PALACIO. ....	109





## LISTA DE TABLAS

TABLA 1. ASOCIACIÓN DE LOS NIVELES DE SCADA CON LA ESTRUCTURA DE SISTEMAS PROPUESTA. FUENTE: AUTORES. ....	23
TABLA 2. DATAGRAMAS DE LA COMUNICACIÓN SERIAL. FUENTE: AUTORES. ....	30
TABLA 3. DATOS DE CARGA Y DESCARGA DEL TANQUE <i>H-v</i> . FUENTE: AUTORES. ....	46
TABLA 4. ANÁLISIS DE LOS DATOS <i>H-v</i> . FUENTE: AUTORES. ....	46
TABLA 5. DATOS DE DESCARGA <i>H-t</i> . FUENTE: AUTORES. ....	48
TABLA 6. DATOS DE CARGA <i>H-t</i> . FUENTE: AUTORES. ....	50
TABLA 7. VALORES PREDETERMINADOS. FUENTE: AUTORES. ....	54
TABLA 8. VARIABLES DE CONFIGURACIÓN. FUENTE: AUTORES. ....	54
TABLA 9. VARIABLES DE PROCESO. FUENTE: AUTORES. ....	55
TABLA 10. VARIABLES DE CONFIGURACIÓN PARA EL OPERADOR REMOTO. FUENTE: AUTORES. .	60
TABLA 11. VARIABLES DE PROCESO PARA EL OPERADOR REMOTO. FUENTE: AUTORES. ....	61
TABLA 12. VARIABLES EMPLEADAS EN VISUALIZACIÓN DE REALIDAD VIRTUAL. FUENTE: AUTORES. ....	65
TABLA 13. VARIABLES EMPLEADAS EN SIMULACIÓN DE REALIDAD VIRTUAL. FUENTE: AUTORES. .....	66
TABLA 14. COMPARACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS PAQUETES DE SOFTWARE. FUENTE: CARLOS MORA. ....	70
TABLA 15 RESUMEN DE LAS PRUEBAS REALIZADAS POR TCP/IP. FUENTE: AUTORES. ....	87
TABLA 16. RESUMEN DE LAS PRUEBAS REALIZADAS POR RS-232. FUENTE: AUTORES. ....	88





## INTRODUCCION

---

La industria colombiana viene trabajando desde hace algún tiempo con sistemas automatizados de supervisión y control de procesos, para hacer de la efectividad su principal característica.

Teniendo en cuenta que *es necesaria la innovación en los procesos productivos*<sup>1</sup>, cuyo fundamento sea la investigación y el desarrollo de prototipos que solucionen problemas y optimicen recursos, el diseño e implementación de sistemas SCADA, en pequeña y gran escala, es una de las herramientas disponibles en la industria actual para suplir esta necesidad, *ofreciendo una amplia gama de beneficios para este sector, tales como la redistribución adecuada de la mano de obra, el mejoramiento del tiempo de ciclo, una menor producción defectuosa, el aumento del tiempo de vida de la maquinaria y recursos físicos, entre otros*<sup>2</sup>.

Se debe tener en cuenta asimismo que muchas de las tareas automatizadas de control y visualización que se efectuaban con PLC (controladores lógicos programables o autómatas) se están realizando actualmente con sistemas basados en PC, utilizando tarjetas de expansión/adquisición de datos o microcontroladores, lo que justifica claramente la aplicación de un software para tal fin (que en términos estructurales es llamado sistema de gestión), que hace posible la simulación del sistema de supervisión y la respuesta de la planta de forma remota y, además, en un Ambiente Virtual.

De esta manera, la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, en la búsqueda de la formación idónea de profesionales en las áreas de Instrumentación Electrónica y Automatización de Procesos, se ve enfrentada a la necesidad de diseñar un prototipo de sistema de comunicación industrial que se adapte a sus necesidades pedagógicas que impone una nueva realidad industrial.

Pensando en los recursos disponibles en el laboratorio, así como en el análisis y experimentación de procesos, donde la presión y la temperatura actúan como variables físicas fundamentales, se presenta el diseño e implementación de un software de sistema de gestión que modele, supervise y simule los dispositivos antes mencionados, para evitar que su estudio en corto tiempo presente limitantes de escalabilidad al compararse con los procedimientos y tecnologías actuales.

---

<sup>1</sup> PORTER, Michael. Estrategia y Ventaja Competitiva. Barcelona: Ediciones Deusto, 2006. Michael M. Porter es Bishop William Laurence University Professor en la Harvard Business School.

<sup>2</sup> DIESTEFANO, Mario. Comunicaciones en entornos industriales. Facultad de ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina, 2005.





---

### Trabajo de Grado, 9 de 128

De esta manera, el lector encontrará en este documento el desarrollo de una primera versión de un sistema de gestión para un prototipo de adquisición, supervisión y simulación de datos, puntualmente enfocado en las variables presión, caudal de gases y nivel de líquidos (variables finales) que satisface, como herramienta pedagógica, las necesidades actuales del laboratorio de Instrumentación de la E3T, siendo a su vez compatible con el sistema de instrumentación existente en el mismo.

En el capítulo 1 se hace un marco de referencia conceptual sobre el concepto de SCADA, sus objetivos, características, niveles de organización, ventajas, relacionando esto con el concepto de sistema de gestión. Asimismo, con el fin de tener claro un punto de partida sobre los recursos disponibles, se hace una descripción física del laboratorio de instrumentación; con base en lo anterior, se define una solución integral para lograr los objetivos propuestos. Las fases en que se dividió este trabajo se encuentran descritas en el capítulo 2, descritas en un orden lógico y por prioridades.

En el capítulo 3, se inicia el desarrollo de la solución planteada, la cual se divide en módulos estratégicos, donde se ubica cada uno de estos dentro de la estructura general, junto con sus interrelaciones. Posteriormente, cada módulo es descrito concretamente; en este punto, se hace también un énfasis especial en los aspectos que respaldan la escalabilidad del sistema.

El capítulo 4 contiene una descripción detallada de los aspectos relacionados con el modelado matemático de cada uno de los fenómenos físicos que intervienen en el sistema, los datos tomados para su definición, su correspondiente análisis y se propone su relación matemática.

Teniendo en cuenta las características de las señales que intervienen en el proceso, en conjunto con los requerimientos del sistema de gestión, en el capítulo 5 se plantean los puntos importantes a tener en cuenta para el diseño de un sistema de adquisición, desarrollable en proyectos posteriores.

En el capítulo 6, se hace más evidente la relación sistema-usuario con la construcción de los diagramas de flujo, que describen las rutinas tanto para la supervisión (local o remota) como para los usos de Realidad Virtual. La integración de estos diagramas con los modelos matemáticos en las herramientas de software se describe en el capítulo 7, detallando aspectos particulares de su funcionamiento. Las características y la configuración de red, necesarias para la comunicación remota y la visualización en Realidad Virtual del proceso se describen en el capítulo 8.

Para terminar el desarrollo, en el capítulo 9 se describen algunas características del modelo desarrollado para Realidad Virtual, la forma como se interconectaron los distintos bloques para la visualización y simulación; igualmente, se conceptualiza la interacción posible entre el usuario y el sistema, así como una mirada a la interfase de usuario.

En el capítulo 10, se analizan los resultados de las pruebas hechas al sistema de gestión implementado, generando conclusiones y observaciones que sintetizan el trabajo realizado; igualmente, se dan algunas recomendaciones para el correcto





---

**Trabajo de Grado, 10 de 128**

funcionamiento del sistema por parte del usuario, así como sugerencias para un eventual acondicionamiento de nuevos dispositivos.

Se espera que, en este trabajo, el lector encuentre un punto de partida que lo motive a la investigación y el desarrollo de temas relacionados con la automatización, la instrumentación industrial y las redes de datos.





## 1. CONCEPTOS PRELIMINARES

---

Este capítulo se tratarán dos conceptos básicos, cuya interrelación es fundamental para el desarrollo de este trabajo: Sistemas SCADA y sistemas de gestión. Se hará asimismo una descripción sobre los recursos físicos del laboratorio de instrumentación de la E3T, así como el planteamiento de la solución implementada para lograr los objetivos propuestos.

### 1.1 INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS SCADA

Un sistema SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) puede definirse como la *aplicación software especialmente diseñada para funcionar sobre ordenadores de control de producción*<sup>3</sup>. Este software se interconecta al proceso, por medio de comunicaciones digitales y presenta de manera gráfica el estado de las variables que intervienen en el mismo.

#### 1.1.1 *Objetivos de los sistemas SCADA*

Los sistemas SCADA tienen como función principal presentar y procesar datos que permitan al operador supervisar -control supervisivo- un proceso industrial, entendiendo el término *supervisar* como *el acto de vigilar o inspeccionar algún proceso en marcha y en tiempo real*<sup>4</sup>, facilitando igualmente la adquisición de datos, para determinar el estado del proceso y su posterior análisis.

Ahora bien, no debe considerarse al SCADA como un sistema de control propiamente dicho –es decir, no puede actuar de manera independiente y tomar decisiones autónomas en un proceso-, ya que se limita a realizar un *control de supervisión*, modificando condiciones puntuales del sistema, tales como arranques, paradas, pausas, etc.

---

<sup>3</sup> ARTEAGA Alwin, URIBE Cesar, RUEDA Wilfred. “Controlador lógico programable TSX-nano, módulos de entrenamiento y prácticas de laboratorio. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2001

<sup>4</sup> GRUPO DE INVESTIGACIÓN OCEANBUOYS. Telemetría marítima en las boyas de monitoreo oceánico "galatea" (omb-2001), y el sistema vms (vessel monitoring system), usando los scada oceánicos "triton" (sco-2001) abordando de barcos pesqueros. En: Implementación de un Sistema Oceánico SCO-2001 [En línea]. Página Web versión HTML. Disponible en Internet: <[http://www.geocities.com/ocean\\_buoys/3ze.html](http://www.geocities.com/ocean_buoys/3ze.html)>





### 1.1.2 Características generales<sup>5</sup>

Con el fin de poder adaptarse a las necesidades de la industria actual, un sistema SCADA debe poseer las siguientes características:

- Ser de arquitectura abierta, teniendo la capacidad de adaptarse a equipos de diferentes fabricantes.
- Tener un módulo de comunicación que permita el intercambio de información entre el computador y el controlador, los cuales deben comunicarse de forma transparente para el usuario.
- Emplear un entorno gráfico sencillo –o interfaz gráfica- que permita desarrollar aplicaciones de manera rápida, consistentes con las situaciones reales del proceso.
- Facilitar la programación a través de módulos de proceso en tiempo real y post proceso de la información.

### 1.1.3 Niveles<sup>6</sup>

#### Nivel de Instrumentación

En esta instancia se toman las variables físicas (presión, caudal, nivel, etc.) y se convierten en una señal que pueda ser leída o interpretada por el operador. El sistema SCADA maneja instrumentación eléctrica o electrónica, donde la variable física se convierte en una señal eléctrica.

#### Nivel RTU

El RTU es la unidad terminal remota que básicamente es un dispositivo inteligente microprocesador, que recoge, almacena y procesa la información que viene de la instrumentación del campo.

#### Nivel de Comunicaciones

Es el encargado de tomar la información de la RTU, y transmitirla por el medio escogido hasta el centro de control. Dependiendo del costo, la disponibilidad, la velocidad de transmisión y la confiabilidad requeridas, se selecciona el medio de comunicación mas apropiado, como por ejemplo las líneas telefónicas, los radios de comunicaciones, las microondas o sistemas satelitales de envergadura similar.

#### Centro de Control

Esta compuesto por un conjunto de poderosos computadores con toda la variedad de periféricos, que realizan el procesamiento de las señales. Usualmente, existe también un equipo de interfase de comunicaciones, cuya función es la de recibir la información

---

<sup>5</sup> COLOMER, Johan, MELENDEZ Joaquín, AYZA Jordi. Sistemas de supervisión. Barcelona: CEA-ICFA, 2000.

<sup>6</sup> GRUPO DE INVESTIGACIÓN OCEANBUOYS, Ibid.





---

**Trabajo de Grado,** 13 de 128

de diferentes canales de comunicación y procesarla, agrupándolas para enviarlas a los computadores servidores mediante redes de trabajo LAN, MAN o WAN.

**Software de integración y operaciones**

Son las instrucciones de control a las computadoras para que puedan interaccionar y procesar debidamente las señales enviadas desde los RTU's. Adicionalmente, permite al operador determinar el estado del proceso y asociar las variables del mismo con imágenes animadas –mímicos- que representan elementos finales de control tales como interruptores, motores válvulas, etc.

*1.1.4 Ventajas*

Entre las principales ventajas del sistema SCADA se tienen:

- Reporte en tiempo real de las variables físicas del sistema.
- Control de contingencias.
- Almacenamiento de datos históricos.
- Planeamiento de la operación.
- Análisis de instrumentos.
- Eficiencia y seguridad de la operación.
- Confiabilidad en la medición.
- Facilidad de mantenimiento.

Teniendo en cuenta esta breve introducción sobre los sistemas SCADA, se procede a relacionar lo anterior con el concepto y las generalidades de un sistema de gestión.

**1.2 SISTEMA DE GESTIÓN (SG)**

Para empezar, el termino *gestión* puede definirse como *un conjunto de trámites que se llevan a cabo para resolver un asunto*<sup>7</sup>. Su significado tiene que ver con dirigir y administrar una organización, sistema o proceso específico.

En los sistemas SCADA, un sistema de gestión puede entenderse como una herramienta software muy específica, dedicada a servir de interfaz entre los procesos que se supervisan y el usuario final.

---

<sup>7</sup> DICCIONARIO DE LA LENGUA ESPAÑOLA. En: Gestión [en línea]. Página Web, versión HTML. Disponible en Internet:  
<<http://www.wordreference.com/definicion/gesti%F3n>>





### Trabajo de Grado, 14 de 128

El objeto de los SG es el de *manejar de manera clara, sencilla y ordenada un conjunto de datos*, provenientes del sistema de instrumentación, *tendientes a facilitar el análisis y la toma oportuna y eficaz de decisiones que afecten el proceso.*<sup>8</sup>

Una de las características más ventajosas del SG es la abstracción de la información y la transparencia de los procesos para el usuario; en este caso particular se apreciará que la interfaz no requiere del conocimiento técnico o lógico de la implementación del sistema por parte del operador, sino que se enfoca a la comprensión de las entradas y salidas del proceso.

### 1.3 DESCRIPCIÓN FÍSICA DEL LABORATORIO DE INSTRUMENTACIÓN DE LA E3T<sup>9</sup>

El laboratorio de instrumentación de la E3T, se encuentra ubicado hacia el costado norte del campus universitario, en el segundo piso (209), del edificio de Alta Tensión. Está diseñado para trabajar inicialmente con cinco variables de proceso (presión, nivel, flujo, temperatura, peso) con las cuales se realizan diferentes prácticas que comprenden desde tomar medidas hasta realizar algunos lazos de control.

Cuenta con 4 conjuntos de mesas, las cuales disponen cada una un sistema de tubería de presurización por aire con sus respectivos dispositivos de medición de presión de fluidos, temperatura y switch de presión.

Igualmente se dispone de una tubería para la medición de flujo de gases -Figura 1-. y un tanque de agua abierto de acrílico de 40cm de diámetro, 260 cm de alto y 8 mm de espesor. -Figura 2- para medición de nivel de líquidos.

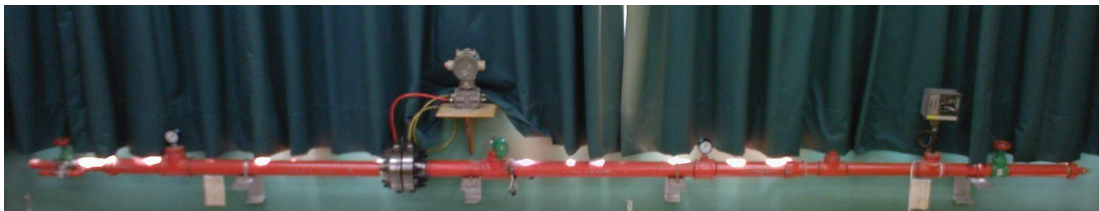


Figura 1: Tubería para la medición de flujo de gases. Fuente: Autores.

<sup>8</sup> Wikimedia Foundation, Inc. En: Sistemas de gestión de bases de datos [en línea]. Página web, versión HTML. Disponible en Internet: <[http://es.wikipedia.org/wiki/Sistema\\_de\\_gestión\\_de\\_base\\_de\\_datos](http://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_de_gestión_de_base_de_datos)>.

<sup>9</sup> SAYAGO, Sandra Milena. Planeación e Implementación del Laboratorio de Instrumentación Electrónica de la E3T: Trabajo de grado. UIS. Bucaramanga, 2001





Figura 2: Tanque de agua. Fuente: Autores.

### 1.3.1 Sistema de transmisión de gas

La tubería para la medición de flujo de gases cuenta con los siguientes dispositivos:

*Medidor primario: Sistema de platina de orificio de brida* –Figura 3–: En él se produce una diferencia de presión, siendo el caudal proporcional a esta.

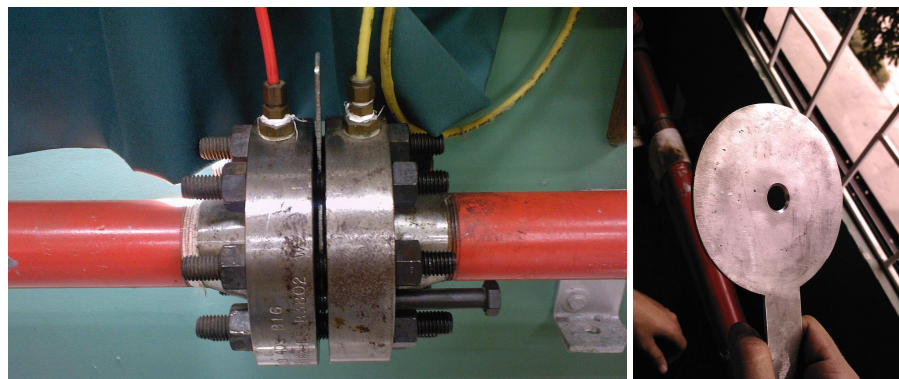


Figura 3. Sistema medidor de orificio, con su respectiva platina. Fuente: Autores

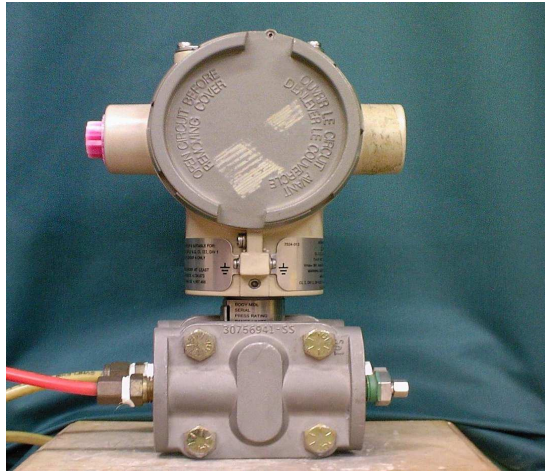


**Trabajo de Grado, 16 de 128**

En el proyecto se utilizó una platina de orificio de 14.19 mm de diámetro en acero inoxidable, montada sobre una brida con orificio de acero al carbón con 5% de níquel y de 2" x 300 libras.

*Medidores secundarios*, que son:

*Transmisor inteligente de presión diferencial* –Figura 4-, el cual mide la presión diferencial ( $h_w$ ) necesaria para el cálculo de caudal. Es un transmisor electrónico marca Honeywell<sup>10</sup> STD930, con un rango de presión ajustable entre 0 - 300 PSI.



**Figura 4. Transmisor inteligente de presión. Fuente: Autores**

Tiene dos entradas de sondas de presión (Naranja y amarillo), que toman las lecturas de presión a cada lado de la platina de orificio.

*Medidor de presión absoluta*: Se puede apreciar en la Figura 5. se tienen básicamente 2 manómetros colocados aguas arriba y aguas abajo, con el propósito de entregar una lectura de la presión absoluta presente en esos punto. Son analógicos y no presentan la opción de una señal eléctrica de salida para toma de datos digitales. Son de doble escala. ( $\text{Kg}/\text{cm}^2$  y PSI ), adicionalmente tiene un rango de 0- 150PSI (0 -  $10.4 \text{ Kg}/\text{cm}^2$  )

---

<sup>10</sup> Honeywell Process Solutions. ST3000 Smart pressure Transmitter: specification and model selection guide. Phoenix, Arizona: Honeywell International Inc., 2007.





Figura 5. Medidor de Presión Absoluta. Fuente: Autores.

*El sensor de temperatura:* Actualmente, este dispositivo no se encuentra instalado en la tubería, pero resulta necesario para poder cumplir con las especificaciones de las normas AGA<sup>11</sup> 3 de cálculo de flujo ya que este es proporcional a la temperatura.

*Controlador: switch de presión* –Figura 6–: Este se encarga de liberar la presión de la tubería en caso de llegar a niveles peligrosos para la integridad de la misma (Rango: 0-150 PSI)<sup>12</sup>, y actúa abriendo o cerrando una válvula solenoide (actuador Figura 7) de 3 vías —



Figura 6. Switch On/Off de presión. Fuente: Autores.

<sup>11</sup> Estas normas se tratarán en detalle en el capítulo 4.

<sup>12</sup> Honeywell Process Solutions. Pressuretrol Controllers: specification and model selection guide. Phoenix, Arizona: Honeywell International Inc., 2007.



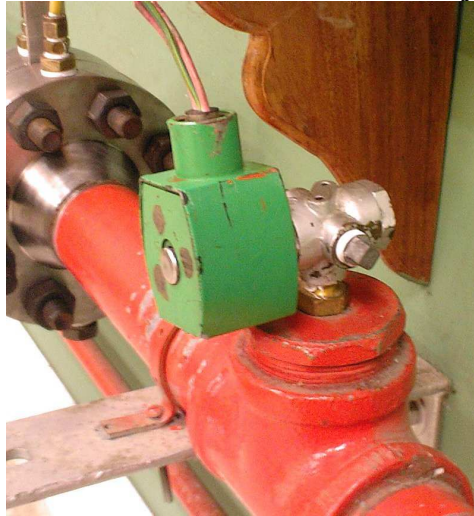


Figura 7. Válvula solenoide de tres vías. Fuente: Autores.

### 1.3.2 Sistema de medición de nivel

Esta comprendido por:

- *Transmisor inteligente de presión diferencial* : Es igual al empleado en el sistema de gas, de igual forma actúa como medidor de presión diferencial, pero en ese caso entre la presión de la base de la tubería y la presión atmosférica presente en el exterior del tanque -Figura 8-.



Figura 8. Medidor inteligente de presión diferencial. Fuente: Autores.





**Trabajo de Grado, 19 de 128**

- *Actuadores solenoides*: Se trata de 2 válvulas, una de entrada del líquido en la parte superior-Figura 9- y otra en la parte inferior -Figura 10-, para el desagüe del tanque, marca Uni-d, con alimentación a 110V tipo ON-OFF.



**Figura 9. Válvula de llenado. Fuente: Autores.**



**Figura 10. Válvula de desagüe. Fuente: Autores.**

#### 1.4 SOLUCIÓN PLANTEADA

Como punto de partida y teniendo en cuenta los conceptos anteriores, así como los recursos disponibles en el Laboratorio, se planteó la estructuración del mismo en 3 sistemas independientes, que se enlazan consecutivamente con sus señales de entrada y salida. Además, estos sistemas cumplen una secuencia que describe el ciclo completo de las señales, desde el fenómeno físico hasta su almacenamiento y disposición en línea, como lo muestra la Figura 11. Estos 3 sistemas son:

- Sistema de Instrumentación
- Sistema de Adquisición
- Sistema de Gestión





Figura 11. Secuencia de las señales. Fuente: Henry Antonio Mendiburu Díaz<sup>13</sup>

A continuación se describen brevemente los dos primeros sistemas, para luego en capítulos posteriores hacer un enfoque completo del sistema de gestión.

#### 1.4.1 Sistema de instrumentación

Este sistema está compuesto por todos los dispositivos relacionados directamente con el transporte de gases y la medición de nivel de líquidos, donde se incluyen los medidores primarios y secundarios mencionados anteriormente, así como los actuadores y elementos finales de control (válvulas eléctricas y mecánicas)

El objetivo de este sistema es el de implementar los medidores primarios en contacto directo con la variable física a medir, que en este caso son los transmisores inteligentes de presión diferencial (para la medición indirecta de flujo y nivel), y otros dispositivos que se tendrán que implementar en el futuro para la medición de la temperatura y la presión absoluta.

En el caso puntual de los transmisores inteligentes de presión diferencial, se tiene una salida de tensión de 1 - 5 Vdc<sup>14</sup>, que se encuentra compensada digitalmente para evitar las no linealidades de los transductores internos que se emplean en las lecturas de presión.

#### 1.4.2 Sistema de Adquisición

Este sistema tiene dos módulos claramente distinguidos: acondicionamiento y digitalización.

##### Acondicionamiento

<sup>13</sup> MENDIBURU D. Henry. Instrumentación virtual Industrial. Lima: INDECOPI-PERU., 2006.

<sup>14</sup> Honeywell Process Solutions. ST3000 Smart pressure Transmitter. Ibid.





---

**Trabajo de Grado, 21 de 128**

En este módulo se pretende mejorar las características eléctricas de las señales provenientes del sistema de instrumentación, de tal manera que se minimicen los efectos de ruido, impedancias, niveles de DC, caídas de voltaje, etc. que dificultarán la captura digital de las señales.

**Digitalización**

Para poder entregar los datos de las variables físicas al computador para su posterior procesamiento, se necesita hacer una codificación de la forma de la señal de entrada; esta codificación se conoce como “*conversión análoga-digital*” y consiste en discretizar los valores de la señal en determinados instantes de tiempo.

Para que los anteriores sistemas puedan ser parte de un prototipo SCADA, al mismo tiempo que se puedan convertir en una herramienta pedagógica más completa, es necesario integrar a ellos un sistema de gestión, con el fin de supervisar, visualizar, simular y comunicar los procesos existentes de una manera sistemática y ordenada, para una mejor comprensión y manejo de sus fenómenos físicos asociados. Concretamente, con la solución planteada se logra el cumplimiento de los objetivos propuestos al inicio de este trabajo, los cuales se enuncian a continuación:

- Desarrollar una primera versión de sistema de gestión para un prototipo de sistema de simulación, supervisión y visualización de eventos y alarmas a escala industrial para las variables presión, caudal y nivel, que satisfaga las necesidades del laboratorio de Instrumentación de la E3T y que a su vez sea compatible con el sistema de instrumentación existente y un sistema de adquisición de datos propuesto.
- Definir el modelo funcional<sup>15</sup>, que comprende la relación y la estrategia de comunicación entre los diferentes sistemas anteriormente planteados, teniendo como parámetros la facilidad para integrar nuevos componentes que hagan parte en un futuro del sistema de instrumentación, y sus correspondientes requerimientos en su integración con la estructura del laboratorio. Para esto se requiere:
  - Un modelo matemático adecuado que defina la secuencia de las señales correspondientes a las variables físicas de los dispositivos, desde el sistema de instrumentación hasta el sistema de gestión.
  - Una estrategia para el sistema de adquisición de datos, que permita garantizar una adecuada comunicación entre el sistema de instrumentación y el sistema de gestión.

---

<sup>15</sup> Entiéndase por *modelo funcional*, el esquema que describe la interacción y la comunicación entre cada módulo de software –simulación, control y visualización- que compone el sistema de Gestión, y la interacción de este con el equipo humano -operadores, estudiantes y usuarios en general-.





---

**Trabajo de Grado, 22 de 128**

- Un algoritmo de supervisión de la magnitud de las variables físicas involucradas, de tal forma que se mantengan en un rango de funcionamiento seguro, generando avisos o alarmas para la toma de decisiones, así como también la emisión de señales para los elementos de control o actuadores.
- La integración de los modelos matemáticos que proporcionan los dispositivos del sistema de instrumentación, con el algoritmo de supervisión desarrollado, en paquetes de software adecuados para ello.
- Supervisión y visualización virtual remota desde la red de la E3T, sobre el sistema de instrumentación.
- Una primera versión de la interfase de realidad virtual en 3D, que permita la visualización de forma remota y simulación del laboratorio de Instrumentación, en cuanto a la medición de caudal y nivel.

Las etapas a seguir para implementar el sistema de gestión se describen en el capítulo siguiente.



## 2. FASES DE DESARROLLO

Teniendo en cuenta la organización en 5 niveles del sistema SCADA propuesta en el capítulo 1, los recursos físicos del laboratorio de instrumentación de la E3T, y la solución implementada para lograr los objetivos propuestos, se proponen tres sistemas asociados a los anteriores niveles SCADA, que se muestran en la Tabla 1:

Niveles SCADA	Solución implementada
Instrumentación	Sistema de instrumentación
RTU	Sistema de adquisición
Comunicaciones	Sistema de Gestión
Control	
Integración y operaciones	

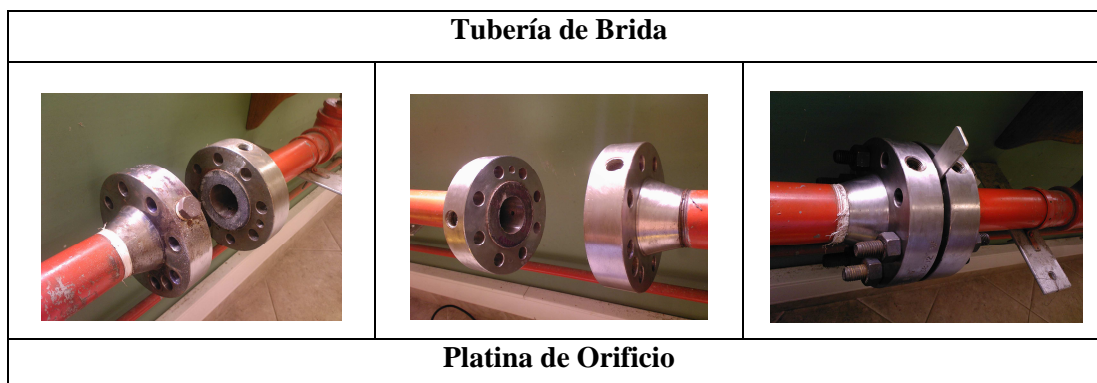
**Tabla 1. Asociación de los Niveles de SCADA con la estructura de sistemas propuesta.**  
Fuente: Autores.

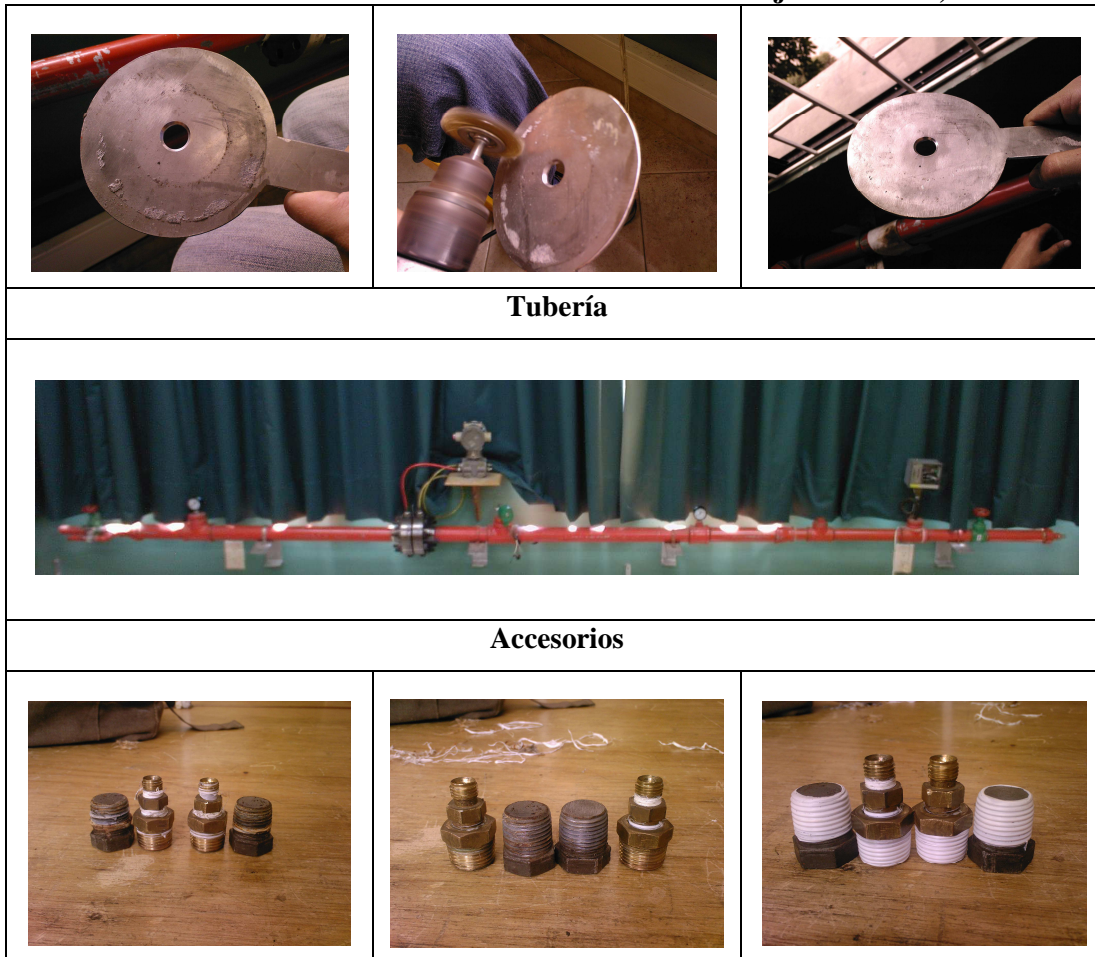
De la tabla anterior, se puede deducir que el sistema de gestión planteado puede definirse como un **conjunto o combinación de determinados niveles SCADA (Comunicaciones, control y software de integración y operación) que interactúan para servir de interfaz entre los procesos que se supervisan y el usuario final.**

Para el desarrollo de los sistemas anteriores se trabajaron las siguientes etapas:

### 2.1 PLANTEAMIENTO DE LOS SISTEMAS DE INSTRUMENTACIÓN Y ADQUISICIÓN

En esta etapa se reconoció el estado físico del laboratorio, e igualmente se realizó mantenimiento y adecuación sobre sus componentes, con base en la información técnica de su funcionamiento.





**Figura 12. Mantenimiento del sistema de Instrumentación**

Se plantearon las características de las pruebas necesarias para la toma de datos sobre los cuales se modeló matemáticamente el comportamiento físico del sistema de medición de nivel y de transmisión de gas.

Seguidamente, y con base en el modelo matemático y las características de las señales de salida de los transmisores, se propuso un modelo para el sistema de gestión.

Después de realizar una investigación sobre las características de los posibles paquetes de software para la implementación del sistema de gestión, y teniendo en cuenta las características físicas de las señales a manejar, se propuso la estrategia de comunicación entre los sistemas de instrumentación y adquisición.



## 2.2 DESARROLLO DEL SISTEMA DE GESTIÓN

Tendientes a sintetizar el diseño del sistema de gestión y a facilitar su comprensión, en esta etapa se dividió a éste en módulos funcionales de trabajo.

Posteriormente, se eligió el paquete de software, con base en varios criterios de comparación – físicos, normativos y de hardware -, desarrollando simultáneamente el diagrama de flujo general de los datos e integrando esto con los modelos matemáticos previamente calculados.

Se constituyó el modelo en realidad Virtual del laboratorio, que incluye los dispositivos de instrumentación presentes en él, así como la forma de manipulación de los recursos virtuales (Por ejemplo: ¿Cuál es la forma de accionar una válvula?).

Se definieron igualmente, las especificaciones de los requerimientos de software, que incluyen los procedimientos de acceso a las distintas funciones del sistema de gestión.

Una vez ejecutado lo anterior, se procedió a realizar la estrategia de comunicación entre los sistemas de adquisición y gestión, así como la comunicación remota.

## 2.3 PRUEBAS Y DISEÑO DEFINITIVO

En esta instancia, se construyó un modelo a escala de las salidas del sistema de gestión, hacia el sistema de adquisición para simular el comportamiento que se presentaría en los actuadores cuando los tres sistemas (instrumentación, adquisición y gestión) se encuentren completamente integrados.

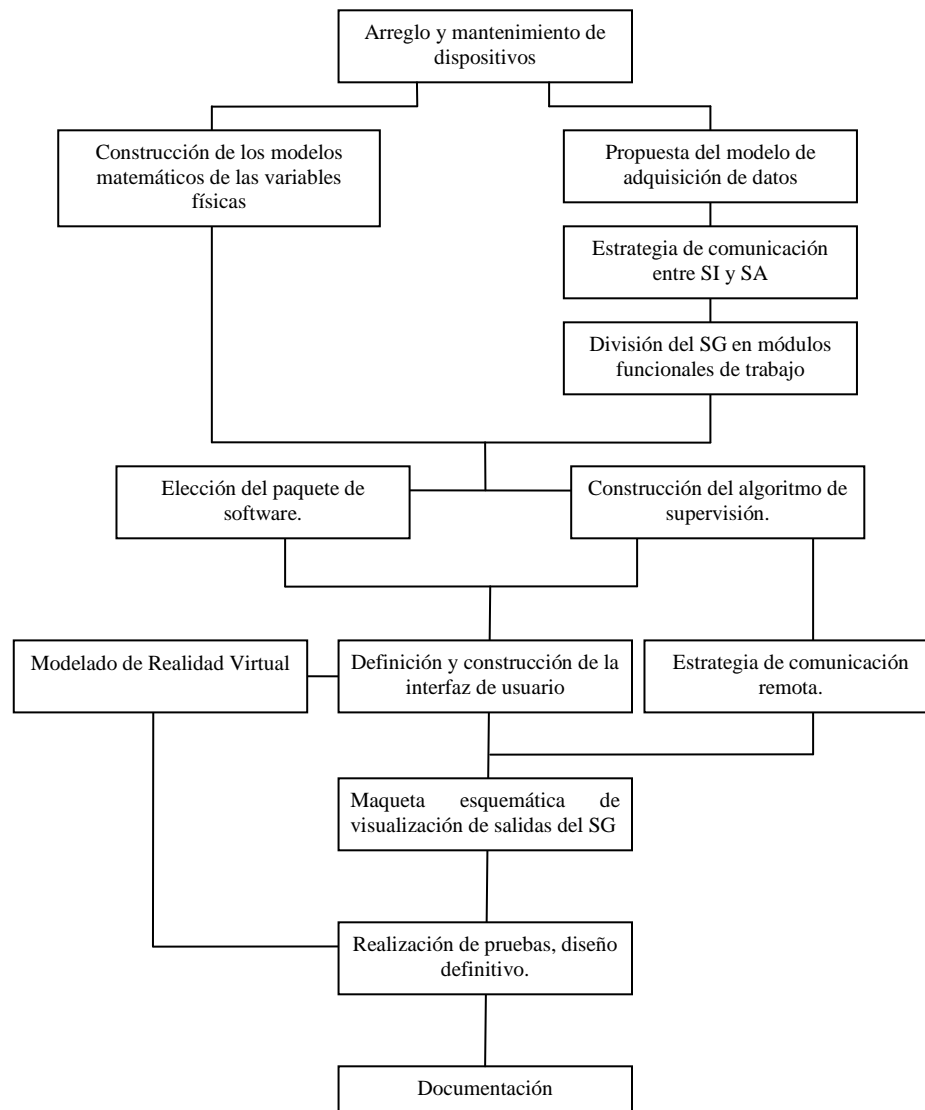
Se desarrollaron pruebas pertinentes para detectar errores en la conectividad entre los módulos del sistema de gestión inicialmente definidos.

Sintetizando lo anteriormente expuesto, se presenta en el Esquema 1 el siguiente diagrama de flujo de las actividades desarrolladas en el transcurso del trabajo.





Trabajo de Grado, 26 de 128



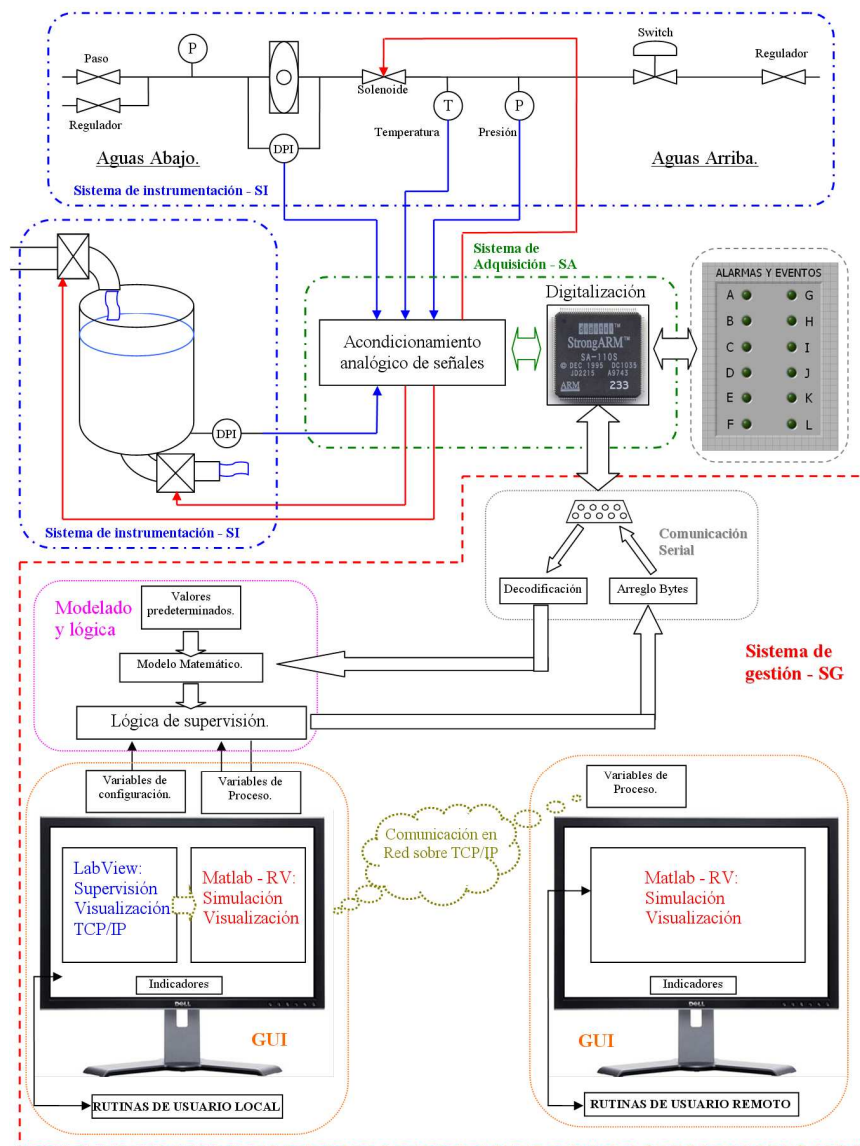
Esquema 1. Diagrama de flujo de las etapas de desarrollo del trabajo de grado. Fuente: Autores.





### 3. MODELO FUNCIONAL GENERAL DEL SISTEMA DE GESTION

Dado que el sistema de gestión diseñado tiene como fin ser el soporte para un prototipo de SCADA en el laboratorio de Instrumentación Electrónica de la E3T, a continuación se hace una breve descripción acerca del modelo funcional que lo contiene, el cual se muestra en el Esquema 2.



Esquema 2. Modelo funcional general de los sistemas integrados. Fuente: Autores.





### Trabajo de Grado, 28 de 128

Este esquema sintetiza, en pocas palabras, la integración de los sistemas de instrumentación, adquisición y gestión (SI – SA – SG). Es necesario en este momento comenzar a describir más detalladamente el sistema de gestión propiamente dicho, sobre el que se enfoca este trabajo.

Primeramente, se ha dividido este sistema en cuatro módulos estratégicos, con el fin de una simplificación del sistema y de la aplicación de la escalabilidad. Son los siguientes:

- Comunicación serial
- Modelado y lógica
- Comunicación TCP/IP
- Interfaz Gráfica – GUI

Cada uno de estos módulos puede considerarse autónomo (es decir, la modificación de un módulo no altera la estructura de los demás), pero al mismo tiempo se interrelacionan. Por ejemplo, si en lugar de establecer una comunicación serial se establece una comunicación USB, el resto de módulos (esto es, modelado, lógica, interfaz de usuario y comunicación TCP/IP) no tienen porqué cambiar su configuración. Las secciones siguientes estarán enfocadas a describir cada módulo más detalladamente.

### 3.1 COMUNICACIÓN SERIAL

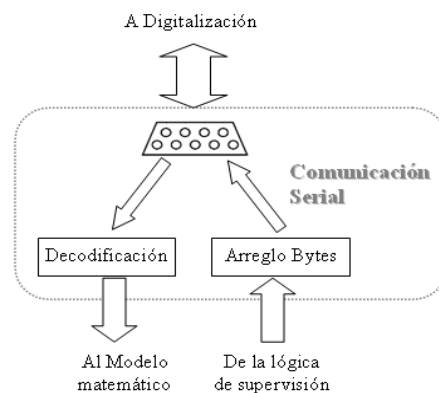


Figura 13. Módulo de Comunicación Serial. Fuente: Autores.

Esta estrategia de comunicación fue elegida por varias razones:





---

**Trabajo de Grado, 29 de 128**

- La gran mayoría de computadores disponen de una interfaz RS-232<sup>16</sup>, utilizada para la comunicación serial, lo que favorece su escalabilidad.
- Existe gran cantidad de documentación técnica sobre este tipo de comunicación, así como de los detalles de su implementación.
- La comunicación serial sobre RS-232 (que llega hasta 20Kbps<sup>17</sup>) satisface los requerimientos de la velocidad de la transferencia de datos.
- Gran facilidad de interacción con el paquete de software de supervisión.

### 3.1.1 Estructura de la comunicación

Esta comunicación se presenta entre el paquete de software de la lógica de supervisión y el dispositivo seleccionado para la adquisición.

Desde la lógica de supervisión hacia los elementos finales (panel de visualización y actuadores), se envían 2 bytes generados previamente a través del puerto (con interfase RS-232), que permiten visualizar las alarmas y el manejo de las válvulas. Los datagramas de dichos bytes se muestran en la Tabla 2.

Desde los medidores secundarios hacia la lógica de supervisión, a través de la interfase RS-232, la información necesita cierto procesamiento que se describe a continuación:

### 3.1.2 Conversión decimal:

El flujo de datos recibidos por el puerto serial es reconocido en un principio como una cadena de valores hexadecimales, por esto debe hacerse la conversión de estos últimos al formato decimal (entre 0 y 255).

### 3.1.3 Ponderación:

Es necesario el paso de los valores decimales anteriores, a valores de tensión correspondientes con los entregados por los medidores secundarios según el estándar de 1 Vdc (valor mínimo)- 5 Vdc (valor máximo).

Dada la complejidad en la programación del paquete software de generación de la realidad virtual para poder recibir los datos entregados por el puerto serial, y teniendo en cuenta que estos deben estar al alcance tanto de la lógica de supervisión como de la

---

<sup>16</sup> Es posible la implementación de la comunicación USB a partir de la comunicación serial, por medio de un adaptador de fácil adquisición comercial.

<sup>17</sup> WIKIMEDIA FOUNDATION INC. En: Interfaz RS-232 [en línea]. Página Web, versión HTML. Disponible en Internet: <<http://es.wikipedia.org/wiki/RS-232>>





**Trabajo de Grado, 30 de 128**

herramienta de realidad virtual, se decidió que solamente el paquete de software de supervisión tuviera acceso directo al puerto serial, de tal forma que la herramienta de realidad virtual recibiera los datos usando TCP/IP, lo que resuelve a su vez la visualización en la intranet de la universidad o desde el exterior a esta.

BYTE1 (8bits)								BYTE2 (8bits)							
B7	B6	B5	B4	B3	B2	B1	B0	B7	B6	B5	B4	B3	B2	B1	B0
Bit0 (sol): Estado de la válvula solenoide (abierta = 1, cerrada = 0).								Bit0 (spnp): ¿Set Point permitido? (No = 1, Si = 0).							
Bit1 (Llenar): Estado de la válvula de llenado (Abierta = 1, Cerrada = 0)								Bit1 (nnp): ¿Nivel permitido? (No = 1, Si = 0).							
Bit2 (Vaciar): Estado de la válvula de desagüe (Abierta = 1, Cerrada = 0)								Bit2 (MRN): Opción de mando remoto de las válvulas de nivel (local = 1, remoto = 0)							
Bit3 (PA1): Sobrepasso de la presión absoluta.								Bit3 (listo): ¿El nivel llegó al Set Point esperado? (Si = 1, No = 0).							
Bit4: No se implementa.								Bit0 (mani): Manejo de Nivel (automático = 1, manual = 0).							
Bit5: No se implementa.								Bit1 (MRS): Opción de mando de la válvula solenoide (local = 0, remoto = 1).							
Bit6: No se implementa.								Bit3 (maq): Manejo del flujo (automático = 1, manual = 0).							
Bit7: No se implementa.								Bit7 (CONTROL) :¿Sistema encendido? (Si = 0, No = 1)							

**Tabla 2. Datagramas de la comunicación serial. Fuente: Autores.**

### 3.2 Módulo de Modelado Matemático y Lógica de Supervisión

En este apartado se describen las generalidades sobre el modelado matemático y la lógica de supervisión, todo esto integrado en un módulo específico, mostrado en la Figura 14. Principalmente se compone de 3 partes:



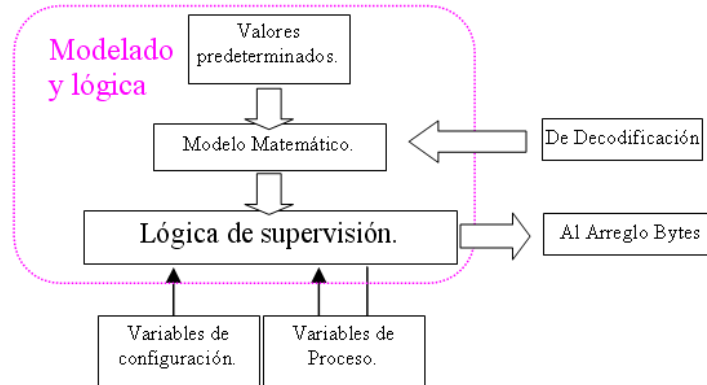


Figura 14. Módulo de modelado y lógica. Fuente: Autores.

### 3.2.1 *Valores predeterminados:*

Son las constantes que se emplean en el modelado matemático de los procesos físicos, relacionadas con ciertas condiciones físicas del fluido sujeto a medición, la geometría de los dispositivos de conducción, etc. Estos valores inciden sustancialmente en el modelo matemático. Téngase en cuenta que, para una eventual modificación de los mismos, se debe editar el archivo, es decir, no se pueden cambiar en el entorno gráfico de usuario.

### 3.2.2 *Modelado matemático*

El modelado matemático se compone de dos factores:

- La relación entre la variable física que registran los medidores secundarios a medir (presión y temperatura) y la señal de tensión que proviene de los mismos.
- La relación entre las variables presión y temperatura con las variables de proceso que se quieren supervisar (flujo y nivel). La Figura 15 sintetiza lo anteriormente expresado.



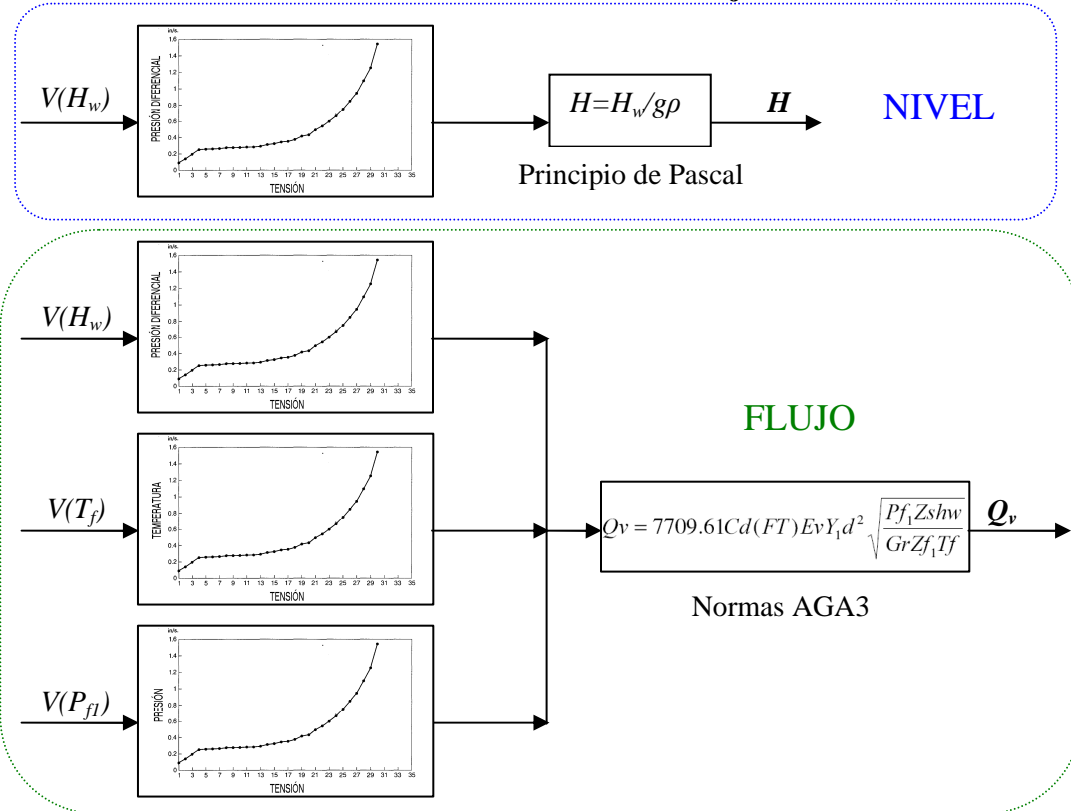


Figura 15. Estructura de los modelos matemáticos. Fuente: Autores.

### 3.2.3 Lógica de supervisión

La lógica de supervisión tiene como objetivo mantener ciertas variables de proceso dentro de límites establecidos, generando y permitiendo la visualización de eventos específicos para corregir anomalías en su valor. Las variables que interactúan en la supervisión son las siguientes:

Set Point: Determina el valor deseado de nivel de líquido (cm).

NI: Valor actual de nivel (cm).

IL: Valor mínimo permitido de nivel (cm).

SL: Valor máximo permitido de nivel (cm).

Pr: Tolerancia permitida al alcanzar el valor de nivel deseado (cm).

PF1: Valor actual de la presión absoluta (PSIA).

PH: Valor máximo que puede tomar la presión absoluta (PSIA).





En el caso del nivel de líquido, es sobre esta misma variable directamente donde se realiza la supervisión, a diferencia del flujo de gas, en la que se hace supervisión sobre la presión absoluta.

Paralelo a esta supervisión de proceso, la programación permite igualmente el mando automático o manual de los procesos, así como el manejo de actuadores por parte de un operador remoto<sup>18</sup>.

### 3.3 Comunicación TCP/IP

En este módulo, representado en la Figura 16, se presenta la configuración y la lógica del protocolo TCP/IP, necesarias para el establecimiento de la comunicación del paquete de software de supervisión, con la herramienta de Realidad virtual, tanto internamente en la estación central, como de manera remota a cualquier parte del mundo.

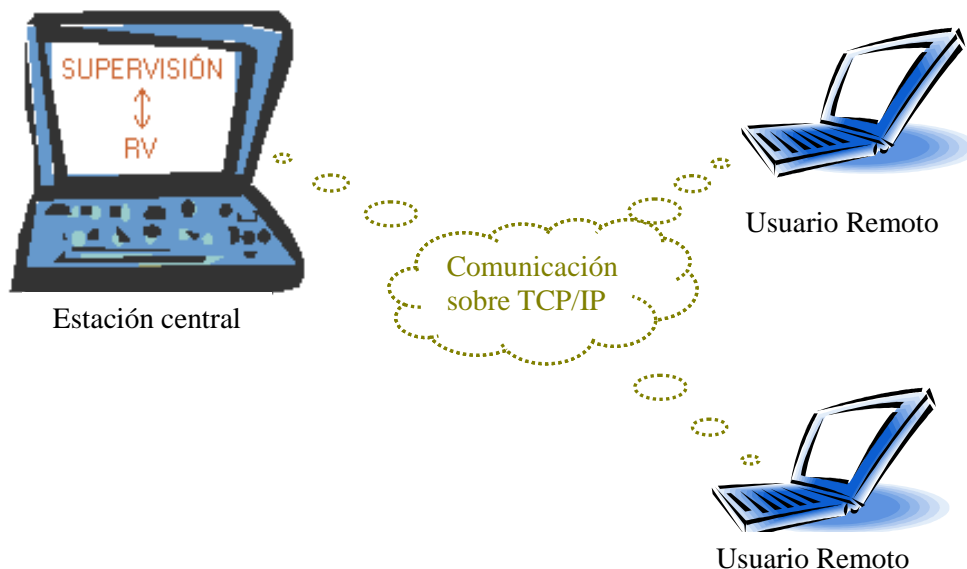


Figura 16. Esquema general de comunicación TCP/IP. Fuente: Autores.

<sup>18</sup> Esto se explicará con más detalle en el capítulo 6.





### 3.4 Interfaz Gráfica de Usuario (GUI)

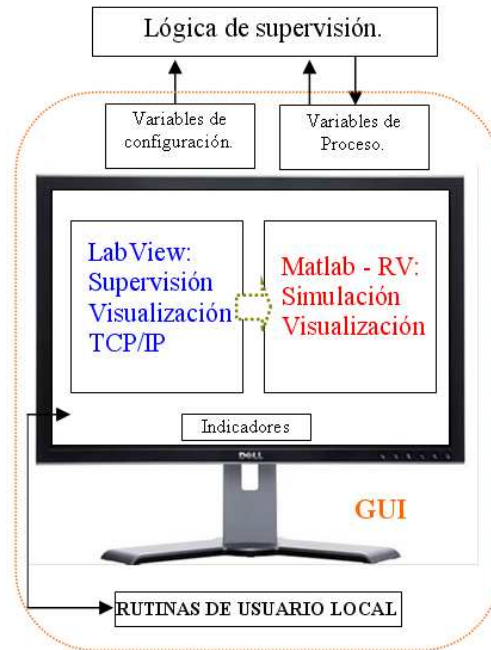


Figura 17. Módulo GUI. Fuente: Autores

Comprende todo el manejo gráfico de las variables de entrada y de salida del proceso, así como la interacción sistema – operador para la elección de rutinas de usuario - Figura 17-.

Básicamente, existen dos interfaces: una de inicio, que corresponde a la del paquete de software de supervisión, y una segunda interfaz, asociada a la visualización y simulación de los procesos sobre realidad virtual.

Dentro de este módulo, se manejan dos aspectos: las constantes de configuración y las variables de proceso<sup>19</sup>, descritas a continuación.

#### 3.4.1 Constantes de configuración

Hace referencia a las variables sobre las cuales se hace el cálculo del flujo y nivel del liquido, con ellas se determinan las características de los sistemas presentes en el laboratorio. En caso de presentarse una eventual modificación en el tanque o tubería, estas constantes se modificarían para adecuarse a las nuevas características del sistema.

<sup>19</sup> La explicación de estos dos aspectos se desarrollará con más detalle en el capítulo 6.





#### 3.4.2 *Variables de proceso*

Hacen referencia a los valores numéricos sobre los cuales el usuario tiene mando directo y que básicamente no modifican las características del sistema, sino su comportamiento dinámico.

#### 3.4.3 *Pantalla*

Es el dispositivo de salida en el cual el usuario interactúa con los programas y se visualiza todo lo que acontece en el módulo por medio de valores numéricos, indicadores, mímicos y gráficas.

#### 3.4.4 *Rutinas de usuario*

Son las acciones que puede desarrollar el usuario para interactuar con el software de supervisión, como encendido y apagado de válvulas, cambio de dirección IP, etc.

#### 3.4.5 *Indicadores*

Son todos los recursos sobre los cuales el usuario recibe la información del sistema. Los hay de tipo numérico, gráfico y luminoso.

### 3.5 Escalabilidad del sistema de gestión

La escalabilidad puede definirse como *la propiedad deseable de un sistema, una red o un proceso, que indica su habilidad para, o bien manejar el crecimiento continuo de trabajo de manera fluida, o bien para estar preparado para hacerse más grande sin perder calidad en los servicios ofrecidos*<sup>20</sup>. En general, también se podría definir como *la capacidad del sistema informático de cambiar su tamaño o configuración para adaptarse a las circunstancias cambiantes*<sup>21</sup>.

Para medir la escalabilidad de un sistema en particular, *es necesario definir los requerimientos específicos en las dimensiones donde se crea que son importantes*<sup>22</sup>.

A continuación se mencionan los aspectos por los que este sistema puede considerarse en gran medida escalable.

---

<sup>20</sup> WIKIMEDIA FOUNDATION INC. En: Escalabilidad [en línea]. Página Web, versión HTML. Disponible en Internet: <<http://es.wikipedia.org/wiki/Escalabilidad>>

<sup>21</sup> WIKIMEDIA FOUNDATION INC. *Ibid.*

<sup>22</sup> WIKIMEDIA FOUNDATION INC. *Ibid.*



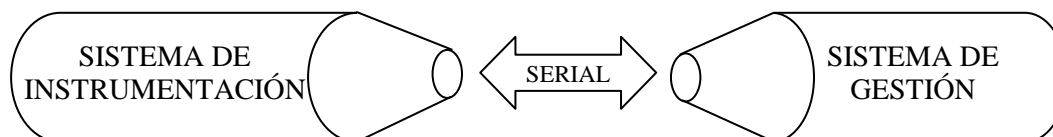


### 3.5.1 Estructura modular

En la estructuración del sistema de gestión se empleó una estrategia de programación modular, continuando con las ideas planteadas en las secciones anteriores de este capítulo. Es así como esto se puede ver plasmado en los distintos módulos que conforman el sistema de gestión, los cuales tienen esta misma estrategia de programación.

### 3.5.2 Comunicación Serial (Sistema de Adquisición – Sistema de Gestión)

El protocolo de comunicación serial permite la escalabilidad del sistema, al manejar las mismas vías de entrada y de salida para todos los dispositivos que intervienen en la supervisión. Dado que el número de canales necesarios para la comunicación se mantiene constante, se puede aumentar el número de variables físicas medidas al incrementar la velocidad de transmisión de los datos<sup>23</sup> -Esquema 3-.



**Esquema 3. Escalabilidad de la comunicación serial. Fuente: Autores.**

Puede llegar a ser necesaria la codificación de las señales tanto de salida como las de entrada para mejorar la eficiencia en la comunicación, minimizando los requerimientos del sistema de gestión en cuanto a capacidad de procesamiento y memoria.

Teniendo en cuenta que el protocolo de comunicación serial permite la transferencia de datos de hasta 20kb<sup>24</sup>, es posible concluir que el ancho de banda de la comunicación está siendo sub-utilizado y condicionado por la capacidad de manejo de datos del software de supervisión y de la herramienta de realidad virtual.

### 3.5.3 Acceso a los datos

Son muchas las aplicaciones que pueden acceder a la información que se transfiere en la lógica de supervisión, gracias al protocolo de comunicación utilizado; de esta manera, todas estas aplicaciones pueden eventualmente enviar y recibir datos vía

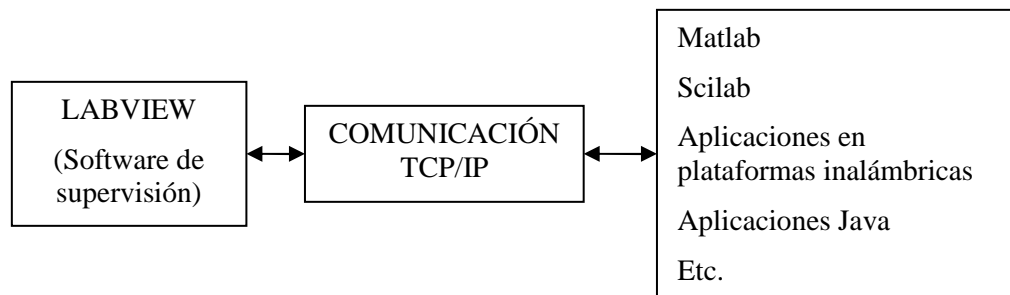
<sup>23</sup> Acerca del número y el tipo de señales que puede hacer parte del sistema, esto tiene su limitación, la cuál se detalla en las observaciones del capítulo 10.

<sup>24</sup> WIKIMEDIA FOUNDATION INC. En: Interfaz RS-232 [en línea]. Página Web, versión HTML. Disponible en Internet: <<http://es.wikipedia.org/wiki/RS-232>>





TCP/IP e interactuar con el módulo de modelado y lógica de supervisión, en el manejo de las variables involucradas. Esto se ilustra en el Esquema 4.



Esquema 4. Escalabilidad por acceso a los datos. Fuente: Autores.

#### 3.5.4 Programación de realidad virtual

De igual forma, el tipo de programación en realidad virtual (VRML) que se emplea usa el concepto de nodos como unidad básica, que pueden incluirse separadamente para generar sistemas más complejos a medida que aumentan las necesidades o los recursos informáticos.





## 4. MODELADO MATEMÁTICO

En este capítulo se detalla la forma como se definieron los distintos modelos matemáticos que intervienen en el sistema de gestión y la forma en que se calcularon, teniendo en cuenta el caso particular de cada proceso.

### 4.1 MODELO DE LA TUBERÍA DE TRANSMISIÓN DE GASES

#### 4.1.1 Características básicas de los medidores de platina de orificio<sup>25</sup>

En este apartado, por medio de las normas AGA3 de medición de gas, se procede a describir el cálculo de flujo volumétrico en una tubería de brida, en función de la presión absoluta, la presión diferencial y la temperatura de flujo como magnitudes físicas fundamentales.

La ecuación de caudal o flujo volumétrico para gas en condiciones estándar ( $Q_v$ ), desarrollada a partir de la densidad relativa real del gas, requiere tanto condiciones estándar como condiciones básicas, donde se asume que la presión estándar es 14,73 libras fuerza por pulgada absoluta y la temperatura es 519.67°R (Rankine, lo equivalente a 60°F) en su constante numérica. Por lo tanto, la tasa de flujo volumétrica en condiciones estándar, desarrollada a partir de la densidad relativa real del gas, es la siguiente:

$$Q_v = 7709.61Cd(FT)E_v Y_1 d^2 \sqrt{\frac{P_{f1} Z_s h_w}{G_r Z_{f1} T_f}} \quad (1)$$

Donde:

$Cd(FT)$ : Coeficiente de descarga para medidor de orificio con tomas en brida.

$D$ : Diámetro del orificio de la platina, calculado a la temperatura de flujo, en pulgadas.

$E_v$ : Factor de velocidad de aproximación.

$G_r$ : Densidad relativa real del gas<sup>26</sup>.

$H_w$ : Presión diferencial del orificio, en pulgadas de agua, a 60°F (Fahrenheit<sup>27</sup>).

<sup>25</sup> ECOPETROL, Vicepresidencia de Suministro y Mercadeo. Manual Único de Medición, cap. 14: Medición de gas natural. Bogotá, 2006.

<sup>26</sup> Gr es la densidad medida de un cuerpo con respecto a la densidad del agua. Es adimensional.





$T_f$ : Temperatura de flujo, en °R (Rankine)<sup>28</sup>.

$Y_f$ : Factor de expansión (en la toma aguas arriba).

$Z_f$ : Compresibilidad en condiciones de flujo corriente arriba ( $P_{ff}$ ).

$Z_s$ : Compresibilidad a 14.73 psia y 60°F

En la expresión (1), se supone que las condiciones estándar y las condiciones base son las mismas. Sin embargo, si esas condiciones son diferentes, la tasa volumétrica de flujo calculada en condiciones estándar se debe convertir a la tasa volumétrica en condiciones base, por medio de la relación:

$$Q_b = Q_v \left( \frac{P_s}{P_b} \right) \left( \frac{T_b}{T_s} \right) \left( \frac{Z_b}{Z_s} \right) \quad (2)$$

$P_b$ : Presión base en libras fuerza por pulgada cuadrada absoluta. En este caso puede ser 14.65 o para otras presiones base 15.025

$P_s$ : Presión estándar en libras fuerza por pulgada cuadrada absoluta.

$Q_b$ : Tasa de flujo volumétrica base, en ft<sup>3</sup>/h.

$Q_v$ : Tasa de flujo volumétrica estándar, en ft<sup>3</sup>/h.

$T_b$ : Temperatura base, en °R. Puede ser 519.67° R

$T_s$ : Temperatura estándar, en °R.

$Z_b$ : Compresibilidad en condiciones base

$Z_s$ : Compresibilidad en condiciones estándar.

### Coefficiente de descarga para un medidor de orificio con tomas en brida, $C_d(FT)$

Este coeficiente de descarga para un medidor de orificio concéntrico, de tomas en brida y borde cuadrado, cuya ecuación fue desarrollada por Reader-Harris y Gallagher, se determinó a partir de pruebas de laboratorio. Esta ecuación se aplica a diámetros

<sup>27</sup> La escala Fahrenheit es la más corrientemente usada y se diseñó en 1714 cuando se pensaba que el cero era la temperatura más baja que se podía producir en un laboratorio. El punto de fusión de hielo se ha marcado en 32 F y el punto de ebullición del agua en 212 F. SAYAGO, Sandra Milena. Planeación e Implementación del Laboratorio de Instrumentación Electrónica de la E3T: Trabajo de grado. UIS. Bucaramanga, 2001.

<sup>28</sup> La escala Rankine es la escala Fahrenheit absoluta donde el punto de congelamiento es de 491.7 R y el punto de ebullición 671.7 R. El cero absoluto equivale a 0 R. SAYAGO, Sandra Milena. Ibid.





**Trabajo de Grado**, 40 de 128

nominales de 2 ó más pulgadas; relaciones de diámetro ( $\beta$ ) de 0.1 a 0.75 (partiendo del principio de que el diámetro del orificio  $d_r$  es mayor de 0.45 pulgadas); y un número de Reynolds ( $R_{ed}$ ) para la tubería mayor o igual a 4000.

En primer lugar, se definieron los coeficientes  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $M_1$  Y  $M_2$  de la siguiente forma:

$$A = \left( \frac{19000\beta}{R_{ed}} \right)^{0.8} \quad (3)$$

$$B = \frac{\beta^4}{1 - \beta^4} \quad (4)$$

$$C = \left( \frac{10^6}{R_{ed}} \right)^{0.35} \quad (5)$$

$$M_1 = \max \left( 2.8 - \frac{D}{N_4}, 0.0 \right) \quad (6)$$

$$M_2 = \frac{2L_2}{1 - \beta} \quad (7)$$

Donde:

$d$ : Diámetro del orificio, calculado a la temperatura de flujo  $T_f$ , en pulgadas.

$D$ : Diámetro interno del tubo medidor, calculado a  $T_f$ , en pulgadas.

$E$ : Constante neperiana = 2.71828.

$L_1=L_2$ : Corrección adimensional para la localización de la toma ( $N_4/D$ , tomas en brida.)

$N_4 = 1.0$ , cuando  $D$  está en pulgadas.

$\beta = d/D$ : Relación de diámetros.

$R_{ed}$ : Número de Reynolds.

El *número de Reynolds* se usa como un parámetro de correlación para representar el cambio en el coeficiente de descarga de la platina de orificio, con referencia al diámetro del tubo medidor, la velocidad de flujo, la densidad y la viscosidad del fluido.

La ecuación para el número de Reynolds es la siguiente:





$$R_{ed} = 0.0114541 \left( \frac{Q_b P_b G_r}{\mu D T_b Z_{bair}} \right) \quad (8)$$

$Z_{bair}$ : Compresibilidad del aire a 14.73 libras por pulgada cuadrada absoluta y 60°F. Adimensional

$Z_{bgas}$ : Compresibilidad del gas en condiciones base ( $P_b$  Y  $T_b$ ). Adimensional.

En la práctica se usan los siguientes valores promedio<sup>29</sup>:

$$\mu = 0.0000069 \left[ \frac{lb}{ft - s} \right] \text{ (libras por pie - segundo)}$$

$$T_b = 515.67^\circ R$$

$$P_b = 14.73 \left[ \frac{lb - f}{in^2} \right] \text{ (libra fuerza por pulgada cuadrada)}$$

$$Z_{bair} = 0.999590$$

Cuando la tasa de flujo no se conoce, el número de Reynolds se puede desarrollar por medio de iteraciones, suponiendo un valor inicial de 0.60 para el coeficiente de descarga para un orificio con tomas en brida,  $Cd(FT)$ , y usando el volumen computado para estimar el número de Reynolds.

Asimismo, se definen las siguientes variables, en su orden:

$$Upstrm = (0.0433 + 0.0712e^{-8.5L_1} - 0.1145e^{-6.0L_1})(1 - 0.23A) B \quad (9)$$

$$Dnstrm = -0.0116(M_2 - 0.52M_2^{1.3})\beta^{1.1}(1 - 0.14A) \quad (10)$$

$$TapTerm = Upstrm + Dnstrm \quad (11)$$

$$Ci(CT) = 0.5961 + 0.029\beta^2 + 0.003(1 - \beta)M_1 \quad (12)$$

<sup>29</sup> Si el fluido que se está midiendo tiene una viscosidad, una temperatura o una gravedad específica real muy alejada de las que se muestran arriba, las suposiciones que se hicieron no son aplicables. El rango de aplicación de la ecuación está entre 0.0000059 y 0.0000079 libra masa por pie-segundo para la viscosidad, 30°F a 90°F para la temperatura y 0.55 a 0.75 para la gravedad específica real.





$$C_i(FT) = C_i(CT) + TapTerm \quad (13)$$

De esta manera

$$C_d(FT) = C_i(FT) + 0.000511 \left( \frac{10^6 \beta}{R_{ed}} \right)^{0.7} + (0.0210 + 0.0049A) \beta^4 C \quad (14)$$

#### Factor de velocidad de aproximación ( $E_v$ )

El factor de velocidad de aproximación es una expresión matemática que relaciona la velocidad del fluido en la sección próxima al medidor de orificio (aguas arriba) a la velocidad del fluido en el orificio. Este factor se calcula con la siguiente ecuación:

$$E_v = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^4}} \quad (15)$$

Donde  $\beta$  es la relación de diámetros del tubo y la llaves de reborde

#### Factor de expansión ( $Y_1$ )

Factor de proceso termodinámico que relaciona la densidad del fluido aguas arriba y aguas abajo; se define por la siguiente expresión:

$$Y_1 = 1 - (0.41 + 0.35B^4) \frac{x_1}{k} \quad (16)$$

Cuando la presión estática se mide aguas arriba

$$x_1 = \frac{h_w}{(27.707 P_{f1})} \quad (17)$$

En la práctica se acepta usar un valor de  $k=1.3$

De esta manera quedan definidas todas las variables necesarias para el cálculo del caudal volumétrico de acuerdo con la expresión (1).

#### 4.1.2 Toma de datos

Para esto se implementa la conexión eléctrica que se muestra en la grafica a continuación, donde se toman datos del voltímetro que esta en paralelo con la resistencia de  $250 \Omega$ .



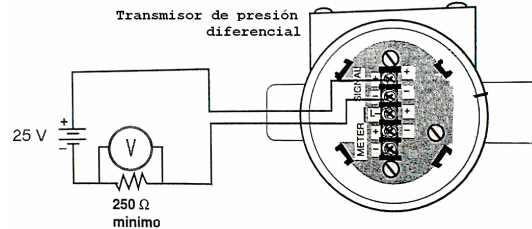


Figura 18. Conexión eléctrica del transmisor diferencial. Fuente: Autores.

#### 4.1.3 Análisis y definición del modelo

##### Presión Diferencial

De esta manera, para calcular el modelo presión diferencial – tensión eléctrica, se realizó el siguiente procedimiento<sup>30</sup>:

- Para la caracterización, se utilizó el transmisor de presión diferencial utilizado para obtener el modelo *nivel del líquido – tensión eléctrica* en el tanque de agua, puesto que el transmisor que estaba en la tubería no estaba correctamente calibrado, en el sentido de que su spam o rango de medida es demasiado grande para la presión diferencial que se registra en la platina<sup>31</sup>.
- Se activó el compresor, asegurándose de que todas las llaves de la tubería estén cerradas, de tal forma que la presión absoluta aguas arriba llegue a 80 PSI.
- Sin dejar caer este nivel de presión, se procede a abrir muy lentamente la llave de salida de gas (ubicada en el extremo izquierdo). En este punto, el caudal es aproximadamente 5 ft<sup>3</sup>/min (300 ft<sup>3</sup>/h), y el transmisor diferencial de presión marca 1.65 Vdc. Ahora bien, de acuerdo con la caracterización del nivel de líquido en el tanque, este es el valor de tensión correspondiente a 11.6cm de agua, es decir, a 0.165 PSI
- Teniendo en cuenta lo anterior, así como la linealidad del transmisor diferencial de presión, se definió una expresión que describe este comportamiento, teniendo en cuenta que la salida de tensión eléctrica debe estar entre 1 -5Vdc:

$$H_w = 0.33v - 0.33 \quad (18)$$

<sup>30</sup> Las sugerencias para la caracterización de la tubería, así como el caudal aproximado de 5 ft<sup>3</sup>/min a una presión absoluta de 80 PSI, son datos tomados de: SAYAGO, Sandra Milena. *Ibíd*

<sup>31</sup> Se comprobó que el rango de presión diferencial del aire en la tubería no abarca más de un 12.5% del rango sobre el que se encuentra calibrado actualmente el medidor.





Donde  $H_w$  está en PSI y  $v$  en Volts

### Presión absoluta y temperatura

Puesto que aún no se han implementado en el laboratorio transmisores de presión absoluta y de temperatura, se proponen los siguientes modelos para estas variables en función de la tensión de salida de sus respectivos medidores secundarios, teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- Los transmisores deben tener un comportamiento lo más lineal posible.
- El valor de la presión absoluta puede oscilar entre 0-150 PSI.
- El valor de la temperatura puede oscilar entre 50-90 F (10°C – 32°C)

Con base en esto, los modelos que se proponen para la presión absoluta y la temperatura en función de la tensión eléctrica de los medidores son:

$$P_{f1} = 37.5v - 37.5 \quad (19)$$

$$T_f = 10v + 40 \quad (20)$$

Donde  $P_{f1}$  está en PSIA,  $T_f$  en F y  $v$  en Volts.

## 4.2 MODELO DE TANQUE DE NIVEL DE LIQUIDO.

### 4.2.1 Modelo matemático Presión – Nivel

El nivel de líquido ( $h$ ) [m] en el tanque se mide proporcionalmente a la presión diferencial del líquido ( $P$ ) [N/m<sup>2</sup>], su densidad ( $\rho$ ) [Kg/m<sup>3</sup>] y la aceleración de la gravedad ( $g$ ) [m/s<sup>2</sup>], de la siguiente forma<sup>32</sup>:

$$h = \frac{P}{\rho g} \quad (21)$$

### 4.2.2 Toma de datos.

Para la lógica de supervisión del nivel de liquido, es necesario definir la curva nivel vs. Tensión eléctrica, que relaciona la señal eléctrica entre 1 – 5V del transmisor diferencial con un nivel de liquido en centímetros.

---

<sup>32</sup> La fórmula (21) proviene de la expresión básica  $P = \rho gh$ . SERWAY, Raymond. Física, volumen 1. Nueva York: McGrawHill, 2003.





**Trabajo de Grado, 45 de 128**

Teniendo en cuenta las dimensiones del tanque y que el transmisor diferencial se encuentra calibrado para registrar su salida máxima de 5V a un nivel de 85 cm, se realizó la toma de datos en los sentidos de llenado y vaciado, tomándose un paso constante de 2.5cm.

Estos datos se relacionan a continuación en la Tabla 3:

Llenado		Vaciado	
Nivel (cm)	Voltaje (V)	Nivel (cm)	Voltaje (V)
5,0	1,20	5,0	1,2
7,5	1,26	7,5	1,26
10,0	1,40	10,0	1,41
12,5	1,50	12,5	1,58
15,0	1,63	15,0	1,78
17,5	1,79	17,5	1,8
20,0	1,84	20,0	1,93
22,5	2,00	22,5	2,01
25,0	2,11	25,0	2,17
27,5	2,23	27,5	2,3
30,0	2,39	30,0	2,4
32,5	2,47	32,5	2,55
35,0	2,60	35,0	2,6
37,5	2,69	37,5	2,74
40,0	2,80	40,0	2,81
42,5	2,91	42,5	2,95
45,0	3,00	45,0	3,01
47,5	3,09	47,5	3,18
50,0	3,22	50,0	3,29
52,5	3,39	52,5	3,4
55,0	3,43	55,0	3,54
57,5	3,59	57,5	3,6
60,0	3,64	60,0	3,76
62,5	3,80	62,5	3,85
65,0	3,96	65,0	4
67,5	4,01	67,5	4,08
70,0	4,17	70,0	4,2
72,5	4,21	72,5	4,27
75,0	4,39	75,0	4,42
77,5	4,55	77,5	4,57
80,0	4,61	80,0	4,65
82,5	4,71	82,5	4,79
85,0	4,81	85,0	4,85





87,5	4,97	87,5	5,01
90,0	5,07	90,0	5,17
92,5	5,17	92,5	5,17
95,0	5,17	95,0	5,17

Tabla 3. Datos de Carga y descarga del tanque  $H-v$ . Fuente: Autores

Nótese que a un nivel de 90 cm. el transmisor diferencial ya se encuentra fuera del rango de tensión eléctrica de salida.

#### 4.2.3 Análisis de datos y modelo final.

A los datos de la Tabla 3 se les aplicó regresión lineal (Figura 19), cuyos resultados se muestran en la Tabla 4:

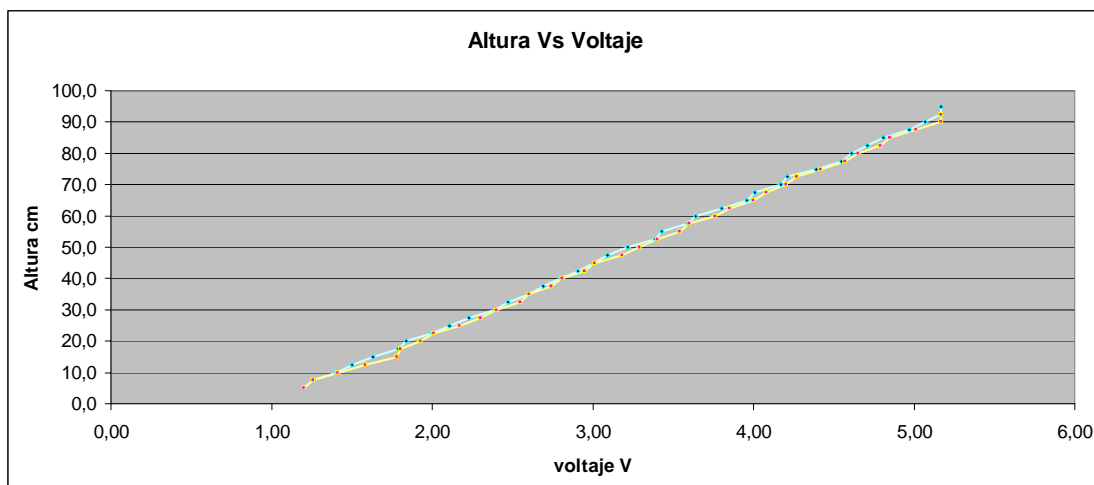


Figura 19. Regresión lineal curva  $H-v$ . Fuente: Autores

Parámetro	Aumento de nivel	Descenso de nivel
Pendiente (m)	22,02513375	21,87575684
Corte con el eje x (b)	-21,30190597	-21,92084778
Coefficiente de correlación R	0,999591357	0,999566739

Tabla 4. Análisis de los datos  $H-v$ . Fuente: Autores

Con base en lo anterior, se toman los resultados obtenidos en el llenado del tanque (columna verde), ya que presentan un mejor coeficiente de correlación.

Con base en esto, la curva Nivel – Tensión es:

$$h = 22,025 * v - 21.301 \quad (22)$$

Donde  $h$  esta en cm y  $v$  en Volts.





#### 4.3 MODELOS UTILIZADOS PARA SIMULACIÓN EN REALIDAD VIRTUAL

Para la implementación de la herramienta de simulación que se desarrolló en Realidad Virtual, deben definirse 2 modelos en función del tiempo: uno para el aumento del nivel y otro para su disminución.

##### 4.3.1 Modelo matemático Nivel – tiempo de descarga

Existe el modelo de descarga de un depósito con líquido<sup>33</sup>, que fue desarrollado a partir de la aplicación del teorema de dinámica de fluidos de Torricelli y de la ecuación de Bernoulli, el cual describe la dependencia entre el nivel de líquido en el depósito y el tiempo, así:

$$2\sqrt{H} - 2\sqrt{h} = S_2 \sqrt{\frac{2g}{S_1^2 - S_2^2}} t \quad (23)$$

Donde

$H$ : Nivel inicial el depósito (m)

$h$ : Nivel para el tiempo  $t$  (m)

$S_1$ : Radio del depósito (m)

$S_2$ : Radio del orificio en la base (m)

Si tomamos como la salida en la base y no en el lado y consideramos que  $S_1 \gg S_2$ , tenemos que la relación de nivel vs. tiempo es de orden cuadrático.

##### Toma de datos

Para realizar esta toma, en primer lugar se ubicó el nivel de líquido en el tanque en 95 cm. A continuación, se accionó la válvula de desagüe y se procedió a tomar un video registrando el cambio en el nivel, a partir de la superficie del líquido. Después de observar detalladamente el video, de este se extrajeron los siguientes datos, condensados en la Tabla 5:

Nivel (cm)	Tiempo transcurrido (s)
95,0	0
92,5	7
90,0	13

<sup>33</sup> FRANCO GARCÍA Ángel. Física con ordenador. En: Curso interactivo de física por Internet [en línea] Página Web, versión HTML. Disponible en Internet:  
<<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/fluidos/dinamica/vaciado/vaciado.htm>>





Trabajo de Grado, 48 de 128

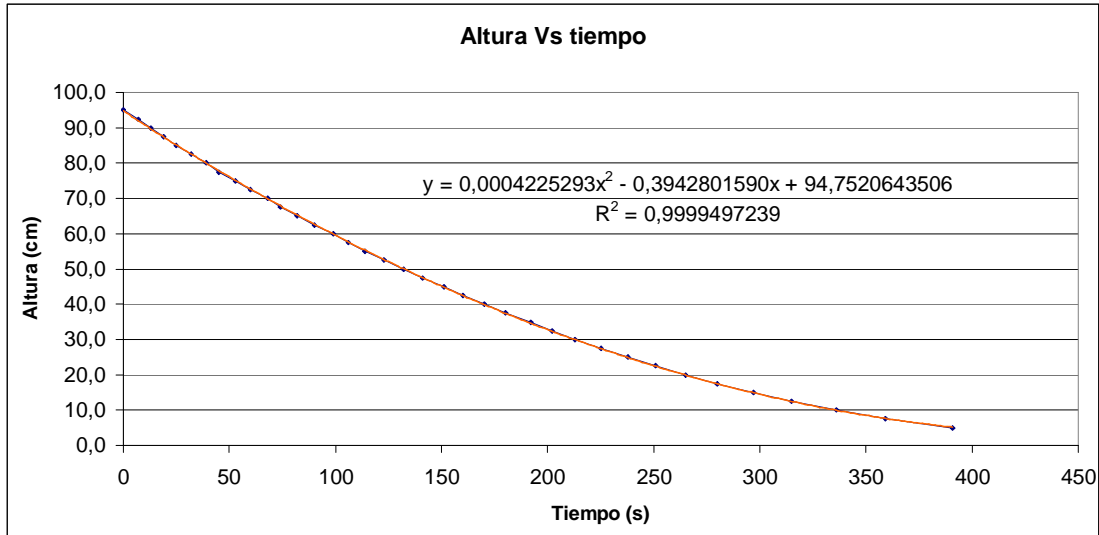
87,5	19
85,0	25
82,5	32
80,0	39
77,5	45
75,0	53
72,5	60
70,0	68
67,5	74
65,0	82
62,5	90
60,0	99
57,5	106
55,0	114
52,5	123
50,0	132
47,5	141
45,0	151
42,5	160
40,0	170
37,5	180
35,0	192
32,5	202
30,0	213
27,5	225
25,0	238
22,5	251
20,0	265
17,5	280
15,0	297
12,5	315
10,0	336
7,5	359
5,0	391

Tabla 5. Datos de descarga  $H-t$ . Fuente: Autores.

### Análisis de datos y modelo final

A los datos de la Tabla 5 se les aplicó regresión cuadrática, cuyos resultados se muestran en la Figura 20:





**Figura 20. Regresión cuadrática datos de descarga. Fuente: Autores**

De la figura anterior, se aprecia que el modelo matemático Nivel – tiempo es de orden cuadrático, definido por la siguiente expresión:

$$h = 0.0004225293t^2 - 0.3942801590t + 94.7520643506 \quad (24)$$

Donde  $h$  esta en cm y  $t$  en s.

#### 4.3.2 Modelo matemático nivel – tiempo de carga

Si bien la relación entre nivel y tiempo de descarga es de orden cuadrático, el nivel con relación al tiempo de carga es de carácter lineal, ya que el flujo de agua por la válvula de llenado puede considerarse constante.

Para comprobar esto, se tomaron datos del nivel de agua entre 10 y 75 cm, registrando el tiempo transcurrido en cada medida. Los resultados de esta medición se observan en la Tabla 6.

Nivel (cm)	Tiempo transcurrido (s)
75,0	250
70,0	232
65,0	217
60,0	199
55,0	183
50,0	164
45,0	148
40,0	130





35,0	114
30,0	96
25,0	77
20,0	61
15,0	44
10,0	26

Tabla 6. Datos de carga  $H-t$ . Fuente: autores

A los datos de la Tabla 6 se les aplicó regresión lineal, cuyos datos se presentan en la Figura 21.

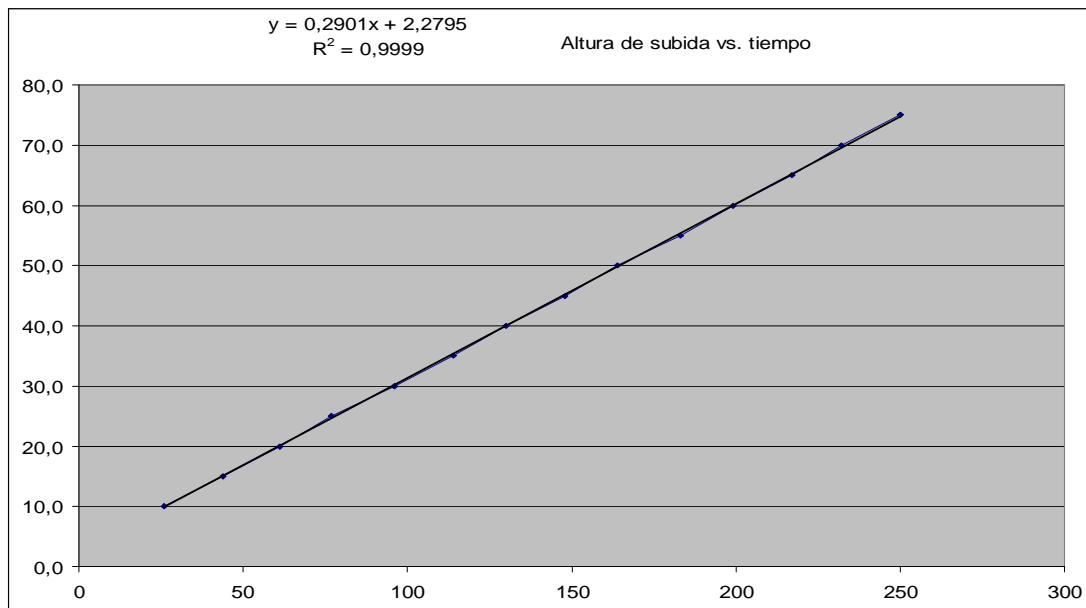


Figura 21. Regresión lineal datos de descarga. Fuente: Autores

Tal como se ve en la figura, la expresión de carga del tanque es:

$$H = 0.291t + 2.2795 \quad (25)$$

Donde  $H$  está en cm y  $t$  en segundos.





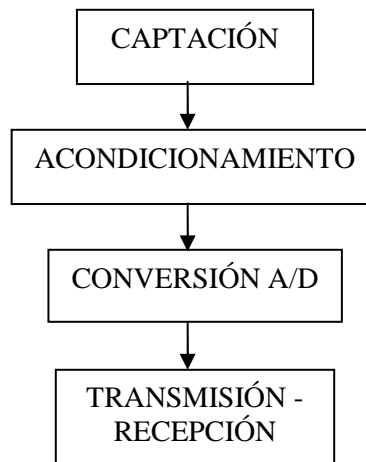
## 5. ESTRATEGIA PROPUESTA PARA EL SISTEMA DE ADQUISICION DE DATOS

Como ya se indicó, el transmisor o medidor secundario es el primer paso del procedimiento de medida. Su principal finalidad es obtener una indicación objetiva acerca de una magnitud física (presión, temperatura, etc.). Para ello, este debe ser un elemento sensible al fenómeno y proporcionar una salida útil, casi siempre eléctrica.

Ahora bien, la salida que proporciona un transmisor no siempre se puede conectar directamente a un aparato de medida o a un conversor análogo-digital<sup>34</sup>. Debido a los inconvenientes presentes en las señales, se presenta una estrategia de adquisición, que tiene como fin mejorar las características de las señales de los transmisores, es decir, procurar que estas contengan únicamente la información de la variable física que se está midiendo. Esta estrategia involucra la siguientes etapas<sup>35</sup>:

- Captación de las variables físicas.
- Acondicionamiento de las señales eléctricas.
- Conversión análoga – digital.
- Transmisión - recepción de datos.

La secuencia de estas etapas se muestran en el Esquema 5:



<sup>34</sup> CAÑAS, Ricardo. Asesoría recibida por los autores acerca de adquisición de datos, 2007.

<sup>35</sup> MORENO V. Ignacio. Apuntes de instrumentación electrónica. Área de tecnología electrónica, 2004.





## 5.1 CAPTACIÓN DE LA SEÑAL

El laboratorio de instrumentación cuenta con sensores de presión diferencial de una alta linealidad y exactitud, pero aún no se cuenta con sensores de presión absoluta y de temperatura para la tubería.

La elección de estos sensores debe realizarse de acuerdo con los requerimientos de los procesos en cuanto a su exactitud y linealidad, conforme al presupuesto disponible para la adquisición de los mismos .

## 5.2 ACONDICIONAMIENTO

Teniendo en cuenta las características del sistema, la señal puede presentar algunos de los siguientes inconvenientes:

- La salida del transmisor es muy débil y no es capaz de detectarse. Este motivo puede descartarse en el caso de las señales que salen de los transmisores de presión existentes, ya que oscilan entre 1-5 Vdc y 4-20 mA, valores suficientes para ser capturados y digitalizados.
- La salida del transmisor presenta altos niveles de ruido<sup>36</sup> en uno o varios rangos de frecuencia.
- La salida del transmisor presenta altos niveles de interferencia<sup>37</sup> en uno o varios rangos de frecuencia.

Para eliminar dichos inconvenientes, se debe adecuar la señal para un correcto procesamiento, teniendo en cuenta los siguientes parámetros<sup>38</sup> , según los requerimientos del sistema de gestión:

- Es indispensable la aplicación de filtros pasabajas. Teniendo en cuenta que las señales de los transmisores es continua, pero que se somete a una digitalización, se recomienda que la frecuencia de corte de los filtros este levemente por encima de la mitad de la frecuencia de muestreo. Debido a que esta frecuencia

---

<sup>36</sup> Considérese como *ruido* a las señales generadas por los elementos del propio circuito: resistencias, amplificadores operacionales, etc.

<sup>37</sup> Considérese como *interferencias* a las señales de origen externo al sistema presentes en su salida.

<sup>38</sup> GARCIMARTIN M. Ángel. Sistemas de medida y adquisición de datos. Universidad de Pamplona, España: 2003.





se estableció con un valor máximo de 10 Hz, el filtro debe tener una frecuencia de corte de 5 Hz<sup>39</sup>.

- Eliminación de interferencias: dentro de este punto, es necesario una selección adecuada de las fuentes de alimentación, un buen acople entre las etapas de potencia y control y un correcto diseño del PCB.

### 5.3 CONVERSIÓN A/D

Con base en los rangos de medida de las variables del proceso (presión absoluta: 0-150 PSIA<sup>40</sup>, presión diferencial: 0-1.5 PSI, temperatura: 50-90 F), es posible implementar un ADC de 8 bits si se desea obtener  $2^8 = 256$  particiones del rango de operación de la variable física, alcanzando una resolución menor de 0.4% del rango de la misma, suficiente para una medición óptima del proceso. Si se desea, se pueden implementar conversores de mayor resolución; finalmente, esto lo determina el diseñador del sistema de adquisición.

Para la obtención de los datos provenientes de los conversores debe implementarse un dispositivo que permita el control de flujo de la información entre estos, así como una memoria que almacene dichos datos para una posterior transmisión y procesamiento, ó una transmisión directa al sistema de gestión.

El mecanismo controlador puede ser de tipo microcontrolador o DSP (Digital Signal Processing), según las velocidades de muestreo y el manejo de periféricos a implementar en el sistema. Como las variables del proceso son de baja frecuencia, con un microcontrolador se pueden cubrir estas necesidades.

### 5.4 TRANSMISIÓN – RECEPCIÓN

Teniendo en cuenta que el sistema de gestión se implementó con una comunicación serial de interfaz RS-232, se recomienda mantener esta configuración para el sistema de adquisición de datos, pero sin descartar la posible implementación de otra interfase de comunicación, tal como USB, Bluetooth, IrDA, etc. Dicha modificación es soportada debido a la estructura modular implícita del sistema de gestión, mencionada en capítulos anteriores.

Una vez la señal de control este lista para ingresar al sistema de gestión, se procede al estudio de la lógica de supervisión, la cuál se encarga de su adecuado procesamiento.

---

<sup>39</sup> Aplicación del teorema de Nyquist.

<sup>40</sup> Rango registrado por los manómetros neumáticos presentes en la tubería.





## 6. ALGORITMO DE SUPERVISION

En esta sección se muestra, inicialmente por medio de un diagrama de flujo, la lógica de supervisión implementada para los procesos de medición de flujo en la tubería y de nivel de líquido en el tanque, tanto para el operador local como para un operador remoto autorizado para la supervisión y manejo de los procesos. Con el fin de que el lector adquiriera una adecuada visión global de estos dos últimos aspectos, se presenta asimismo una paráfrasis descriptiva de las funciones más relevantes de esta lógica.

### 6.1 SUPERVISIÓN DEL OPERADOR LOCAL

#### 6.1.1 Descripción de entradas y salidas

Como se mencionó en el capítulo 3, las variables que intervienen en nuestro proceso se dividieron en tres tipos:

- Variables predeterminadas
- Variables de configuración
- Variables de proceso

De acuerdo con esta clasificación, en las siguientes tablas se presenta, el nombre de la variable, así como su tipo y una breve descripción.

**Tabla 7. Valores predeterminados. Fuente: Autores**

Nombre	Tipo	Descripción
Gr	Entrada (DBL <sup>41</sup> )	Gravedad Específica (adimensional)
Zs	Entrada (DBL)	Compresibilidad base (adimensional)
Zf1	Entrada (DBL)	Compresibilidad flujo (adimensional)
N4	Entrada (DBL)	Constante (adimensional)
cdft	Interna (DBL)	Coefficiente de descarga (adimensional)

**Tabla 8. Variables de configuración. Fuente: Autores**

Nombre	Tipo	Descripción
fh	Entrada (STRING <sup>42</sup> )	Fecha y hora actual

<sup>41</sup> DBL (Double precision number): Número de doble precisión

<sup>42</sup> BOOLEAN: Admite únicamente valores de 0 (apagado) ó 1 (encendido)





**Trabajo de Grado, 55 de 128**

d	Entrada (DBL)	Diámetro de la platina de orificio (in.)
D	Entrada (DBL)	Diámetro de la tubería (in.)

**Tabla 9. Variables de proceso. Fuente: Autores**

Nombre	Tipo	Descripción
fs	Entrada (DBL)	Frecuencia de muestreo (Hz)
vh	Entrada (DBL)	Tensión de nivel (V)
vhw	Entrada (DBL)	Tensión de presión diferencial (V)
vtf	Entrada (DBL)	Tensión de temperatura de flujo (V)
vpf1	Entrada (DBL)	Tensión de presión absoluta (V)
SP	Entrada (DBL)	Set point (cm)
IL	Entrada (DBL)	Límite inferior (cm)
SL	Entrada (DBL)	Límite Superior (cm)
pr	Entrada (DBL)	Tolerancia (cm)
ni	Interna <sup>43</sup> (DBL)	Nivel (cm)
Hw	Interna (DBL)	Presión diferencial (PSI)
Tf	Interna (DBL)	Temperatura de flujo (F)
Pf1	Interna (DBL)	Presión absoluta aguas arriba (PSIA)
PH	Entrada (DBL)	Límite máximo permitido de caudal (PSI)
byte1	Salida (DBL – BINARY)	Primera salida al uC
byte2	Salida (DBL – BINARY)	Segunda salida al uC
mani	Entrada (BOOLEAN <sup>44</sup> )	Mando de nivel
maq	Entrada (BOOLEAN)	Mando de caudal
PA1	Salida (BOOLEAN)	Sobrepaso del límite superior del caudal

<sup>43</sup> Las variables INTERNAS son aquellas que dependen de una entrada específica y que intervienen en el modelo matemático, pero que no son salidas finales del proceso.

<sup>44</sup> STRING: Cadena de caracteres





**Trabajo de Grado, 56 de 128**

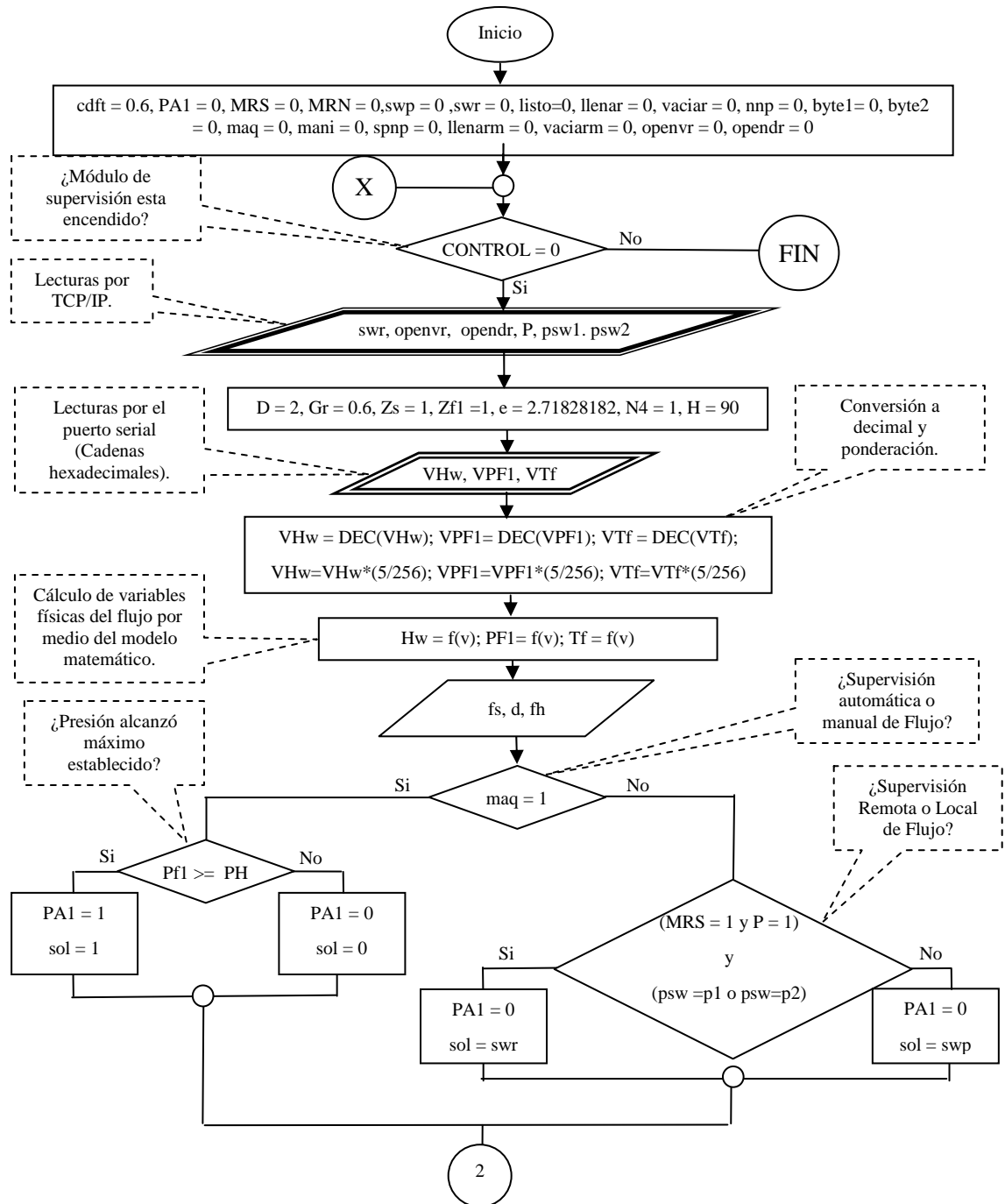
MRS	Entrada (BOOLEAN)	Mando remoto de la válvula solenoide
MRN	Entrada (BOOLEAN)	Mando remoto de las válvulas del tanque (llenado y desagüe)
listo	Salida (BOOLEAN)	Nivel alcanzó el Set Point
spnp	Salida (BOOLEAN)	Set Point no permitido
openv	Interna (BOOLEAN)	Abrir válvula de llenado desde el PC local
opend	Interna (BOOLEAN)	Abrir válvula de desagüe desde el PC local
P	Entrada (BOOLEAN)	Solicitud de permiso operador remoto
openvr	Entrada (BOOLEAN)	Abrir válvula de llenado desde el PC remoto
opendr	Entrada (BOOLEAN)	Abrir válvula de desagüe desde el PC remoto
nnp	Salida (BOOLEAN)	Nivel no permitido
llenar	Salida (BOOLEAN)	Activar válvula de llenado
vaciar	Salida (BOOLEAN)	Activar válvula de desagüe
swp	Entrada (BOOLEAN)	Activar válvula solenoide desde el PC local
P	Entrada (BOOLEAN)	Solicitud de permiso para acceso remoto
psw	Entrada (BOOLEAN)	Contraseña acceso usuario remoto
swr	Entrada (BOOLEAN)	Activar válvula solenoide desde el PC remoto

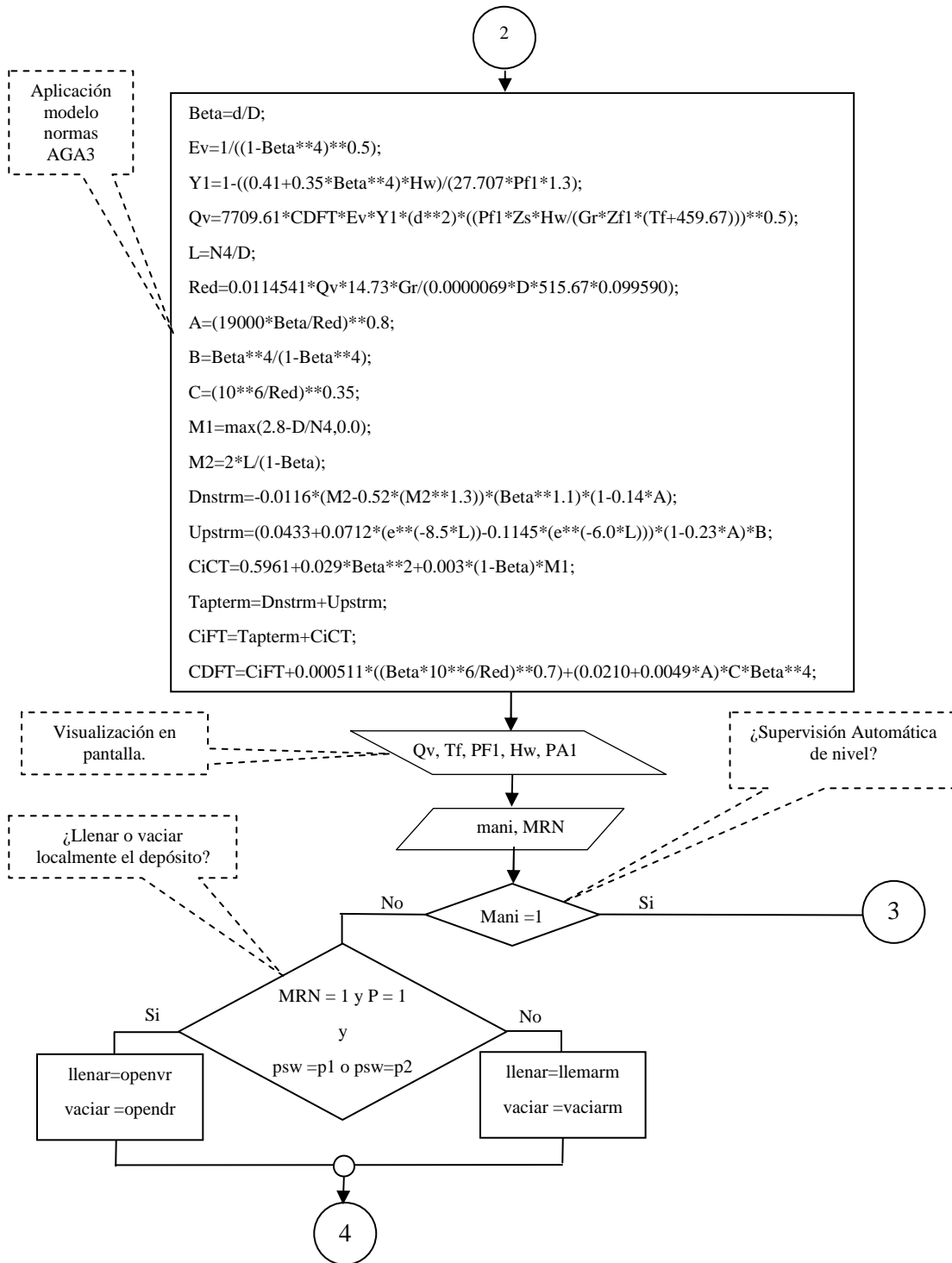
Los diagramas de flujo de las secciones siguientes muestran la lógica de supervisión propiamente dicha. Las llamadas en línea punteada indican, en palabras corrientes, el significado del bloque señalado.





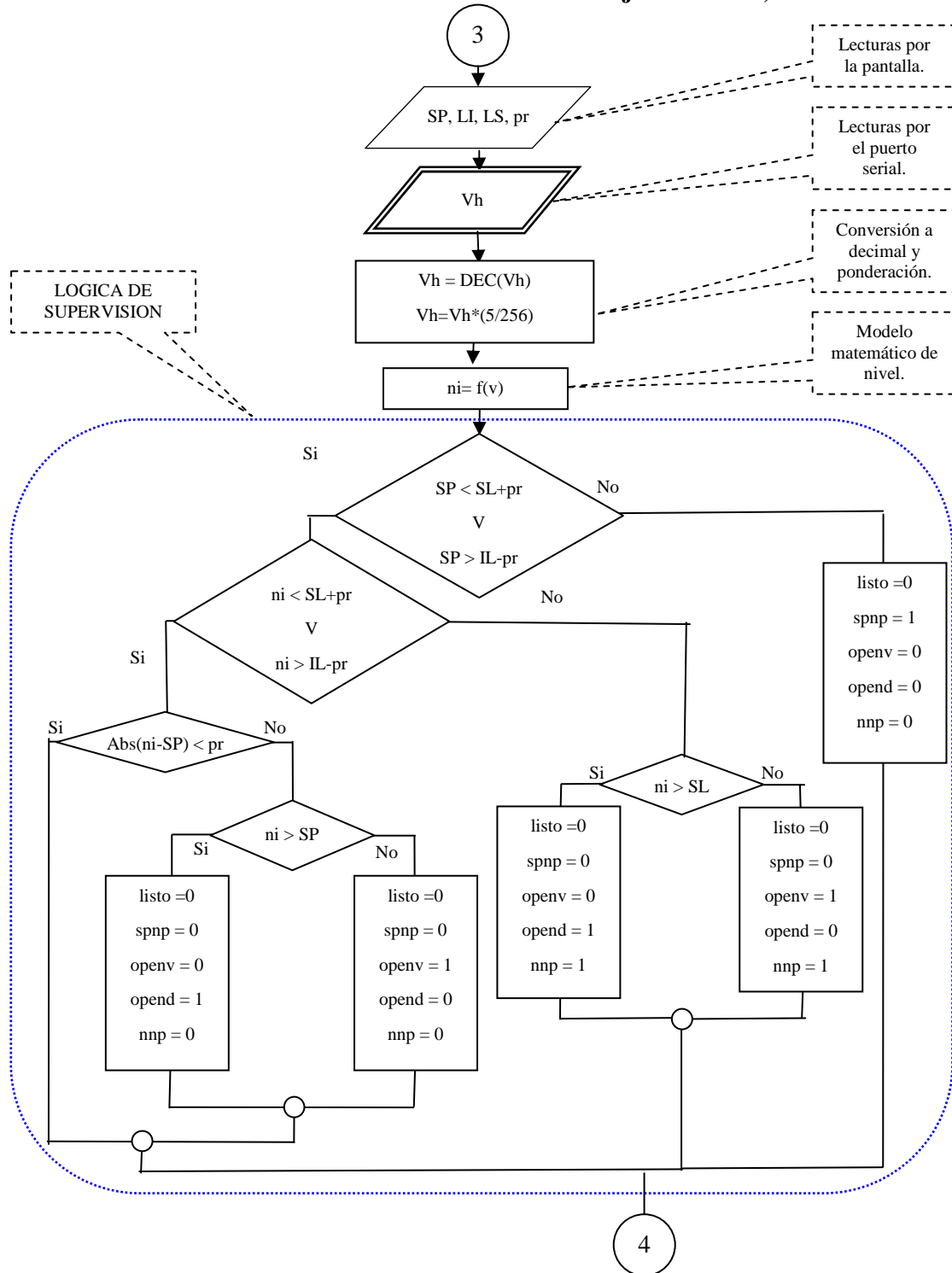
6.1.2 Diagrama de flujo

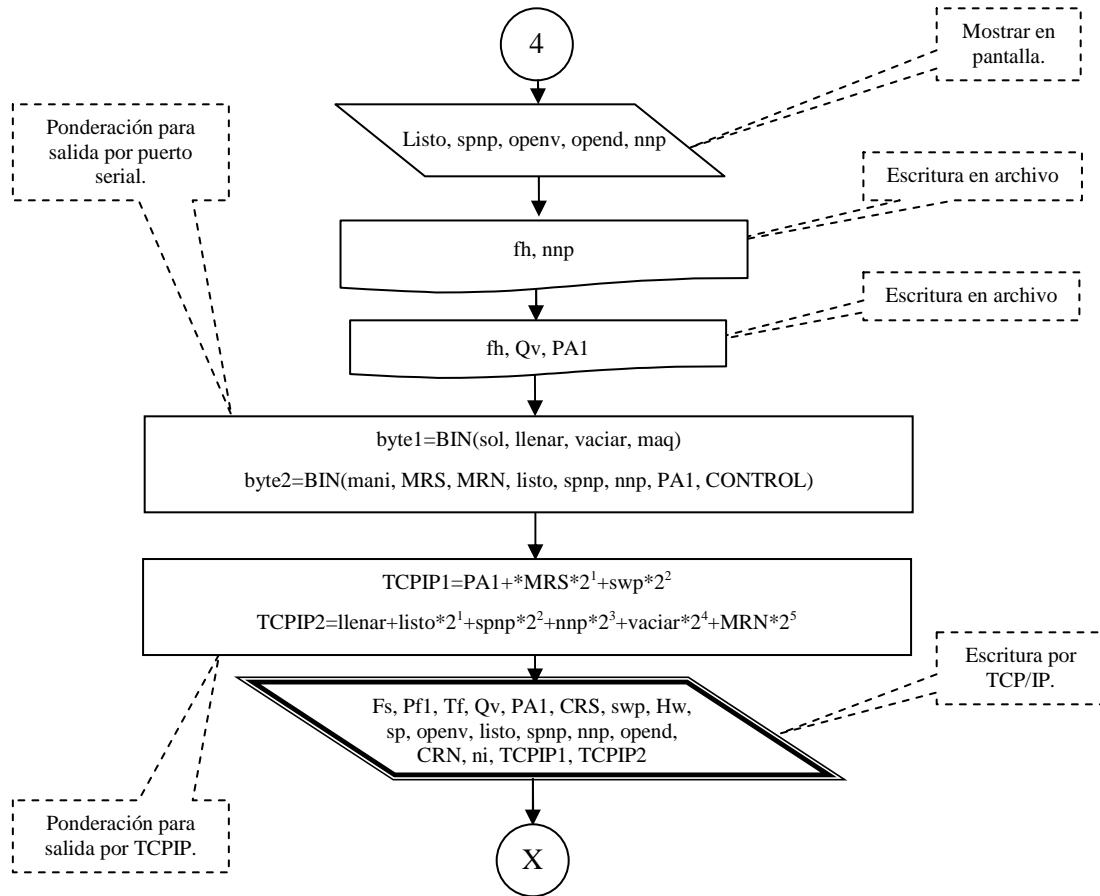






Trabajo de Grado, 59 de 128





Esquema 6. Diagrama de flujo general del proceso desde el operador local. Fuente: Autores

## 6.2 LÓGICA DE SUPERVISIÓN PARA EL OPERADOR REMOTO

Al igual que para el operador local, se describen a continuación, en las tablas siguientes, las variables utilizadas para la lógica en el operador remoto, así como su diagrama de flujo correspondiente.

### 6.2.1 Descripción de entradas y salidas

Tabla 10. Variables de configuración para el operador remoto. Fuente: Autores.

Nombre	Tipo	Descripción
fh	Entrada (STRING)	Fecha y hora actual (D/M/A





Tabla 11. Variables de proceso para el operador remoto. Fuente: Autores.

Nombre	Tipo	Descripción
fs	Entrada (DBL)	Valor de la frecuencia de muestreo (Hz) enviado desde el PC local
Pf1	Entrada (DBL)	Valor de la presión absoluta (PSIA) enviado desde el PC local
Tf	Entrada (DBL)	Valor de la temperatura de flujo del gas (F) enviado desde el PC local
Qv	Entrada (DBL)	Valor del flujo de gas (ft <sup>3</sup> /h) enviado desde el PC local
Hw	Entrada (DBL)	Valor de la presión diferencial del gas (PSI) enviado desde el PC local
Port1	Entrada (DBL)	Arreglo booleano enviado desde el PC local
Port2	Entrada (DBL)	Arreglo booleano enviado desde el PC local
SP	Entrada (DBL)	Valor del Set Point de nivel de líquido (cm) enviado desde el PC local
ni	Entrada (DBL)	Valor del nivel de líquido (cm) enviado desde el PC local
openvr	Entrada (BOOLEAN)	Abrir válvula de llenado
opendr	Entrada (BOOLEAN)	Abrir válvula de desagüe
msw	Entrada (BOOLEAN)	Abrir válvula solenoide
MRS	Interna (BOOLEAN)	Mando remoto de la válvula solenoide
swp	Interna (BOOLEAN)	Abrir la válvula solenoide desde el PC local
openv	Interna (BOOLEAN)	Mando remoto de las válvulas del tanque (llenado y desagüe)
opend	Interna (BOOLEAN)	Abrir válvula de desagüe desde el PC local
MRN	Interna (BOOLEAN)	Mando remoto de las válvulas del tanque (llenado y desagüe)
PA1	Salida (BOOLEAN)	Sobrepaso del límite superior del caudal
listo	Salida (BOOLEAN)	Nivel alcanzó el Set Point
spnp	Salida (BOOLEAN)	Set Point no permitido
nnp	Salida (BOOLEAN)	Nivel no permitido
P	Salida (BOOLEAN)	Solicitud de permiso para acceso



Facultad de  
Ingenierías  
Físico  
Mecánicas



Escuela de Ingenierías  
Eléctrica, Electrónica y  
Telecomunicaciones



---

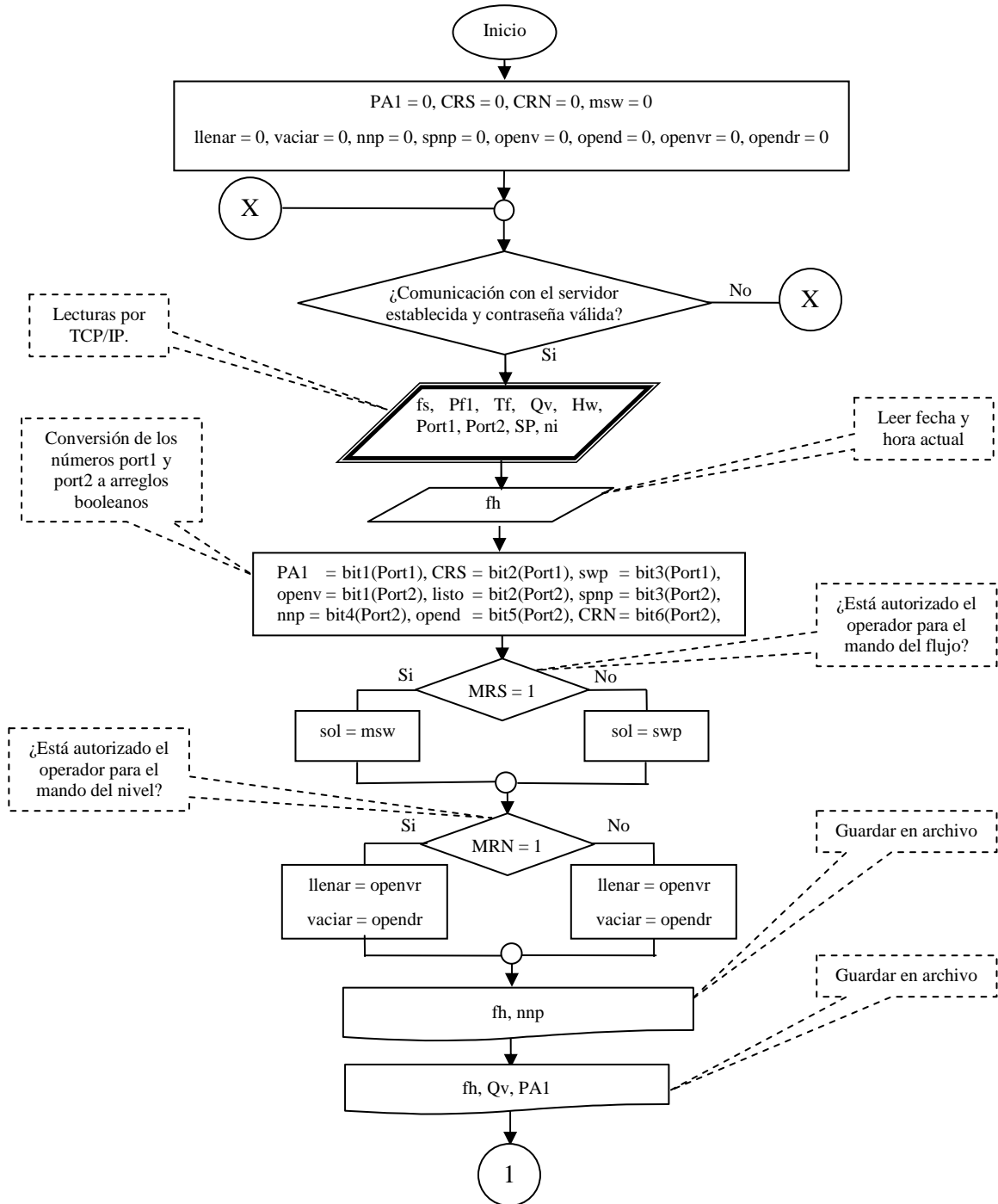
**Trabajo de Grado, 62 de 128**

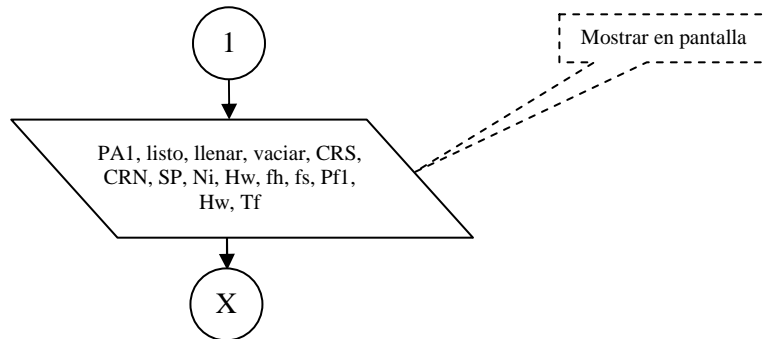
psw	Salida (DBL)	Contraseña acceso
Stop	Salida (DBL)	Apagado del sistema





6.2.2 Diagrama de flujo





Esquema 7. Diagrama de flujo general del proceso desde el operador remoto. Fuente: Autores

### 6.3 MODELO DE SUPERVISIÓN EN REALIDAD VIRTUAL

En realidad virtual se presentan 2 usos principales, *visualización* del estado de laboratorio y *simulación* de los procesos físicos.

La *visualización* comprende la capacidad de ver en un ambiente de realidad virtual el estado actual de algunas variables de los procesos, (tubería de transmisión de gases y tanque de nivel de líquidos), e incluso se pueden visualizar los dos eventos al mismo tiempo si es que de esta forma se están llevando a cabo.

La limitación más importante es que solamente se puede visualizar, es decir, que en ningún momento se puede hacer supervisión remota de los elementos del laboratorio; por esta razón, no se presentan para el usuario casos de interacción más que la actualización de los valores de algunos parámetros de funcionamiento, del nivel de líquido, cálculo de flujo y el estado de las válvulas de regulación.

Para lo anterior, es necesario contar con una estructura de red local y que la estación local del laboratorio se encuentre conectada y enviando los valores de las variables vía TCP/IP.

En la Tabla 12 se relacionan las variables empleadas en *visualización* sobre Realidad Virtual:

Nombre	Tipo	Descripción
tf	Entrada (DBL)	Temperatura del Flujo.
qv	Entrada (DBL)	Flujo.
PA1	Entrada (DBL)	Presión absoluta aguas arriba.
openv	Entrada (BOOLEAN)	Indicación del estado ON de llenado del tanque.





**Trabajo de Grado, 65 de 128**

opend	Entrada (BOOLEAN)	Indicación del estado ON de vaciado del tanque.
luzswitch	Entrada (BOOLEAN)	Indicación del estado ON del switch.
hw	Entrada (DBL)	Presión diferencial.
ni	Entrada (DBL)	Nivel de liquido.
sp	Entrada (BOOLEAN)	Indicación de set point alcanzado.

**Tabla 12. Variables empleadas en visualización de Realidad Virtual. Fuente: Autores.**

La *simulación* es la otra utilidad de Realidad Virtual para el laboratorio de instrumentación, que se emplea tanto para el proceso de medición de caudal, como para el de medición de nivel; en este aspecto, se tiene que de igual forma como en la estación central real, se puede llevar a cabo la supervisión de los eventos del laboratorio, es decir, detectar estados de emergencia y tomar acciones pertinente para corregirlos, pero de una forma simplificada.

### Nivel del líquido

En este punto, se tiene interacción con el estado de las válvulas (virtuales, no las reales) que permite simular su funcionamiento, referencias visuales del cambio de nivel, de acuerdo con las condiciones cambiantes de las válvulas de llenado y desagüe, la presencia de indicadores de los estados de las válvulas y, en caso de llegar al nivel máximo permitido (por defecto es de 80cm), se toman la acciones para impedir que se continúe en este estado; es decir, se presenta la desactivación de la válvula de llenado y la activación de la válvula de desagüe, hasta encontrar un nivel de liquido seguro.

La diferencia con el software de supervisión real local es la ausencia de un control automático que permita la definición de un nivel esperado (setpoint) y el control de este sin supervisión del operador y asumiendo temperatura constante (85 F)

A continuación se relacionan las variables empleadas en *simulación* sobre Realidad Virtual:

Nombre	Tipo	Descripción
qv	Entrada (BOOLEAN)	Flujo en la tubería
Luzcompre	Entrada (DBL)	Testigo ON compresor.
Pa1	Entrada (DBL)	Presión absoluta en la tubería
volttub	Entrada (DBL)	Voltaje de salida del medidor diferencial
ni	Entrada (DBL)	Nivel de liquido
openv	Entrada (BOOLEAN)	Testigo ON de válvula de llenado.
opend	Entrada (BOOLEAN)	Testigo ON de válvula de vaciado.

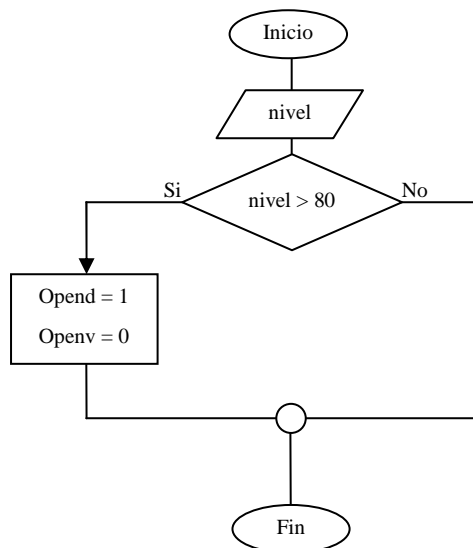




luzswitch	Entrada (BOOLEAN)	Testigo de switch flujo ON.
on-off compre	Salida (BOOLEAN)	Compresor encendido.
onsalidflu	Salida (BOOLEAN)	Salida de presión ON.
offsalidflu	Salida (BOOLEAN)	Salida de presión OFF.
on-off llenado	Salida (BOOLEAN)	Válvula de llenado ON.
on-off vaciado	Salida (BOOLEAN)	Válvula de vaciado ON
on-off switch	Salida (BOOLEAN)	ON válvula vaciado emergencia

Tabla 13. Variables empleadas en simulación de Realidad Virtual. Fuente: Autores.

El siguiente es el diagrama de flujo para la supervisión del nivel de líquido en el tanque, bajo simulación de Realidad Virtual:



Esquema 8. Diagrama de flujo del proceso para la simulación en RV de la medición de nivel. Fuente: Autores.

### Tubería

En este caso, se tiene interacción con el compresor que genera la presión de gas y con la válvula de salida de gas para generar un flujo.

Se tienen además indicaciones visuales del estado del compresor, indicación visual del flujo calculado y el estado de la válvula solenoide de regulación de presión.

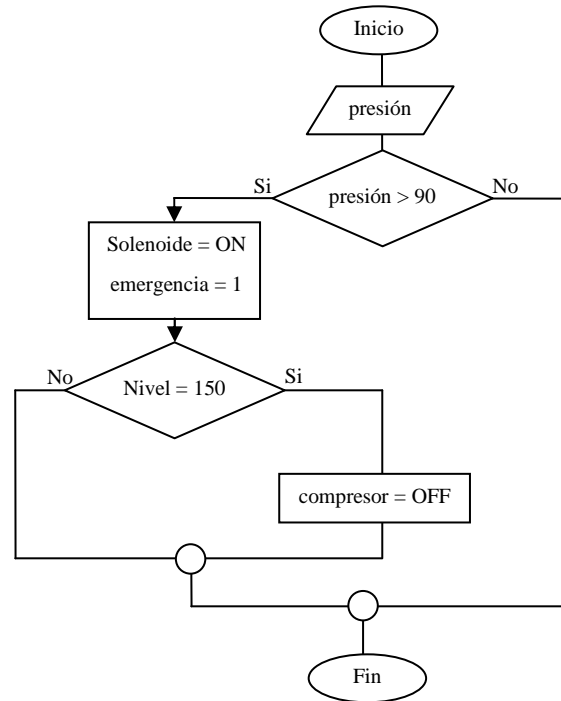




**Trabajo de Grado, 67 de 128**

La supervisión actúa sobre la válvula solenoide, que permite liberar la presión del sistema de forma rápida.

Se presenta a continuación el diagrama de flujo para la supervisión de la tubería de medición de gases en simulación de Realidad Virtual:



**Esquema 9. Diagrama de flujo del proceso para la simulación en RV de la medición de flujo. Fuente: Autores**

Una vez presentada la lógica de supervisión, se procede en el capítulo siguiente a integrarla con los modelos matemáticos de los procesos existentes, por medio de paquetes de software.





## 7. INTEGRACION DEL MODELADO MATEMÁTICO Y LA LÓGICA DE SUPERVISIÓN

---

En los capítulos anteriores se observó cómo se realizó el modelado matemático *caudal – tensión eléctrica y nivel – tensión eléctrica*, así como también el algoritmo implementado para la supervisión. Lo anterior se integra en un modelo informático soportado por Labview –para la supervisión propiamente dicha- y MatLab –para la visualización y simulación-. Este capítulo sintetiza los criterios para la elección del software anteriormente mencionado, así como las generalidades sobre la programación del mismo.

### 7.1 SELECCIÓN DEL SOFTWARE

Esta comparación y selección se realiza con el fin de encontrar paquetes de software lo suficientemente robustos para el soporte del sistema de gestión, aspecto definitivo en el desarrollo de este trabajo.

#### Criterios de selección

- Capacidad de supervisión del proceso, manteniendo la presión, el caudal y el nivel en los valores determinados por el usuario.
- Cumplimiento con los requisitos básicos del sistema SCADA:
  - Facilidad para una arquitectura abierta –escalabilidad-.
  - Interfaz gráfica de usuario.
  - Capacidad de generación de historiales de las mediciones y eventos, así como de gráficos de las variables más relevantes del proceso.
  - Funcionalidad en la comunicación con el sistema de instrumentación y el sistema de adquisición.
- Facilidad de programación.
- Disponibilidad.

Entre los paquetes candidatos están: Borland C++, Visual Basic, Visual C++, LabView y MatLab.

De la comparación realizada en la Tabla 14, se concluye que las opciones más ventajosas son Labview 7.0 para el algoritmo de supervisión y MatLab 6.5 para la simulación y visualización de los procesos en Realidad Virtual.





Trabajo de Grado, 69 de 128

CRITERIO	Borland C++	Visual Basic	Visual C++	Labview	MatLab
Disponibilidad en la UIS o Versión	Si 4.51	Si 6.0	Si 6.0	Si 7.0	SI 6.5
Facilidad en la programación	Regular	Regular	Regular	Buena	Regular
Tiempo de aprendizaje	6 meses	6 meses	6 meses	4 meses	6 meses
Conocimiento del software por parte de los autores	Nula	Básica	Básica	Avanzada	Media
Escalabilidad	Baja	Media	Baja	Alta	Media
Facilidad para implementar GUI	Baja	Alta	Media	Alta	Alta
Facilidad de la rutina de adquisición de datos	Baja	Baja	Baja	Alta	Baja
Herramientas para simulación y realidad virtual	No	No	No	Si	Si
Sistemas operativos que lo soportan	Windows, 9x, NT, Linux (compilador de C)	Windows 9x, NT	Windows 9x, NT, Linux (con el emulador de Windows)	Windows 9x, NT, Macintosh, Unix, Linux (se requiere la librería GNU c)	Windows 9x, NT, Unix, Linux, Macintosh
Hardware mínimo requerido -Espacio Disco Duro -Memoria Ram -Procesador	300MB 16MB 486 o superior	80MB 16MB 486 o superior	80MB 32MB Pentium de 200MHz o superior	130MB 128MB Pentium III, Celeron 600MHz o superiores.	90MB 128MB Pentium II, Xeon PIII, AMD Athlon, Athlon XP





Tabla 14. Comparación de las características de los paquetes de software. Fuente: Carlos Mora<sup>45</sup>

## 7.2 IMPLEMENTACIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS Y EL ALGORITMO DE SUPERVISIÓN EN LABVIEW 7.0

### 7.2.1 Modelos matemáticos

Para la aplicación de las normas AGA3, vistas en el capítulo 4, así como para los modelos matemáticos de presión absoluta, temperatura y nivel, calculados en ese mismo capítulo, se utilizó un nodo fórmula, tal como se muestra en la Figura 22, con sus respectivas entradas y salidas.

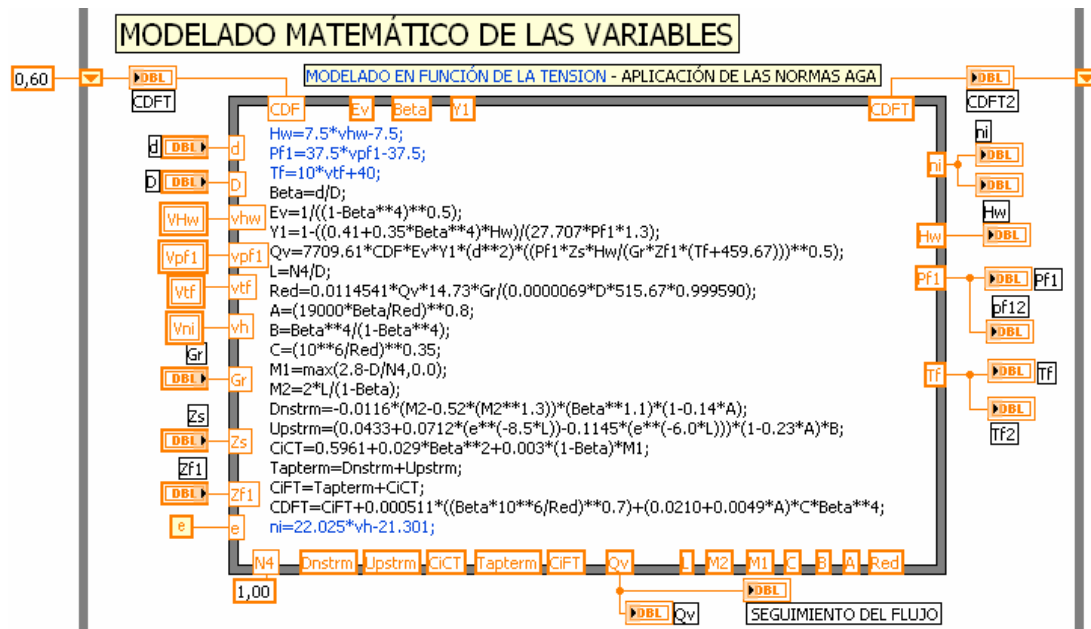
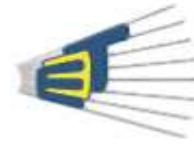


Figura 22. Modelos matemáticos implementados en Labview 7.0. Fuente: Autores

<sup>45</sup> MORA CRIOLLO, Carlos Alberto. Adquisición y control de datos de un sistema de baja presión. Tesis de grado. Bogotá: UNAL, 2004. Paquetes de software disponibles también en la UIS





### 7.2.2 Supervisión de presión absoluta y nivel

Esta supervisión, detallada en los diagramas de flujo del capítulo anterior e implementada en Labview tal como se muestra en la Figura 23, tiene como objetivos principales:

- Mantener las variables presión absoluta (que incide directamente sobre el flujo) y nivel de líquido, dentro de los límites establecidos por el usuario.
- Generar eventos o alarmas cada vez que ocurra un cambio significativo o una anomalía en el proceso.

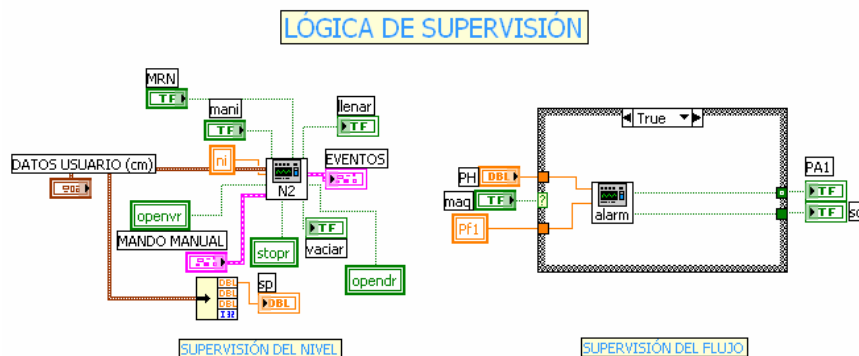


Figura 23. Lógica de supervisión en Labview 7.0. Fuente: Autores.

### 7.2.3 Opciones de mando

Mediante las opciones MRS Y MRN, el operador local puede darle la oportunidad a un operador remoto autorizado, para ejercer el mando de la válvula solenoide de la tubería y de las válvulas de llenado y desagüe del tanque (ambos procesos independientemente). Algunas consideraciones al respecto:

- El operador remoto autorizado (con una contraseña asignada), debe previamente enviar una petición de manejo.
- El operador local es el que decide quién va a manejar los actuadores. Si la contraseña del usuario remoto es correcta y si se acepta la petición recibida, el operador remoto asume el mando hasta que el operador local se lo permita.
- Para no crear conflictos de manejo, se hace la salvedad de que solo uno de los dos operadores puede hacer el manejo de las válvulas en un momento determinado.

### 7.2.4 Rutina de comunicación TCP/IP

La comunicación vía TCP/IP se da entre los paquetes de software de supervisión y realidad virtual (Labview→Matlab) de la estación central, así como también para





### Trabajo de Grado, 72 de 128

comunicar esta última con el usuario remoto autorizado<sup>46</sup>. Para su implementación en Labview, fue necesario el uso de estructuras secuenciales. La comunicación entre el operador local y el operador remoto se estableció por los puertos<sup>47</sup> 6340 (Local → Remoto) y 6341 (Remoto → Local). Mediante el puerto 6343, se establece la comunicación entre el paquete de supervisión y la herramienta de realidad virtual.

#### 7.2.5 Generación De Historiales

Es posible registrar en archivos de texto (\*.txt) o en hojas de cálculo (\*.xls) la información de las variables para su posterior análisis y procesamiento estadístico. La velocidad de captura de registros depende directamente de la frecuencia de muestreo de los datos por parte del sistema de adquisición; de esta manera, se pueden almacenar hasta fs datos por segundo en los tipos de archivo mencionados.

Para la generación de historiales, se utilizó la estructura mostrada en la Figura 24. Nótese que, tal como se indicó, el usuario puede escoger el tipo de archivo para almacenar los datos.

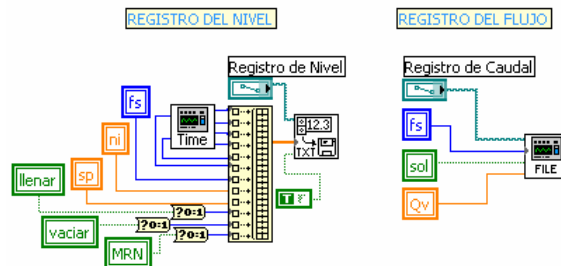


Figura 24. Generación de historiales en Labview. Fuente: Autores.

#### Tolerancia

El manejo de nivel presenta esta opción, la cual permite obtener una “zona muerta” al momento de comparar el nivel actual de líquido con el Set Point requerido, con el fin de evitar el desgaste de las válvulas de llenado y desagüe, y asimismo posibles daños en el sistema eléctrico de las mismas.

La Figura 25 muestra la interfaz de usuario final de la lógica de supervisión local sobre Labview 7.0.

A continuación, se describirá la implementación de los algoritmos y modelos matemáticos sobre Matlab y Realidad Virtual.

<sup>46</sup> La rutina de comunicación TCP/IP se explicará en detalle en el capítulo 8

<sup>47</sup> Estos puertos se seleccionaron conforme a la lista de puertos disponibles en <<http://www.iana.org/assignments/port-numbers>>



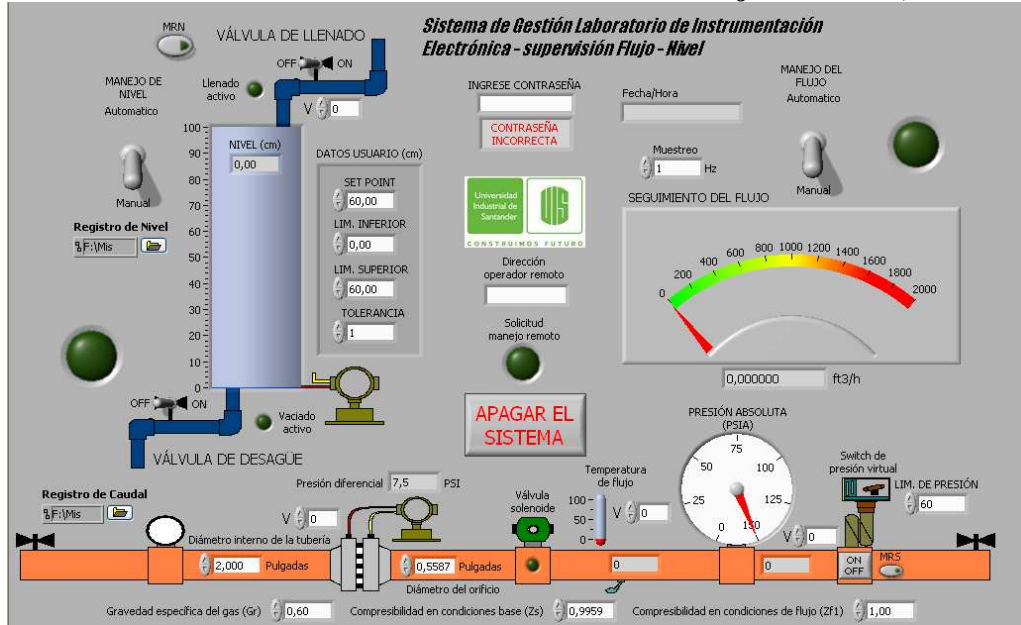


Figura 25. Interfaz gráfica de usuario para la lógica de supervisión. Fuente: Autores.

### 7.3 IMPLEMENTACIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS Y EL ALGORITMO DE SUPERVISIÓN EN SIMULINK DE MATLAB 6.5

Para iniciar, se debe recordar la existencia de dos diferentes casos de uso del software; por un lado, esta la visualización, por otro lado la simulación, ya que solo el módulo de simulación tiene la integración del modelo matemático y la lógica de supervisión.

Como estrategia de programación, para facilitar la implementación y mejorar la experiencia al usuario, se continua con el uso de la estructura completa del laboratorio, es decir, que en Realidad Virtual se ven los sistemas de medición de flujo y de nivel en el mismo momento, posibilitando de esta forma llevar a cabo la simulación de los dos sistemas simultáneamente.

Se parte de un modelo de bloques separado por subsistemas (como es la filosofía de Simulink de Matlab), y en su interior se complementan con otros subsistemas, dada la complejidad del cálculo del flujo. El resultado final es un único bloque de modelo matemático para el cálculo del Flujo, como se puede ver en la Figura 26.



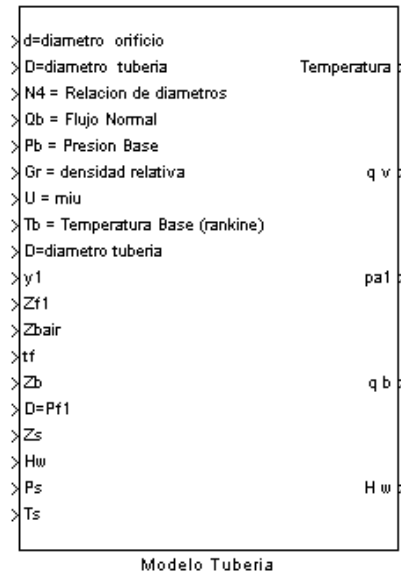


Figura 26. Bloque final del calculo del Flujo. Fuente: Autores.

En conjunto con el modelado de la tubería de gas y el de nivel, fue necesario la creación de varios modelos complementarios, específicamente para la simulación de la tubería y el nivel de liquido.

Estos modelos condensan el comportamiento en el tiempo de fenómenos como el aumento de nivel de liquido, el vaciado del tanque, la caída de presión por apertura de switch y de la válvula de salida y, por último, el modelo de presurización de la tubería con el empleo del compresor.

A continuación en la Figura 27 se pueden ver los bloques finales generados.

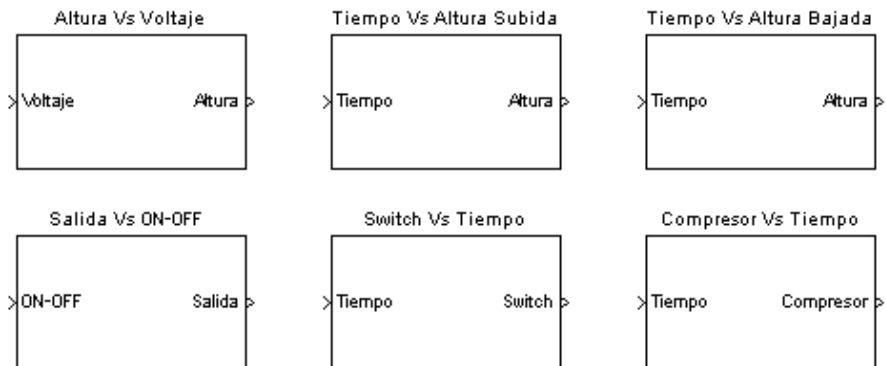


Figura 27. Bloques finales complementarios. Fuente: Autores.

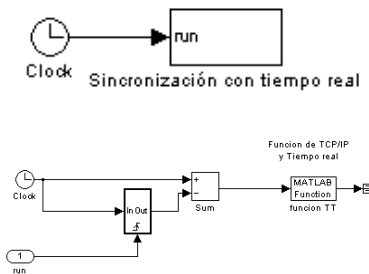




**Trabajo de Grado, 75 de 128**

Adicionalmente, se creó una rutina para lograr la sincronización del tiempo de simulación y el tiempo real, para lograr que los tiempos de los eventos visualizados sean acordes con los esperados en la realidad, y desligar los resultados de la simulación de la capacidad de computo del PC donde se ejecuta.

Este bloque se ve en detalle en la siguiente figura:



**Figura 28. Bloques de sincronización del tiempo real. Fuente: Autores.**

Más adelante se hablará de la otra función que tiene este bloque en la comunicación TCP/IP, de la cuál se tratará en el capítulo siguiente.

De esta manera queda definida la integración entre los modelos matemáticos y las rutinas de supervisión, simulación y visualización en los paquetes de software utilizados.





## 8. IMPLEMENTACION DE TCP/IP EN LABVIEW 7.0 Y EN MATLAB 6.5 PARA LA HERRAMIENTA DE REALIDAD VIRTUAL

### 8.1 INTRODUCCIÓN AL PROTOCOLO<sup>48</sup>

TCP/IP está compuesto por una pareja de protocolos: TCP (*Transmission Control Protocol*) y el IP (*Internet Protocol*).

*IP*: Es un protocolo *no orientado a conexión*; de esta forma, se usa el “menor esfuerzo” para hacer llegar los datos al destino, pero no garantiza que esto efectivamente suceda; es por esta razón que el protocolo no implementa ningún mecanismo para determinar si el paquete alcanza su destino o el orden de llegada e incluso no garantiza la integridad de los datos que efectivamente logren llegar.

Este protocolo es usado tanto en el origen como en el destino de la comunicación, que utiliza una red de paquetes conmutados; esto es, los datos son enviados a su destino a través de la red, por medio de bloques de información conocidos como paquetes o datagramas.

*TCP*: Es un protocolo orientado a conexión, Esto quiere decir que el protocolo es responsable de mantener información que garantice la transferencia de datos entre extremos de la red hasta la aplicación del usuario o en su defecto de un protocolo de nivel superior; esto lo hace mediante la confirmación de que el receptor esta listo para recibir nuevos paquetes de información.

Es un protocolo confiable, es decir que se confirma la llegada e integridad de los paquetes de información que se envían y, en caso de errores o perdidas, se reparan o reenvían. Asimismo, es de tipo *full duplex*, es decir, permite la transferencia de datos en ambas direcciones y al mismo tiempo (estación 1 ↔ estación 2).

El esquema de conexión TCP/IP entre dos estaciones finales se muestra en la Figura 29.

---

<sup>48</sup> MURHAMMER Martin, ATAKAN Orcun, BRETZ Stefan. International Technical Support Organization: TCP/IP Tutorial and Technical Overview. USA, 1998.



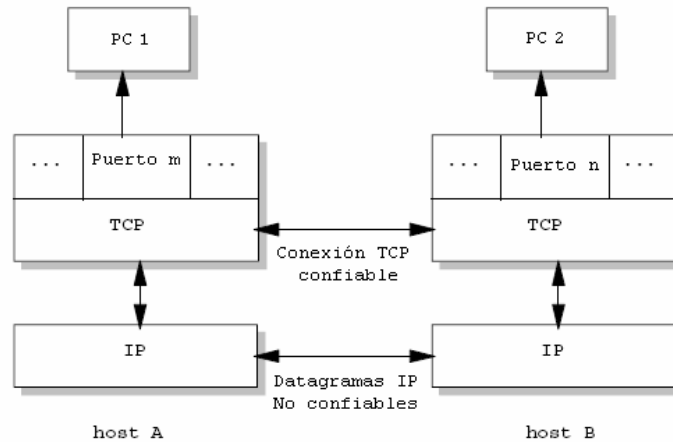


Figura 29. Esquema de Conexión TCP/IP entre dos estaciones. Fuente: TCP-IP IBM REDBOOK<sup>49</sup>.

### 8.1.1 Transferencia de datos de la lógica de supervisión –implementada en Labview- vía TCP/IP.

Las conexiones TCP se componen de tres etapas: establecimiento de conexión, transferencia de datos y fin de la conexión. Para establecer la conexión se usa el procedimiento llamado negociación en tres pasos (*3-way handshake*). Una negociación en cuatro pasos (*4-way handshake*) es usada para la desconexión. Durante el establecimiento de la conexión, algunos parámetros como el número de secuencia son configurados para asegurar la entrega ordenada de los datos y la robustez de la comunicación. A continuación se muestra como se implementan esta tres etapas en el paquete de software Labview 7.0

#### Establecimiento de la conexión - Negociación en tres pasos o Three-way handshake

En primer lugar, el archivo PRINCIPAL.vi, quien inicialmente es el *lado servidor* de la conexión, abre un socket<sup>50</sup> en el puerto 6340 y se queda a la escucha de nuevas conexiones. Es común referirse a esto como *apertura pasiva*.

<sup>49</sup> MURHAMMER Martin, ATAKAN Orcun, BRETZ Stefan. *Ibíd.*

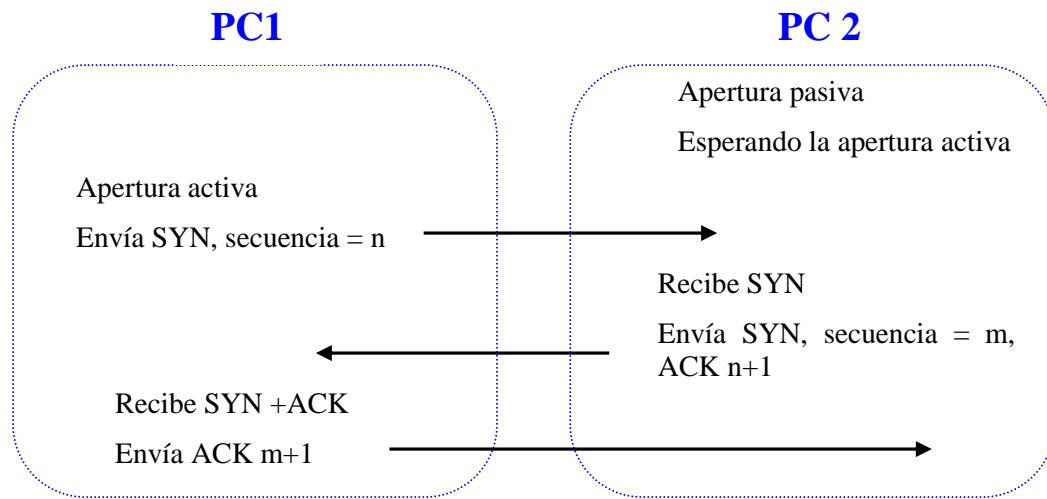
<sup>50</sup> El término Socket designa un concepto abstracto por el cual dos programas (posiblemente situados en computadoras distintas) pueden intercambiarse cualquier flujo de datos, generalmente de manera fiable y ordenada. Un socket queda definido por una dirección IP, un protocolo y un número de puerto.





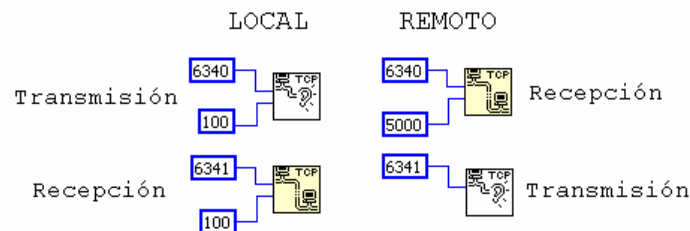
**Trabajo de Grado, 78 de 128**

Por su parte, cuando un operador remoto autorizado desea ejercer la supervisión, abre y ejecuta el programa RECEPCIÓN.vi, que en principio es el *lado cliente*; realiza una *apertura activa* del puerto 6340 enviando un segmento SYN inicial (Sincronismo para iniciar la secuencia) al lado servidor, como parte de la negociación en tres pasos. El lado servidor debe responder a la petición SYN válida con un paquete SYN/ACK (Reconocimiento). Finalmente, el cliente debería responderle al servidor con un ACK, completando así la negociación en tres pasos (SYN, SYN/ACK y ACK) y la fase de establecimiento de conexión en ambas direcciones (Esquema 10).



**Esquema 10. Secuencia del establecimiento de la conexión TCP/IP. Fuente: TCP-IP IBM REDBOOK.**

Nótese que la comunicación TCP/IP es secuencial, por lo que se implementó en Labview mediante estructuras de secuencia (*sequence structures*) como se verá en ilustraciones siguientes. En la Figura 30 se observan los bloques implementados en Labview para el establecimiento de la conexión.



**Figura 30. Bloque y puertos para el establecimiento de la comunicación TCP/IP en Labview. Fuente: Autores.**





---

**Trabajo de Grado, 79 de 128**

IMPORTANTE: Cualquiera de las dos estaciones (principal y remota) actúan como lado servidor o como lado cliente en su momento, depende de quién este enviando o recibiendo datos.

**Transferencia de datos<sup>51</sup>**

Durante la etapa de transferencia de datos, una serie de mecanismos claves determinan la fiabilidad y robustez del protocolo. Entre ellos están incluidos el uso de un número de secuencia para ordenar los segmentos TCP recibidos y detectar paquetes duplicados, sumas de comprobación (*checksums*) para detectar errores, así como reconocimientos y temporizadores para detectar pérdidas y retrasos.

Durante el establecimiento de conexión TCP, los números iniciales de secuencia son intercambiados entre las dos entidades TCP. Siempre hay un par de números de secuencia incluidos en todo segmento TCP, referidos al número de secuencia y al número de reconocimiento. A través del uso de estos números, TCP puede pasar los segmentos recibidos en el orden correcto dentro del flujo de bytes a la aplicación receptora.

Los datos que se envían al operador remoto son: fs, Pf1, Tf, Qv, TCPIP1<sup>52</sup>, Hw, sp, TCPIP2 y ni, los cuales se condensan en una sola cadena de caracteres tipo string, por lo que el programa de recepción debe dividir adecuadamente esta cadena recibida y convertir cada dato a su formato original (numérico, booleano, etc.). Lo anterior se hizo en dos secuencias, ya que no se pudo realizar en una sola, debido a que se generaba un error de flujo simultaneo excesivo de datos, tal como se indica en la Figura 31.

Por su parte, los datos que se envían del operador remoto al principal son: openvr, opendr, msw y P (descritos en el capítulo anterior), pudiendo recibirse estos en una sola secuencia -Figura 32-.

Ahora bien, recuérdese que, mediante el puerto 6343, se envían datos a la herramienta de realidad virtual para la visualización desde esta herramienta, siguiendo esta misma estructura secuencial (Figura 33).

**Fin de la conexión**

La fase de finalización de la conexión usa una negociación en cuatro pasos (*4-way handshake*), terminando la conexión desde cada lado independientemente. Cuando uno de los dos extremos de la conexión desea parar su "mitad" de conexión transmite un paquete FIN, que el otro interlocutor asentirá con un ACK. Por tanto, una desconexión típica requiere un par de segmentos FIN y ACK desde cada lado de la conexión.

---

<sup>51</sup> MURHAMMER Martin, ATAKAN Orcun, BRETZ Stefan. *Ibíd.*

<sup>52</sup> Recuérdese que TCPIP1 y TCPIP2 son números que llevar implícitos datos booleanos, como se detalla en los diagramas de flujo del capítulo 4.





Trabajo de Grado, 80 de 128

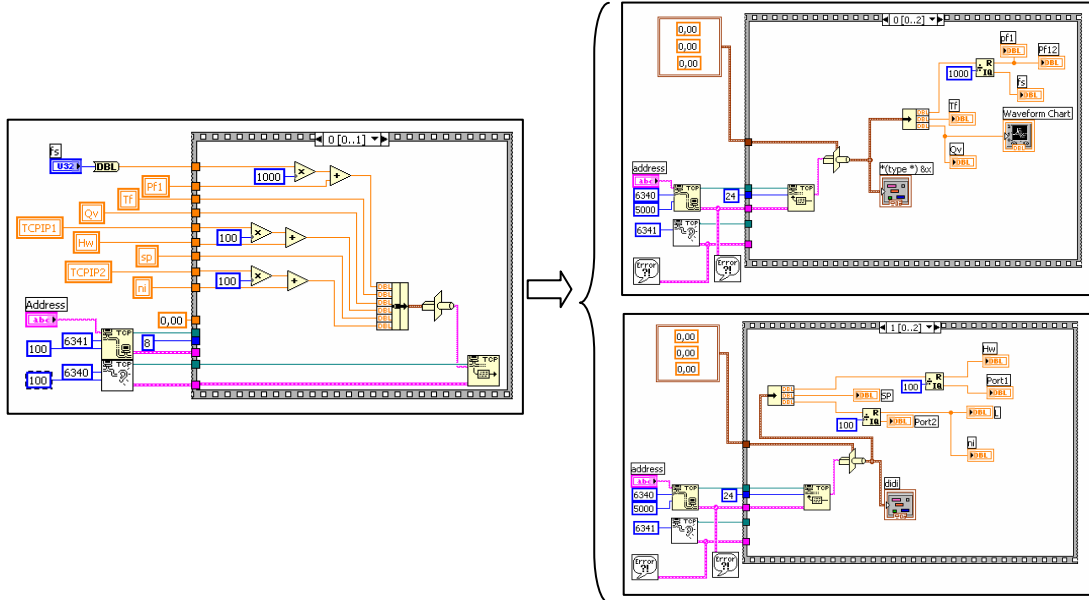


Figura 31. Transferencia de datos PRINCIPAL – RECEPCIÓN. Fuente: Autores.

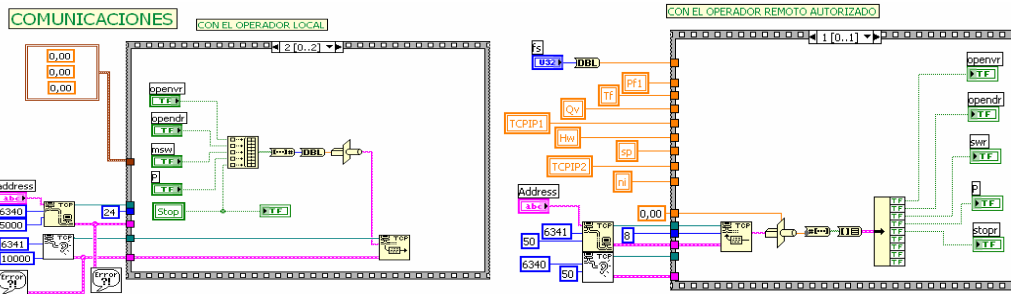


Figura 32. Transferencia de datos RECEPCIÓN – PRINCIPAL. Fuente: Autores.

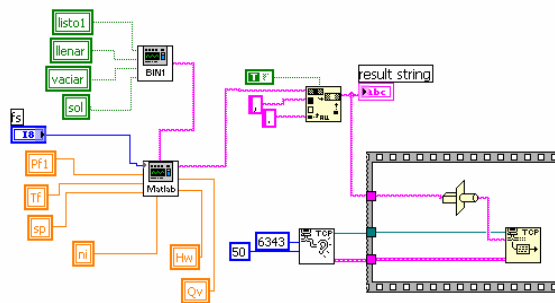


Figura 33. Transferencia de datos lógica de supervisión – visualización Realidad Virtual





Una conexión puede estar "medio abierta" en el caso de que uno de los lados la finalice pero el otro no. El lado que ha dado por finalizada la conexión no puede enviar más datos pero la contraparte si podrá.

### Puertos TCP<sup>53</sup>

TCP usa el concepto de número de puerto para identificar a las aplicaciones emisoras y receptoras. Cada lado de la conexión TCP tiene asociado un número de puerto (de 16 bits sin signo, con lo que existen 65536 puertos posibles) asignado por la aplicación emisora o receptora. Los puertos son clasificados en tres categorías: bien conocidos, registrados y dinámicos/privados. Los puertos bien conocidos son asignados por la Internet Assigned Numbers Authority (IANA), van del 0 al 1023 y son usados normalmente por el sistema o por procesos con privilegios. Las aplicaciones que usan este tipo de puertos son ejecutadas como servidores y se quedan a la escucha de conexiones. Algunos ejemplos son: FTP (21), SSH (22), Telnet (23), SMTP (25) y HTTP (80). Los puertos registrados son normalmente empleados por las aplicaciones de usuario de forma temporal cuando se conectan con los servidores, pero también pueden representar servicios que hayan sido registrados por un tercero (rango de puertos registrados: 1024 al 49151). Los puertos dinámicos/privados también pueden ser usados por las aplicaciones de usuario, pero este caso es menos común. Los puertos dinámicos/privados no tienen significado fuera de la conexión TCP en la que fueron usados (rango correspondiente: 49152 al 65535).

## 8.2 IMPLEMENTACIÓN DE TCP/IP EN SIMULINK DE MATLAB

Para la comunicación por TCP/IP con LabView fue necesaria la introducción de una toolbox<sup>54</sup>, cuya licencia opera bajo los estándares de software GNU<sup>55</sup> y que se encuentra contenida en el bloque de la Figura 28. A dicha toolbox fue necesario hacerle ciertas modificaciones para integrarlo al modelo de manejo de tiempo real.

En resumen, el código modificado quedó como se puede ver en la Figura 34. Este código limita las capacidades de actualización de las variables, pero igualmente le da la capacidad para adquirir datos de la red, siendo posible la visualización e incluso, con algunos cambios, la transmisión de datos para lograr una supervisión sobre las variables del proceso.

---

<sup>53</sup> MURHAMMER Martín, ATAKAN Orcun, BRETZ Stefan. *Ibíd.*

<sup>54</sup> RYDESÄTER Peter. FILE EXCHANGE, En: MATLAB Central. Pagina web versión html. Disponible en internet:  
<<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/loadFile.do?objectId=345&objectType=file>>

<sup>55</sup> Tipo de licencia de uso, que defiende 4 libertades del usuario de software. Para mas información visitar: <http://www.gnu.org/home.es.html>.





Una vez la estrategia de comunicación queda definida, se procede en el capítulo siguiente a describir el entorno de realidad virtual en 3D, sobre el cual se hará simulación y visualización del proceso.

```
function [datosx] = salidadato(tsim)
conecta=pnet('tcpconnect','127.0.0.1',6343);
pnet(conecta,'setwritetimeout',0.6);
pnet(conecta,'setreadtimeout',0.6);
dato='';
while length(dato) ==0
    dato=pnet(conecta,'read');
end
pnet(conecta,'close');
dato;
largo=length(dato);
datos(1)=eval(dato(1));
datos(2)=eval(dato(2));
datos(3)=eval(dato(3));
datos(4)=eval(dato(4));
inicio=6;
casilla=4;
for i=6:largo
    if dato(i)=='@'
        casilla=casilla+1;
        fin=i-1;
        datos(casilla)=eval(dato(inicio:fin));
        inicio=i+1;
    end
end
datosx=datos;
```

Figura 34. Código de comunicación TCP/IP y tiempo real. Fuente: Autores

## 9. DESCRIPCION DEL ENTORNO DE REALIDAD VIRTUAL

El desarrollo del Ambiente de Realidad Virtual sobre MatLab, le dará la capacidad a los estudiantes de acceder remotamente a una simulación del Laboratorio de Instrumentación y, de esta forma, preparar con anticipación las prácticas del mismo, previniendo situaciones críticas que puedan poner en riesgo la integridad del sistema.

Tanto en la Figura 35 como en la Figura 36, en los bloques de realidad virtual, se define el archivo \*.wrl que modela el espacio del laboratorio. En él, se encuentran todos los componentes fundamentales, como las tuberías, luces, texturas, botones etc.; además, se definen las características necesarias para la interacción con los otros bloques del modelo de Simulink.





Trabajo de Grado, 83 de 128

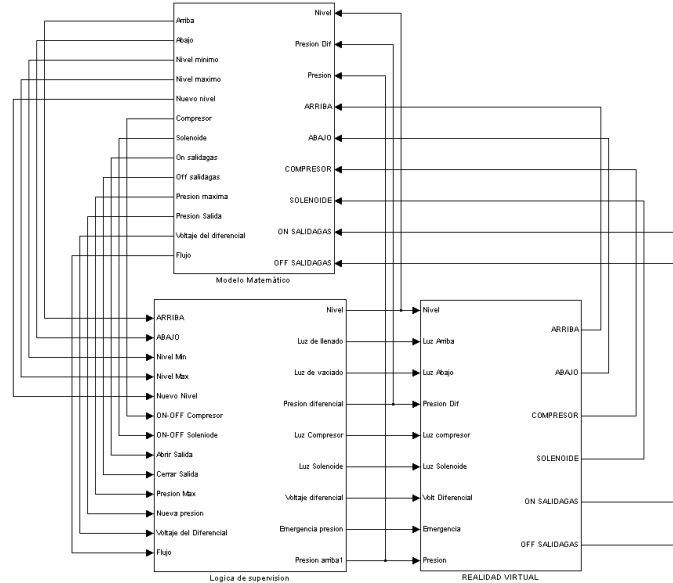


Figura 35. Diagrama general de simulación sobre Matlab. Fuente: Autores

De la anterior figura, se puede observar que se tienen entradas y salidas del bloque de realidad virtual, lo que garantiza una interacción con el modelo, a partir de la interfase de usuario (Figura 40).

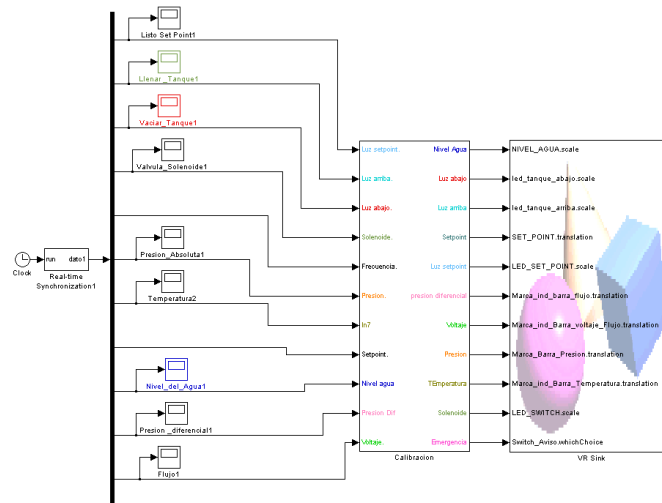


Figura 36. Diagrama general de Visualización sobre Matlab. Fuente: Autores

Dentro del bloque de realidad virtual, se pueden encontrar los sub-bloques donde se definen las entradas y salidas, así como el archivo \*.wrl de la interfaz de usuario.



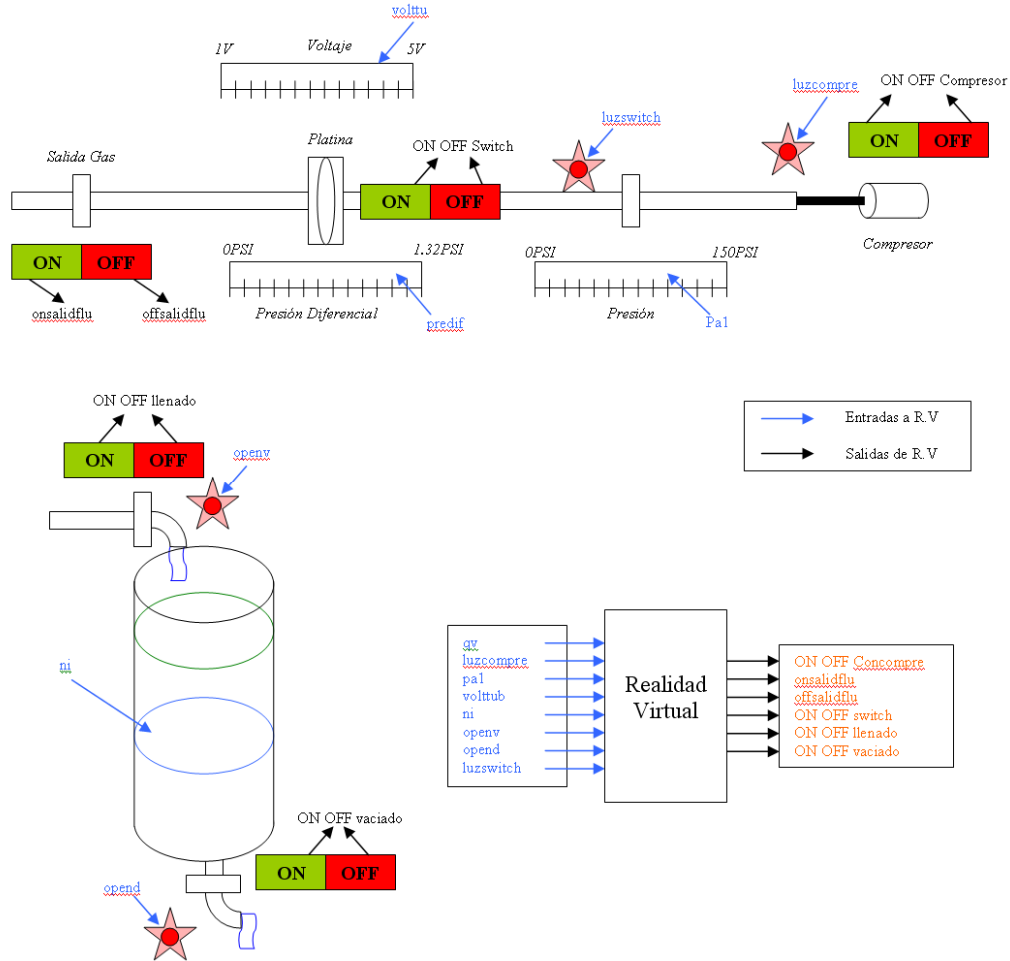


Figura 37. Diagrama conceptual de entradas y salidas para simulación. Fuente: Autores.

De acuerdo con la Figura 37, se tiene el concepto general de la interacción entre el usuario y la interfaz; esta permite la modificación de los parámetros de la simulación; es decir, el usuario puede tomar decisiones sobre las acciones siguientes a la simulación.





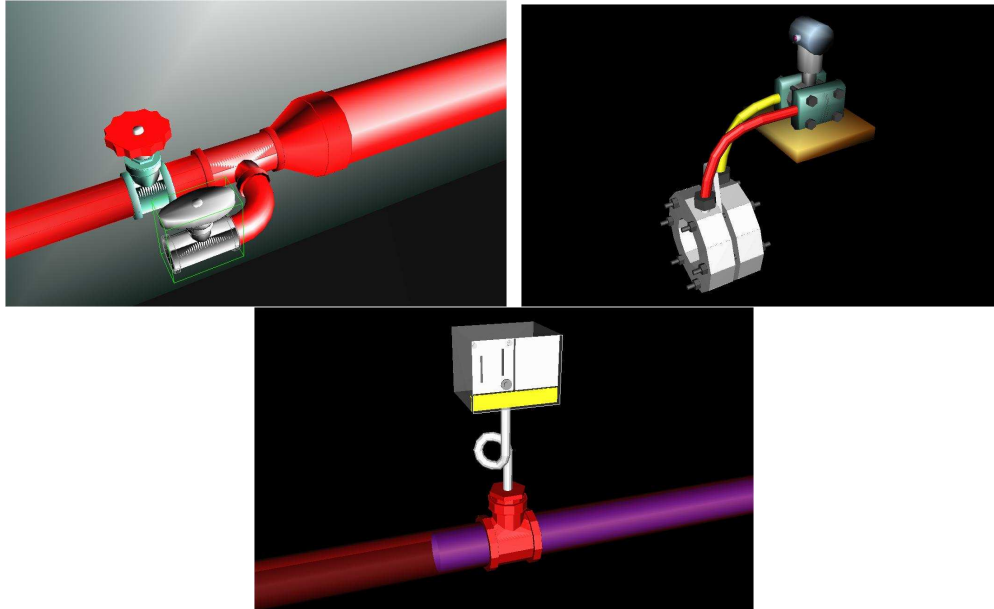


Figura 39. Detalles del instrumental en el entorno de Realidad Virtual. Fuente: Autores.

Se puede ver la calidad en los detalles de los anteriores modelos, pero esto hace que se necesiten más recursos computacionales, de tal forma que se tiene escogió un modelo intermedio de detalle.

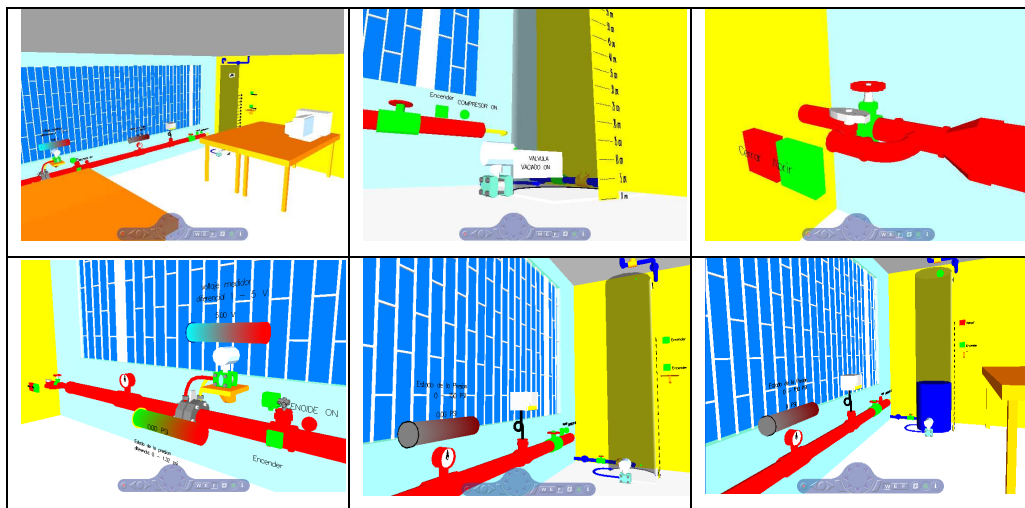


Figura 40. Detalles de la interfase de usuario de Realidad Virtual. Fuente: Autores.

En la Figura 40 se ve, en la parte de debajo de las imágenes, un panel de navegación, con él se puede mover el usuario, con la ayuda del Mouse y/o el teclado de flechas, esto es una cuestión de practica, más que de instrucciones precisas.





## 10. PRUEBAS REALIZADAS

En este capítulo se resumen las pruebas realizadas como parte de la preparación y comprobación del trabajo realizado.

### 10.1 PRUEBAS DE CONECTIVIDAD TCP/IP:

Para algunas de estas pruebas fue necesaria la solicitud y certificación de un punto de Red en el laboratorio (IP asignada: 192.168.45.121). La Figura 41 es una imagen del proceso de certificación y configuración del punto de red solicitado para el laboratorio.



Figura 41 Configuración y configuración del punto de red. Fuente: Autores

Lado servidor	Lado cliente	Resultado
Labview (local)	Labview (local)	Positivo
Labview (local)	Labview (remoto – red LAN)	Positivo
Labview (local)	Labview (local) y Matlab (local)	Positivo
Labview (local)	Labview (remoto red LAN) y Matlab (remoto red LAN)	Positivo

Tabla 15 Resumen de las pruebas realizadas por TCP/IP. Fuente: Autores.

### 10.2 PRUEBAS DE CONECTIVIDAD DEL PUERTO SERIAL

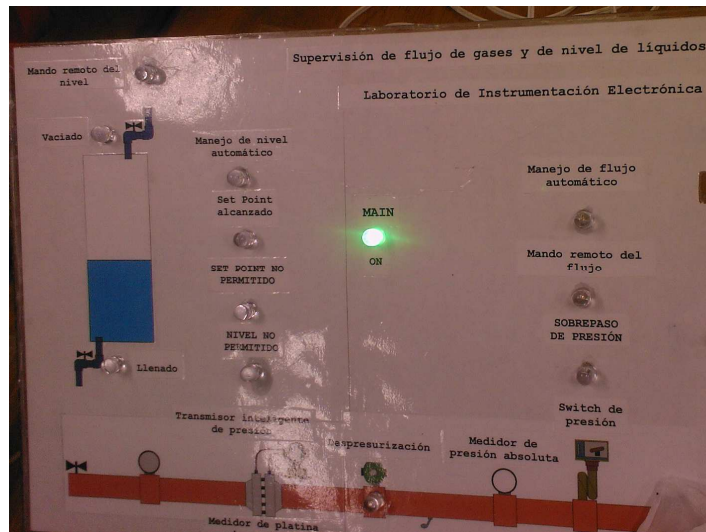
La Figura 42 es una imagen del prototipo de comunicación serial desarrollado para emular la comunicación con todos el sistema de instrumentación del laboratorio. En





**Trabajo de Grado, 88 de 128**

ella se puede apreciar detalles de los circuitos correspondientes al microcontrolador, el MAX-232 y el sistema de relés para el accionamiento de las válvulas solenoides.



**Figura 42. Prueba de comunicación serial con un prototipo. Fuente: Autores**

Lado servidor TCP/IP	Lado cliente TCP/IP	Interfaz de comunicación serial	Resultado
Labview (local)	Labview (local)	RS-232	Positivo
Labview (local)	Labview (remoto – red LAN)	RS-232	Positivo
Labview (local)	Labview (local) y Matlab (local)	RS-232	Positivo
Labview (local)	Labview (remoto red LAN) y Matlab (remoto red LAN)	RS-232	Positivo

**Tabla 16. Resumen de las pruebas realizadas por RS-232. Fuente: Autores.**





## 11. OBSERVACIONES, CONCLUSIONES

---

### 11.1 CONCLUSIONES

- El diseño e implementación del sistema de gestión, respondió a las necesidades actuales del laboratorio y a los recursos disponibles, implementando soluciones sencillas pero prácticas, enfocadas a brindar la mejor experiencia al usuario.
- Con este trabajo, se confirma una vez más que, cualquier herramienta software que pueda reemplazar en su totalidad a una herramienta hardware para la solución de un problema, dispone de todas las ventajas de la competitividad. En este trabajo, por ejemplo, el software de supervisión está en la capacidad de sustituir el switch de presión mediante una señal controlada por el usuario para activar la válvula solenoide.
- Los recursos físicos del Laboratorio de Instrumentación de la E3T, permitieron el diseño y la implementación de un sistema de gestión, el cual se presenta como un conjunto o combinación de determinados niveles SCADA, que resulta siendo un notable punto de partida para la modernización pedagógica en las áreas de Automatización Industrial, Instrumentación Electrónica y Redes de Datos en la Universidad Industrial de Santander.
- La estructura modular independiente e interrelacionada, los protocolos e interfaces de comunicación utilizados para el acceso a los datos y la fácil adaptación de dispositivos de diversas dimensiones y capacidades, son entre otras, razones muy sólidas por las cuales se puede asegurar que el sistema de gestión fue diseñado e implementado para ser escalable como herramienta pedagógica.
- La linealidad de los transmisores de presión, el rango de medida y la claridad en las leyes físicas y en las normativas de medición establecidas, permitieron obtener modelos matemáticos simplificados de su funcionamiento, para hacer factible la simulación en realidad virtual de su comportamiento.
- Debido a su generalizada implementación, así como en la confiabilidad en la transferencia de datos, se utilizó el protocolo TCP/IP como base para el módulo de comunicación del sistema de gestión planteado. Gracias a TCP/IP, y teniendo en cuenta la topología y los alcances de las redes de datos, usuarios remotos autorizados pueden acceder a los recursos del laboratorio para la supervisión y sobre la plataforma de LabView y para visualización sobre Realidad Virtual.





### Trabajo de Grado, 90 de 128

- Se desarrolló una plataforma de usuario sencilla de manejar, en donde el sistema queda abierto a nuevas actualizaciones y al aumento en la complejidad de los procesos supervisados.
- La plataforma virtual presenta una experiencia enriquecedora donde se pueden manejar visualmente los conceptos de funcionamiento de los procesos, al tener la capacidad de simular un comportamiento y presentarlo en una interfase que emula un ambiente reconocido por el usuario.
- Aunque se detectaron limitaciones para la programación sobre realidad virtual con MatLab, esta continua siendo una excelente herramienta para modelar y emplear en conjunto con Simulink, al poder representar modelos matemáticamente complejos sobre una visualización 3D.
- Por medio del sistema de gestión implementado, el usuario u operador presente en el laboratorio está en la capacidad de:
  - Supervisar las variables de proceso, es decir, mantener tanto la presión absoluta de la tubería (y por ende el flujo) como el nivel de líquido, en un rango de valores seguros y conforme a sus necesidades.
  - Visualizar en tiempo real los cambios en las variables de proceso (cuantificación del aumento o disminución del flujo de gas y del nivel de líquido) y comprobar que lo que se observa en la interfaz de usuario corresponda fielmente con lo que sucede en la realidad.
  - Simular el comportamiento físico de los dispositivos de medición de flujo y nivel de líquidos.
  - Autorizar a un usuario u operador remoto para que éste supervise y tome el mando de los procesos.

## 11.2 OBSERVACIONES

- Dentro de un sistema de instrumentación, los medidores primarios son aquellos que modifican la variable física; en este caso particular, corresponde a la platina de orificio, que genera una presión diferencial. El medidor secundario toma esa diferencia de presión y la convierte en una señal eléctrica, que de acuerdo con los estándares, va de 1-5 Vdc.
- Debido a su condición de fluido gaseoso, el aire genera una presión diferencial muy pequeña en la tubería (del orden de 1 PSI). Por esta razón, el transmisor diferencial de presión debe estar calibrado adecuadamente para poder generar señales de tensión eléctrica
- La comunicación serial por medio de la interfaz RS-232 fue la seleccionada para interconectar el sistema de gestión con el sistema de adquisición planteado, por varias razones:
  - La disposición de esta interfaz por la gran mayoría de ordenadores.





---

**Trabajo de Grado, 91 de 128**

- La gran cantidad de documentación técnica sobre este tipo de comunicación y de los detalles de su implementación.
  - La satisfacción de los requerimientos de la velocidad de la transferencia de datos.
  - Un costo de implementación bajo.
  - La facilidad de interacción con el paquete de software de supervisión.
- Existen formas más eficientes de comunicación, simulación, supervisión etc., pero con las actuales estrategias implementadas, se logra cumplir con los objetivos planteados y asegurar una compatibilidad con futuras actualizaciones.
  - Para el acceso al sistema de gestión, por parte de un operador externo a la red de la universidad, es necesario que se cuente con una dirección IP pública, en la estación del operador local, que se encuentra en la intranet, es decir, que desde el exterior se pueda tener acceso al número IP público asignado a la estación del operador local y en los puertos especificados; asimismo, una adecuada configuración de los dispositivos de enrutamiento entre estas dos estaciones.
  - A la estación local fue asignada una dirección pública por la División de Servicios de Información de la Universidad (IP: 200.21.228.134), junto con la habilitación de los puertos 6340-6344, con el fin de poder acceder al sistema de gestión desde una ubicación externa a la red local. Desafortunadamente, las pruebas realizadas por un operador remoto externo no fueron satisfactorias, posiblemente por las siguientes razones:
    - El sistema desarrollado sobrepasa las políticas de seguridad de red, implementadas en la universidad.
    - Los dispositivos de enrutamiento de la red de la universidad no posibilitan la comunicación por los puertos configurados.
    - Excesivo tráfico en la red.
    - Uso inadecuado de los recursos de la red, como por ejemplo la asignación arbitraria de direcciones IP por parte de personas no autorizadas.
  - Las razones para elegir a Labview 7.0 como el paquete de software más adecuado para integrar los modelos matemáticos con la lógica de supervisión, así como a Matlab 6.5 para el desarrollo de la herramienta de Realidad Virtual, fueron las siguientes:
    - Disponibilidad en la UIS
    - Facilidad en la programación





---

**Trabajo de Grado, 92 de 128**

- Tiempo de aprendizaje
  - Conocimiento del software por parte de los autores
  - Escalabilidad
  - Facilidad para implementar GUI
  - Facilidad de la rutina de adquisición de datos
  - Herramientas para simulación y realidad virtual
  - Sistemas operativos que lo soportan
  - Hardware mínimo requerido
- La precisión en el modelo aceptado por las normas AGA3 para el cálculo del flujo a partir del uso de medidores de platina de orificio, conlleva a una rigurosa implementación, que si bien implica un complicado modelado matemático, trae a la vez como retribución una fiabilidad en los factores que modifican su comportamiento y en los datos calculados.
  - El uso de una estructura modular le permite a futuros proyectos ampliar las capacidades del actual, al encapsular cada funcionalidad y dejar un ambiente de programación de fácil entendimiento, además de una transparencia para el usuario común, que no necesita conocer su programación para poderlo emplear y aprovechar sus características.
  - A la salida de la válvula de llenado del tanque de agua se le adaptó un fragmento de tubo PVC de 50cm., cercano a la pared del tanque, con el objetivo de suavizar la caída de agua y así poder observar mejor el nivel de líquido para su correspondiente medición.
  - El modelado matemático del presente trabajo es una primera visión del comportamiento físico real de los procesos y hace parte del esfuerzo conjunto con un nuevo proyecto para la implementación de los sistemas de instrumentación y adquisición.
  - La toolbox de realidad virtual en Matlab 6.5 se encuentra limitada a 8 salidas de realidad virtual, es decir, solo pueden capturar 8 parámetros provenientes del usuario.
  - La posibilidad de controlar procesos remotamente deja abierto un gran espectro de nuevos proyectos, tendientes a explotar los recursos actuales de los que se dispone y mejorando la visión de las capacidades de las nuevas tecnologías.





## 12. RECOMENDACIONES

---

### 12.1 Para los operadores locales y remotos

- Asegurarse de tener correctamente instalado el software de supervisión (Labview 7.0) tanto en la estación local como en la remota.
- Dado que la comunicación a través de TCPIP se realiza por puertos no asignados, es necesario confirmar que en primer lugar el Firewall de Windows permita la comunicación por ellos, (Esto se realiza incluyendo los puertos 6340, 6341 y 6343 dentro de la lista de excepciones de puertos sobre TCP del Firewall de windows) además hace falta la comprobación que los routers o switches no posean algún tipo de programación o negación de servicios por estos puertos (Comunicarse con su administrador de red). Lo anterior es necesario realizarlo tanto en el PC residente del sistema de gestión como en el del usuario remoto.
- Es recomendable tener cuidado de presentar una desconexión accidental del cable serial mientras se transmiten datos, puesto que el software de Labview puede congelar su funcionamiento, siendo necesario un reinicio del PC, además de la posible pérdida de datos.

### 12.2 Para la herramienta de Realidad Virtual

- Realizar la instalación de MatLab 6.5 junto con la toolbox de Realidad Virtual, así como la ejecución del comando 'vrinstall' en la línea de comandos (se sugiere la elección de la opción OpenGL), para realizar la instalación del visor de realidad virtual incluido en el software, y tener acceso a la visualización y la simulación.
- Copiar la totalidad de los archivos contenidos en la carpeta 'RV' contenida en el CD de este proyecto en la carpeta 'work' de MatLab.
- Debido al alto grado de exigencia de los recursos físicos por parte de la aplicación sobre realidad virtual, se sugiere su ejecución en un equipo actualizado, teniendo en cuenta como punto principal los recursos de memoria de video.

### 12.3 Para actualizaciones, mejoras y proyectos futuros

- Implementar la normatividad ISA en cuanto a la nomenclatura de procesos y dispositivos, con el objeto de hacerlo mas acorde con la realidad industrial, sin dejar de lado la visión académica.





---

**Trabajo de Grado, 94 de 128**

- Hacer una revisión técnica del switch de presión y de las válvulas solenoides de la tubería y del desagüe del tanque, así como un mantenimiento periódico del sistema de instrumentación en general, para poder comprobar en la realidad el comportamiento de los procesos.
- Ampliar el sistema de instrumentación que se incorpore al sistema de gestión.
- El uso de una red de datos congestionada presenta retos para la comunicación fiable y para las necesidades de supervisión de procesos delicados o con altas tasas de muestreo, por tal motivo se recomienda hacer hincapié en que en la industria se usa una red dedicada exclusivamente para este servicio, a diferencia del medio pedagógico.
- Proponer un diseño con su correspondiente implementación de los sistemas de instrumentación y adquisición, teniendo en cuenta las recomendaciones vistas en el capítulo 5, así como su integración con el sistema de gestión implementado.
- Es posible explorar otras capacidades de comunicación propias del software, que permitan la incorporación de nuevas características al sistema de gestión ya desarrollado.(P.E: Chat entre usuario remoto y local)
- Si bien la comunicación serial es suficiente para los propósitos educativos, es fácilmente implementable una comunicación USB que ampliaría sus capacidades y compatibilidades.
- Los problemas con la red plantean la necesidad de que sus políticas de seguridad sean revisadas frente a las nuevas expectativas de servicios y aplicaciones.





### 13. BIBLIOGRAFÍA

---

[1] AMAYA J .Alejandro, Diapositivas de instrumentación electrónica, Universidad Industrial de Santander, 2006

[2] ARTEAGA Alwin, URIBE Cesar, RUEDA Wilfred. “Controlador lógico programable TSX-nano, módulos de entrenamiento y prácticas de laboratorio. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2001

[3] COLOMER, Johan, MELENDEZ Joaquín, AYZA Jordi. Sistemas de supervisión. Barcelona: CEA-ICFA, 2000.

[4] CREUS SOLÉ, Antonio. Instrumentación Industrial. Marcombo, ediciones técnicas, 2005.

[5] DE LA FUENTE, Silva, Leopoldo, TCP, Disponible por Internet : <URL: <http://www.monografias.com/trabajos7/tcp/tcp.shtml>

[6] DICCIONARIO DE LA LENGUA ESPAÑOLA. En: Gestión [en línea]. Página Web, versión HTML. Disponible en Internet: <<http://www.wordreference.com/definicion/gesti%F3n>>

[7] DIESTEFANO, Mario. Comunicaciones en entornos industriales. Facultad de ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina, 2005.

[8] ECOPETROL, Vicepresidencia de Suministro y Mercadeo. Manual Único de Medición, cap. 14: Medición de gas natural. Bogotá, 2006.

[9] FRANCO GARCÍA Ángel. Física con ordenador. En: Curso interactivo de física por Internet [en línea] Página Web, versión HTML. Disponible en Internet: <<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/fluidos/dinamica/vaciado/vaciado.htm>>





---

**Trabajo de Grado,** 96 de 128

[10] GARCIMARTIN M. Ángel. Sistemas de medida y adquisición de datos. Universidad de Pamplona, España: 2003.

[11] GRUPO DE INVESTIGACIÓN OCEANBUOYS. Telemetría marítima en las boyas de monitoreo oceánico "galatea" (omb-2001), y el sistema vms (vessel monitoring system), usando los scada oceánicos "triton" (sco-2001) abordo de barcos pesqueros. En: Implementación de un Sistema Oceánico SCO-2001 [En línea]. Página Web versión HTML. Disponible en Internet: <[http://www.geocities.com/ocean\\_buoys/3ze.html](http://www.geocities.com/ocean_buoys/3ze.html)>

[12] Honeywell Process Solutions. Pressuretrol Controllers: specification and model selection guide. Phoenix, Arizona: Honeywell International Inc., 2007.

[13] Honeywell Process Solutions. ST3000 Smart pressure Transmitter: specification and model selection guide. Phoenix, Arizona: Honeywell International Inc., 2007

[14] MENDIBURU D. Henry. Instrumentación virtual Industrial. Lima: INDECOPI-PERU., 2006

[15] MORA CRIOLLO, Carlos Alberto. Adquisición y control de datos de un sistema de baja presión. Tesis de grado. Bogotá: UNAL, 2004.

[16] MORENO V. Ignacio. Apuntes de instrumentación electrónica. Área de tecnología electrónica, 2004.

[17] MURHAMMER Martin, ATAKAN Orcun, BRETZ Stefan. International Technical Support Organization: TCP/IP Tutorial and Technical Overview. USA, 1998.

[18] PORTER, Michael. Estrategia y Ventaja Competitiva. Barcelona: Ediciones Deusto, 2006. Michael M. Porter es Bishop William Laurence University Professor en la Harvard Business School.

[19] RYDESÄTER Peter. FILE EXCHANGE, En: MATLAB Central. Pagina web versión html. Disponible en internet:





<<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/loadFile.do?objectId=345&objectType=file>>

[20] SAYAGO, Sandra Milena. Planeación e Implementación del Laboratorio de Instrumentación Electrónica de la E3T: Trabajo de grado. UIS. Bucaramanga, 2001

[21] SERWAY, Raymond. Física, volumen 1. Nueva York: McGrawHill, 2003.

[22] WIKIMEDIA FOUNDATION INC. En: Escalabilidad [en línea]. Página Web, versión HTML. Disponible en Internet: <<http://es.wikipedia.org/wiki/Escalabilidad>>

[23] WIKIMEDIA FOUNDATION INC. En: Interfaz RS-232 [en línea]. Página Web, versión HTML. Disponible en Internet: <<http://es.wikipedia.org/wiki/RS-232>>

[24] WIKIMEDIA FOUNDATION INC. En: Sistemas de gestión de bases de datos [en línea]. Página web, versión HTML. Disponible en Internet: <[http://es.wikipedia.org/wiki/Sistema\\_de\\_gestión\\_de\\_base\\_de\\_datos](http://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_de_gestión_de_base_de_datos)>.

[25] WIKIMEDIA FOUNDATION INC. En: Protocolo de Internet [en línea]. Página web, versión HTML. Disponible en Internet: <[http://es.wikipedia.org/wiki/Protocolo\\_IP](http://es.wikipedia.org/wiki/Protocolo_IP)>





## 14. ANEXO A. FUNDAMENTOS DE MEDICIÓN DE CAUDAL EN GASES Y DE NIVEL EN LÍQUIDOS EN EL ÁMBITO INDUSTRIAL

---

### 14.1 CAUDAL

#### 14.1.1 Definición

El caudal puede definirse *como el movimiento de un fluido (líquidos o gases) causado por la diferencia de presiones, con respecto al tiempo*<sup>56</sup> –dimensionalmente  $[L^3/T]$ -. De manera específica, el caudal o flujo volumétrico *es el que se mide en unidades de volumen, como galones por minuto (GPM), barriles por hora (BPH), pies cúbicos por hora (ft<sup>3</sup>/h), etc*<sup>57</sup>.

En todo proceso, se espera que el flujo sea o pueda hacerse laminar. En este tipo de flujo, *las partículas se mueven siguiendo trayectorias regulares, fluyendo uniformemente en capas o estratos. Las porciones de flujo se deslizan unas sobre otras como si fueran láminas*<sup>58</sup>.

#### 14.1.2 Importancia de la medición de caudal

El flujo es una de las principales variables que se encuentran en todo tipo de industria, es así que la tecnología ha mejorado los métodos conocidos y buscado alternativas para encontrar medidas más exactas, precisas y confiables.

El objetivo de medir un flujo obedece a las necesidades del control de los procesos, ya sean continuos, semicontinuos o discontinuos (batch). *Si se conoce el valor del flujo, se puede evaluar una situación operacional y hacer los correctivos adecuados*<sup>59</sup>.

---

<sup>56</sup> SAYAGO, Sandra Milena. Planeación e Implementación del Laboratorio de Instrumentación Electrónica de la E3T: Trabajo de grado. UIS. Bucaramanga, 2001

<sup>57</sup> SAYAGO, Sandra Milena. Planeación e Implementación del Laboratorio de Instrumentación Electrónica de la E3T, Ibíd.

<sup>58</sup> SAYAGO, Sandra Milena. Planeación e Implementación del Laboratorio de Instrumentación Electrónica de la E3T, Ibíd.

<sup>59</sup> SAYAGO, Sandra Milena. Planeación e Implementación del Laboratorio de Instrumentación Electrónica de la E3T, Ibíd.





### 14.1.3 Tipos de medición de caudal

Existen varios métodos para medir el caudal según sea el tipo de caudal volumétrico o másico deseado. Entre los transductores más importantes figuran los siguientes<sup>60</sup>:

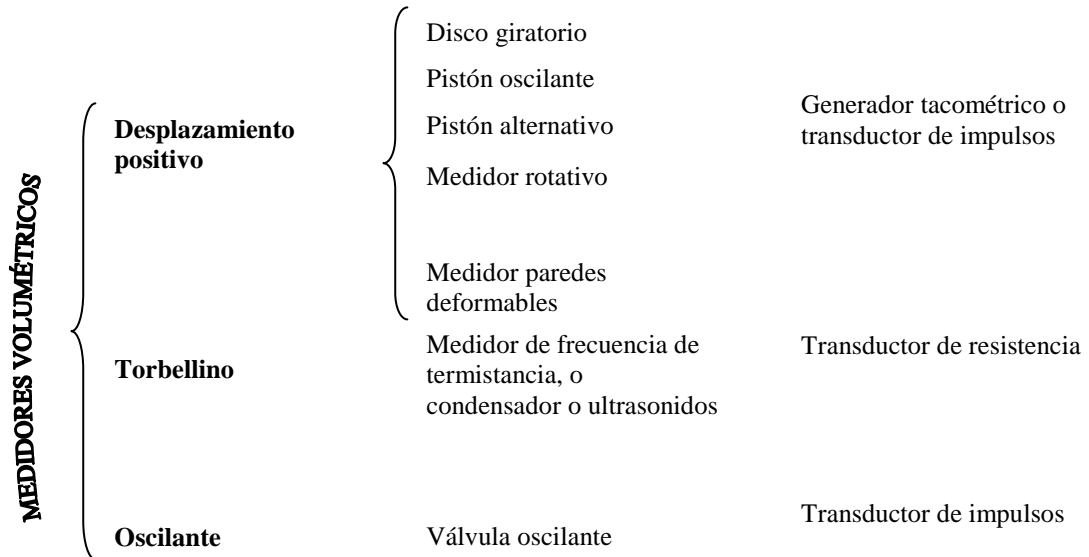
	SISTEMA	ELEMENTO	TRANSMISOR
<b>MEDIDORES VOLUMÉTRICOS</b>	<b>Presión diferencial</b>	Platina de orificio	Conectados a tubo U O a elemento de fuelle O de diafragma
		Tobera	
		Tubo Venturi	
		Tubo Pitot	
		Tubo Annubar	
<b>Área variable</b>		Rotámetro	Equilibrio de movimientos Potenciómetro
	<b>Velocidad</b>	Vertedero con flotador en canales abiertos	Potenciométrico
Turbina		Piezoelectrico	
<b>Fuerza</b>		Placa de Impacto	Equilibrio de fuerzas Galgas extensiométricas
<b>Tensión inducida</b>		Medidor magnético	Convertidor potenciométrico

Esquema 11 ANEXO Clasificación de los medidores de caudal. Fuente AMAYA J .Alejandro<sup>61</sup>

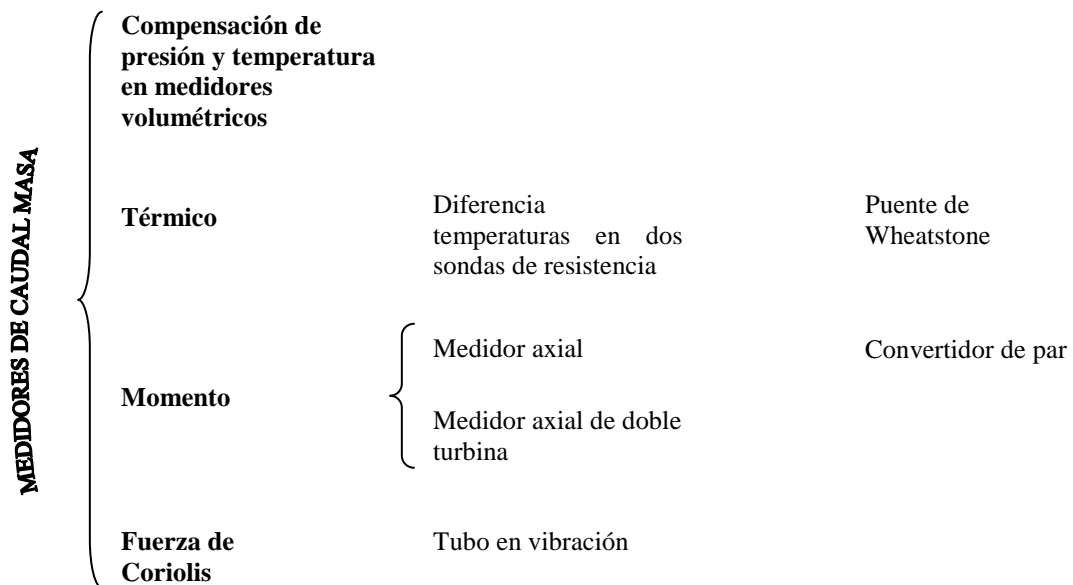
[1] <sup>60</sup> CREUS SOLÉ, Antonio. Instrumentación Industrial. Marcombo, ediciones técnicas, 2005.

<sup>61</sup> AMAYA J .Alejandro, Diapositivas de instrumentación electrónica, Ibíd.





Esquema 12 ANEXO Continuación del Esquema 11 Fuente AMAYA J .Alejandro<sup>62</sup>



<sup>62</sup> AMAYA J .Alejandro, Diapositivas de instrumentación electrónica, Ibíd.





*La medición de gas natural se debe realizar siempre que se presente un cambio de responsabilidad o propiedad del producto<sup>64</sup>. El gas se mide cuando se compra, se vende, se almacena, o se intercambia entre propietarios, transportadores o procesadores. También se requieren mediciones cuando el gas se transporta a través de fronteras nacionales o internacionales. Además, las medidas son necesarias para monitorear el desempeño del sistema de tuberías<sup>65</sup>.*

#### 14.1.4 Leyes físicas que permiten la deducción de la expresión de caudal volumétrico a partir de una diferencia de presión<sup>66</sup>

A continuación se citará la deducción de la fórmula de caudal a partir de una presión diferencial establecida en una tubería horizontal, tal como lo muestra la Figura 43.

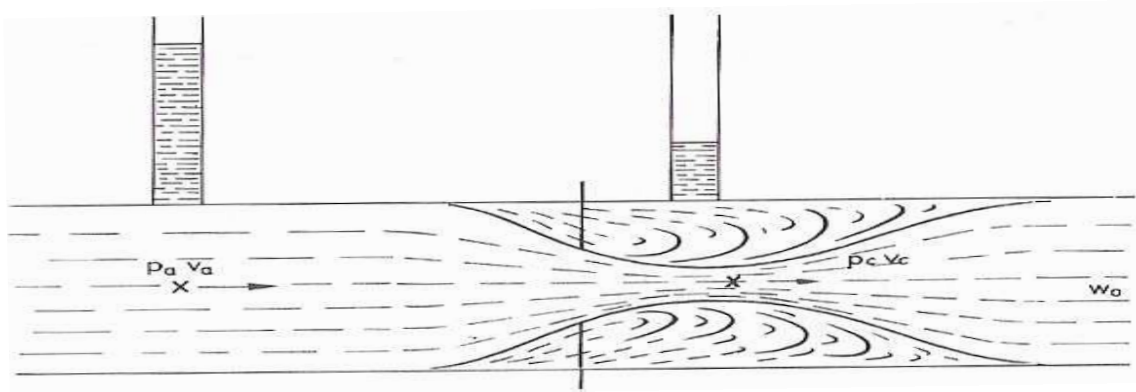


Figura 43 ANEXO Comportamiento de un fluido al experimentar una diferencia de presión. Fuente: Antonio Creus

<sup>63</sup> AMAYA J .Alejandro, Diapositivas de instrumentación electrónica, Ibíd.

<sup>64</sup> ECOPETROL, Vicepresidencia de Suministro y Mercadeo. Manual Único de Medición, capítulo 14: Medición de gas natural. Bogotá, 2006.

<sup>65</sup> AMAYA J .Alejandro, Diapositivas de instrumentación electrónica, Universidad Industrial de Santander, 2006

<sup>66</sup> CREUS SOLÉ, Antonio. Instrumentación Industrial. Ibíd.





**Trabajo de Grado, 102 de 128**

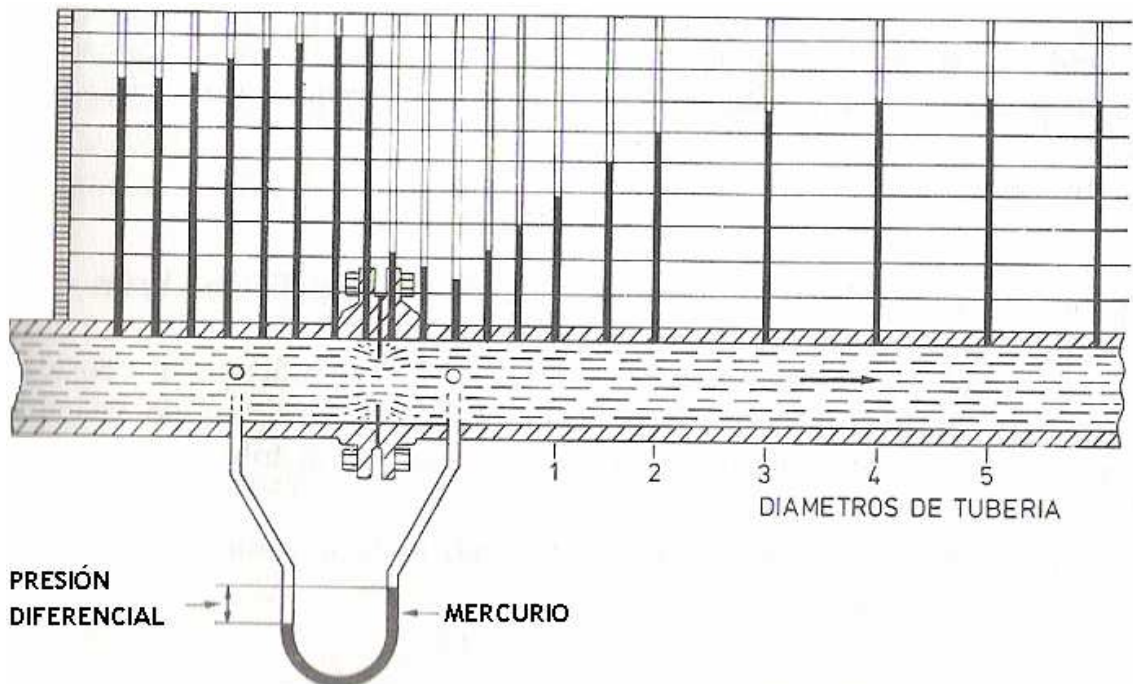
Como es evidente, el caudal antes y después de la platina es el mismo –el fluido no tiene otro camino por donde irse-, por lo que

$$Q_a = Q_c \quad (26)$$

Dado que el caudal dimensionalmente es  $[L^3/T]$  (unidad de volumen por unidad de tiempo), también puede expresarse como el producto de la velocidad del fluido por la superficie transversal que atraviesa el mismo.

$$Q_a = \frac{V_a}{t} = v_a * s_a \quad (27)$$

$$Q_c = \frac{V_c}{t} = v_c * s_c$$



**Figura 44. ANEXO: Niveles de presión a lo largo de una tubería con platina de orificio.**  
Fuente: Antonio Creus.

Por lo que





$$v_a s_a = v_c s_c \quad (28)$$

$$Y \quad v_a = \frac{s_c v_c}{s_a} \quad (29)$$

Donde  $V_a$  y  $V_c$  son los volúmenes de fluido antes y después de la platina,  $v_a$  y  $v_c$  son las velocidades de los fluidos y  $s_a$  y  $s_c$  las correspondientes secciones transversales que atraviesan.

Ahora bien, la fórmula de caudal contenida con los elementos de presión diferencial se basa en la aplicación del teorema de Bernoulli (*altura cinética + altura de presión + altura potencial = cte.*) a una tubería horizontal

$$\frac{V_a^2}{2} + \frac{P_a}{\rho_0} = \frac{V_c^2}{2} + \frac{P_c}{\rho_0} \quad (30)$$

Reordenando la ecuación (5) y aplicando (4), se tiene que

$$v_c^2 - \frac{s_c^2 v_c^2}{s_a^2} = 2 \left( \frac{P_a - P_c}{\rho_0} \right) \quad (31)$$

Tratándose de una tubería circular,

$$s_a = \frac{\pi D^2}{4} \quad (32)$$

$$s_c = \frac{\pi d^2}{4}$$

Donde  $D$  y  $d$  son los diámetros de la tubería y del orificio de la platina, respectivamente. Al dividir las dos expresiones, se tiene que

$$\frac{s_c}{s_a} = \frac{d^2}{D^2} = \left( \frac{d}{D} \right)^2 \quad (33)$$

Defínase el término  $\beta$  como la relación de diámetros de orificio y tubería, esto es

$$\beta = \frac{d}{D} \quad (34)$$





Aplicando factor común  $v_c$  en (6) y la ecuación (9), se obtiene la expresión

$$v_c = \sqrt{\frac{2 \frac{P_a - P_c}{\rho_0}}{1 - \beta^4}} \quad (35)$$

Defínase asimismo el factor de velocidad de acercamiento  $E$  como

$$E = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^4}} \quad (36)$$

Reordenando (10) y aplicando (11) se obtiene

$$v_c = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^4}} \sqrt{2 \frac{P_a - P_c}{\rho_0}} = E \sqrt{2 \frac{P_a - P_c}{\rho_0}} \quad (37)$$

Y el caudal en volumen será

$$Q_v = s_c v_c = E \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2 \frac{P_a - P_c}{\rho_0}} [m^3 / s] = k \sqrt{\frac{H'}{\rho_0}} [m^3 / s] \quad (38)$$

Expresando  $d$  en m;  $h$ ,  $P_a$  y  $P_c$  en pascal y  $\rho_0$  en kg/m<sup>3</sup>; y siendo  $k$  una constante,  $d$  el diámetro del orificio y  $h$  la presión diferencial producida por el elemento<sup>67</sup>.

Las fórmulas anteriores, aunque si bien son aproximaciones, son muy precisas. *La precisión normal cuando se realizan mediciones por este método es de  $\pm 1.5 - 2\%$ <sup>68</sup>.* En la práctica, se consideran factores de corrección que tienen en cuenta el reparto desigual de velocidades, la contracción de la vena del fluido, las rugosidades de la tubería, el estado del líquido, del gas, del vapor, etc.

La fórmula (13) se afecta mediante un coeficiente adicional  $C$  llamado “coeficiente de descarga”, con lo cual

$$Q_v = CE \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2 \frac{P_a - P_c}{\rho_0}} \quad (39)$$

<sup>67</sup> Estas expresiones están limitadas a fluidos ideales incompresibles.

<sup>68</sup> SAYAGO, Sandra Milena. Planeación e Implementación del Laboratorio de Instrumentación Electrónica de la E3T, Ibíd.





### Trabajo de Grado, 105 de 128

En el caso de un fluido compresible, su densidad varía en toda la sección de la vena ya que cambia la presión, la temperatura y el peso específico.

La expresión final que se obtiene es parecida a la de los fluidos incompresibles, introduciendo un coeficiente experimental de expansión  $\varepsilon$  para tener en cuenta la expansión ocurrida durante la aceleración del flujo. Este coeficiente es función de la relación de presiones, de la relación de calores específicos para los fluidos compresibles y de la relación de secciones del elemento y de la tubería.

La expresión final es:

$$Q_v = CE\varepsilon \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2 \frac{P_a - P_c}{\rho_0}} [m^3 / s] \quad (40)$$

De esta manera, queda claro que el caudal volumétrico depende de la diferencia de presión “aguas arriba – aguas abajo”, la densidad del fluido, las características geométricas de la platina y de otras variables cuyo estudio se profundizará en la sección siguiente.

#### 14.1.5 *NORMAS AGA DE MEDICIÓN DE GAS: ASPECTOS IMPORTANTES*<sup>69</sup>

##### Selección de medidores

En gran parte de las empresas en el ámbito nacional, la medición de los gases se efectúa con platinas de orificio, pero también se puede realizar con medidores de desplazamiento positivo (DP) ó de turbina de alto rendimiento, que determinan el caudal volumétrico del gas, basados en condiciones de operación aparentemente constantes; pero, tanto la presión como la temperatura suelen variar, provocando en ocasiones errores significativos en la medición, a menos que se introduzcan los factores de corrección necesarios, basados en las condiciones reales del proceso. Otra alternativa es la de medir directamente el caudal másico<sup>70</sup> del fluido. Aunque a la fecha se han desarrollado varios métodos de medición de flujo másico, el más difundido y que se encuentra aprobado para transferencia de custodia por el API es utilizando efecto Coriolis.

Los medidores se escogen sobre la base de costos, el tamaño de la línea, el fluido que se va a medir, su estado (gas o vapor), rango del medidor y exactitud deseado, entre otros parámetros. Para ello se utilizan los estándares AGA R3/ISO 5167 (Medidores de

<sup>69</sup> ECOPETROL, Vicepresidencia de Suministro y Mercadeo. Manual Único de Medición, Ibíd.

<sup>70</sup> El caudal másico corresponde a la cantidad de gas en unidades de masa (Kg, lb., etc.) que pasa por un punto por unidad de tiempo.





---

**Trabajo de Grado, 106 de 128**

orificio) o AGA R7/ISO 9951 (Medidores de tipo turbina) según sea el caso del tipo de medidor que se haya seleccionado ya que dentro de cada uno de estos estándares se especifica los detalles de diseño, manufactura, instalación, prueba, calibración, operación y mantenimiento.

También es necesario analizar qué se va a medir al momento de seleccionar el medidor de gas, ya que, hasta cierto punto, todos los gases se desvían del comportamiento ideal. Esta desviación es conocida como Factor de Compresibilidad el cual es determinado por dos métodos los cuales son desarrollados en el “AGA Reporte N° 8”. Estos métodos pueden ser aplicados para temperaturas desde -200 F hasta 760 F (-130 °C hasta 400 °C), a presiones hasta de 40000 PSIA (280Mpa). Si la medición se aplica en condiciones extremas, el factor debe ser verificado por otros medios.

**Medidor de platina de orificio**

La platina de orificio es uno de los dispositivos medidores más usados en la industria del gas para transferencia de custodia; para su uso, se puede seguir el estándar para medidores de orificio AGA reporte N° 3, ANSI/API 2530 y GPA 8185.

Las platinas de orificio pueden ser de dos tipos, aleta y universal.

**Tipo aleta:** Es usada entre rebordes y debe contener como mínimo la siguiente información al lado de la entrada (lado afilado por aguas arriba, si se bisela la placa):

- La perforación del orificio a 68° F según lo medido por el fabricante.
- El material de la placa.
- El tamaño nominal del tubo de gas.
- El nombre del fabricante o la marca comercial.
- La palabra “INLET”.

**Tipo universal:** Es usada sencilla o doble en la cámara apropiada. Esta placa debe tener la información siguiente estampada en el lado en sentido descendiente (lado biselado):

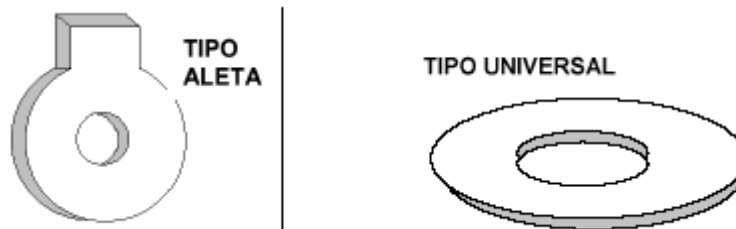
- La perforación del orificio a 68° F según lo medido por el fabricante
- El material de la placa
- El diámetro nominal del tubo de gas
- El nombre del fabricante o la marca comercial.
- La palabra “OUTLET”





**Figura 45 ANEXO Platina de orificio tipo universal. Fuente: Orifice plates and plate sealing units. Daniel ®-Emerson <sup>TM</sup>**

El material de las platinas de orificio puede ser de tipo 304 o 316 acero inoxidable.



**Figura 46 ANEXO Tipos de platinas de orificio. Fuente: Manual ECOPETROL**

Para la selección de la platina de orificio es necesario tener en cuenta el número de Reynolds, ya que es un factor decisivo en la elección. La norma AGA N° 3 establece las especificaciones y requerimientos de instalación para la medición de flujos usando medidores de este tipo<sup>71</sup>.

<sup>71</sup> Los requerimientos mínimos para la instalación correcta del medidor de orificio se encuentran en detalle en:

ECOPETROL, Vicepresidencia de Suministro y Mercadeo. Manual Único de Medición, Ibíd.

SAYAGO, Sandra Milena. Planeación e Implementación del Laboratorio de Instrumentación Electrónica de la E3T. Ibíd.





## 14.2 NIVEL DE LÍQUIDOS

### 14.2.1 Definición

El nivel de un líquido se define como *la posición de su superficie por encima o por debajo de un punto de referencia*<sup>72</sup>.

### 14.2.2 Importancia de la medición de nivel

La medición de nivel es fundamental, tanto desde el punto de vista del funcionamiento correcto del proceso como de la consideración del balance adecuado de materias primas o de productos finales.

En las plantas industriales *es muy importante medir y controlar los niveles de los tambores, tanques, recipientes, etc., para operar con eficiencia, alta seguridad, determinar la cantidad de productos, prevenir la disponibilidad de materia prima, verificar la disponibilidad de espacio para almacenar productos, relacionar costos y control de inventarios y muchas razones que hacen de la medición de nivel una actividad de especial cuidado*<sup>73</sup>.

### 14.2.3 Tipos de medición de caudal

Esencialmente, existen cuatro principios de fundamentación en la medición de nivel de líquidos, los cuales se exponen a continuación en el siguiente esquema<sup>74</sup>:

---

<sup>72</sup> SAYAGO, Sandra Milena. Planeación e Implementación del Laboratorio de Instrumentación Electrónica de la E3T.Ibid.

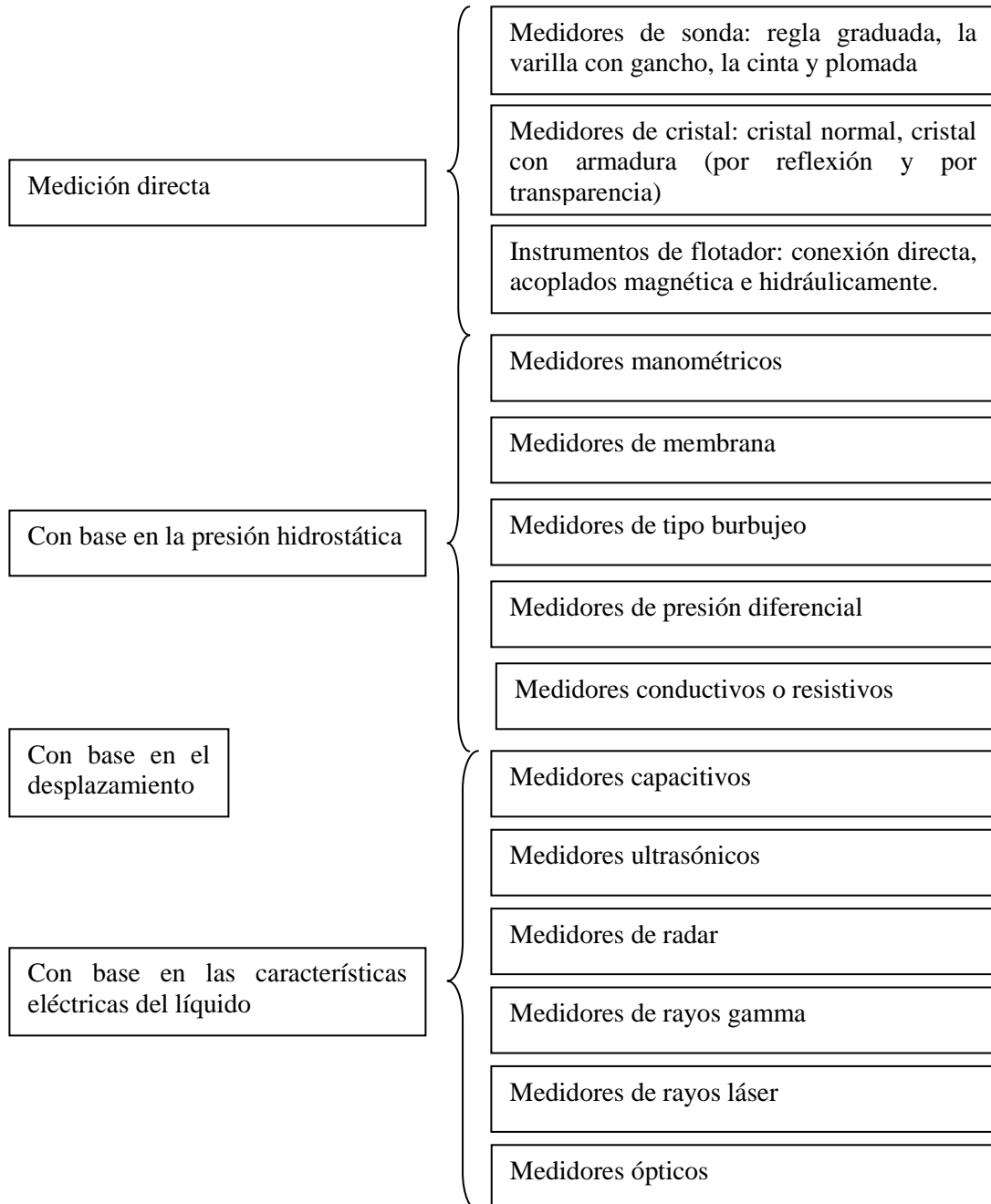
<sup>73</sup> SAYAGO, Sandra Milena. Planeación e Implementación del Laboratorio de Instrumentación Electrónica de la E3T.Ibid.

<sup>74</sup> AMAYA J .Alejandro, Diapositivas de instrumentación electrónica. Ibid.





Trabajo de Grado, 109 de 128



Esquema 14 ANEXO: Clasificación de medidores de caudal. Fuente: José Amaya Palacio.





#### 14.2.4 Leyes físicas que rigen la medición de nivel de líquidos

Cada uno de los dispositivos que se encuentran en el esquema anterior, está basado en una determinada ley física para el cálculo del nivel de un líquido. En el caso particular del laboratorio de Instrumentación Electrónica de la E3T, el nivel de líquido ( $h$ ) [m] en el tanque se mide proporcionalmente a la presión diferencial del líquido ( $P$ ) [ $\text{N}/\text{m}^2$ ], su densidad ( $\rho$ ) [ $\text{Kg}/\text{m}^3$ ] y la aceleración de la gravedad ( $g$ ) [ $\text{m}/\text{s}^2$ ], de la siguiente forma<sup>75</sup>:

$$h = \frac{P}{\rho g} \quad (41)$$

*Cuando el punto de referencia se encuentra en la base del recipiente –como es el caso del tanque existente en el laboratorio–, la medición puede llevarse a cabo en el líquido desde este punto a la superficie y se llama medición hacia adentro<sup>76</sup>.*

---

<sup>75</sup> La fórmula(33) proviene de la expresión básica  $P = \rho gh$  . SERWAY, Raymond. Física, Ibíd.

<sup>76</sup> SAYAGO, Sandra Milena. Planeación e Implementación del Laboratorio de Instrumentación Electrónica de la E3T. Ibíd.





## Manual de Uso de Realidad Virtual.

### Instalación:

A continuación se define el procedimiento para la correcta instalación del software de realidad virtual sobre Matlab.

-Instale Matlab 6.5 o superior, de acuerdo a las instrucciones del software, asegurándose de tener seleccionada la opción de instalación completa de la herramienta “Virtual Reality Toolbox”.

Ejecute el software y en la ventana de comandos ejecute “vrinstall”, este comando le mostrara el estado de la instalación del visor y editor de Realidad virtual, en caso de no tener instalado el Visor, seleccione la opción de instalar; Se recomienda seleccionar la opción “OpenGL” dado que goza de mayor estabilidad y compatibilidad.

Una vez instalado el software copiar el contenido de la carpeta “archivosRV” a la carpeta “work” que se encuentra dentro de la carpeta de instalación de Matlab 6.5, (matlab6p5\work).

### Configuración:

Para la configuración de la herramienta de Realidad Virtual en Visualización es necesario abrir el archivo “salidadato.m” y en la línea XXX editar la dirección IP del host Local con el cual se quiere realizar la conexión, salvar los cambios y salir del archivo.

Se requiere la desactivación del “Firewall de Windows” para esto consulte la opción Inicio-panel de control-Firewall de Windows- general, y seleccione “desactivado”, adicionalmente cree la excepción para Matlab y los puertos 6340 a 6343, en la pestaña “excepciones”.

Antes de continuar es necesario verificar el estado de la conexión de red, para esto abra una ventana de “símbolo del sistema”, y ejecute el comando “ping ” con la dirección del equipo local con el cual se quiere lograr la comunicaron. Por ejemplo: ping 192.168.45.121 ; los datos de salida de este comando deben indicar que fue respondida la solicitud, que ningún paquete se pierda y los tiempos de respuesta sean menores a 3ms.

Abrir el archivo “VISUALIZACION.mdl” y correr su ejecución.





---

### Trabajo de Grado, 112 de 128

Para la configuración de la herramienta de Realidad Virtual en Simulación solo es necesario la correcta instalación de la toolbox de realidad virtual y su configuración con el comando “vrinstall” como se describe anteriormente, es decir no es necesario editar ningún documento, la verificación de la conexión o la creación de excepciones.

Abra el archivo “SIMULACION.mdl” y corra su ejecución.

#### Modo de empleo:

Para los modos Visualización y Simulación se recomienda el empleo de las vistas predefinidas o la opción de navegación “fly”, para emplear las flechas para realizar movimientos al frente, atrás y los lados; Para subir la vista haga un arrastre del Mouse desde la parte inferior de la ventana hacia la parte superior y para descender la vista haga el arrastre desde la parte superior hacia la inferior.

En el modo de Simulación se puede interactuar con los “botones” de color verde o rojo, que son señalizados por el cambio de la forma del puntero del Mouse en la pantalla, para el uso de los recursos como es el caso del encendido o apagado del compresor y las válvulas solenoides; igualmente para la apertura (botón verde) o cerrado (botón rojo) de la válvula de salida de gas. Se debe hacer un clic y mantenerlo presionado un momento, es decir que no se recomienda hacer pulsaciones rápidas sobre el “botón”.

Para iniciar la práctica de medición de Flujo es necesario la presurización de la tubería, para esto encienda el compresor y vigile el nivel de presión.

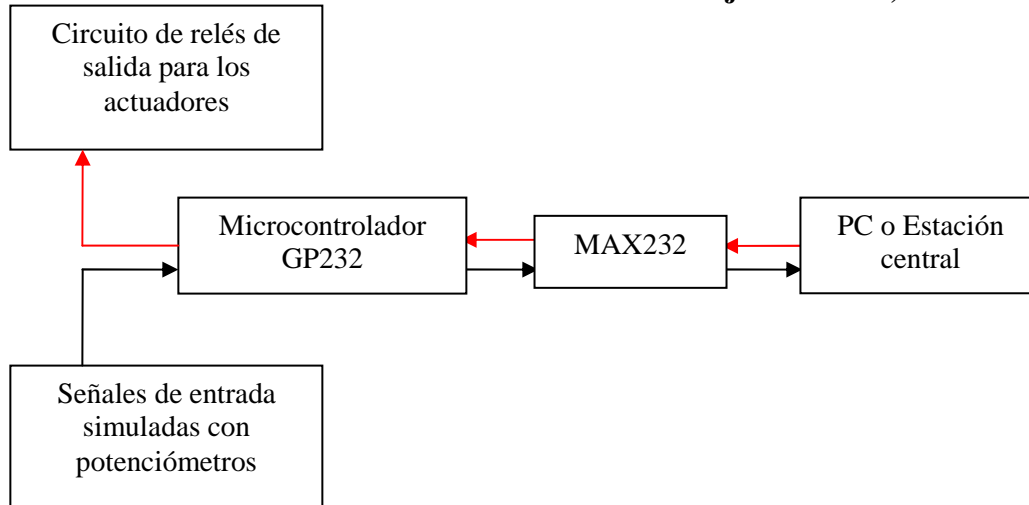
Al terminar el uso se recomienda no guardar los cambios hechos al archivo.

## LÓGICA DE SUPERVISIÓN DE FLUJO DE GAS Y NIVEL DE LÍQUIDO - MANUAL DE USUARIO

### INSTALACIÓN DEL SOFTWARE LABVIEW 7.0

Previamente, se debe verificar que el circuito de adquisición de datos con comunicación serial esté correctamente conectado al computador principal, el cual se recomienda ubicar en la mesa más cercana al tanque, para facilidad en las conexiones. Este circuito, para efectos demostrativos del trabajo de grado, se implementó de la siguiente manera:





#### Observaciones:

- Los potenciómetros presentan un ruido significativo, por lo que se hace necesario el diseño de un sistema de adquisición que solucione este problema.
- En la carpeta “Codewarrior ADC SCADA” del CD del proyecto de grado, se encuentra el código con el se puede programar el microcontrolador GP232 para la implementación de la lógica de supervisión.

El paquete Software Labview 7.0 viene usualmente en 2 CD'S<sup>77</sup>. Verificar la instalación correcta de cada uno de ellos, tanto en la estación local como en la remota. Este software se puede encontrar en el Centro de Estudios de la E3T.

Antes de interactuar con la lógica de supervisión, se recomienda leer el capítulo 4 de éste trabajo de grado, el cual trata sobre el modelo matemático de las variables físicas en función de la tensión eléctrica, así como la aplicación de las normas AGA3, así como el apartado 7.2, con el fin de manipular adecuadamente cada una de las funciones de la supervisión.

## INSTALACIÓN Y EJECUCIÓN

---

<sup>77</sup> Siga las instrucciones que la rutina de instalación le muestre. Para mayor seguridad, instale TODOS los componentes del software.





---

**Trabajo de Grado, 114 de 128**

El usuario encontrará en el CD del proyecto de grado una carpeta<sup>78</sup> llamada SG, y dentro de ella los siguientes archivos:

**PRINCIPAL.VI:** Este es el programa principal de supervisión, con comunicación por el puerto serial, para que por medio de este ingresen las 4 señales de entrada del proceso (presión diferencial  $H_w$ , presión absoluta  $P_{fl}$ , temperatura de flujo  $T_f$  y nivel  $ni$ ) y salgan los 12 indicadores luminosos necesarios para la visualización del proceso, en el siguiente orden<sup>79</sup>:

**BYTE1:**

- Bit0: Indicar sobrepaso de presión
- Bit1: Encender la válvula de desagüe
- Bit2: Encender la válvula de llenado
- Bit3: Encender la Válvula Solenoide
- Bit4 – Bit7: No implementados

**BYTE2:**

- Bit8: Indicar Set Point no permitido
- Bit9: Indicar nivel no permitido
- Bit10: Permitir mando remoto del nivel
- Bit11: Indicar Set Point Alcanzado
- Bit12: Activar mando automático del nivel
- Bit13: Permitir mando remoto de la presión Absoluta
- Bit14: Activar mando automático de la presión absoluta
- Bit15: Indicar que el sistema general está encendido

---

<sup>78</sup> **IMPORTANTE:** Se recomienda que, por cuestiones de direccionamiento, se le dé una ubicación fácil y definitiva a esta carpeta, por ejemplo “Escritorio”, “Mis documentos” o “C:\Archivos de programa”.

<sup>79</sup> Este orden debe ser tenido en cuenta para la implementación del sistema de adquisición. Si el usuario esta en capacidad de editar el diagrama de bloques, puede cambiar el orden de estas salidas como más le convenga.





---

**Trabajo de Grado, 115 de 128**

Por lo tanto, este programa se debe abrir y ejecutar **únicamente** en el PC central, asignado al laboratorio de instrumentación.

**PRINCIPALS.VI:** Este programa es un EMULADOR de *PRINCIPAL.VI* pero, en lugar de recibir señales por el puerto serial, ofrece al usuario la posibilidad de ingresar las 4 señales de entrada por medio de controles numéricos. Por esta razón, se puede abrir y ejecutar en cualquier PC que tenga instalado Labview 7.0.

**REMOTO.VI:** Este es el programa que debe ejecutar el usuario si desea visualizar y hacer manejo a distancia del proceso. Para que el operador remoto externo al laboratorio pueda ejercer el mando sobre el sistema de instrumentación, así como la visualización en Realidad Virtual<sup>80</sup>, el programa del operador local (*PRINCIPAL.VI* ó *PRINCIPALS.VI*) debe estar ejecutándose y enviando datos.

### Guía de Interfaz de usuario

#### Usuario Local – Supervisión y comunicación serial *PRINCIPAL.VI*

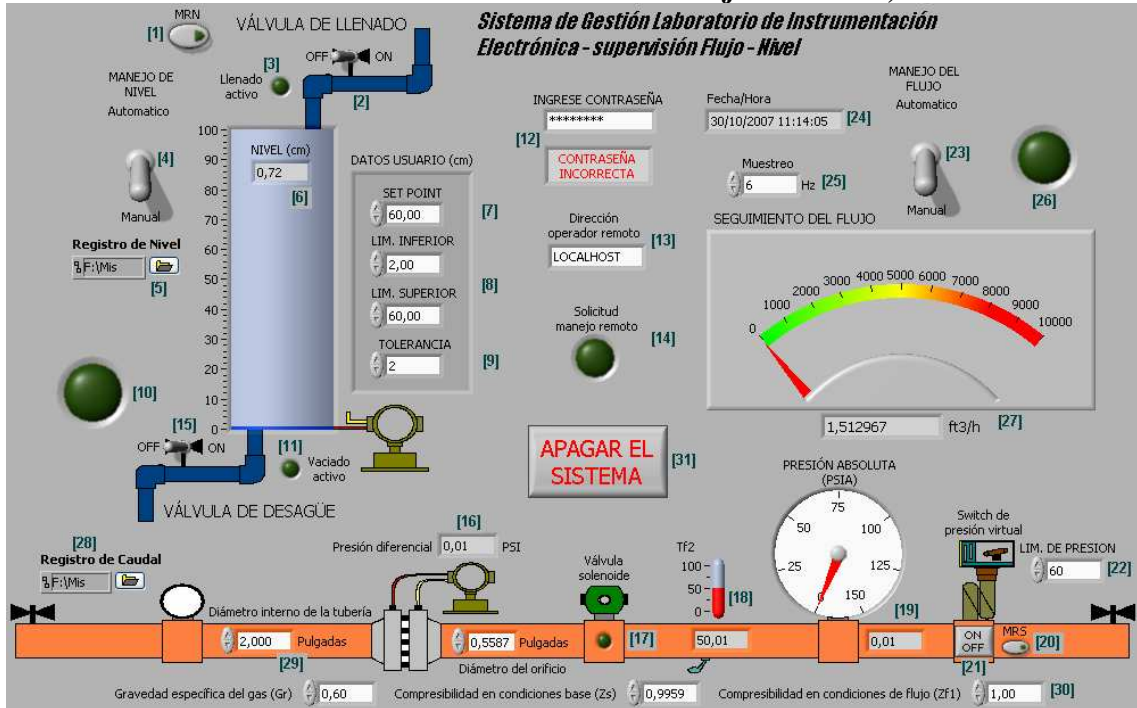
---

<sup>80</sup> Se recomienda que en un mismo computador no se ejecuten simultáneamente la supervisión remota y la herramienta de Realidad Virtual, a menos que se tenga un dispositivo con alta capacidad de procesamiento.





Trabajo de Grado, 116 de 128



- [1]: Opción para otorgar permiso de manejo remoto de nivel de líquido
- [2]: Control ON-OFF de válvula de llenado
- [3]: Indicador de encendido de la válvula de llenado: se enciende cuando [2] esta en la posición ON.
- [4]: Opción de mando local de nivel: automático o manual. Use la opción manual para activar [2] y [15] en cualquier momento del proceso. Si la opción elegida es manual, debe ajustarse un Set Point de nivel previamente para que el sistema lo alcance automáticamente, aquí [2] y [15] se encuentran deshabilitadas.
- [5]: Opción para ubicar el archivo de registro de nivel de líquido. Ubíquese aquí el archivo nivelocal.txt para que los registros se almacenen en este archivo.
- [6]: Indicador numérico del nivel del líquido
- [7]: Ajuste numérico del Set Point. Este debe ir dentro de los límites establecidos en [8].
- [8]: Ajuste numérico de los límites superior e inferior del Set Point y el nivel del líquido
- [9]: Ajuste numérico de la tolerancia





---

**Trabajo de Grado, 117 de 128**

[10]: Indicador luminoso y de texto de alarmas en la medición de nivel de líquido. Solo operan si [4] está en la opción automático.

[11]: Indicador de encendido de la válvula de desagüe: se enciende cuando [15] esta en la posición ON.

[12]: Ingreso de contraseña<sup>81</sup> para autenticación del operador

[13]: Dirección de red (IP) de la estación de supervisión remota<sup>82</sup>

[14]: Indicador luminoso de solicitud de mando remoto por un operador remoto

[15]: Control ON-OFF de la válvula de desagüe

[16]: Indicador numérico de la presión diferencial

[17]: Indicador de encendido de la válvula solenoide

[18]: Indicador numérico de la temperatura de flujo

[19]: Indicador numérico de la presión absoluta

[20]: Opción para otorgar permiso de manejo de presión absoluta. Este permiso se debe otorgar si se está seguro de que un operador remoto autorizado se encuentra conectado en ese momento y ha emitido [14]

[21]: Control ON-OFF de la válvula solenoide de la tubería

[22]: Ajuste numérico del límite de presión absoluta

[23]: Opción de mando local de presión absoluta: automático o manual

[24]: Indicador de la fecha y la hora actual

[25]: Ajuste de la frecuencia de muestreo de los datos. **IMPOORTANTE:** para evitar congestión en los datos, se recomienda usar una frecuencia máxima de 7 Hz.

[26]: Indicador luminoso de sobrepaso de presión: Solo operan si [23] está en la opción automático.

[27]: Indicador numérico del flujo de aire

[28]: Opción para ubicar el archivo de registro de flujo de aire. Ubíquese aquí el archivo flujolocal.txt para que los registros se almacenen en este archivo.

[29]: Ajuste numérico del diámetro de la tubería y del diámetro de la platina de orificio

---

<sup>81</sup> La contraseña tanto para tener acceso al diagrama de bloques como para ejecutar el programa es “80242521”; el usuario puede cambiar la contraseña bajo su responsabilidad.

<sup>82</sup> Si se desea ejecutar PRINCIPALS.VI y REMOTO.VI en el mismo computador, úsese la dirección “localhost”



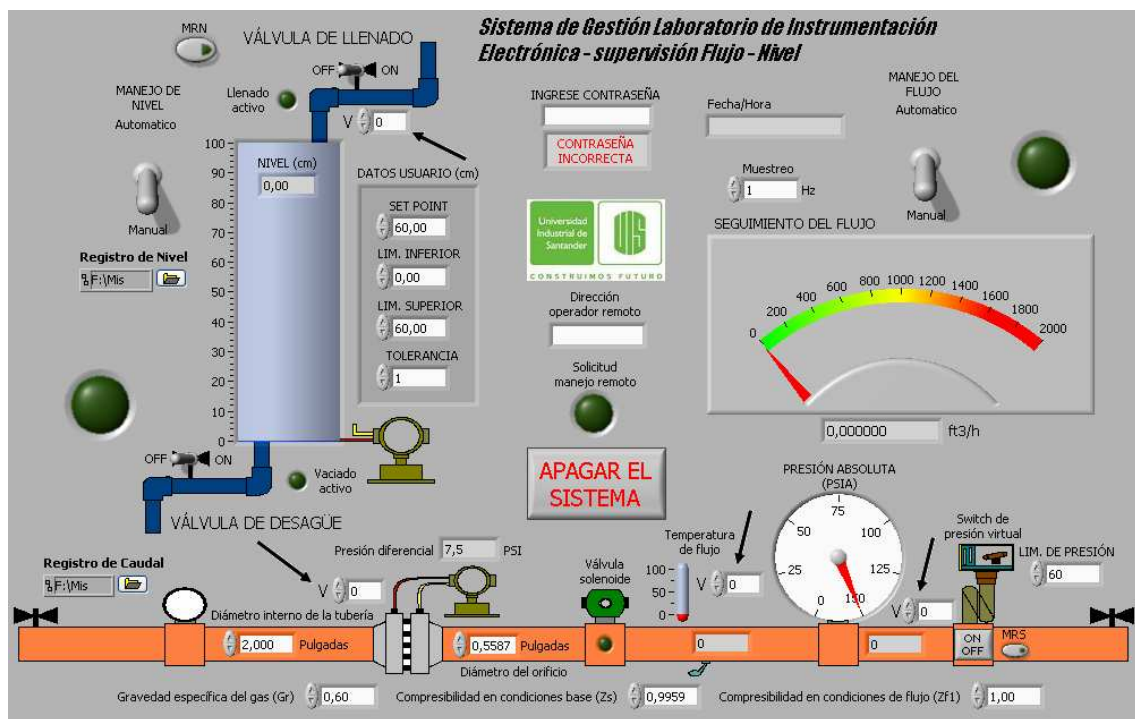


**Trabajo de Grado, 118 de 128**

[30]: Ajuste numérico de la gravedad específica del gas, compresibilidad en condiciones base y en condiciones de flujo

[31]: Apagado del sistema de supervisión local.

**Usuario Local – Supervisión, entradas simuladas desde Labview *PRINCIPALS.VI***



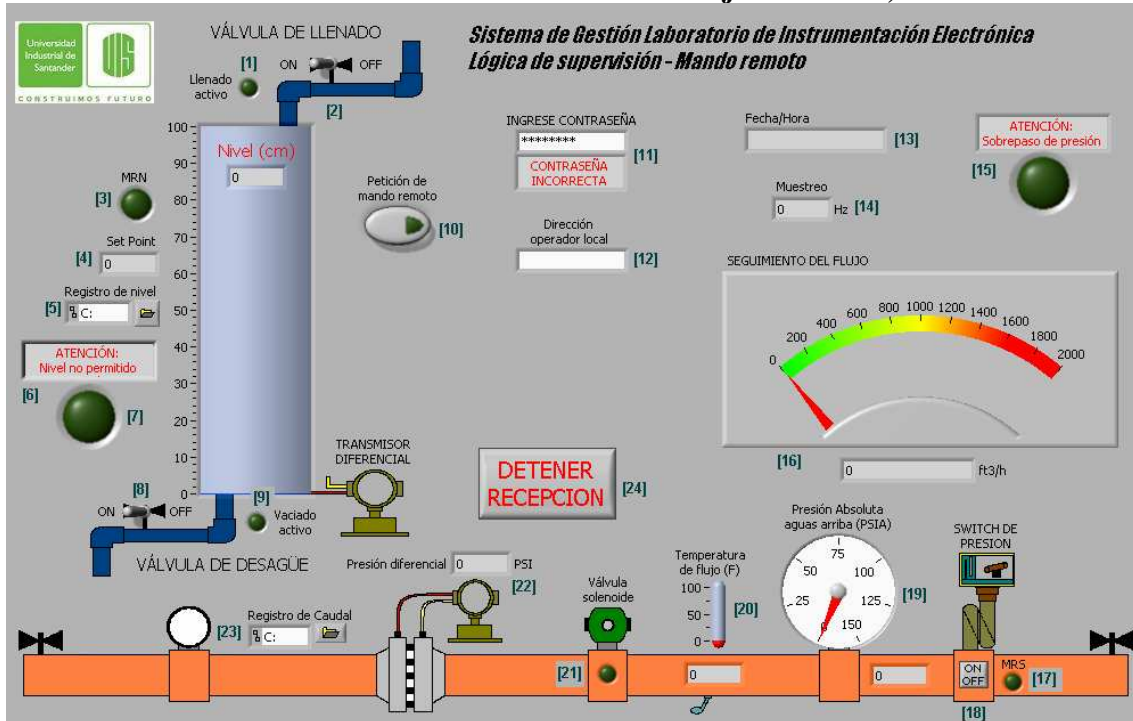
A diferencia de PRINCIPAL.VI, esta interfaz presenta la opción de que las cuatro señales de entrada sean ingresadas desde el mismo software, en los controles señalados con las flechas. Se deben ingresar valores entre 1-5 Vdc.

**Usuario Remoto**





Trabajo de Grado, 119 de 128



[1]: Indicador de encendido de la válvula de llenado

[2]: Control ON-OFF de la válvula de llenado

[3]: Indicador de acceso permitido al manejo remoto de nivel. El operador remoto podrá usar [2] y [8] para el mando de las válvulas de nivel sólo si este indicador está encendido.

[4]: Indicador numérico del Set Point (cm)

[5]: Opción para ubicar el archivo de registro de nivel de líquido. Ubíquese aquí el archivo nivelremoto.txt para que los registros se almacenen en este archivo

[6]: Indicador de texto de alarmas en la medición de nivel de líquido

[7]: Indicador luminoso de alarmas en la medición de nivel de líquido

[8]: Control ON-OFF de la válvula de desagüe

[9]: Indicador de encendido de la válvula de desagüe

[10]: Opción para solicitar mando remoto al operador local

[11]: Ingreso de contraseña para autenticación del operador

[12]: Dirección de red (IP) de la estación de supervisión local





---

**Trabajo de Grado, 120 de 128**

[13]: Indicador de la fecha y la hora actual

[14]: Indicador de la frecuencia de muestreo de los datos

[15]: Indicador luminoso de sobrepaso de presión

[16]: Indicador numérico del flujo de aire

[17]: Indicador de acceso permitido al manejo remoto de presión absoluta. El operador remoto podrá usar [18] para el mando de la válvulas solenoide de presión sólo si este indicador está encendido.

[18]: Control ON-OFF de la válvula solenoide de la tubería

[19]: Indicador numérico de la presión absoluta

[20]: Indicador numérico de la temperatura de flujo

[21]: Indicador de encendido de la válvula solenoide

[22]: Indicador numérico de la presión diferencial

[23]: Opción para ubicar el archivo de registro de flujo de aire. Ubíquese aquí el archivo flujoremoto.txt para que los registros se almacenen en este archivo

[24]: Apagado del sistema remoto.

NOTA: CUALQUIER DUDA ADICIONAL QUE EL LECTOR TENGA CON RESPECTO AL MANEJO DE LA LÓGICA DE SUPERVISIÓN Y DE LA HERRAMIENTA DE REALIDAD VIRTUAL, ASI COMO DE CUALQUIER DETALLE DE ESTE TRABAJO DE GRADO, PUEDE ESCRIBIR A LOS SIGUIENTES CORREOS ELECTRÓNICOS:

[ets@hotmail.com](mailto:ets@hotmail.com)

[diego.com.co@gmail.com](mailto:diego.com.co@gmail.com)

