

UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCVELICA

(Creada por Ley N° 25265)



**FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA-SISTEMAS
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE SISTEMAS**

TESIS

**"OPTIMIZACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGAS MEDIANTE UN
SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO CON SOFTWARE EN UN
BIODIGESTOR SIMULADO"**

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

TECNOLOGÍAS DE INFORMACIÓN

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO DE SISTEMAS

PRESENTADO POR LOS BACHILLERES:

SANCHEZ QUISPE, Cesar Letelier

ESCOBAR VILCAS, Miryan Betty

HUANCVELICA - 2013



ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS

En el Auditorio de la Facultad de Ingeniería Electrónica - Sistemas, a los 01 días del mes de OCTUBRE del año 2013, a horas 11:00, se reunieron; el Jurado Calificador, conformado de la siguiente manera:

164

Presidente: Ingr. Sinche Crispin Fernando Viterbo
 Secretario: Ingr. Cristobal Lara Rely Alcides
 Vocal: Ingr. Rojas Bujardo John Fredy

Designados con Resolución N° 112-2013-FIES-UNH del proyecto de investigación (Tesis), Titulado: "OPTIMIZACION DE LA PRODUCCION DE BIOGAS MEDIANTE UN SISTEMA DE CONTROL AUTOMATICO CON SOFTWARE EN UN BIODIGESTOR SIMULADO"

Cuyos autores son los graduado (s):

BACHILLER (S): CESAR LETELIER SANCHEZ QUISPE
MIRYAN BETTY ESCOBAR VILCAS

A fin de proceder con la evaluación y calificación de la sustentación del proyecto de investigación, antes citado.

Finalizado la evaluación; se invito al público presente y a los sustentantes a abandonar el recinto; y, luego de una amplia deliberación por parte del jurado, se llegó al siguiente el resultado:

APROBADO POR MAYORIA

DESAPROBADO

En conformidad a lo actuado firmamos al pie.

Presidente

Secretario

Vocal



UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCABELICA
(Creada por Ley N° 25265)



FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA-SISTEMAS
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE SISTEMAS

TESIS

“OPTIMIZACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGAS MEDIANTE UN SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO CON SOFTWARE EN UN BIODIGESTOR SIMULADO”

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN
TECNOLOGÍAS DE INFORMACIÓN

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO DE SISTEMAS

PRESENTADO POR LOS BACHILLERES:

SANCHEZ QUISPE, Cesar Letelier
ESCOBAR VILCAS, Miryan Betty

FECHA DE INICIO : Septiembre de 2012
FECHA DE CULMINACIÓN : Abril de 2013

HUANCABELICA 2013

162

ASESOR

Ing. Víctor Raúl Rodríguez Peña

CO-ASESOR:

Ing. Edgar Rafael Julián Laine

161

A nuestros padres por brindarnos su apoyo incondicional en todo momento; y a los docentes de la Escuela Académica Profesional de Sistemas quienes contribuyeron significativamente en nuestra formación Profesional.

160

INDICE DE CONTENIDO

Portada	
Asesores	
Dedicatoria	
Índice de contenido	
Índice de tablas	
Índice de figuras	
Resumen	
Introducción	
CAPÍTULO I: PROBLEMA	
1.1. Planteamiento del Problema	17
1.2. Formulación del Problema	19
1.2.1. Problema General	19
1.2.2. Problemas Específicos	19
1.3. Objetivo: General y Específicos	20
1.3.1. Objetivo General	20
1.3.2. Objetivos Específicos	20
1.4. Justificación	20
1.4.1. Legal	20
1.4.2. Académica	20
1.4.3. Tecnológica	20
1.4.4. Económica	21
1.4.5. Científica	22
1.4.6. Social	22
1.4.7. Ambiental	22
CAPÍTULO II : MARCO TEÓRICO	
2.1. Antecedentes	23
2.1.1. Biodigestores construidos en el Perú	25
2.2. Bases Teóricas	34
2.2.1. Producción de Biogás	34
2.2.2. Tipos de Biodegradación de la Materia Orgánica	36
2.2.2.1. Descomposición Aeróbica.	36
2.2.2.2. Descomposición Anaeróbica.	37
2.2.2.3. Biodigestión Anaeróbica y sus Etapas	37
2.2.3. Factores que Influyen en la Producción de Biogás	40
2.2.3.1. Tipo de Materia Prima (MP)	41
2.2.3.2. Temperatura del Sustrato (T)	42
2.2.3.3. Carga Volumétrica (CV)	43
2.2.3.4. Inclusión de Inoculantes (I)	43

2.2.3.5. Tiempo de Retención (TR).	44
2.2.3.6. Nivel de Acidez (pH)	46
2.2.3.7. Relación Carbono/Nitrógeno (C/N)	47
2.2.3.8. Agitación y Mezclado.	48
2.2.3.9. Inhibidores	48
2.2.3.10. Nutrientes	49
2.2.3.11. Toxicidad	50
2.2.3.12. Digestor o biodigestor	50
2.2.4. Sistemas de control	53
2.2.4.1. Diseño e Implementación de Sistemas de Control	53
2.2.4.2. Diseño del sistema de Control Automático	53
2.2.4.3. Sistema de Control Automático mediante Software	55
2.2.4.4. El algoritmo de control PID	56
2.2.4.5. Características de los controladores PID	58
2.2.4.6. El algoritmo de control ON/OFF	58
2.2.4.7. Definición de las variables en un proceso	59
2.2.5. Fundamentos del software LABVIEW	60
2.2.5.1. Instrumento Virtual (VI)	61
2.2.5.2. El Entorno de LabVIEW	62
2.2.5.3. Ventana del panel frontal (FRONT PANEL)	63
2.2.5.4. Paleta de Herramientas (TOOLS PALETTE)	65
2.2.5.5. Barra de Herramientas del Panel Frontal	66
2.2.5.6. La Paleta de Controles (CONTROLS PALETTE)	67
2.2.5.7. Ventana del diagrama de bloques (BLOCK DIAGRAM)	70
2.2.5.8. Barra de Herramientas del Diagrama de Bloques	70
2.2.5.9. Paleta de Funciones (FUNCTION PALETTE)	70
2.2.5.10. Menús Desplegables	73
2.2.6. Marco Conceptual	74
2.3. Hipótesis	76
2.3.1. Hipótesis General	76
2.3.2. Hipótesis Específicas	76
2.4. Variables de estudio	77
2.4.1. Variable Independiente (X)	77
2.4.2. Variable Dependiente (Y)	77
2.4.3. Definición Operativa de Variables e Indicadores	77
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	78
3.1. Ámbito de Estudio	78
3.2. Tipo de Investigación	78
3.3. Nivel de Investigación	78
3.4. Método de Investigación	79

150

3.4.1 Método General	79
3.4.2 Método Específico	79
3.5. Diseño de Investigación	79
3.6. Población, Muestra y Muestreo	80
3.6.1. Población	80
3.6.2. Muestra	80
3.7. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos	81
3.7.1. Técnicas de Recolección de Datos	81
3.7.2. Instrumento de Recolección de Datos	81
3.8. Procedimiento de recolección de datos	82
3.9. Técnicas de procesamiento y análisis de datos	82
3.9.1 Cálculo del Volumen de Biogás Producido diariamente	82
3.9.1.1 Materia Orgánica Disponible.	82
3.9.1.2 Materia Orgánica Total disponible.	83
3.9.1.3 Peso de Animal Requerido (WA)	83
3.9.1.4 Sólidos totales (ST)	84
3.9.1.5 Contenido de sólidos volátiles totales (SV)	85
3.9.1.6 Potencial de producción de metano (PCH4)	85
3.9.1.7 Volumen de Biogás Producido (VBIOGÁS)	85
3.9.1.8 Volumen de Metano y CO2 Producido	87
3.9.1.9 Calculo de la T _{óptima} (°C) y el [TR] óptimo (días)	88
3.9.1.10 Cálculo del Volumen de Diseño del Biodigestor (VDB)	97
3.9.1.11 Cálculo de la Alimentación Óptima para el Biodigestor de 10m ³ de capacidad	99
3.9.1.12 Calculo de la producción óptima del biodigestor a condiciones óptimas	103
CAPÍTULO IV: RESULTADOS	105
4.1. Presentación de Resultados	105
4.1.1. El software BIOSIM 1.2	106
4.1.1.1. Ventana de inicio de software	106
4.1.1.2. Ventana de configuración de resolución de pantalla	106
4.1.1.3. Ventana de bienvenida en el software	108
4.1.1.4. Ventana de configuración inicial del software	108
4.1.1.5. Carga Inicial en el tanque de Mezcla	111
4.1.1.6. Carga Inicial en el Biodigestor	112
4.1.1.7. Carga o Alimentación diaria al biodigestor	114
4.1.1.8. La etapa de producción de biogás	116
4.2. Discusión de Resultados	120
4.2.1. Validación del modelo matemático empleado para la simulación	120
4.2.1.1. La producción de biogás simulada vs experimental	120

159

4.2.2. Evaluación de la producción No Optimizada (Experimental) vs Optimizada (Simulada con control automático)	124
4.3. Prueba de hipótesis estadística.	128
4.3.1. Hipótesis Nula (H0)	128
4.3.2. Hipótesis Alternativa (H1)	128
4.3.3. Sistema de hipótesis	128
4.3.4. La prueba T-student con el software SPSS 20	132
CONCLUSIONES	135
RECOMENDACIONES	137
BIBLIOGRAFÍA	138
ANEXOS	140

154

INDECE DE TABLAS

Tabla 1.1. Población de ganados en la Región Huancavelica	18
Tabla 2.1. Lugares e instituciones que han trabajado biodigestores en el Perú a enero 2012	26
Tabla 2.2. Composición del Biogás	34
Tabla 2.3. Características del metano	35
Tabla 2.4. Composición del biogás derivado de diversas fuentes	35
Tabla 2.5. Porcentaje de los gases presentes en el biogás	36
Tabla 2.6. Producción de estiércol por especie	41
Tabla 2.7. Tipo de bacterias en función de la temperatura	42
Tabla 2.8. Tiempo de retención y materia prima	45
Tabla 2.9. Producción de gas en relación con el tiempo de retención	46
Tabla 2.10. Efectos del pH en la biodigestión	46
Tabla 2.11. Relación C/N para diferentes materias primas	48
Tabla 2.12. Elementos inhibidores	49
Tabla 2.13. Niveles de control de procesos	54
Tabla 2.14. Características PID	58
Tabla 2.15. Variables e indicadores	77
Tabla 3.1. Contenido y tipo de materia orgánica	83
Tabla 3.2. Potencial de producción de metano (PCH ₄) de varios Residuos	85
Tabla 3.3. Composición del Biogás	87
Tabla 3.4. Principales Componentes del Biogás	87
Tabla 3.5. Producción simulada de biogás a T=20°C y TR=20 días	88
Tabla 3.6. Variables de mayor impacto en el proceso de producción de biogás en un biodigestor de 10m ³ de capacidad y sus valores óptimos	97
Tabla 3.7. Relación estiércol - agua para diferentes tipos de fuentes	101
Tabla 3.8. Parámetros óptimos de operación en la producción de Biogás	102
Tabla 3.9. Producción estimada de biogás a condiciones óptimas de operación obtenidas mediante Simulación	104
Tabla 4.1. Parámetros óptimos de operación en la producción de Biogás	109
Tabla 4.2. Parámetros operación y producción de biogás en el biodigestor del distrito de Apata-Concepción-Junín	120
Tabla 4.3. Datos alimentados para el cálculo de la producción con el modelo matemático de Chen	121
Tabla 4.4. Fórmulas empleadas en el modelo matemático de Chen	121

133

Tabla 4.5. Resultados de la simulación a las condiciones de operación (temperatura y tiempo de retención) experimentales y SIN SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO	121
Tabla 4.6. Producción promedio mensual simulada y experimental	123
Tabla 4.7. Parámetros operación no optimizados empleados en la Producción	124
Tabla 4.8. Parámetros operación optimizados empleados en la Producción	124
Tabla 4.9. Resultados de la producción experimental sin control vs producción optimizada con control	126
Tabla 4.10. Producción promedio mensual experimental (Sin control) vs simulada (con control)	127

154

ÍNDICE DE FIGURA

Figura 1.1. Rendimiento de la producción de biogás	21
Figura 2.1. Proyecto IAA-UPC en Cuzco 13 Biodigestores piloto de PET en la cuenca Jabon de Mayo (2004).	27
Figura 2.2. Proyecto IAA-UPC en Cuzco Planta experimental Fundo K'ayra UNSAAC (2009).	27
Figura 2.3. Biodigestor de 8m ³ volumen total en Yanaoca Cusco, 4,000m.s.n.m. (2012).	28
Figura 2.4. Proyecto Soluciones Prácticas – ISF en Cajamarca 4 iodigestores piloto de PET en distrito Encañada (2007/08)	28
Figura 2.5. Biodigestor piloto de 10m ³ en Camal de Chorrillos previo al BD de 300m ³ , Se observa la Caja de carga que se construyó (2007).	29
Figura 2.6. Biodigestor tubular Cidelsa instalado en Abancay – Apurímac para tratar estiércol de ganado vacuno (2008).	29
Figura 2.7. Biodigestor en Granja Villa, Chorrillos, Lima (2010).	30
Figura 2.8. Biodigestor tubular de 10m ³ instalado en Huaraz para Tratar estiércol de cuyes (2009).	30
Figura 2.9. Biodigestor de 20m de longitud y dos reservorios de biogás de 1.7m ³ cada uno produce 1,250 litros de Biol por día -Tocache (2007).	31
Figura 2.10. Biodigestor en Geomembrana de PVC de 0.6mm. Instalado en la Granja Ganadera de Calzada, Moyobamba – Proyecto Especial Altomayo, Gobierno Regional de San Martín. (2007).	31
Figura 2.11. Biodigestor tubular fabricado en Geomembrana de PVC de 0,6mm - Instalado en la empresa Palmagro en Pucallpa. (2008).	32
Figura 2.12. Biodigestor tubular de 1.27m diámetro X 20.0m de longitud. Instalado en Tocache con la colaboración del PEAM Moyobamba y la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza (2008).	32
Figura 2.13. Biodigestor tubular preparado para inverdadero a 3,700 msnm. AYACUCHO (2009).	33
Figura 2.14. Digestor de 10 m ³ , en el complejo agropecuario del distrito de Apata – Junín (2011)	33
Figura 2.15. Etapas del proceso de digestión anaeróbica.	38
Figura 2.16. Hidrólisis o solubilización.	38
Figura 2.17. Acidificación	39
Figura 2.18. Metanización	39
Figura 2.19. Digestor de balón de plástico (FLUJO PISTÓN)	52
Figura 2.20. Diagrama de bloques del Sistema de Control por Retroalimentación	55
Figura 2.21. Esquema control de temperatura mediante software	55

Figura 2.22. Sistema de control de Lazo cerrado	56
Figura 2.23. Diagrama de Bloques de un Controlador PID	57
Figura 2.24. Diagramas de Bloques de Controladores de Dos Posiciones	59
Figura 2.25. Acción del controlador "ON"/ "OFF"	59
Figura 2.26. Representación de un Proceso	60
Figura 2.27. Evolución de la programación	61
Figura 2.28. Principio de un VI, instrumento real y virtual	62
Figura 2.29. Ventana de inicio de LabVIEW 2012	62
Figura 2.30. Ventana de selección de proyecto nuevo	63
Figura 2.31. Ventanas del panel frontal y diagrama de bloques de un VI en Blanco	64
Figura 2.32. Partes de un instrumento virtual (VI)	64
Figura 2.33. Barra de herramientas del panel frontal	66
Figura 2.34. Formas visibles de la paleta de controles	67
Figura 2.35. Categorías de la entrada MODERN	68
Figura 2.36. Categorías de la entrada MODERN	68
Figura 2.37. Categorías de la entrada MODERN	69
Figura 2.38. Categoría decoraciones de la entrada MODERN	69
Figura 2.39. Barra de herramientas del diagrama de bloques	70
Figura 2.40. Formas visibles de la paleta de funciones	71
Figura 2.41. Categorías de la entrada PROGRAMMING	72
Figura 2.42. Menús desplegables disponibles en LabVIEW	72
Figura 2.43. Ventanas desplegables de objetos	74
Figura 3.1. Datos Alimentados para simulación de la producción a distintos TR	88
Figura 3.2. Gráfica de la simulación de PRODUCCIÓN DE BIOGÁS a distintos valores de tiempo de residencia (TR) para $20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 50^{\circ}\text{C}$	89
Figura 3.3. Resultados de la simulación de PRODUCCIÓN DE BIOGÁS a distintos valores de tiempo de residencia (TR) para $20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 50^{\circ}\text{C}$	89
Figura 3.4. Gráfica de la simulación de PRODUCCIÓN DE METANO a distintos valores de tiempo de residencia (TR) para $20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 50^{\circ}\text{C}$	90
Figura 3.5. Resultados de la simulación de PRODUCCIÓN DE METANO a distintos valores de tiempo de residencia (TR) para $20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 50^{\circ}\text{C}$	90
Figura 3.6. Gráfica de la simulación de PRODUCCIÓN DE CO ₂ a distintos valores de tiempo de residencia (TR) para $20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 50^{\circ}\text{C}$	91
Figura 3.7. Resultados de la simulación de PRODUCCIÓN DE CO ₂ a distintos valores de tiempo de residencia (TR) para $20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 50^{\circ}\text{C}$	91
Figura 3.8. Datos Alimentados para simulación de la producción a distintas T(°C)	93

Figura 3.9. Gráfica de la simulación de PRODUCCIÓN DE BIOGÁS a distintos valores de temperatura (T) para $10 \text{ días} \leq TR \leq 50 \text{ días}$	93
Figura 3.10. Resultados de la simulación de PRODUCCIÓN DE BIOGÁS a distintos valores de temperatura (T) para $10 \text{ días} \leq TR \leq 50 \text{ días}$	94
Figura 3.11. Gráfica de la simulación de PRODUCCIÓN DE METANO a distintos valores de temperatura (T)	94
Figura 3.12. Resultados de la simulación de PRODUCCIÓN DE METANO a distintos valores de temperatura (T) para $10 \text{ días} \leq TR \leq 50 \text{ días}$	95
Figura 3.13. Gráfica de la simulación de PRODUCCIÓN DE CO ₂ a distintos valores de temperatura (T) para $10 \text{ días} \leq TR \leq 50 \text{ días}$	95
Figura 3.14. Resultados de la simulación de PRODUCCIÓN DE CO ₂ a distintos valores de temperatura (T) para $10 \text{ días} \leq TR \leq 50 \text{ días}$	96
Figura 3.15. Al término de la simulación se obtiene los resultados siguientes para biogás:	96
Figura 3.16. Esquema General de un Biodigestor TUBULAR.	98
Figura 3.17. Dimensiones Reales del Biodigestor de 10m ³ TUBULAR (mm)	100
Figura 3.18. Dimensiones Equivalentes del Biodigestor de 10m ³ TUBULAR (mm)	100
Figura 3.19. Datos Alimentados simulación de la producción óptima de biogás	103
Figura 3.20. Gráfica de la simulación de PRODUCCIÓN DE BIOGÁS a condiciones óptimas (TR=30días y T=30°C)	103
Figura 3.21. Resultados de la simulación de PRODUCCIÓN DE METANO a condiciones óptimas (TR=30días y T=30°C)	104
Figura 4.1. Panel Principal del software BIOSIM 1.2 desarrollado en el entorno de programación gráfico LabVIEW versión 9.0.	105
Figura 4.2. Ventana de inicio de software	106
Figura 4.3. Ventana resolución de pantalla en Windows 7	107
Figura 4.4. Ventana de configuración de resolución de pantalla en el software.	107
Figura 4.5. Ventana de Configuración inicial del software con TR=30	109
Figura 4.6. Ventana de configuración inicial con TR=40.	110
Figura 4.7. Ingreso de parámetros de simulación del proceso.	110
Figura 4.8. Etapa de carga inicial en el tanque de mezcla.	112
Figura 4.9. Proceso de carga inicial en el biodigestor (carga inicial al 3.83%)	112
Figura 4.10. Proceso de carga inicial en el biodigestor (carga al 73.47%)	113
Figura 4.11. Inicio del proceso de producción	113
Figura 4.12. Carga diaria al tanque de mezcla	114
Figura 4.13. Alimentación diaria al biodigestor	115
Figura 4.14. Descarga diaria del biodigestor	115
Figura 4.15. Inicio del proceso de producción de biogás (día 0)	116

Figura 4.16. Registro histórico de evolución del proceso (hasta el día 1)	117
Figura 4.17. Registro gráfico de la evolución del proceso (hasta el día 6)	117
Figura 4.18. Producción de biogás a partir del décimo día.	118
Figura 4.19. Registro histórico de la producción de biogás (simulación)	118
Figura 4.20. Registro gráfico de la producción de biogás (simulación)	119
Figura 4.21. Registro Gráfico de la producción de biogás al alcanzar el Estado Estacionario	119
Figura 4.22. Resultados de producción	123
Figura 4.23. Datos de la tabla 4.7 ingresados a la ventana de configuración inicial del software BIOSIM 1.2	125
Figura 4.24. Resultados de la simulación de producción a condiciones óptimas de la tabla 4.7 (SOFTWARE BIOSIM 1.2)	125
Figura 4.25. Resultados de producción optimizada (con control) vs experimental del biodigestor de Apata-Concepción-Junín.	127
Figura 4.26. Configuración de variables en el software SPSS 20	129
Figura 4.27. Ingreso de producción experimental y simulada al software SPSS 20	130
Figura 4.28. Tabla estadística de la producción Experimental y Simulada (generado por el software SPSS 20)	131
Figura 4.1. Tabla estadística de la producción Objetivo (generado por el software SPSS 20)	132
Figura 4.1. Grafica de la prueba de hipótesis.	133
Figura 4.2. Grafica de la prueba de hipótesis.	134

RESUMEN

El presente trabajo de investigación está desarrollado dentro del ámbito de las tecnologías de la información aplicadas al control y la automatización de procesos, el equipo que es objeto de esta investigación es un biodigestor tubular de 10m³ de capacidad instalado en la localidad de Apata-Concepción-Junín, el cual sirvió de referencia para el presente estudio, el desarrollo del trabajo de investigación comenzó con la revisión bibliográfica y la determinación de los parámetros de operación más óptimos para el sistema, con una base bien fundamentada de acuerdo con las referencias encontradas de distintos investigadores y de investigaciones desarrolladas en el ámbito internacional, se determinó el tiempo de residencia óptimo el cual fue de 30 días, la temperatura de operación de 30 °C, y una tasa de alimentación de 125 Kg de Estiércol fresco con 125 Kg de agua no potabilizada, una vez encontrados estos parámetros se requería de un simulador que nos permita simular dinámicamente el comportamiento del biodigestor y que cuente con un sistema que nos permita mantener las condiciones óptimas constantes durante todo el proceso, para lo cual fue necesario desarrollar el software BIOSIM 1.2, dicho software fue desarrollado en el entorno de programación grafica LabVIEW el cual es el lenguaje de programación más apropiado para cumplir este propósito, el software BIOSIM 1.2 fue desarrollada para permitirnos controlar los tiempo de alimentación y descarga de la materia prima alimentada al biodigestor denominada Sustrato o Biomasa que no es otra cosa que la mezcla del estiércol vacuno y agua en proporción 1:1, además el software con base en los modelos matemáticos descritos y utilizados para determinar las condiciones óptimas en el capítulo III, nos permite simular el proceso dinámicamente y gracias a ello podemos monitorear la evolución del proceso en tiempo mediante gráficas y registros históricos, y mediante los reportes que el software genera, una vez obtenidos los resultados de las simulación se procedió a comparar a las mismas condiciones de operación la producción promedio mensual de biogás estimada mediante simulación versus los datos experimentales tomados del biodigestor real de referencia que fueron obtenidos de fuentes primarias, con toda esta información y con ayuda del software SPSS 20 fue posible verificar un incremento en la producción del 64,19%, superando ampliamente el 20% propuesto en la hipótesis, con lo cual el desarrollo del presente trabajo de investigación se justifica, para que a posteriori pueda ser implementado en un sistema real adicionalmente utilizando al hardware descrito en el capítulo III.

INTRODUCCIÓN

Nos encontramos dentro de la era digital, donde para poder participar competitivamente en los mercados del mundo globalizado requerimos automatizar nuestros sistemas mediante herramientas informáticas y software especializado, por lo que se hace vital el control de procesos mediante software desarrollado para esta tarea, conscientes de eso y de que el corazón del sistema planteado para nuestro trabajo es un software desarrollado en el entorno de programación gráfico que ha revolucionado el desarrollo de software a nivel internacional para múltiples aplicaciones conocido como LabVIEW y que esta tecnología hoy en día se viene aplicando a distintos campos de la ciencia y la ingeniería en todo el mundo, en nuestra investigación dicho lenguaje de programación nos sirvió para desarrollar la herramienta software BIOSIM 1.2, aplicación que nos permite controlar un biodigestor tipo tubular el cual es motivo de nuestra investigación, para poder optimizar la producción de biogás la cual en el Perú actualmente se viene dando en condiciones de operación no controladas y no optimizadas, aun así este tipo de equipos funcionan en el Perú y en distintas partes del mundo en lugares donde las condiciones ambientales son cálidas como Pucallpa y también en lugares donde el clima es más frío como es el caso de Huancavelica, a pesar de no contar con sistemas de control, esta es la razón fundamental que impulsa el desarrollo de la presente investigación, motivo por el cual la presente tesis se compone de IV capítulo, los cuales son descritos brevemente a continuación:

En el capítulo I que corresponde al planteamiento del problema y la justificación de la investigación, se describe las razones por las cuales se desarrolló el presente estudio además de los objetivos que se plantearon al inicio de la investigación.

En el capítulo II se presentan las evidencias más importantes o antecedentes relacionados con la presente investigación en el ámbito nacional e internacional, motivo por el cual la tesis tiene bases sólidas, además se presenta la revisión bibliográfica y las fuentes que sustentan los distintos modelos matemáticos considerados para la simulación del proceso lo cual también es la base para el desarrollo del software.

En el capítulo III se describe el ámbito de la investigación, población, muestra así como el procesamiento de la información, en este capítulo se describe como se llegan a determinar las condiciones de operación más óptimas para el proceso de producción de biogás, condiciones que serán utilizadas como parámetros de operación por parte del software.

Finalmente en el capítulo IV se describe detalladamente el funcionamiento y los resultados obtenidos a partir de la simulación con el software BIOSIM 1.2, con las condiciones de operación determinadas en el capítulo III, además se valida los resultados simulados comparados con datos obtenidos del biodigestor real instalado en Apata-Concepción-Junín el cual nos sirve como referencia para verificar la funcionalidad del software, también se encuentra el análisis referido al incremento de la producción como resultado de la implementación del sistema de control por parte del software.

CAPÍTULO I

PROBLEMA

1.1. Planteamiento del Problema

La poca disponibilidad e ineficiencia de las actuales fuentes de energía en el área rural de la Provincia de Tayacaja departamento de Huancavelica, para la iluminación, la cocción de alimentos y otros, desemboca en que la población campesina incrementa la contaminación al medio ambiente, sin conocer que existe otras posibilidades tecnológicas que pueden resultar en esquemas sostenibles de manejo de los recursos naturales y de los residuos humanos y animales; sin que por esto se cambie culturalmente el uso de los residuos (estiércol) para fines agrícolas. Una alternativa fundamental es el empleo de digestores anaeróbicos para la producción de metano (biogás) utilizando como materia prima estiércol de animales principalmente del ganado vacuno. En la provincia de Tayacaja gran parte de la población rural se dedica a la crianza de ganado vacuno, por ende a la producción y comercialización de leche y sus derivados (queso, mantequilla, manjar blanco, yogurt, helados, etc.), haciendo uso de combustible para la manufactura de dichos productos, además para el quehacer diario (cocina y alumbrado), entre los principales productos que destacan son: Leña en un 40%, gas propano 25%, kerosene 14%, otros 21%, también Huancavelica es el departamento que tiene el mayor porcentaje de población que vive en situación de pobreza, 85,7%, de los cuales un significativo 59,9% se encuentra en situación de pobreza extrema. Más aún, la infancia huancavelicana se encuentra en situación de desnutrición crónica, 48,5% de los niños de 0 a 5 años y 56% de los niños entre 6 a 11 años. (Ministerio de Agricultura, 2008)

En Huancavelica Los productos pecuarios más importantes de la región son la carne y la leche. La producción de carne corresponde a la de vacuno, seguida la de ovino y en tercer lugar la de alpaca. La producción de leche se obtiene, tanto del ganado vacuno como del caprino. La mayor producción de carne y leche de vacunos se localiza en las provincias de

146

Tayacaja y Huaytará; Huancavelica produce mayormente carne de alpaca y de ovino, fibra de alpaca y lana de ovino; Huaytará y Castrovirreyna son los mayores productores de leche vacuno y caprino.

Tabla 1.1. Población de ganados en la Región Huancavelica.

POBLACIÓN DE GANADOS (Nº DE CABEZAS)	
Aves	417,746
Vacuno	195,539
Ovino	917,568
Porcino	108,787
Caprino	176,189
Alpaca	224,720
Llama	127,652
Cuy	1'157,724
Equino	64,920
Vicuña	13,812
Guanacos	135

Fuente y elaboración: (Ministerio de Agricultura, 2008)

Según Fabiola Lahura Romero en su proyecto de investigación **“INSTALACIÓN DE UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN EL COMPLEJO AGROPECUARIO DEL DISTRITO DE APATA-CONCEPCIÓN-JUNÍN”**. UNSCH, Tesis del 2011, propone que en promedio una vaca de 300kg de peso produce al día 21kg de estiércol fresco, y presenta además datos experimentales de la producción de biogás mediante un biodigestor a condiciones no controladas, datos que utilizaremos **sólo como referencia para la simulación del proceso** debido a que las **condiciones ambientales de temperatura** son semejantes, en tanto se puede estimar que **sólo en Huancavelica se producen diariamente 4,106 toneladas de estiércol** sólo de ganado vacuno (Ministerio de agricultura, 2008), esta cantidad alarmante y sin tratamiento alguno **genera por descomposición natural una gran cantidad de gases de efecto invernadero (GEI) responsables del deterioro de medio ambiente, además generan malos olores, proliferación de insectos y enfermedades degradando la calidad de vida de la población expuesta**, estos son los efectos contraproducentes de la mala disposición de este tipo de residuos orgánicos, en el Perú y en la región Huancavelica se viene dando el tratamiento de estos residuos orgánicos mediante la tecnología de Biodigestores para la producción de Biogás

que se utiliza como gas combustible y otros subproductos como el Biol y el Biosol utilizados como abonos orgánicos y en la preparación de compost, todo esto representa una atractiva alternativa de aprovechamiento de residuos orgánicos (excretas) con el fin de minimizar los efectos contraproducentes hacia el medio ambiente, pero **actualmente estos equipos operan sin ningún tipo de control automático y no tienen implementados tecnologías como sensores electrónicos, actuadores automáticos y software de control que incrementen su eficiencia y seguridad** (García, 2009), por lo cual se reduce la producción de Biogás incrementando también el riesgo de exposición y emisión accidental hacia la atmosfera de la mezcla gaseosa producida por estos equipos esta mezcla está compuesta principalmente de gas metano, monóxido y dióxido de azufre, sulfuro de hidrogeno, amoniaco, estos gases son tóxicos y representan una amenaza para el medio ambiente, por lo cual se le debe dar un manejo adecuado, es por ello que se requiere plantear sistemas de control automático que permitan operar en condiciones controladas y seguras estos equipos para optimizar su eficiencia y garantizar la seguridad del proceso, por esta razón el presente trabajo se presenta como una alternativa de solución que debe de implementarse en los biodigestores que operan actualmente no sólo en la región Huancavelica si no en todo el Perú.

1.2. Formulación del Problema

1.2.1. Problema General

¿En qué porcentaje se puede optimizar la producción de biogás mediante el sistema de control automático con software en un biodigestor simulado?

1.2.2. Problemas Específicos

- a) ¿Cómo simular dinámicamente mediante software el proceso de producción de biogás en un biodigestor real?
- b) ¿Cómo controlar las variables de mayor impacto en el proceso de producción de biogás?
- c) ¿Cómo validar los resultados simulados de producción de biogás con datos reales de producción de biogás?
- d) ¿Cuál es la relación de producción del biodigestor simulado con sistema de control automático respecto a un biodigestor real sin control?

1.3. Objetivo: General y Específicos

1.3.1. Objetivo General

Optimizar la producción de biogás mediante un sistema de control automático con software en un biodigestor simulado.

1.3.2. Objetivos Específicos

- a) Simular dinámicamente mediante software el proceso de producción de biogás en un biodigestor real.
- b) Controlar las variables de mayor impacto en el proceso de producción de biogás.
- c) Validar los resultados simulados de producción de biogás con datos reales de producción de biogás.
- d) Determinar la relación de producción del biodigestor simulado con sistema de control automático respecto a un biodigestor real sin control.

1.4. Justificación

1.4.1. Legal

Este proyecto de tesis se enmarcara dentro de los parámetros del uso del Reglamento de Grados y Títulos, que contempla la Facultad de Ingeniería Electrónica y Sistemas de la Universidad Nacional de Huancavelica.

1.4.2. Académica

El proyecto permitirá aplicar una serie de conocimientos adquiridos durante la formación académica en la escuela académico profesional de Ingeniería de Sistemas, en cuanto a su aplicación práctica mediante el modelamiento, la simulación y el control automatizado de procesos referidos a un biodigestor real actualmente instalado y operativo en el complejo agropecuario del distrito de Apata-Concepción-Junín.

1.4.3. Tecnológica

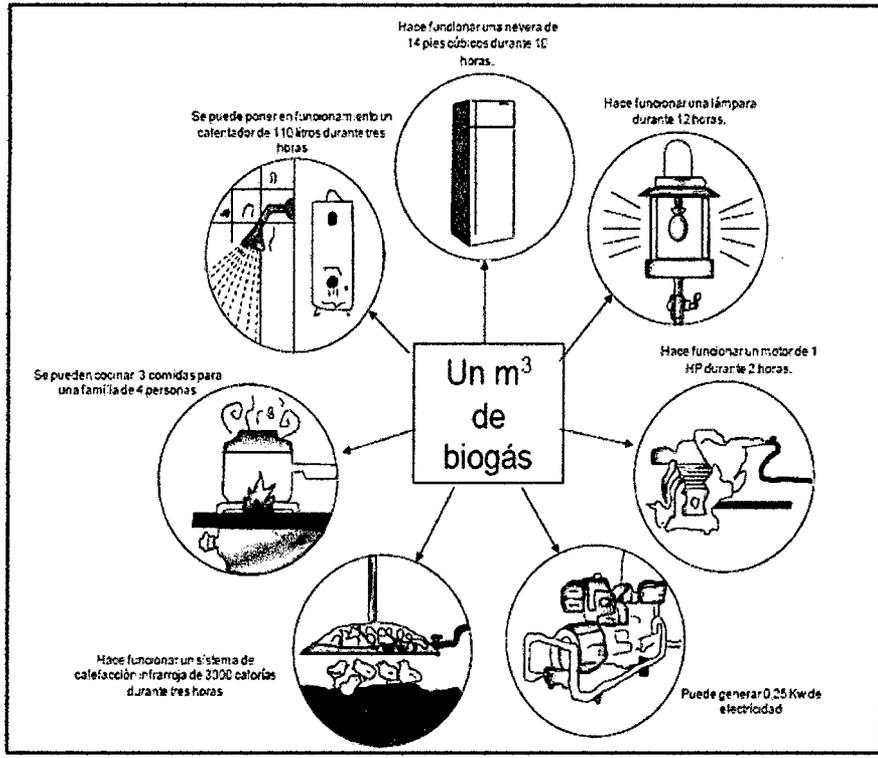
Con el uso de la tecnología que representan los sistemas de control automatizado ampliamente utilizados en todo el mundo y muchos países industrializados para optimizar la eficiencia de sus procesos, se justifica tecnológicamente debido a que "Todo proceso o sistema que no es controlado utilizando los recursos tecnológicos actualizados se considera un proceso desfasado y poco eficiente".

Al implementar un sistema de control automatizado para el control eficiente del tiempo de residencia para conseguir el objetivo de optimizar la producción de biogás se justifica toda la inversión en hardware y software requerido para poner en marcha dicho proyecto.

1.4.4. Económica

La implementación masificada del proyecto de tesis en un sistema representa una atractiva alternativa de obtener energía limpia y económica, según estimaciones realizadas por empresas dedicadas a este rubro de producción energética indica que 1m³ de biogás puede hacer funcionar una lámpara durante 12 horas, generar 0.25kW de electricidad o se puede utilizar para cocinar 3 comidas para una familia de cuatro personas, entre otros usos los cuales se muestran en la figura continua.

Figura 1.1. Rendimiento de la producción de biogás



Fuente y elaboración: (CIDELSA SAC, 2012)

El rendimiento esperado es de cuando menos 1,5m³ de biogás producido diariamente, por lo cual en evaluando en términos económicos la producción del biodigestor se justifica económicamente la implementación del proyecto.

1.4.5. Científica

En proyecto estará basado en la aplicación de la investigación científica, en la cual se seguirán las etapas como: diagnóstico, identificación de problemas, análisis de causas y efectos, formulación del problema y planteamiento de la hipótesis; precisando indicadores, su definición y cálculo para la obtención de resultados.

1.4.6. Social

El proyecto de tesis, tiene como finalidad poder mejorar la producción de biogás en este tipo de equipos como son los biodigestores, todo ello con la finalidad de ofrecer una alternativa económica y limpia de obtener energía, además de los subproductos como el biol y biosol que son utilizados para producir compost orgánico y biofertilizantes los cuales son aprovechados para la agricultura, toda esta producción se pone al alcance de los pobladores en situación de pobreza y extrema pobreza para mejorar su calidad de vida, a partir de desechos orgánicos, con lo cual se justifica el fin social y el desarrollo de la presente tesis.

1.4.7. Ambiental

En el distrito de Pampas Tayacaja y en toda la región de Huancavelica no se cuenta con un adecuado sistema de tratamiento de las excretas procedentes de ganado vacuno las cuales son producidas en la actualidad, siendo fuente de contaminación al producir gases de efecto invernadero, en promedio una vaca de 300kg de peso produce al día 21kg de estiércol fresco (Lahura, 2011), en tanto se estima que sólo en Huancavelica se producen diariamente 4,106 toneladas de estiércol sólo de ganado vacuno esto además ha de producir malos olores, proliferación de insectos y enfermedades en la población aledaña expuesta a dichos gases, degradando su calidad de vida, las cuales constituyen las razones muy importantes por las que es necesaria en la brevedad del tiempo darle un adecuado tratamiento a esta materia orgánica, mediante sistemas que operen a las condiciones ambientales de Huancavelica.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

Según los reportes conocidos la primera planta de Biogás combustible fué construida en Dador – Bombay (India) a comienzo de la Década de los 30, donde aún presentaba una producción artesanal; esta primera planta contaba con aparatos rudimentarios y aun no tenía un patrón de producción.

A inicios de 1945 esta tecnología fue mejorado y tuvo una gran demanda en Europa, en donde se realizaron estudios técnicos para mejorar su producción, hecho por el cual se llega a dominar las diversas variedades de producción, es decir ya tenían conocimiento del efecto de la temperatura, efecto del pH, efecto de las bacterias en determinados desechos, la relación de agua que se debe de agregar a la materia seca, entre otras cosas. Todas estas relaciones fueron estudiadas más profundamente por los científicos G. Duceiller y H. Iraman, los cuales presentan un trabajo de investigación aceptable y adaptable a cualquier tipo de producción del Biogás; la cual dividía simplemente en dos procesos:

La pre-fermentación aeróbica: Las características de esta etapa es la producción de gas carbónico o dióxido de carbono, debido a que la materia orgánica se encuentra en un medio húmedo y además es fuertemente exotérmico.

La fermentación anaerobia: Su característica principal de ésta etapa es la producción del Biogás, debido a que las bacterias presentes, realizan la transformación de la materia convertida en dióxido de carbono anteriormente, en metano, para ello cuentan con una determinada cantidad de calor y un determinado pH.

Años más tarde en la década de 1950, se produce una revolución de Biogás, el cual se expande a diversos lugares del mundo y surgen empresas y fábricas dedicadas exclusivamente a la producción del Biogás.

En Filipinas cabe resaltar que no se tiene datos exactos de la puesta en marcha de fábricas dedicadas a la producción del Biogás, lo que resalta en este país, es la producción en particular de un campesino, que contando solo con una pequeña fábrica artesanal, produjo un aproximado de 1400m³ de gas por día, dicha producción era obtenida a partir de desechos de 100 cabezas de ganado, el gas producido pudo reemplazar al petróleo, necesario para poner en marcha 2 motobombas y calefacción de la casa donde habitaba.

En Corea hubo una planta donde se encontraban todos los requerimientos técnicos para la producción de Biogás, donde se realizaron diversos experimentos y se llegaron a descubrir y aislar posteriormente las bacterias que en una mínima parte interfieren con la producción, cabe resaltar el desempeño del doctor Young Dean Park.

En los años 90, cabe resaltar la caída de la producción debido a la invasión del petróleo, hecho por el cual muchas fábricas tuvieron que cerrar y otras se fueron a quiebra. Hace cinco años atrás se obtuvo algunos datos estadísticos, donde resalta un ligero incremento en la producción del Biogás, debido a que la contaminación en algunos países ha alcanzado niveles altos.

En el Perú se han desarrollado bajo una campaña de la Universidad de Cajamarca decenas de biodigestores usando estiércol y otros residuos de la cuenca lechera cajamarquina y existe recientemente la iniciativa de la Municipalidad de Maynas de llevar adelante un proyecto del orden de los 10 MW.

Finalmente como parte de la investigación preliminar en bibliotecas y en centro de investigación, se ubicó un conjunto de tesis conteniendo aspectos de la producción de biogás a partir de excretas de ganado utilizando la tecnología de los Biodigestores; tres tesis son las más relevantes, por ello han sido consideradas en este acápite.

RUDY VARGAS (2004) en su tesis: "ESTUDIO TÉCNICO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS COMO COMBUSTIBLE A PARTIR DE ESTIÉRCOL MEZCLADO CON CHALA DE MAÍZ Y RESIDUOS ORGÁNICOS", UNSCH, indica que es posible producir gas a las condiciones ambientales de la ciudad de San Cristóbal de Huamanga (), donde se encuentra la universidad para este trabajo se utilizó como sustrato estiércol de ganado vacuno mezclado con chala de maíz y otros residuos orgánicos producidos en dicho lugar obteniéndose buenos resultados, pero se puede identificar la no utilización de tecnología

para un control automatizado, ya que el único control con el que se cuenta es manual, es decir solo por parte de los operadores del equipo.

NILO JUSCAMAYTA. (1987) en su tesis: "ESTUDIO DE PRE-FACTIBILIDAD PARA LA OBTENCIÓN DE METANO INDUSTRIAL, A PARTIR DE AGUAS CLOACALES DE LA TOTORILLA PARA AYACUCHO. UNSCH", indica que es factible obtener gas metano el cual es el principal constituyente del biogás a partir de aguas cloacales en Ayacucho, utilizando la tecnología de los Biodigestores, en esta tesis se menciona que el sustrato para la producción de biogás es una mezcla acuosa con alta carga orgánica, la cual al igual que la biomasa de las excretas de ganado vacuno por acción de las bacterias metano génicas anaerobias se descomponen para producir biogás a las condiciones ambientales de Ayacucho (temperatura ambiental que oscila entre 22 y 25 °C).

La producción de biogás a las condiciones ambientales de la sierra como es el caso de la ciudad de concepción en Huancayo, cuya temperatura ambiental promedio es de 17°C, a una presión de 520mmg, en donde se verifica la obtención de biogás a partir de excretas de ganado vacuno utilizando un biodigestor tipo tubular de geo membrana, tesis en la cual se concluye en que la temperatura ambiental es solo una variable más en la producción de biogás, mas no un factor predominante, debido a que la reacción química que se produce en el interior del biodigestor es exotérmica y puede alcanzar temperaturas de hasta 50°C, sin ningún medio de calefacción, lo que sí es importante es el aislamiento para evitar las pérdidas de calor hacia el exterior, al igual que los otros trabajos tampoco aquí se ha implementado ningún tipo de control automatizado, tan solo se cuenta con un control manual por parte de los ejecutores de la tesis.

2.1.1. Biodigestores construidos en el Perú

En el Perú el uso de la tecnología de los Biodigestores se remonta técnicamente desde el año 2004, en donde se pusieron en marcha la implementación de diversos proyectos relacionados con la instalación y operación de los Biodigestores, a cargo de diversas universidades, ONG's municipalidades y otras instituciones gubernamentales con la finalidad de ofrecer alternativas que nos permitan darle un tratamiento adecuado a las excretas no solo de ganados vacunos sino de otros tipos de animales como son pollos, cerdos y caprinos, en diversas partes del Perú actualmente vienen operando a distintas condiciones ambientales; la nivel del mar e

incluso hasta los 4000 metros sobre el nivel del mar, a condiciones climáticas adversas como es el caso de Yanaoca en Cusco, con lo que se ha encontrado evidencia que estos sistemas operan en condiciones donde la temperatura ambiente puede ser muy baja en ciertas temporadas del año, en resumen al mes de Enero del 2012 se han instalado un total de 360 biodigestores en todo el Perú. Según la tabla siguiente:

Tabla 2.1. Lugares e instituciones que han trabajado biodigestores en el Perú a enero 2012.

LUGAR	PROMOTOR
Arequipa	Investigación y desarrollo para el Sur
	Irrigación Majes
Cajamarca	CEFOP
	Soluciones Prácticas
	Universidad Toribio Rodríguez de Mendoza
Cuzco	IAA
	Municipio de Urubamba
	Sierra productiva
Huancavelica	Caritas
Huaraz	Care Perú
Lima	Ciudad Saludable
	Inti Solar
Piura	Cuerpo de Paz USA, Municipalidad de Santo Domingo de Morropon
San Martín	PEAM
Trujillo	Minera Barrick
	ONG
	Universidad Nacional de Trujillo

Fuente y elaboración: (SNV Latin America, 2012)

137

Figura 2.1. Proyecto IAA-UPC en Cuzco 13 Biodigestores piloto de PET en la cuenca Jabon de Mayo (2004).



Fuente y elaboración: (SNV Latin America, 2012)

Figura 2.2. Proyecto IAA-UPC en Cuzco Planta experimental Fundo K'ayra UNSAAC (2009).



Fuente y elaboración: (SNV Latin America, 2012)

136

Figura 2.3. Biodigestor de 8m³ volumen total en Yanaoca Cusco, 4,000m.s.n.m. (2012).



Fuente y elaboración: (SNV Latin America, 2012)

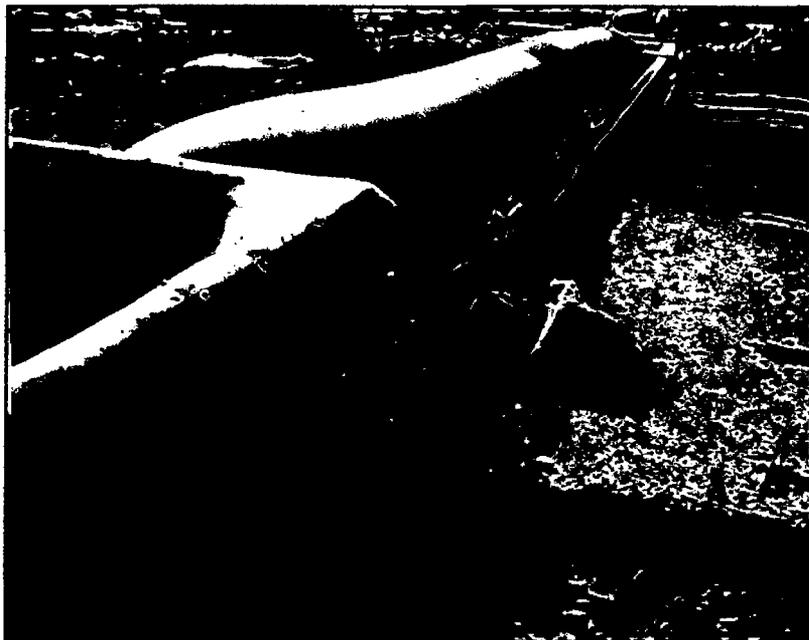
Figura 2.4. Proyecto Soluciones Prácticas – ISF en Cajamarca 4 Biodigestores piloto de PET en distrito Encañada (2007/08)



Fuente y elaboración: (SNV Latin America, 2012)

139

Figura 2.5. Biodigestor piloto de 10m³ en Camal de Chorrillos previo al BD de 300m³, Se observa la Caja de carga que se construyó (2007).



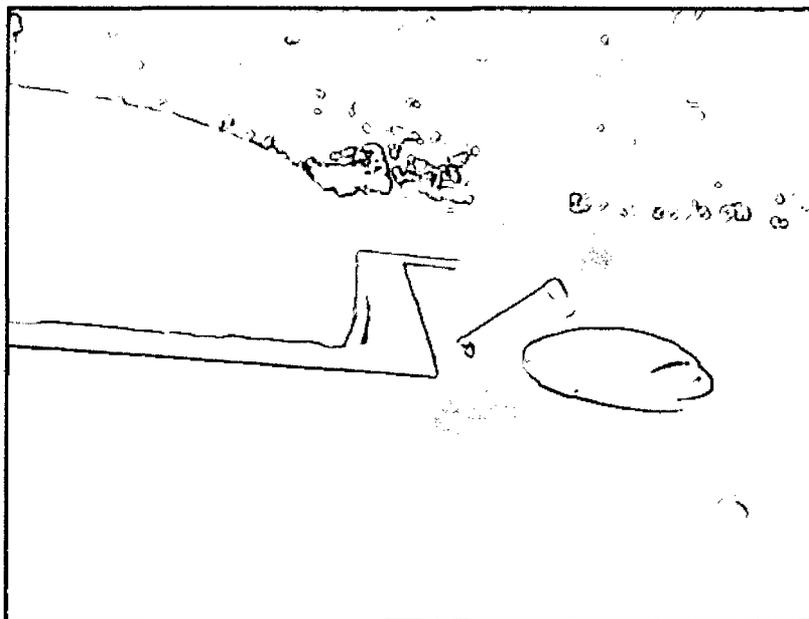
Fuente y elaboración: (SNV Latin America, 2012)

Figura 2.6. Biodigestor tubular Cidelsa instalado en Abancay – Apurímac para tratar estiércol de ganado vacuno (2008).



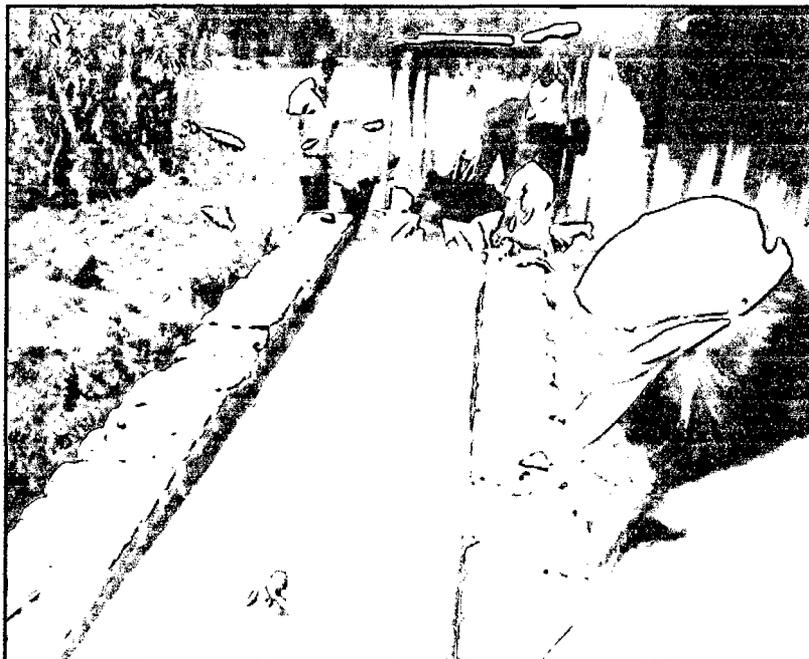
Fuente y elaboración: (SNV Latin America, 2012)

Figura 2.7. Biodigestor en Granja Villa, Chorrillos, Lima (2010).



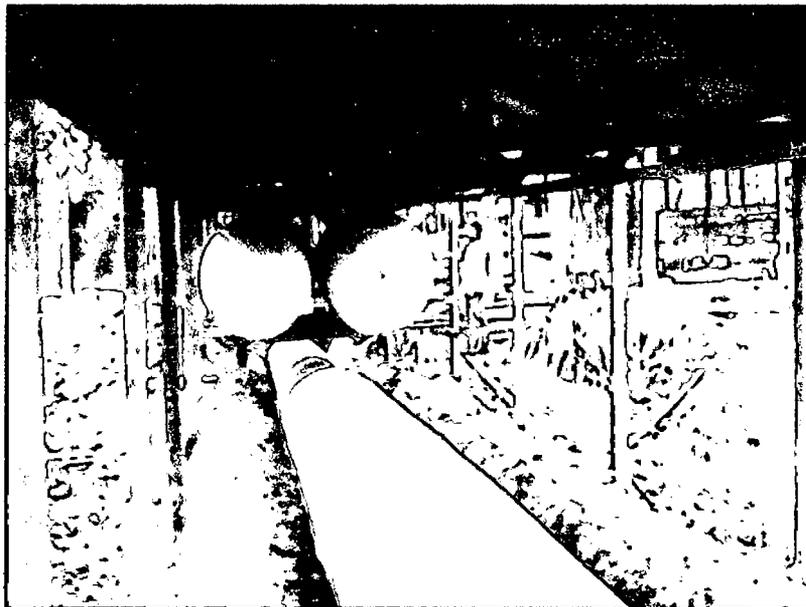
Fuente y elaboración: (CIDELSA SAC, 2012)

Figura 2.8. Biodigestor tubular de 10m³ instalado en Huaraz para Tratar estiércol de cuyes (2009).



Fuente y elaboración: (CIDELSA SAC, 2012)

Figura 2.9. Biodigestor de 20m de longitud y dos reservorios de biogás de 1.7m³ cada uno produce 1,250 litros de Biol por día -Tocache (2007).



Fuente y elaboración: (CIDELSA SAC, 2012)

Figura 2.10. Biodigestor en Geomembrana de PVC de 0.6mm. Instalado en la Granja Ganadera de Calzada, Moyobamba – Proyecto Especial Altomayo, Gobierno Regional de San Martín. (2007).



Fuente y elaboración: (CIDELSA SAC, 2012)

Figura 2.11. Biodigestor tubular fabricado en Geomembrana de PVC de 0,6mm -
Instalado en la empresa Palmagro en Pucallpa. (2008).



Fuente y elaboración: (CIDELSA SAC, 2012)

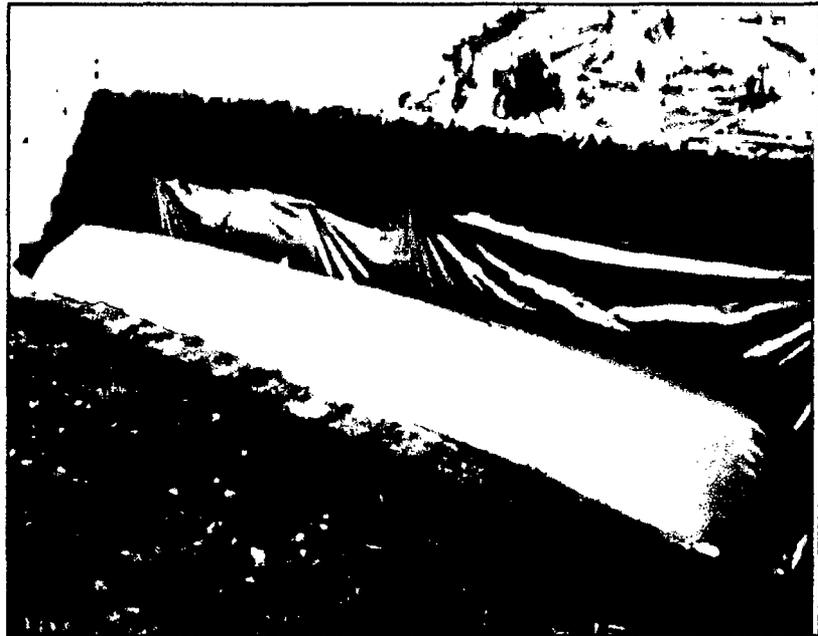
Figura 2.12. Biodigestor tubular de 1.27m diámetro X 20.0m de longitud. Instalado
en Tocache con la colaboración del PEAM Moyobamba y la
Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza (2008).



Fuente y elaboración: (CIDELSA SAC, 2012)

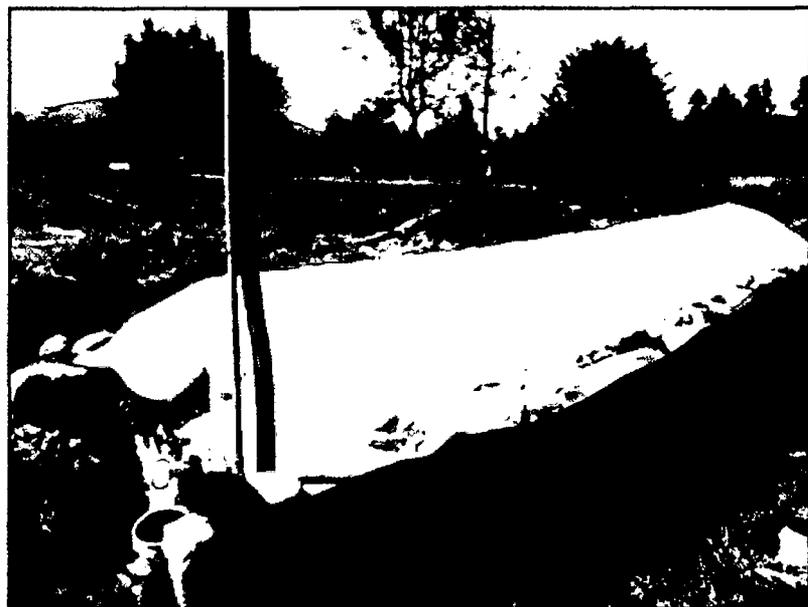
(B)

Figura 2.13. Biodigestor tubular preparado para inverdadero a 3,700 msnm. AYACUCHO (2009).



Fuente y elaboración: (CIDELSA SAC, 2012)

Figura 2.14. Digestor de 10 m³, en el complejo agropecuario del distrito de Apata – Junín (2011)



Fuente y elaboración: (Lahura, 2011)

2.2. Bases Teóricas

2.2.1. Producción de Biogás

El Biogás es el nombre común que se le ha dado a la mezcla gaseosa producida durante la biodegradación anaeróbica de materia orgánica. El biogás, es una mezcla de gas compuesto principalmente por metano (entre 60-80%), dióxido de carbono (30 - 40%), anhídrido sulfhídrico (0 a 1%), trazos de oxígeno, monóxido de carbono, hidrógeno, amoníaco, nitrógeno (2 a 5%); es, por tanto, un gas combustible.

El biogás se obtiene como producto de la saturación bacteriana anaeróbica, es decir, en ausencia del oxígeno que mata las bacterias y también en ausencia del aire que contiene oxígeno y en un medio de un caldo de bacterias metanogénicas, proteolíticas de desechos orgánicos que contengan una adecuada proporción de carbono y proteínas.

Tabla 2.2. Composición del Biogás

Componentes	Porcentaje
Metano (CH ₄)	60 – 80
Dióxido de carbono (CO ₂)	30 – 40
Hidrógeno (H ₂)	5 – 10
Nitrógeno (N ₂)	1 – 2
Monóxido de carbono (CO)	0 – 1.5
Oxígeno (O ₂)	0.1
Ácido sulfhídrico (H ₂ S)	0 – 1
Vapor de Agua	0.3

Fuente y elaboración: (Kléber & Manitio, 2010)

El carbono y las proteínas son aportadas por las hojas secas, pajas, ichus, rastrojos, excrementos humanos y de animales domésticos; la orina incrementa el nitrógeno y consecuentemente la producción de biogás mejora. Esta fermentación por medio de bacterias especializadas en producir gas metano se debe realizar en ausencia de todo oxígeno y a temperatura más o menos constante, siendo la temperatura de 35°C la que parece ser apropiado para un rendimiento óptimo. La temperatura ambiente usual en la costa, en la sierra y gran parte de ceja de selva es inferior a ésta, por tanto, en muchos casos debemos hacer uso de calefactores auxiliares. Un sistema de calefacción relativamente económica y fácil de lograr es la calefacción solar por medio de serpentines de tuberías de cobre inmerso en el

fermentador por el cual circula agua calentada en un colector solar externo o se puede usar también los invernaderos como sistemas de calefacción solar aunque la temperatura lograda es menor que en el caso anterior.

La fórmula química del gas metano es CH₄ y es el principal constituyente del biogás. A los aparatos en los cuales se realizan la fermentación bacteriana para la obtención de biogás se denominan en general, fermentadores de biogás o fermentadores de gas metano. Toda familia de 4 a 6 personas que posean 3 vacas y otros animales mayores o un número suficiente de animales domésticos menores está en condición de poseer un fermentador de biogás que le proporcione suficiente gas combustible para cocinar tres veces al día y aún le da gas para alumbrado por uno o tres horas. Se pueden usar también como materia prima para los fermentadores otros desechos orgánicos: excrementos humanos, hojas secas, residuos de pajas.

Tabla 2.3. Características del metano

ITEM	Valor
Densidad	1.09 kg/m ³
Solubilidad en agua	Baja
Presión crítica	673.1 Psia
Temperatura crítica	82.5 °C
Poder calorífico	4500 a 6500 Kcal/m ³

Fuente y elaboración: (Kléber & Manitio, 2010)

La tabla N° 2.3, resume la composición promedio del biogás según la fuente..

Tabla 2.4. Composición del biogás derivado de diversas fuentes

Gases	Desechos Agrícolas	Lodos cloacales	Desechos industriales	Rellenos sanitarios	Propiedades
CH ₄	50 – 80%	50 – 80%	50 – 70%	45 -65%	Combustible
CO ₂	30 -50 %	20 – 50%	30 – 50%	34 – 55%	Ácido, asfixiante
H ₂ O(v)	Saturación	Saturación	Saturación	Saturación	Corrosivo
H ₂ S	100 – 7000 ppm	0 – 1%	0 – 8%	0.5 – 100 ppm	Corrosivo, olor, tóxico
H ₂	0 – 2%	0 – 5%	0 – 2%	0 – 1%	Combustible
Amoniaco	trazas	trazas	trazas	trazas	Corrosivo
N ₂	0 – 1%	0 – 3%	0 – 1%	0 – 20%	Inerte
O ₂	0 – 1%	0 – 1%	0 – 1%	0 – 5%	Corrosivo
CO	0 – 1%	0 – 1%	0 – 1%	trazas	Tóxico
Orgánicos	Trazas	trazas	trazas	5ppm	Corrosivos, olores

Fuente y elaboración: (Kléber & Manitio, 2010)

2.2.2. Tipos de Biodegradación de la Materia Orgánica

En términos sencillos el biogás es la mezcla de gases resultantes de la descomposición de la materia orgánica realizada por acción bacteriana en condiciones anaeróbicas. La composición de biogás depende del tipo de desecho utilizado y de las condiciones en que se procesa. Los principales componentes del biogás y en mayor porcentaje son el metano (CH4) y el dióxido de carbono (CO2). Aunque la composición del biogás varía de acuerdo a la biomasa utilizada, su composición aproximada se presenta a continuación. Tabla 2.5.

Tabla 2.5. Porcentaje de los gases presentes en el biogás

GAS	VOLUMEN
Metano, CH4	54 - 70%
Bióxido de carbono, CO2	27 - 45%
Hidrógeno, H2	1 - 10%
Nitrógeno, N2	0.5 - 3%
Acido Sulfhídrico, H2S	0.1%

Fuente y elaboración: (Wheatley, 2010)

El metano, principal componente del biogás, es el gas que le confiere las características combustibles al mismo. El valor energético del biogás por lo tanto estará determinado por la concentración de metano alrededor de 20 - 25 MJ/m3, comparado con 33 - 38MJ/m3 para el gas natural.

El proceso de biodegradación del sustrato se da por dos métodos:

- Descomposición aeróbica (aerobia).
- Descomposición anaeróbica (anaerobia).

2.2.2.1. Descomposición Aeróbica.

Esta descomposición es en presencia de oxígeno por lo tanto es un proceso oxidante, el mismo que es llevado a cabo teóricamente en tres etapas:

- ❖ La oxidación de la materia orgánica.
- ❖ La nitrificación.
- ❖ La desnitrificación, con el fin de remover el nitrógeno amoniacal.

Sin embargo los dos últimos pasos son complejos y difíciles de ejecutar con este tipo de residual.

En este tipo de descomposición, el oxígeno es el receptor de los electrones desprendidos en la descomposición biológica o degradación. Los organismos

aerobios emplean la energía desprendida en el fenómeno de la descomposición para sus procesos de crecimiento y reproducción, y al mismo tiempo liberan una cantidad de calor.

$$\Delta \text{Energía} = \text{Biomasa} + \text{Calor} \dots\dots\dots (2.1)$$

2.2.2.2. Descomposición Anaeróbica.

Esta descomposición ocurre en ausencia de oxígeno (sin aire) al interior de un biodigestor, aparato que facilita el crecimiento y la proliferación de un grupo de bacterias anaerobias metanogénicas, que descomponen y tratan los residuos dejando como resultado final, un gas combustible conocido como biogás, además produce un efluente líquido alcalino rico en nutrientes y materia orgánica estabilizada.

En la descomposición anaeróbica el agente receptor de los electrones desprendidos de la degradación es otro compuesto distinto al oxígeno. Para esta descomposición, la energía desprendida del proceso de descomposición es receptada por los enlaces de metano. La energía restante se emplea, al igual que en la descomposición aerobia, en los procesos metabólicos y en liberación de calor.

$$\Delta \text{Energía} = \text{Biomasa} + \text{Calor} + \text{CH}_4 \dots\dots\dots (2.2)$$

El Metano (CH₄) producido en este proceso es el último eslabón en una cadena de microorganismos que degradan materia orgánica y devuelven los productos de la descomposición al medio ambiente.

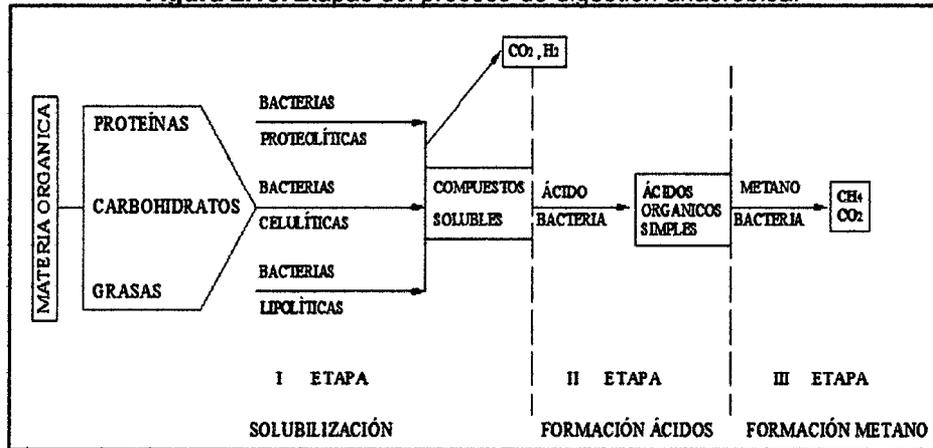
Bajo este concepto, el proceso por el cual se obtiene el biogas es una fuente de energía renovable, que se obtiene a partir de sustratos de escaso valor económico y que, además, son una fuente de contaminación y enfermedades. De lo anterior mencionado y para fines del desarrollo de la presente tesis, se hará referencia detalladamente a la biodigestión anaeróbica.

2.2.2.3. Biodigestión Anaeróbica y sus Etapas.

En el proceso de la biodigestión anaeróbica, la materia orgánica se degrada paulatinamente para producir metano, mediante un conjunto de interacciones complejas entre distintos grupos de bacterias. En el digestor herméticamente cerrado, el oxígeno libre de la atmósfera y del agua es consumido por las bacterias aerobias, que tienden a desaparecer, y ser reemplazadas por las

bacterias facultativas. Estas, junto con las anaerobias, pueden iniciar entonces la digestión anaeróbica. Figura 2.15.

Figura 2.15. Etapas del proceso de digestión anaeróbica.



Fuente y elaboración: (Wheatley, 2010)

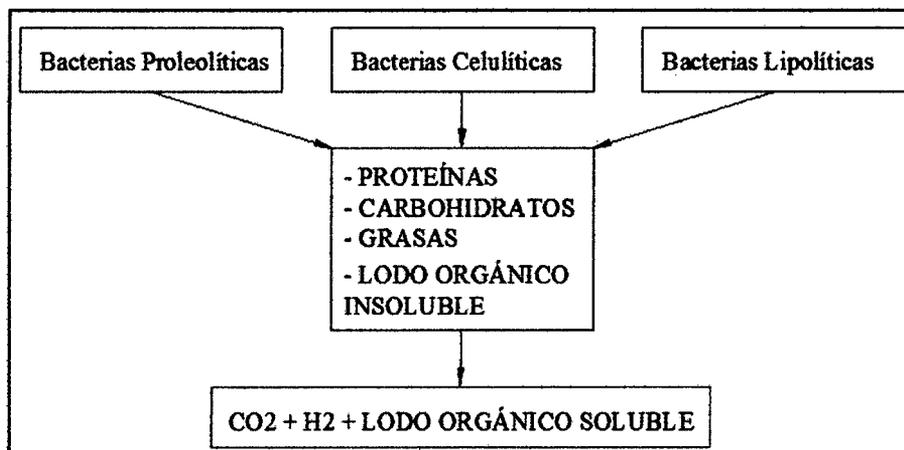
De acuerdo a lo anterior se tienen tres etapas:

- Hidrólisis.
- Acidogénesis.
- Metanogénesis.

Etapas de hidrólisis o solubilización.

Esta primera etapa consiste en una mezcla de bacterias llamadas a veces formadoras de ácidos, que hidrolizan las moléculas complejas de materia orgánica para originar ácidos grasos de cadena corta y alcohol. Figura 2.16.

Figura 2.16. Hidrólisis o solubilización.



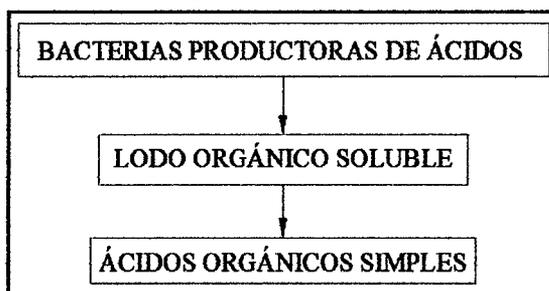
Fuente y elaboración: (Wheatley, 2010)

El material orgánico soluble resultante puede ser asimilado por la célula y por lo tanto sirve como sustrato para las bacterias de la segunda etapa.

Etapa de acidificación o acidogénesis.

El segundo grupo es el de las bacterias acetogénicas, producen acetato e hidrógeno, al igual que todos orgánicos solubles y ácidos orgánicos simples Figura 2.17.

Figura 2.17. Acidificación.



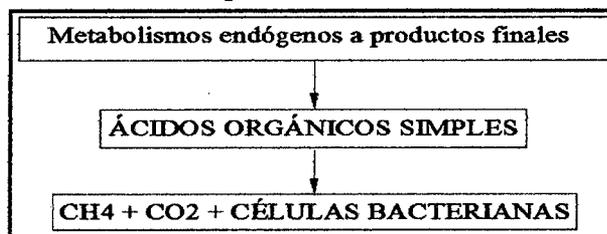
Fuente y elaboración: (Wheatley, 2010)

Los ácidos grasos son convertidos en ácidos orgánicos volátiles, tales como el acético, siendo el principal producto y puede llegar a representar el 70%. También se encuentran el ácido propiónico, compuestos hidrogenados (H_2) y carbodióxidos (CO_2). En esta etapa se da un descenso en el pH que tiende a subir a medida que las bacterias metanogénicas, de la tercera etapa, consumen los ácidos y el oxígeno del medio es eliminado, proceso que es indispensable para la tercera fase.

Etapa de metanogénesis o metanización.

El tercer grupo de micro-organismos se suele denominar metanogénico, y convierte los productos ya degradados a metano y dióxido de carbono. Figura 2.18.

Figura 2.18. Metanización.

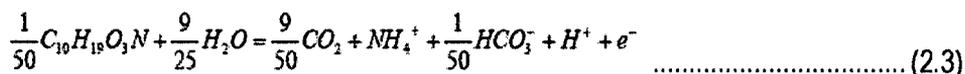


Fuente y elaboración: (Wheatley, 2010)

La transformación final cumplida en esta etapa tiene como principal sustrato el acético junto a otros ácidos orgánicos de cadena corta y los productos finales liberados están constituidos por el metano y el dióxido de carbono.

En esta etapa las bacterias metanogénicas transforman los ácidos orgánicos en metano. Las tres etapas de la producción de metano se pueden resumir en las siguientes reacciones:

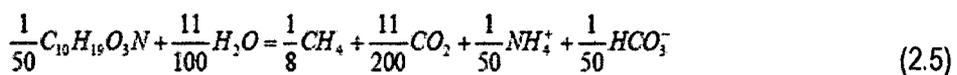
Reacción de Hidrólisis: R_H :



Reacción de Acidogénesis: R_A :



Reacción de Metanogénesis: $R_M = R_A - R_H$



2.2.3. Factores que Influyen en la Producción de Biogás

La actividad metabólica involucrada en el proceso metanogénico se ve afectada por diversos factores. Debido a que cada grupo de bacterias intervinientes en las distintas etapas del proceso responde en forma diferencial a esos cambios, no es posible dar valores cualitativos sobre el grado que afecta cada uno de ellos a la producción de gas en forma precisa. Entre los factores más importantes a tenerse en cuenta se desarrollarán los siguientes:

- El tipo de sustrato (nutrientes disponibles, materia prima), (MP)
- Temperatura del sustrato (T)
- La carga volumétrica (CV)
- Tiempo de retención (TR)
- Nivel de acidez (PH)
- Relación carbono/nitrógeno (C/N)
- Concentración del sustrato (C)
- El agregado de inoculantes (I)
- Grado de mezclado (A)
- Presencia de compuestos inhibidores del proceso, nutrientes y toxicidad.

2.2.3.1. Tipo de Materia Prima (MP)

Las materias primas fermentables incluyen dentro de un amplio espectro a los excrementos animales, aguas residuales orgánicas de las industrias, restos de cosechas y basuras de diferentes tipos, como los efluentes de determinadas industrias químicas.

El proceso microbiológico no solo requiere de fuentes de carbono y nitrógeno sino que también deben estar presentes en un cierto equilibrio sales minerales tales como azufre, fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, molibdeno, zinc, cobalto, selenio, tungsteno, níquel y otros en cantidades menores.

Normalmente las sustancias orgánicas como los estiércoles y lodos cloacales presentan estos elementos en proporciones adecuadas.

Los valores tanto de producción como de rendimiento en gas de los estiércoles presentan grandes diferencias. Esto es debido al sin número de factores involucrados que hacen muy difícil la comparación de resultados. En cuanto al volumen de estiércol producido por las distintas especies animales son variables de acuerdo fundamentalmente al peso y al tipo de alimentación y manejo de los mismos. Cuando se encare un proyecto específico se recomienda realizar una serie de mediciones en el lugar donde se empleará al digester.

A modo ilustrativo se expone a continuación la tabla 1.3, que trata acerca de las cantidades de estiércol producido por diversos tipos de animales y el rendimiento en gas de los mismos, tomando como referencia el kilogramo de sólidos volátiles (SV).

Tabla 2.6. Producción de estiércol por especie.

ESPECIE	PESO VIVO	Kg. ESTIERCOL/día	%CH ₄
Cerdos	50	4,5 - 6	65 - 70
Vacunos	400	25 -40	65
Equinos	450	12 - 16	65
Ovinos	45	2,5	63
Aves	1.5	0,06	60
Caprinos	40	1,5	-

Fuente y elaboración: (EPA U.S., 2009)

Por lo tanto, para mejorar la producción de metano de los biodigestores, es conveniente mejorar los SV, es decir que en la mezcla de estiércoles se encuentre

balanceada la cantidad de C/N, además se encuentre con niveles de pH balanceados y que posea una alta cantidad de organismos metanizantes.

2.2.3.2. Temperatura del Sustrato (T)

La digestión es más rápida y más completa a temperaturas elevadas, el intervalo de 30 - 40°C es adecuado para la velocidad de digestión y la estabilidad del digestor. La temperatura elegida no debe oscilar en un intervalo mayor de cinco grados. En climas fríos gran parte de la energía producida se consume para mantener caliente el digestor y aumentar la temperatura del sustrato, pudiendo representar las 3/4 partes de la producción de gas.

Para que se inicie el proceso se necesita una temperatura mínima de 4° a 10° C y no se debe sobrepasar una máxima de alrededor de 60 a 75°C, como se puede ver en la tabla

Tabla 2.7. Tipo de bacterias en función de la temperatura

BACTERIAS	RANGO DE TEMPERATURAS	SENSIBILIDAD	TIEMPO DE RETENCIÓN
Psicrofílicas	4 - 15°C	± 2°C/hora	Mas de 100 días
Mesofílicas	15°C - 40°C	± 1°C/hora	30 – 60 días
Termofílicas	40°C - 75 °C	± 0,5°C/hora	10 – 16 días

Fuente y elaboración: (EPA U.S., 2009)

En el rango mesofílico las bacterias que se desarrollan en este nivel de temperatura se reproducen fácilmente siendo la temperatura óptima de 35 °C, en la cual los desechos orgánicos se pueden digerir a esta temperatura produciendo biogás. Sin embargo, es necesario conocer las condiciones ambientales en las cuales se llevará dicho proceso para la instalación del equipo de generación de gas. En la fase termofílica se produce la mayor cantidad de biogás que en el anterior y en tiempos más cortos, en general sólo es usado en las grandes instalaciones a nivel industrial, ya que se requiere de un control muy preciso.

Por lo tanto, el aumento de temperatura produce una mayor actividad biológica y mayor producción de gas. Al mismo tiempo se deberá tener en cuenta que al no generar calor, el proceso de estabilizar la temperatura deberá ser mantenida mediante energía exterior. Los digestores que trabajan a temperaturas mesofílicas y termofílicas poseen generalmente sistemas de calefacción, aislamiento y control

los cuales son obviados en digestores rurales económicos que trabajan a bajas temperaturas. La ventaja de la digestión termofílica es que la producción de biogás es aproximadamente el doble que la mesofílica, así que los biodigestores termofílicos pueden ser la mitad en volumen que los mesofílicos, manteniendo su eficiencia general. La temperatura está íntimamente relacionada con los tiempos que debe permanecer la biomasa dentro del digestor para completar su degradación, esto se conoce como tiempo de retención que se detallará más adelante.

2.2.3.3. Carga Volumétrica (CV)

La carga volumétrica es el volumen de sustrato orgánico cargado diariamente al digestor. Este valor tiene una relación de tipo inversa con el tiempo de retención hidráulico, dado que a medida que se incrementa la carga volumétrica disminuye el tiempo de retención. Con la siguiente expresión se puede calcular la carga volumétrica.

$$CV = \left(\frac{1}{TRH} \right) (C_r) \dots\dots\dots (2.6)$$

Donde:

CV = Es la carga volumétrica (Kg/m³.día)

TRH = Tiempo de retención hidráulico. (Días)

Cr = Es la concentración del efluente en (Kg/m³)

Existen diferentes formas de expresar este parámetro (CV), siendo las más usuales las siguientes: Kg. de material/día, Kg. de materia seca/día, Kg. De sólidos volátiles/día, todos expresados por metro cúbico de digestor, (Kg./m³/día).

Al reducir la carga volumétrica (CV) se reduciría el tamaño del biodigestor, pero también se reduciría la cantidad de biogás producido diariamente.

2.2.3.4. Inclusión de Inoculantes (I)

El crecimiento de bacterias en el interior de los digestores posee tres etapas:

I. Arranque.

II. Estabilización.

III. Declinación.

En la primera etapa, el tiempo de retención (TR) puede ser disminuido por la inclusión de material de otro digestor que provea de bacterias y acelere el proceso de fermentación, esto se puede usar en digestores discontinuos que deben ser arrancados frecuentemente.

En la segunda etapa, se produce una cierta estabilización, logrando una mayor producción de biogas por kilogramo de residual. Y finalmente la última zona indica el decaimiento de producción de gas.

Por lo tanto existen dos factores que deben ser tomados en cuenta en la inoculación de un digestor que son; **la proporción en que se agrega la inclusión y la edad del digestor**. Por lo que a mayor proporción y menor edad, la eficacia será mayor.

2.2.3.5. Tiempo de Retención (TR).

Debido a que el proceso de producción de gas es lento, mientras más tiempo estén las sustancias descargadas en el biodigestor, mayor será la producción de gas en términos absolutos por unidad de sustrato. De esta manera existen dos parámetros para calcular el tiempo de retención: El Tiempo de retención de los sólidos biológicos (TRSB), El Tiempo de retención hidráulico (TRH).

- Tiempo de retención de los sólidos biológicos (TRSB)

El tiempo de retención de los sólidos biológicos (TRSB), se determina al dividir el monto de materia orgánica (MO) o Sólidos Volátiles (SV) cargados en el digestor, para la cantidad de (MO) que sale del sistema diariamente. Se asume que el TRSB representa el tiempo de retención promedio de los microorganismos en el digestor. También se puede decir, cuando existe más tiempo para digerir los residuales o excretas, más completa resulta la digestión. El 90% de la digestión se alcanza en 20 días con un promedio de temperatura de 35 °C, pero con el transcurso del tiempo no se logra alcanzar el 100%. Es necesario aclarar que si el TRSB es demasiado corto las bacterias metanogénicas son diluidas o eliminadas con el afluente, por lo tanto existe un cese en la biodigestión, siendo el TRSB de 3 días como mínimo.

- Tiempo de retención hidráulico (TRH)

El tiempo de retención hidráulico (TRH), es la relación entre el volumen del biodigestor dividido por la carga diaria. Para condiciones de campo o granja es más práctico medir el TRH que el TRSB, siendo estos dos parámetros muy importantes en los digestores que han sido construidos en la actualidad. En otras palabras se puede decir que el tiempo de retención (TR) mínimo, está determinado por el tiempo de generación de las bacterias, esto es, el tiempo que necesitan los microorganismos para reproducirse. El TR está ligado a factores tales como: al diseño del reactor, el mezclado del sustrato, la forma de extracción de los efluentes, tipo de sustrato y la temperatura. Por lo tanto, al elegir una mayor temperatura implicará una disminución en los tiempos de retención requeridos.

Este parámetro sólo puede ser claramente definido en los digestores tipo Batch, los cuales son digestores discontinuos y en donde el TR coincide con el tiempo de permanencia del sustrato dentro del biodigestor. Mientras que en los digestores continuos y semicontinuos el tiempo de retención se define como el valor en días, al dividir el volumen del digestor para el volumen de carga diaria.

En la tabla siguiente se puede apreciar el TRH y la materia prima que es usada en la digestión de estiércoles a temperatura mesofílica. Sin embargo, es necesario considerar que ha temperaturas psicofílicas, el TRH será de mayor número de días, produciendo biogás de forma lenta y constante, para lo cual es importante considerar el aporte de bacterias iniciadoras en el proceso de fermentación anaeróbica.

Tabla 2.8. Tiempo de retención y materia prima

MATERIA PRIMA	TRH
Estiércol vacuno líquido.	20 - 30 días
Estiércol porcino líquido.	15 - 25 días
Estiércol aviar líquido.	20 - 40 días

Fuente y elaboración: (EPA U.S., 2009)

En la tabla 2.8 se establece como referencia la producción de gas y el tiempo de retención en función de la temperatura de acuerdo a la materia orgánica de origen bovino (Vacuno).

Tabla 2.9. Producción de gas en relación con el tiempo de retención

Temperatura [°C]	Producción de gas [m ³ /día]	Tiempo de Retención [meses]
15	0.15	12
20	0.30	6
25	0.60	3
30	1.00	2
35	2.00 o mayor	1

Fuente y elaboración: (Wheatley, 2010)

Por lo tanto, el límite mínimo de los TR está dado por la tasa de reproducción de las bacterias metanogénicas debido a que la continua salida de efluente del digestor extrae una determinada cantidad de bacterias que se encuentran en el líquido. Esta extracción debe ser compensada por la multiplicación de las bacterias que pertenecen dentro del reactor. (Wheatley, 2010).

2.2.3.6. Nivel de Acidez (pH)

Cuando se logra establecer el proceso de fermentación el pH se mantiene en valores que oscilan entre 6.6 hasta 7.6 y 8. El pH tiende a disminuir como causa de la presencia de los Ácidos Grasos Volátiles (AGV) y el acetato. Por lo que las bacterias metanogénicas deben convertir rápidamente los AGV a medida que se incrementan las bacterias acetogénicas, caso contrario el pH desciende en el biodigestor. Sin embargo, el equilibrio dióxido de carbono - bicarbonato (CO₂ - HCO₃) y Amonio -Amoníaco (NH₃ -NH₄) opone resistencia al cambio de pH en el material de entrada. Estas desviaciones de los valores normales es un indicativo del desequilibrio entre las bacterias de la fase ácida y la metanogénica provocado por cualquier variación en alguno de los parámetros.

Tabla 2.10. Efectos del pH en la biodigestión

pH	EFFECTO
7 - 7.6	Óptimo
≤ 6.2	Retarda la acidificación
≥ 7.6	Retarda la amonización

Fuente y elaboración: (Wheatley, 2010)

Para controlar las variaciones del pH en el biodigestor, existen dos métodos de control. El primer modo de control es detener la carga del biodigestor y permitir durante cierto tiempo que las bacterias metanogénicas reduzcan los AGV, permitiendo que el nivel de pH se incremente hasta valores aceptables entre el rango establecido. Cuando el pH retoma valores normales se puede continuar cargando el biodigestor con materia orgánica de manera lenta y en pequeñas cantidades para luego aumentar gradualmente la carga y evitar cualquier descenso. El segundo modo de control consiste en agregar tampones o buffer para elevar el pH sin cambiar el ritmo de carga del biodigestor, los elementos a usar son el carbonato de sodio que evitan las precipitaciones del carbonato de calcio, sin embargo este material resulta ser costoso, también se puede agregar agua con cal.

2.2.3.7. Relación Carbono/Nitrógeno (C/N)

La relación C/N, son los constituyentes básicos de la materia orgánica. Por lo tanto es necesario que exista una relación adecuada entre estos elementos; teóricamente la relación adecuada de C/N se encuentra entre 25:1 hasta 35:1. Sin embargo hay que considerar dos efectos: Si la relación C/N es muy elevada, como consecuencia disminuye la actividad biológica, hasta puede inhibir el proceso debido a su alta alcalinidad. Sin embargo, cuando $C/N > 35$, la materia orgánica puede ser tratada como compost, debido al exceso de carbono.

Si la relación C/N es muy baja, como consecuencia se pierde el nitrógeno en forma de amoníaco, inhibiendo por completo la actividad bacteriana.

Por otra parte, la descomposición de materiales con alto contenido de carbono ocurre más lentamente, pero el periodo de producción de biogas es más prolongado. Por ejemplo, la relación de C/N en residuales porcinos es de 9 a 3; en vacunos de 10 a 20; en gallinas de 5 a 8; para humanos es de 8 y para residuos vegetales es de 35. La relación óptima se considera en un rango de 30:1 hasta 10:1, una relación menor de 8:1 inhibe la actividad bacteriana debido a la formación de un excesivo contenido de amonio.

En la tabla siguiente, se presenta el contenido de N, y C/N para diferentes tipos de materia prima, necesario para el proceso de digestión anaeróbica.

Tabla 2.11. Relación C/N para diferentes materias primas

Materia	Nitrógeno (% peso seco)	C/N
Orina	15-18	0.8
Sangre	6.3	3.0
Huesos machacados	-	3.5
Pollo	10-14	15
Carnero	3.8	
Cerdo	3.8	
Caballo	2.3	25
Vaca	1.7	25-18
Hierba cortada	4	12
Hierbas mezcladas	2.4	19
Heno, hierba fresca	4	12
Heno, alfalfa	2.8	17
Heno, hierba azul	2.5	19
Vegetales no leguminosos	2.5-4	11-19
Alga marina	1.9	19
Clavo	1.8	27
Mostaza	1.5	26
Patatas	1.5	25
Espigas de trigo	0.5	150
Espigas de avena	1.1	48
Aserrín	0.1	200-500

Fuente y elaboración: (Kléber & Manitio, 2010)

2.2.3.8. Agitación y Mezclado.

La agitación tiene como objetivo los siguientes aspectos (Acuña, 2008):

- Remoción de los metabolitos producidos por las bacterias metanogénicas.
- Mezcla del sustrato fresco con población bacteriana.
- Evitar que se forme una costra al interior del digestor.
- Establecer una densidad uniforme en la población bacteriana y evitar que deje de existir actividad biológica, que pueda inhibir el proceso.

Existen diferentes mecanismos de agitación desde lo más simple hasta lo más complejo, esto se logra agitando manualmente, agitación por medio de la entrada y salida de líquidos que entran al digestor, agitación de tipo electromecánico por medio de un motor eléctrico acoplado a una hélice.

2.2.3.9. Inhibidores

Este parámetro es muy importante y debe ser tomado en cuenta debido a que metales pesados, antibióticos y detergentes en determinadas concentraciones

115

pueden inhibir e incluso interrumpir el proceso de fermentación. Razón por la cual se debe evitar la carga de estiércol proveniente de animales tratados con antibióticos. (Acuña, 2008). Cuando la concentración de ácidos volátiles es alta más de 2.000 ppm para la fermentación mesofílica y de 3.600 ppm para la termofílica se inhibirá la digestión anaeróbica. Y por último concentraciones elevadas de Nitrógeno y amoníaco destruyen las bacterias metanogénicas.

En la tabla siguiente se puede apreciar valores de concentraciones de ciertos elementos inhibidores, valores que se deben tomar como orientativos, puesto que las bacterias que intervienen pueden con el tiempo adaptarse a condiciones que en un principio las afectaba de forma muy marcada.

Tabla 2.12. Elementos inhibidores

INHIBIDORES	CONCENTRACIÓNINHIBIDOR
SO ₄	5.000 ppm
NaCl	40.000 ppm
Nitrato (según contenido de Nitrógeno)	0,05 mg/ml
Cu	100mg/l
Cr	200 mg/l
Ni	200-500 mg/l
CN (Después que se han domesticado las bacterias metanogénicas a 2-10 mg/ml).	25 mg/l
ABS (Detergente sintético)	20-40 mg/l
Na	3.500-5.500 mg/l
K	2.500-4.500 mg/l
Ca	2.500-4.500 mg/l
Mg	1.000-1.500 mg/l

Fuente y elaboración: (Kléber & Manitio, 2010)

2.2.3.10. Nutrientes

La concentración requerida para las bacterias metanogénicas requiere de contenidos de N, P y otros factores, por lo tanto una variación de estos elementos puede alterar el proceso. Es así que los materiales con alto contenido de Nitrógeno, tales como las excretas de animales, se descomponen fácilmente y producen biogás de una forma rápida, por lo que el periodo de fermentación es corto. Mientras tanto la descomposición de materiales con un alto contenido de carbono es más lento, pero el periodo fermentativo es más largo. Por lo tanto los

materiales con diferentes proporciones de carbono/nitrógeno (C/N) difieren ampliamente en sus rendimientos en biogás.

2.2.3.11. Toxicidad

Cuando existen problemas de toxicidad, los indicadores son la disminución de producción de metano y el incremento en la concentración de AGV que están presentes en el medio. Por lo tanto en la operación de biodigestores es necesario controlar el N y mantenerlo en el nivel óptimo, ya que un desbalance consistente en un contenido alto de nitrógeno y una baja disponibilidad de energía causa una toxicidad por una indebida generación de amonio. Usualmente, los niveles de amoníaco deben mantenerse por debajo de 80 ppm (Anderson 1982)⁴, pero a concentraciones excesivamente altas, entre 1500 y 3000 ppm, el amonio aún puede tolerarse en el medio. Sin embargo, para zonas rurales valores superiores a 8000 ppm pueden inhibir el proceso debido a la falta en el contenido de nitrógeno en el suelo y los alimentos para los animales y seres humanos.

2.2.3.12. Digestor o biodigestor

El digestor es el componente del sistema de biogás que optimiza naturalmente el crecimiento y proliferación de un grupo de bacterias anaerobias que descomponen y tratan los residuos dejando como subproducto gas combustible y un efluente líquido rico en nutrientes y materia orgánica estabilizada. Basados en limitaciones externas como inversión, eficiencia del tratamiento, rendimiento de la energía neta y rendimiento de las operaciones, el rango de las tecnologías disponibles varía desde los sistemas muy rudimentarios hasta los más sofisticados tanto a escala doméstica como a escala comercial. La elección de cual digestor utilizar, está condicionada inicialmente por la temperatura y las características del sistema de manejo de residuos existente o que se planea instalar el cual determina el método de carga del digestor. A continuación se describe brevemente las características para seleccionar el tipo de digestor a utilizar: De acuerdo al método de carga utilizado se distinguen dos tipos genéricos de digestores:

Digestores de flujo discontinuo: Se cargan una vez y quedan cerrados por un tiempo fijo de retención hasta que haya terminado el proceso de fermentación y no haya producción de gas. En esas plantas al comienzo hay mucha masa orgánica y pocas bacterias y al final tienen muchas bacterias y poca masa orgánica. La operación involucra principalmente cargar un biodigestor que permanecerá cerrado con sustrato, un inoculante y en algunos casos, una base para mantener el pH casi neutral.

El digestor es sellado y la fermentación se realiza entre 30 y 180 días, dependiendo de la temperatura ambiente. Durante este período, la producción de gas aumenta paulatinamente hasta un máximo y luego declina. Esta fermentación se puede realizar con un contenido de sólidos orgánicos de 6 a 10%.

Digestores de flujo continuo: Los digestores de flujo continuo son cargados y descargados en forma periódica, por lo general todos los días. Cualquier tipo de construcción es apropiada para una planta continua, pero el material de fermentación debe ser fluido y uniforme. Existen muchos diseños y formas según su estructura, entre los cuales pueden citarse, como los de mayor uso, tres tipos: de estructura sólida fija, de estructura sólida móvil y de balón de plástico.

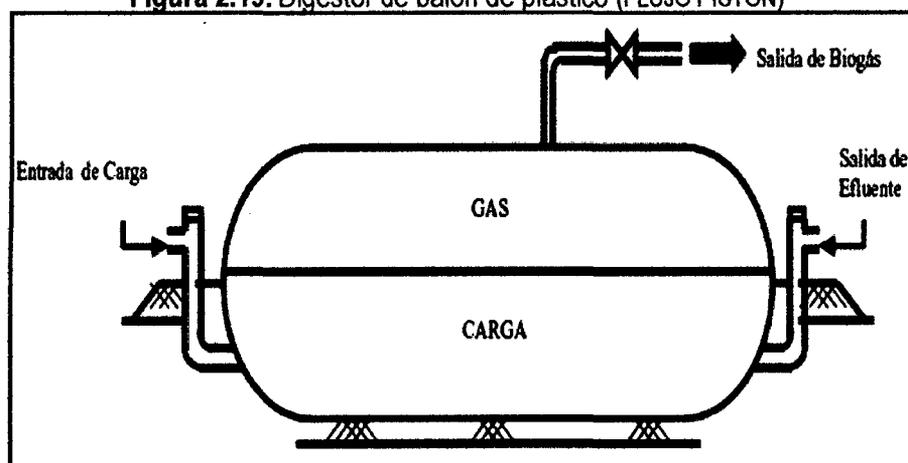
De estructura sólida fija. Consiste de una cámara de gas construida de ladrillos, piedra o concreto la cual permanece inmóvil y fija. Tanto el tope como la base del reactor son semiesféricos y están unidos por lados rectos. La estructura interna es sellada por varias capas para aislar el gas. El digestor es alimentado por un tubo de carga que es recto y finaliza en la mitad de nivel dentro del digestor. Hay un tapón manual en la parte superior del digestor para facilitar su limpieza y el conducto de salida del gas sale de la cubierta.

Digestor de estructura sólida móvil. Este digestor es en forma de bóveda esférica (o cilíndrica) y tiene un depósito de gas móvil en forma de campana flotante. La campana puede flotar directamente en la carga de fermentación o en un anillo de agua cilíndrico. El gas se acumula en la campana, haciéndola subir y luego vuelve a bajar cuando se extrae el gas a través de un tubo instalado en

la campana misma. Para evitar que la campana se ladee, se construye un soporte de hierro como guía. La campana además de subir y bajar, es libre de girar, así puede mover la capa que eventualmente pueda flotar en la superficie de la carga de fermentación. Para su construcción se usa comúnmente ladrillos, cemento, arena y grava; para la campana flotante, lámina de acero.

De balón de plástico (tubular). Está compuesto de una bolsa de plástico, caucho, polietileno o geomembrana de PVC, completamente sellada. La parte inferior de la bolsa (75% de volumen) se rellena con la carga, mientras en la parte superior de la bolsa (25%) se almacena el gas. Los tubos de entrada y salida están sujetos directamente a la pared de la bolsa. Aunque este digestor actúa como un reactor de tapón de flujo, el gas puede almacenarse en una bolsa separada. El material plástico o de caucho para la planta, tiene que ser elegido con cuidado: resistente a la intemperie y a los rayos ultravioleta. Se puede recomendar para todos aquellos sitios donde no haya peligro de que se dañe la pared de la bolsa y donde predominen temperaturas altas y constantes.

Figura 2.19. Digestor de balón de plástico (FLUJO PISTÓN)



Fuente y elaboración: (Marchaim, 1992)

Existen otros tipos de digestores desarrollados recientemente y en proceso de investigación entre los cuales pueden nombrarse los de filtro anaeróbico, reactor de deflector anaeróbico, procesos de contacto anaeróbico, digestores tubulares inclinados, etc., entre los cuales vale la pena mencionar:

De tapón de flujo: A pesar de ser similar al digestor de balón de plástico, es construido con diferentes materiales y clasificado separadamente. Consiste de una zanja construida con concreto o con una membrana impermeable. El digestor se cubre con una cubierta flexible anclada al suelo, al concreto o al acero galvanizado. Estos tanques especiales son rectangulares y tratan residuos que contengan de 11% a 13% total de sólidos.

De mezcla completa. Son tanques especiales, construidos sobre o bajo tierra, que tratan residuos orgánicos cuya concentración de sólidos está en un rango de 3 a 10%. Aparte de los digestores de flujo discontinuo, todos los diseños discutidos se conocen como sistemas de crecimiento suspendido y cuando no hay reciclaje de sólidos, el tiempo de retención es igual al tiempo de retención de los sólidos biológicos.

2.2.4. Sistemas de control

2.2.4.1. Diseño e Implementación de Sistemas de Control

Para poder diseñar el sistema de control de un proceso es preciso estudiar previamente el proceso para poder definir las variables implicadas y los parámetros de nuestro proceso, si vamos a un proceso industrial este posee variables físicas y parámetros de operación los cuales exigen algún tipo de control que garantice la calidad de los subproductos y por ende la performance del producto final, el control de un proceso requiere de la utilización de medios, técnicas, instrumentos de medición, dispositivos y personal.

2.2.4.2. Diseño del sistema de Control Automático

El diseño del sistema de control parte de definir que trabajo es el que va a desempeñar el sistema de control automático en el proceso es decir la labor que va a realizar y en qué nivel se va a implementar ello: Control, Para nuestro sistema significa medir el valor de la variable controlada del sistema: para corregir o limitar la desviación del valor medido, respecto al valor deseado (Ogata, 1998); temperatura de referencia ó set point (T_{REF}).

Definición del nivel de control.- El nivel de control que nos hemos propuesto implementar es el de control automático por computadora, dado a que nuestro controlador lo constituye un software SCADA.

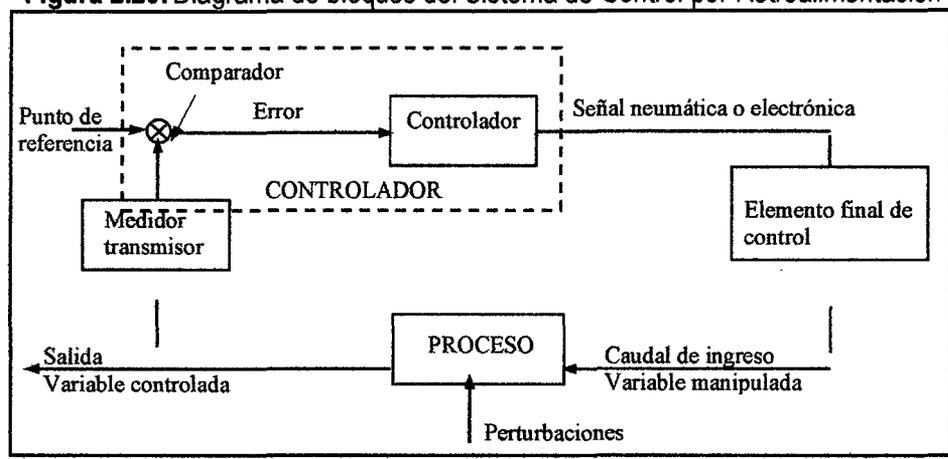
Tabla 2.13. Niveles de control de procesos

Nivel de Control	Modo de operación
Control manual	Cuando el trabajo de regular alguna variable con el fin de compensar alguna alteración en el proceso es ejecutada manualmente (por un operario), basado en mediciones previas de la variable controlada y en la experiencia.
Control automático simple	Cuando el trabajo de regular alguna variable con el fin de compensar alguna alteración en el proceso es ejecutada manualmente (por un operario), basado en mediciones previas de la variable controlada y en la experiencia.
Control automático por computadora	Es la forma moderna de control de procesos, es un control integral (de todo el proceso) mediante una sola máquina (computadora digital), la cual analiza las señales dadas por los puntos de medición y emite las señales respectivas hacia los elementos que regulan las variables

Fuente y elaboración: (Ogata, 1998)

Una vez definido el nivel de control del proceso estamos listos para plantear el diagrama de bloques correspondiente al sistema el cual se muestra en la figura (2.4), en donde se aprecia todos los elementos del sistema de Control Automático del proceso.

Figura 2.20. Diagrama de bloques del Sistema de Control por Retroalimentación

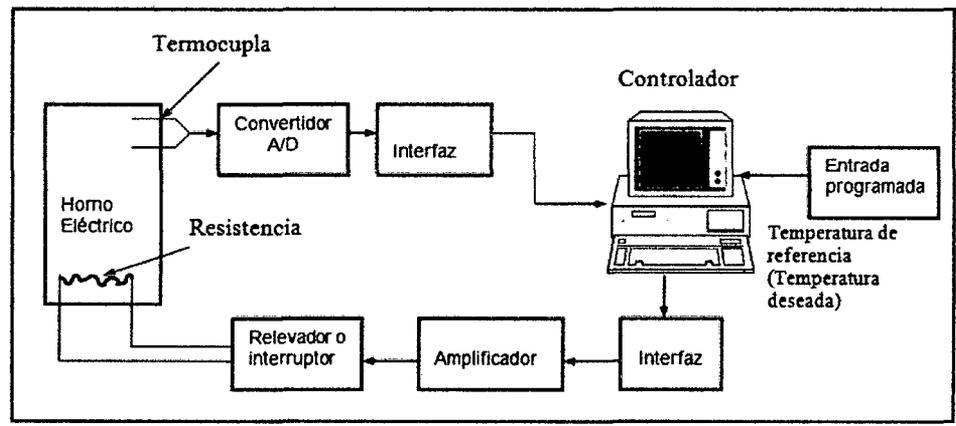


Fuente y elaboración: (Smith & Corripio, 1991)

2.2.4.3. Sistema de Control Automático mediante Software

A un sistema de regulación automática en el que la salida es una variable como temperatura, presión, flujo, nivel de líquido o pH, se le denomina sistema de control de proceso y en el caso de que el controlador sea un software de control se le denomina sistema de control mediante software. El control de procesos tiene amplia aplicación en la industria. En estos sistemas con frecuencia se usan controles programados, como el de la temperatura de un horno de calentamiento en que la temperatura del mismo se controla según un programa preestablecido. En este control el punto de referencia se ajusta según el cronograma preestablecido. El controlador entonces funciona manteniendo la temperatura del horno cercana al punto de ajuste variable.

Figura 2.21. Esquema control de temperatura mediante software

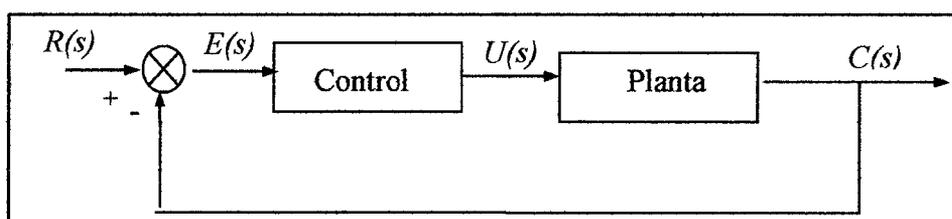


Fuente y elaboración: (Shinsky, 1996)

2.2.4.4. El algoritmo de control PID

Este algoritmo de control es recomendado para controlar procesos dinámicos rápidos, es ampliamente más utilizado para sistemas no lineales y con tiempo muerto, el control PID (Proporcional-integral-derivativo) utiliza las características de los controles proporcional (P), integral (I) y derivativo (D). Y como usarlos para conseguir la respuesta deseada. Considerando el siguiente sistema con realimentación "feedback" (retroalimentación) unitaria:

Figura 2.22. Sistema de control de Lazo cerrado



Fuente y elaboración: (Ogata, 1998)

Donde:

Planta: Sistema objeto del control (proceso a controlar)

Controlador: Proporciona la excitación a la planta; se diseña para controlar el comportamiento global del sistema.

Los tres términos del controlador El controlador PID no es más que una fórmula matemática que evalúa el error podemos escribirla como:

En términos de la función de transferencia se planta según el siguiente modelo:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s = \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s} \dots\dots\dots (2.1)$$

Donde

K_p = Ganancia proporcional

$K_i = K_p/\tau_i$ = Ganancia integral

$K_d = K_p\tau_d$ = Ganancia derivativa

En primer lugar, veamos cómo funciona un controlador PID en un sistema en bucle cerrado (realimentado o "feedback") como el representado en la Fig. 6.3. La variable (e) representa el error de seguimiento (representamos con minúsculas en el dominio del tiempo y con mayúsculas en el dominio de Laplace), la diferencia entre el valor de la entrada deseada (R) y la salida efectiva (c). Esta señal de error

102

(e) se envía al controlador PID y el controlador evalúa tanto la integral como la derivada de esta señal de error. La señal (U) a la salida del controlador es igual a la magnitud del error por la ganancia proporcional (Kp), más la magnitud de la integral del error por la ganancia integral (Ki), más la magnitud de la derivada del error por la ganancia derivativa (Kd).

La combinación de los efectos de acción proporcional, integral y derivativa, se denomina acción de control proporcional – integral – derivativa. Esta combinación tiene las ventajas de cada una de las tres acciones de control individuales. La ecuación de un control con esta acción de control es:

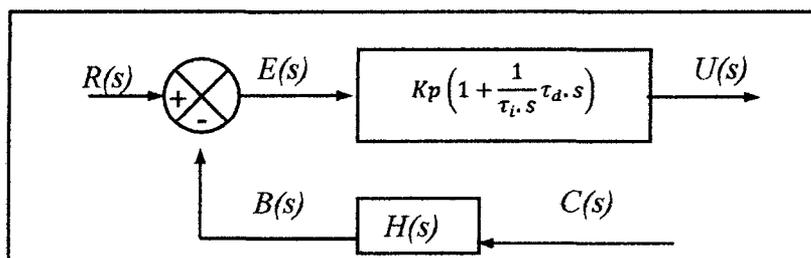
$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{\tau_i} \int_0^t e(t) dt + K_p \tau_d \frac{de(t)}{dt} \dots\dots\dots (2.2)$$

y la función de transferencia es

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right) \dots\dots\dots (2.3)$$

Donde Kp es la ganancia proporcional, τ_i es el tiempo integral, y τ_d es el tiempo derivativo.

Figura 2.23. Diagrama de Bloques de un Controlador PID



Fuente y elaboración: (Ogata, 1998)

Esta señal (u) se envía a la planta, con lo que se produce una nueva salida (C). Esta nueva salida (C) se envía de nuevo al sensor para determinar la nueva señal de error (e). Por último, el controlador utiliza esta nueva señal de error para calcular nuevamente su derivada y su integral. Este proceso se repite una y otra vez.

106

2.2.4.5. Características de los controladores PID

Un controlador proporcional (Kp) reduce el tiempo de subida pero no elimina nunca el error en régimen permanente. El control integral (Ki) elimina el error en régimen permanente pero empeora la respuesta transitoria. Un control derivativo (Kd) incrementa la estabilidad del sistema, reduce el sobreimpulso y mejora la respuesta transitoria. En la siguiente tabla se resumen los efectos de cada controlador Kp, Kd y Ki sobre un sistema en bucle cerrado.

Tabla 2.14. Características PID

RESPUESTA	TIEMPO SUBIDA	SOBREIMPULSO	TIEMPO DE ESTABLECIMIENTO	ERROR
Kp	Disminuye	Aumenta	Poca variación	Disminuye
Ki	Disminuye	Aumenta	Aumenta	Elimina
Kd	Poca variación	Disminuye	Disminuye	Poca variación

Fuente y elaboración: (Shinskey, 1996)

Tenga en cuenta que estas relaciones puede que no sean demasiado precisas porque los efectos de las ganancias Kp, Ki y Kd dependen los unos de los otros. De hecho, al variar el valor de una de estas variables puede que se modifiquen los efectos producidos por las otras dos. Por esta razón, a la hora de determinar los valores de Kp, Ki y Kd sólo deberá usar esta tabla como una referencia.

2.2.4.6. El algoritmo de control ON/OFF

En este sistema de control el actuador tiene sólo dos posiciones fijas, que en muchos casos son, simplemente conectando y desconectando. El Controlador de dos posiciones es simple y económico razón por la cual se usa en muchos sistemas de control tanto domésticos como industriales.

Sea:

$u(t)$ = señal de salida del controlador.

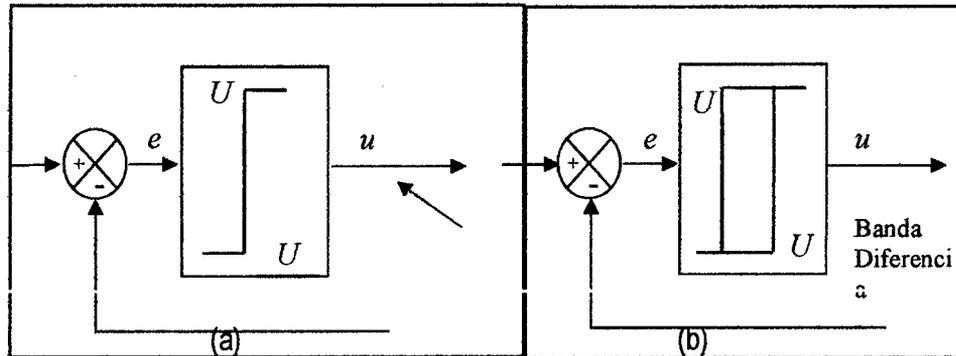
$e(t)$ = señal de error.

En un controlador de dos posiciones, la señal $u(t)$ permanece en un valor máximo o mínimo, según sea la señal de error positiva o negativa, de manera que:

$$u(t) = U1 \text{ para } e(t) > 0 \dots\dots\dots (2.3)$$

$$u(t) = U2 \text{ para } e(t) < 0 \dots\dots\dots (2.4)$$

Figura 2.24. Diagramas de Bloques de Controladores de Dos Posiciones

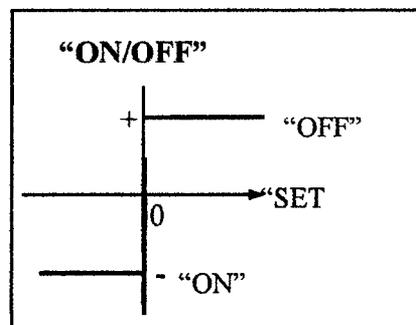


Fuente y elaboración: (Ogata, 1998)

Donde U_1 y U_2 son constantes. Generalmente el valor mínimo de U_2 puede ser, o bien cero, o $-U_1$. En general los controladores de dos posiciones son dispositivos eléctricos, donde habitualmente hay una válvula accionada por un solenoide eléctrico. El rango en que la señal de error debe variar antes de que se produzca la conmutación, se denomina zona muerta o brecha diferencial como se indica en la Fig. 2.27. Tal brecha diferencial hace que la salida del controlador $u(t)$ mantenga su valor hasta que la señal de error haya rebasado ligeramente el valor 0.

Un ejemplo de esta acción de control lo constituye una válvula que actúa como un interruptor; si la ganancia proporcional es muy alta la válvula se moverá de una posición extrema a la otra (enteramente cerrada a enteramente abierta).

Figura 2.25. Acción del controlador "ON"/ "OFF"



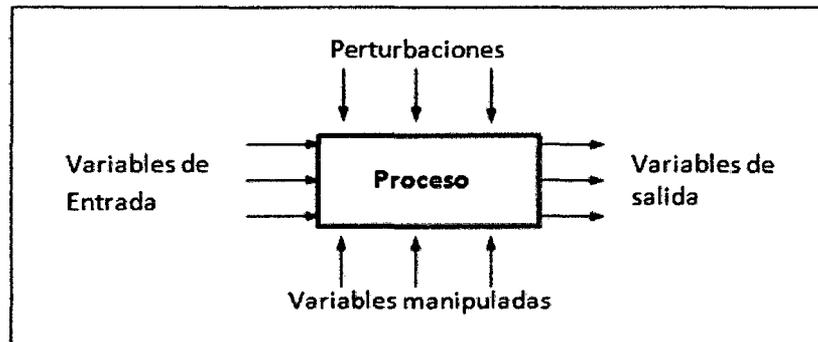
Fuente y elaboración: (Ogata, 1998)

2.2.4.7. Definición de las variables en un proceso

Un proceso cualquiera puede representarse por la siguiente figura:

109

Figura 2.26. Representación de un Proceso



Fuente y elaboración: (Smith & Corrinin 1991)

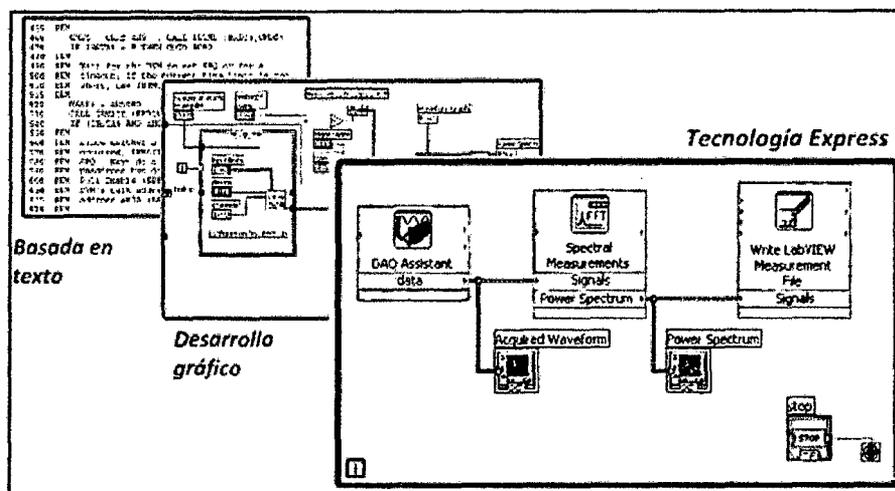
Para nuestro proceso, requerimos definir las variables implicadas, las cuales se describen en el inciso 2.4.1.

2.2.5. Fundamentos del software LABVIEW

LabVIEW es un lenguaje de programación cuyo entorno de desarrollo es gráfico, flexible y modular en su totalidad diferente a la programación mediante comandos tipo texto, sistemas empleados en los lenguajes de programación de alto nivel tradicionales como Assembler, Pascal, Basic, Etc...

Hasta la década de 1980 la tarea de creación de un programa o software de aplicación se llevaba a cabo con paquetes software basados en código texto, estos paquetes software fueron evolucionando y en la actualidad ofrecen una serie de facilidades en el desarrollo de la interfaz de usuario como las funciones de alto nivel y la incorporación de elementos gráficos, que simplifican la tarea de programación y de elaboración de la Interfaz Hombre Maquina (HMI) o panel frontal de la aplicación como es el caso de Visual Basic, sin embargo el cuerpo del programa (PROGRAMACIÓN LÓGICA), seguía basado en comandos tipo texto, lo que suponía mucho tiempo invertido en detalles de programación que nada tiene que ver con la finalidad de creación de una herramienta software. Con la llegada del software de programación gráfica LabVIEW de National Instruments, Visual Designer de Burr Brown o VEE de Agilent Technology, el proceso de creación de un VI se ha simplificado tanto que el tiempo utilizado para el desarrollo de aplicaciones software se ha minimizado al máximo y aún más con la llegada de la tecnología Express con la que cuenta LabVIEW a partir de la versión 7.0 en el año 2005.

Figura 2.27. Evolución de la programación



Fuente y Elaboración: (National Instruments Corporation, 2010)

2.2.5.1. Instrumento Virtual (VI)

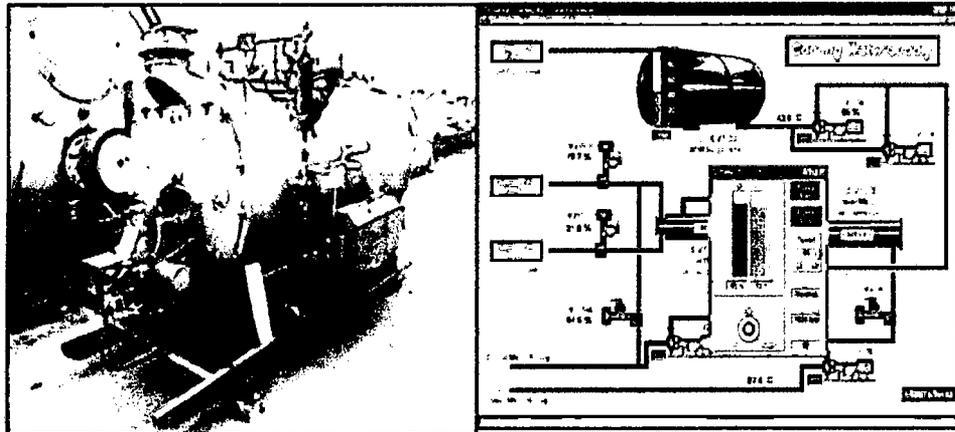
Un instrumento virtual o Virtual Instrument (VI), es un módulo software que simula el panel frontal de un instrumento real de medición de variables físicas y apoyándose en elementos hardware accesibles por el ordenador (tarjetas de adquisición de datos, instrumentos accesibles vía USB, GPIB, RS 232, RS 485, etc.) realiza una serie de medidas como si se tratase de un instrumento real.

Es así que cuando se ejecuta un programa que funciona como instrumento virtual o VI (Virtual Instrument), el usuario ve en la pantalla de su ordenador un panel cuya función es idéntica a la de un instrumento físico, facilitando la visualización y el control del aparato. A partir de los datos reflejados en el panel frontal el VI debe de actuar recogiendo o generando señales como lo haría su homólogo físico.

Los programas de Labview son llamados Instrumentos Virtuales (VIS). Los VIS tienen tres partes principales: el Panel Frontal donde se encuentra la parte externa ó interfaz hombre maquina (HMI) del programa, el Diagrama de Bloques donde está la parte lógica o código fuente del programa y el Icono/Conector que es como la rueda digital que identifica el programa.

102

Figura 2.28. Principio de un VI, instrumento real y virtual



Fuente y Elaboración: (I aiara & Pelenri 2009)

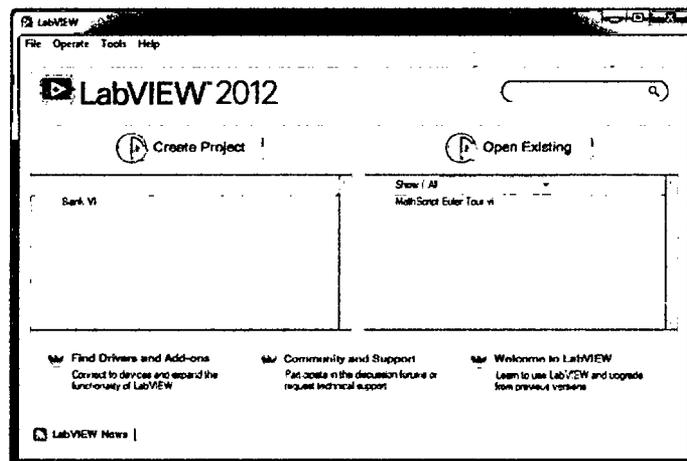
2.2.5.2. El Entorno de LabVIEW

LabVIEW consiste en el archivo ejecutable labview.exe y varios asociados, la

Inicio/Programas/National Instruments/LabVIEW 2012/LabVIEW:

Esta ventana ofrece varias opciones donde tenemos opciones desde creación de programas en blanco hasta una amplia galería de ejemplos desarrollados, destacan:

Figura 2.29. Ventana de inicio de LabVIEW 2012



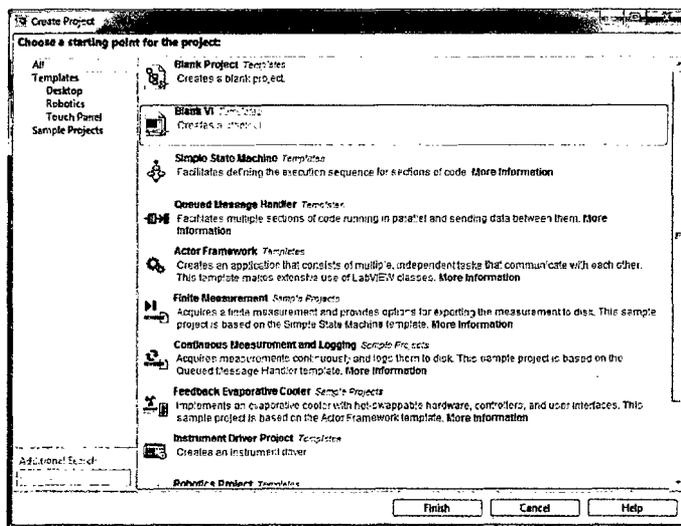
Create Project: Permite crear un VI o un proyecto nuevo.

Open Existing: Permite abrir un VI o un proyecto existente.

Si seleccionamos la primera opción se lanza la ventana siguiente:

501

Figura 2.30. Ventana de selección de proyecto nuevo



Al pulsar la opción **Blank VI** se crea un nuevo programa o VI en blanco, el cual está constituido de dos ventanas, el panel frontal y el diagrama de bloques:

2.2.3.3. Ventana del panel frontal (Front Panel)

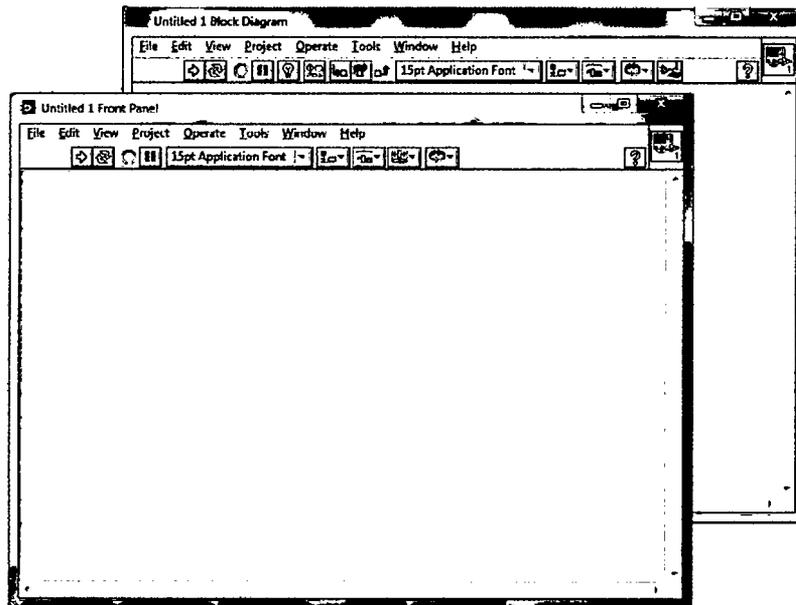
Al abrir un VI en blanco se crean automáticamente dos ventanas una de ellas se conoce como el panel frontal del VI en donde como ya se mencionó vamos a crear la interfaz que entrara en contacto con el usuario final de la aplicación software, esta es una de las ventanas que se utilizan en LabVIEW para construir el VI. La otra ventana se conoce como Diagrama de Bloques en donde se ha de programar la parte lógica o código del VI.

El panel Frontal y el diagrama de bloques están constituidos por una colección de objetos gráficos que son los elementos programados de LabVIEW. El panel frontal contiene varios tipos de controles e indicadores que facilitan la visualización de resultados y el reconocimiento rápido de los componentes del VI, pueden usarse una serie de herramientas prediseñadas así como también usted mismo puede diseñar sus propios indicadores dentro de algunas opciones un poco más avanzadas de acuerdo a la naturaleza de aplicación del instrumento virtual, una aplicación puede ser el diseño alarmas con leds animados con diseño gráfico en 2D y 3D desde programas como Corel Draw, AutoCad, Autodesk 3D

100

MAX, etc, a los cuales además se les puede adicionar archivos de audio con el objeto de hacer más interactiva la aplicación.

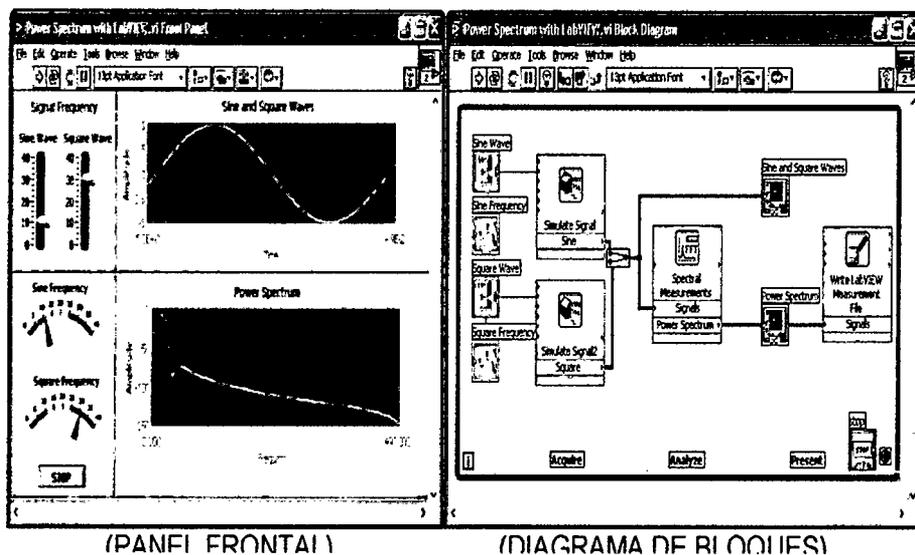
Figura 2.31. Ventanas del panel frontal y diagrama de bloques de un VI en blanco



FUENTE Y ELABORACION: (Julian & Vaiero, 2012)

La siguiente ilustración muestra un panel frontal y su diagrama de bloques asociado:

Figura 2.32. Partes de un instrumento virtual (VI)



(PANEL FRONTAL)

(DIAGRAMA DE BLOQUES)

2.2.5.4. Paleta de Herramientas (TOOLS PALETTE)

Esta es la paleta más importante a la hora de programar y **DEBE ESTAR VISIBLE**, cuando está activa se encuentra visible tanto en el panel frontal como en el diagrama de bloques, en esta paleta podemos encontrar herramientas para crear, modificar y depurar VI's, si la paleta de herramientas no está visible nos vamos al MENU de la parte superior y en VIEW seleccionamos la opción **TOOLS PALETTE** con esto se habilita la ventana:

Ahora podemos seleccionar una Herramienta de este menú al darle click en las casillas interiores de la ventana, el cursor del Mouse toma una forma distinta dependiendo de la herramienta que hemos seleccionado. Entre las herramientas que encontramos en esta paleta tenemos las siguientes:

Herramienta de Selección Automática. Se encuentra seleccionada por defecto, cuando está habilitada actúa como las cuatro principales herramientas: operación, posicionamiento, etiquetado y cableado, dependiendo frente a qué objeto se encuentre y cambia automáticamente.

Herramienta de Operación. Utilice la herramienta de Operación para manipular los controles e indicadores del panel frontal.

Herramienta de Posicionamiento. Utilice esta herramienta para seleccionar, mover o redimensionar objetos en el panel frontal y diagrama de bloques.

Herramienta de Etiquetado. Utilice la herramienta de Etiquetado para editar todo lo relacionado con texto en los objetos tanto del panel frontal como del diagrama de bloques.

Herramienta de Cableado. Utilice la herramienta Cableado para cablear objetos en el diagrama de bloques. Ponga la herramienta de cableado sobre un cable para desplegar el tipo de datos del cable en la ventana de ayuda.

Herramienta de Deslizamiento. Utilice esta herramienta para deslizarse a trabes de la ventana sin utilizar las barras de desplazamiento.

Herramienta de Puntos de Detención. Utilice esta herramienta para poner puntos de ruptura en VIS funciones y estructuras.

Herramienta de Pruebas. Utilice esta herramienta para poner probadores en cables del diagrama de bloques

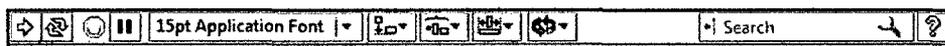
Herramienta de Copiado de Color. Utilice la herramienta de copiado de color para copiar colores e insertarlos con la herramienta de color.

Herramienta de Color. Utilice la herramienta de Color para colorear un objeto. Esta herramienta también despliega el color del fondo y del primer plano del objeto.

2.2.5.5. Barra de Herramientas del Panel Frontal

Las ventanas del panel Frontal y del Diagrama de Bloques contienen una barra de herramientas con botones de herramientas e instrumentos de selección para utilizar para controlar el VI. Dependiendo de si se está trabajando en el panel frontal o en el diagrama de bloques una de las dos barras de herramientas estará disponible.

Figura 2.33. Barra de herramientas del panel frontal



El botón de Ejecución sirve para ejecutar el programa una sola vez.

El botón de Ejecución continua sirve para ejecutar el programa continuamente.

El botón de Abortar la Ejecución aparece mientras el VI se está ejecutando oprima este botón para salir del VI inmediatamente

El botón de Pausa/Continuar. Este botón hace una pausa en la ejecución del VI. Para continuar desde el modo de pausa oprima el botón otra vez y el VI continuará la ejecución.

El Anillo de Fuentes. Este anillo permite seleccionar opciones de fuente, tamaño, color, estilo y otros. **Etiquetado**

El Anillo de Alineación. Use esta herramienta de posición para seleccionar las opciones de alineación incluyendo vertical, horizontal, centrada, etc. Para dos o más objetos

El Anillo de Distribución. Use esta herramienta distribución para seleccionar opciones de distribución incluyendo espacios, compresión etc. Para dos o más objetos

92

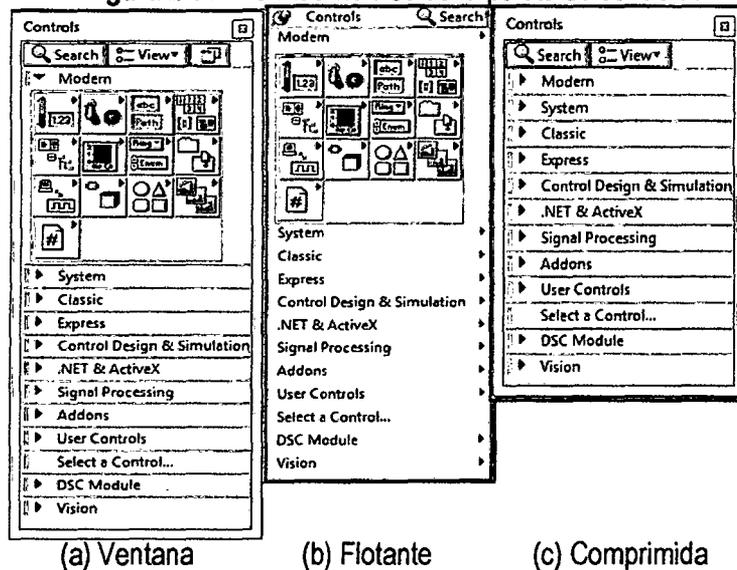
El Anillo de Ordenamiento. Use esta herramienta para jerarquizar el orden de empalme cuando dos o más objetos se encuentran uno tras del otro.

El Anillo de Dimensionamiento. Use esta herramienta para dimensionar objetos del panel Frontal.

2.2.5.6. La Paleta de Controles (CONTROLS PALETTE)

La paleta de Controles esta visible solo en el panel frontal, y consiste en iconos de alto nivel que representan las subcategorias, dando acceso a un gran rango de objetos que están disponibles para crear un VI. Usted puede acceder a las subcategorias al darle click sobre el icono. la otra forma es darle anticlick en un área libre del panel frontal, claro que en esta segunda forma la paleta de controles estará activa solo por unos instantes paleta flotante (figura b), y para convertirla en una ventana estable le damos click en la tachuela que está en la esquina superior izquierda de la paleta.

Figura 2.34. Formas visibles de la paleta de controles



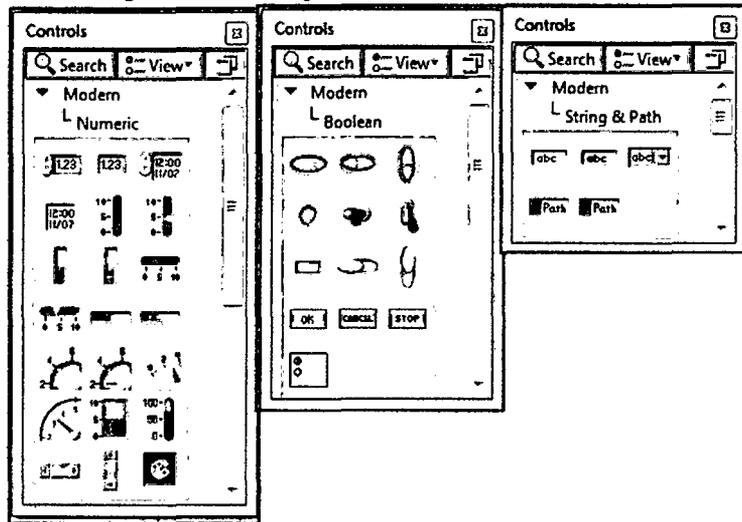
Si desplegamos la entrada MODERN dándole click, visualizamos las categorías con las cuales podemos iniciar el diseño del panel frontal de nuestra aplicación.

NUMERIC (Numérico). Contiene controles e indicadores de datos tipo numéricos, objetos con los cuales podemos ingresar datos numéricos así como visualizar resultados también tipo numéricos.

BOOLEAN (Booleano). Contiene controles e indicadores de datos tipo booleanos

STRING (Cadenas de Caracteres). Contiene controles e indicadores de datos tipo cadena de caracteres (texto) y herramientas tipo path (rutas de archivos en el disco duro).

Figura 2.35. Categorías de la entrada MODERN

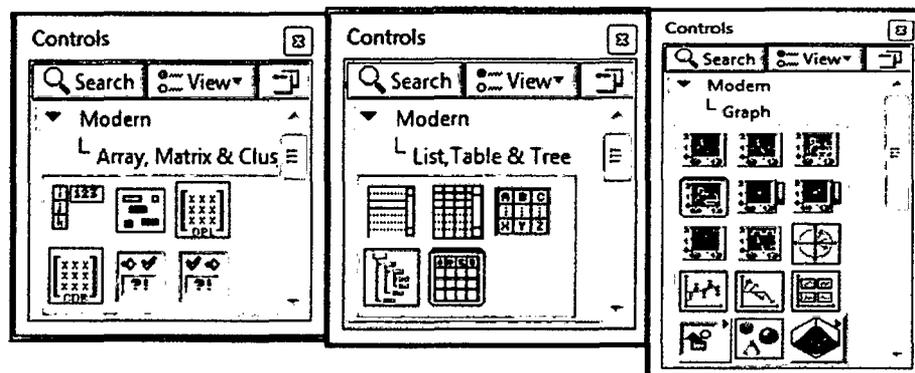


ARRAY, CLUSTER & MATRIX (Arreglos y Agrupamiento). Contiene herramientas que agrupan distintos tipos de datos, para generar arreglos, matrices y clústers.

LIST, TABLE & TREE (Listas, Tablas Y Árbol). Contiene controles e indicadores tipo listas, tablas y árboles en formato tipo texto.

GRAPH (Gráficas). Contiene indicadores tipo gráfico.

Figura 2.36. Categorías de la entrada MODERN



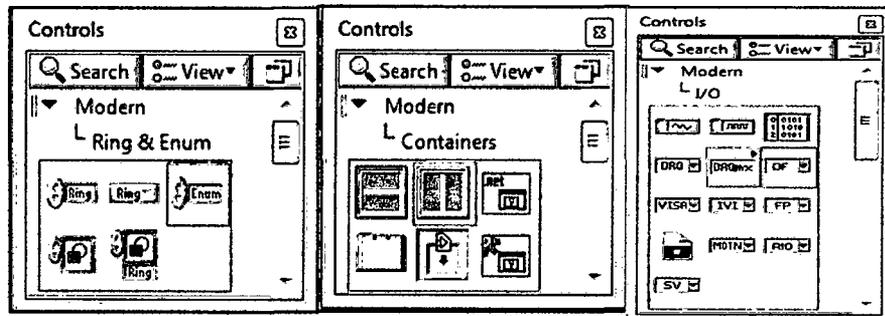
Fuente y elaboración: (Julián & Valero, 2012)

RING & ENUM (Anillo y enumerador). Contiene controles e indicadores tipo anillo (menú desplegable), y enumerador, los cuales se usan para seleccionar casos.

CONTAINERS (Contenedores). Contiene herramientas tipo contenedores y tableros que administran varios objetos análogamente a las páginas de un libro.

I/O (Entradas/Salidas). Contiene controles e indicadores para asociar entradas ó salidas mediante instrumentos de adquisición, envío de señales reales tipo DAQ, VISA, RIO, etc.

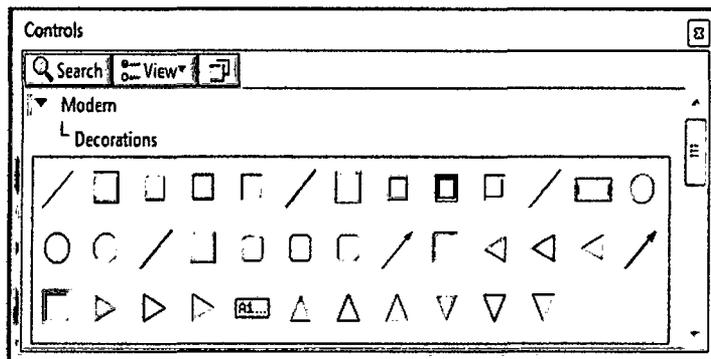
Figura 2.37. Categorías de la entrada MODERN



FUENTE Y ELABORACIÓN: (Julián & Valero, 2012)

DECORATIONS (DECORACIONES). Contiene una galería de objetos gráficos para decorar el panel frontal, estos objetos no tienen un terminal correspondiente en el diagrama de bloques, por lo que no tiene incidencia en el tema de programación.

Figura 2.38. Categoría decoraciones de la entrada MODERN



Fuente y elaboración: (Julián & Valero, 2012)

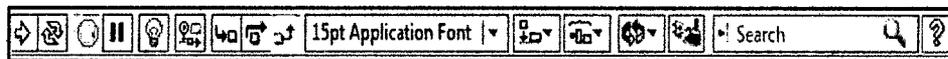
2.2.5.7. Ventana del diagrama de bloques (BLOCK DIAGRAM)

La ventana del Diagrama de Bloques del VI es aquella en donde se guarda la ESTRUCTURA ó EL CÓDIGO DEL PROGRAMA, es muy frecuente que esta ventana no pueda ser visualizada por el usuario final si el programador así lo dispone, LabVIEW utiliza recursos de seguridad que protegen el código del programa con un Password o simplemente se remueve esta ventana, dentro del diagrama de bloques se encuentran LOS TERMINALES correspondientes a los objetos creados en el panel frontal, por lo que si se elimina un componente en una de las ventanas del Front Panel o del Block Diagram automáticamente se elimina también su representativo en la otra ventana.

2.2.5.8. Barra de Herramientas del Diagrama de Bloques

La barra de herramientas del diagrama de bloques contiene los mismos botones que la barra de herramientas del panel frontal, adicionalmente a esto tiene cuatro herramientas útiles para depuración de errores.

Figura 2.39. Barra de herramientas del diagrama de bloques



El botón de animación de la ejecución. Se usa para habilitar la animación de la ejecución.

Modo animado. Cuando la animación en la ejecución está habilitada esta acción permite ver el flujo de los datos a través del diagrama de bloques

El botón de Pasar Sobre. Oprima este botón para habilitar el modo paso a paso este modo permite para en cada uno de los nodos del VI.

El botón de Entrar A. Oprima este botón para entrar a un ciclo, SubVI, etc. Al entrar en el nodo usted está listo para hacer ejecución paso a paso dentro del nodo.

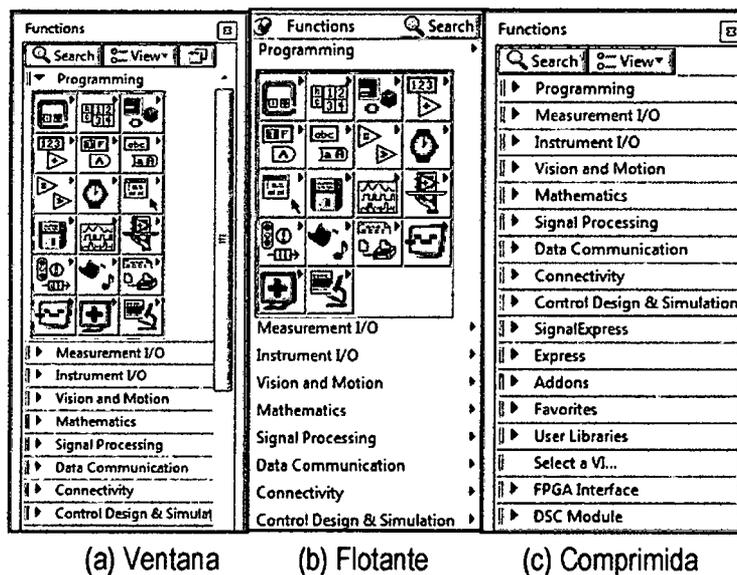
El botón de Salir de. Oprima este botón para salir de un ciclo, SubVI, etc. Al salir de un nodo usted completa la ejecución paso a paso de este nodo y va hacia el siguiente nodo.

2.2.5.9. Paleta de Funciones (FUNCTION PALETTE)

Los diagramas de bloques se construyen utilizando la paleta de funciones, cada opción en la paleta despliega una subcategoría con los iconos de alto nivel. Si la

paleta de funciones no está visible se puede visualizar seleccionando del MENÚ la opción de VIEW y seleccionando FUNCTION PALETTE. La paleta de funciones también se puede acceder al dar anticlick sobre un área libre del Diagrama de Bloques. Para convertir la paleta flotante de funciones del modo anterior en una ventana estable, le damos click la tachuela ubicada en la esquina superior izquierda de la paleta.

Figura 2.40. Formas visibles de la paleta de funciones



Fuente y elaboración: (Julián & Valero, 2012)

Al desplegar la entrada PROGRAMING (Programación) podemos visualizar las principales CATEGORIAS con las cuales podemos iniciar rápidamente la programación lógica de nuestra aplicación, Estas subcategorías son:

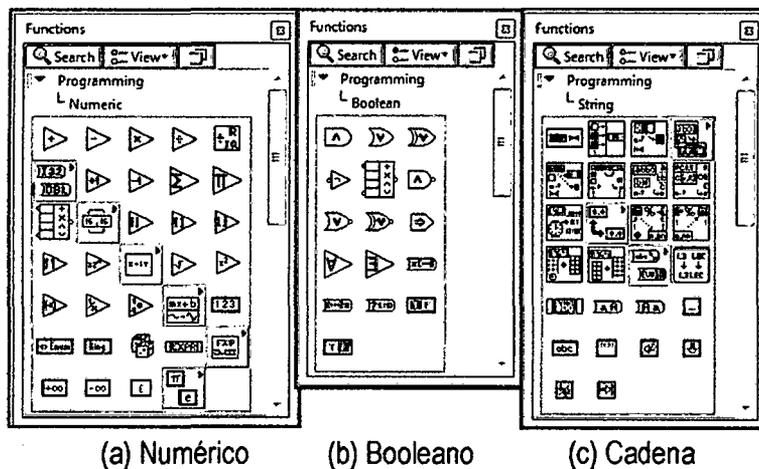
Numeric (Numérico). Contiene funciones elementales aritméticas, constantes numéricas, números complejos, y todo lo relacionado a tratamiento numérico de datos.

Boolean (Booleano). Contiene funciones que operan con datos booleanos, constantes y lógica booleana, también herramientas para convertir a formato numérico.

String (Cadena de Caracteres). Contiene funciones para manipular y operar texto como cadena de caracteres, también herramientas para convertir texto a otros formatos como numérico ó path.

92

Figura 2.41. Categorías de la entrada PROGRAMMING



(a) Numérico

(b) Booleano

(c) Cadena

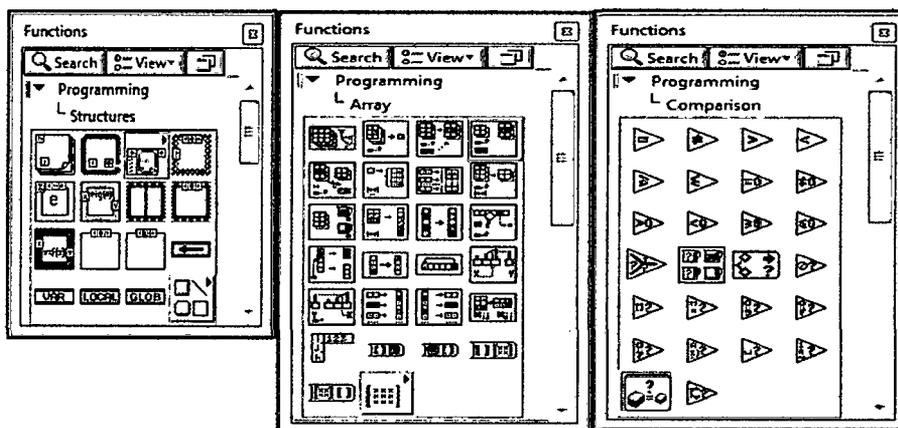
Structures (Estructuras). Contiene todos los ciclos y estructuras que se usan en programación tales como los ciclos for, while, case, etc. Así como también nodos de fórmulas y mathscript.

Array (Arreglos). Contiene funciones para procesar arreglos de datos y matrices.

Cluster & Variant (Agrupamiento y Varianza). Contiene funciones para agrupar y desagrupar datos,

Timing (Temporizado). Contiene herramientas de control del tiempo como los temporizadores, tiempo del sistema y fecha del sistema.

Figura 2.42. Categorías de la entrada PROGRAMMING



Fuente y Elaboración: (Julián & Valero, 2012)

File I/O (Manejo de Archivos). Contiene herramientas para gestionar y guardar datos en archivos y bases de datos de todo tipo.

Graphics & Sound (Gráficos y Sonidos). Contiene funciones para el manejo de sonidos, imágenes 2D, 3D, gráficos polares y otros.

Dialog & User Interface (Dialogo e Interface de Usuario). Contiene herramientas para el manejo de ventanas y cuadros de diálogo, manejo de ventanas de errores.

Report Generation (Generación de Reportes). Contiene herramientas para generar reportes tipo impreso, tipo archivo, Excel, Word, html y otros.

Entrada Vision and Motion (Movimiento y Visión). Contiene Funciones básicas para el manejo de las interfases IMAQ y MOTION de National Instruments.

Entrada Signal Processing (Procesamiento de Señal). Contiene Funciones para tratamiento de señales como filtrado, análisis espectral, ajuste de curvas, etc...

Entrada Data Communication (Comunicación de datos). Contiene VIS para implementar comunicación TCP, DDE, Serial, OLE.

Entrada Connectivity (Conectividad). Contiene VIS para implementar conectividad vía puerto paralelo, control de dispositivos de ingreso.

Entrada Express (Expreso). Contiene VIS y herramientas del tipo Express que facilitan la programación de la aplicación.

Entrada Select a VI (Seleccionar VI). Importa VI's creados y guardados en el disco duro para ingresarlos dentro de una aplicación de mayor nivel como un SUBVI (SUBPROGRAMA), lo que se conoce como PROGRAMACIÓN MODULAR.

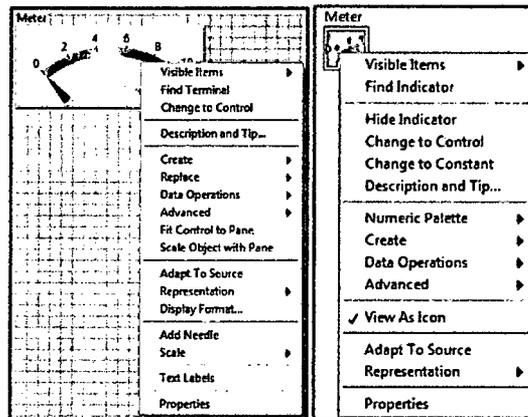
2.2.5.10. Menús Desplegables

La barra de Menú que se encuentra en la parte superior de la pantalla de LabVIEW contiene varios menús Pull-Down (Desplegables), los cuales contienen opciones comunes para la mayoría de las aplicaciones tales como ABRIR, GUARDAR GRABAR, COPIAR Y PEGAR, Y mucho otros, así como también opciones particulares de personalización de la aplicación en LabVIEW.

LabVIEW cuenta además con menús desplegados para todos los objetos tanto del panel frontal como del diagrama de bloques, esta herramienta nos permite acceder a las opciones de visualización, configuración del modo de operación y personalización de los todos objetos creados en LabVIEW, esos menús se

habilitan si hacemos click derecho sobre el objeto en cuestión, aparece las ventanas siguientes:

Figura 2.43. Ventanas desplegables de objetos



Fuente y Elaboración: (Julián & Valero, 2012)

2.2.6. Marco Conceptual

- **Variable controlada.**- Es la variable Dependiente del proceso, la cual es de mucho interés, es la cantidad o condición que se mide y controla. Normalmente la variable controlada es la variable de salida del sistema y cambia con el progreso del proceso, es decir depende del tiempo. (Smith & Corripio, 1991)
- **Variable manipulada.**- Es la variable Independiente, es la cantidad o condición modificada por el controlador a fin de afectar la variable controlada. Esta afecta el curso del proceso y puede ser medidas y cambiadas a voluntad. (Smith & Corripio, 1991).
- **Perturbaciones.**- Se ha tomado en cuenta como perturbaciones del proceso los cambios repentinos en: el flujo de ingreso de fluido de proceso $F(t)$, la temperatura de ingreso de fluido de proceso $T_i(t)$, la temperatura del medio ambiente T_a , los cuales son factores que afectan adversamente el valor de la variable de salida del sistema. Interfieren directamente el curso del proceso y no pueden ser cambiadas a voluntad. Las perturbaciones pueden ser (Smith & Corripio, 1991):
- **Perturbaciones Internas.**- Cuando se generan dentro del sistema, como el aumento de temperatura del fluido de proceso debido al avance de la reacción química. Cambio de fase en los reactivo, entre otros.

- **Perturbaciones Externas:** Cuando se generan fuera del sistema y constituye una entrada como: cambios repentinos en el flujo de ingreso de fluido de proceso, la temperatura de ingreso de fluido de proceso, la presión de vapor del suministro (caldero), la velocidad de agitación del proceso, entre otros.
- **Variables intermedias.-** Son las variables relacionadas con el curso del proceso solo indirectamente y para nuestro proceso lo constituyen: las propiedades físicas de los fluidos intervinientes: densidad, capacidad calorífica, calor latente, temperatura del ambiente, entre otros (Smith & Corripio, 1991)
- **Parámetros.-** Son las variables que toman un valor fijo durante el proceso. Para nuestro proceso: la presión atmosférica, la temperatura de ingreso de fluido de proceso, el nivel y la presión de operación en el interior del reactor, el área de intercambio de calor, entre otros. (Smith & Corripio, 1991)
- **Planta.-** Una planta es un equipo, quizá simplemente un juego de piezas de una máquina, funcionando conjuntamente, cuyo objetivo es realizar una operación determinada. En este libro llamaremos planta a cualquier objeto físico que deba controlarse (como un horno de calentamiento, un reactor químico o columna de destilación). (Ogata, 1998)
- **Proceso.-** El diccionario Merriam-Webster define proceso como una operación o desarrollo natural, caracterizado por una serie de cambios graduales, progresivamente continuos, que se suceden uno a otro de un modo relativamente fijo, y que tienden a un determinado resultado o final; o a una operación voluntaria o artificial progresivamente continua, que consiste en una serie de acciones controladas o movimientos dirigidos sistemáticamente hacia determinado resultado o fin. En este libro se denomina proceso a cualquier operación que deba controlarse. Ejemplos de ellos son los procesos químicos, económicos y biológicos.
- **Sistemas.-** Es la combinación de componentes que actúan conjuntamente y cumple determinado objetivo. Un sistema no está limitado a objetivos físicos. El concepto de sistema puede aplicarse a fenómenos dinámicos abstractos, como los que se encuentran en economía. Por tanto, el término sistema hay que

interpretarlo como referido a sistemas físicos, biológicos, económicos y otros. (Ogata, 1998)

- **Control manual.**- Cuando el trabajo de regular alguna variable con el fin de compensar alguna alteración en el proceso es ejecutada manualmente (por un operario), basado en mediciones previas de la variable controlada y en la experiencia. (Ogata, 1998)
- **Control automático simple.**- Cuando el trabajo anterior es ejecutado por una máquina, obedeciendo indicaciones dadas de antemano según el tipo de proceso a controlar y el modo de acción de la máquina (controlador) Este modo de control es ejecutado en forma individual para cada sistema de proceso. (Ogata, 1998)
- **Control automático por computadora.**- Es la forma moderna de control de procesos, es un control integral (de todo el proceso) mediante una sola máquina (computadora digital), la cual analiza las señales dadas por los puntos de medición y emite las señales respectivas hacia los elementos que regulan las variables. (Ogata, 1998).

2.3. Hipótesis

2.3.1. Hipótesis General

El sistema de control automático con software optimiza el promedio mensual de producción de biogás en un porcentaje mayor al 20% en el biodigestor simulado.

2.3.2. Hipótesis Específicas

- a) Es posible simular dinámicamente el proceso de producción de biogás mediante el modelo matemático desarrollado por Chen, Y.R. (1983) y mediante la herramienta LabVIEW.
- b) Para controlar la temperatura y el tiempo de retención las cuales son las variables de mayor impacto en el proceso de producción de biogás se requiere del software BIOSIM 1.2 desarrollado en LabVIEW con un algoritmo de control por tiempos ON/OFF.
- c) Para validar los resultados simulados de producción de biogás con datos reales se requiere contrastarlos con datos experimentales del biodigestor instalado en el distrito de Apata-Concepción-Junín.

BA

d) La relación de producción del biodigestor simulado con sistema de control automático respecto a un biodigestor real sin control es mayor a 1.

2.4. Variables de estudio

2.4.1. Variable Independiente (X)

EL SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO CON SOFTWARE.

Indicadores

X1: Temperatura de operación en el interior del biodigestor (°C).

X2: Tiempo de retención hidráulico del biodigestor (días).

2.4.2. Variable Dependiente (Y)

EL VOLUMEN DE BIOGÁS PRODUCIDO EN EL BIODIGESTOR SIMULADO.

Indicadores

Y1: El volumen de biogás producido diariamente ($\frac{m^3}{día}$)

2.4.3. Definición Operativa de Variables e Indicadores

Tabla 2.15. Variables e indicadores

HIPOTESIS GENERAL		VARIABLES	INDICADORES
El sistema de control automático con software optimiza el promedio mensual de producción de biogás en un porcentaje mayor al 20% en el biodigestor simulado.		<p>Independiente. X = Sistema de control automático con software.</p> <p>Dependiente. Y = El volumen de biogás producido en el biodigestor simulado.</p>	<p>X1 = Temperatura de Operación en el interior del biodigestor (°C)</p> <p>X2 = Tiempo de retención hidráulico del biodigestor (días)</p> <p>Y1 = El volumen de biogás producido diariamente ($\frac{m^3}{día}$)</p>
HIPOTESIS ESPECIFICAS			
01	Es posible simular dinámicamente el proceso de producción de biogás mediante el modelo matemático desarrollado por Chen, Y.R. (1983) y mediante la herramienta LabVIEW.		
02	Para controlar la temperatura y el tiempo de retención las cuales son las variables de mayor impacto en el proceso de producción de biogás se requiere del software BIOSIM 1.2 desarrollado en LabVIEW con un algoritmo de control por tiempos ON/OFF.		
03	Para validar los resultados simulados de producción de biogás con datos reales se requiere contrastarlos con datos experimentales del biodigestor instalado en el distrito de Apata-Concepción-Junín.		
04	La relación de producción del biodigestor simulado con sistema de control automático respecto a un biodigestor real sin control es mayor a 1.		

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. **Ámbito de Estudio**

El estudio de investigación se desarrollará en la provincia de Tayacaja departamento de Huancavelica ya que la problemática identificada se encuentra en esta provincia y también es aquí donde se desea implementar la tecnología del tratamiento de residuos orgánicos agrícolas mediante biodigestores automatizados.

3.2. **Tipo de Investigación**

El tipo de investigación del presente proyecto según las variables:

Es experimental, debido a que manipulamos las variables temperatura y tiempo de retención en condiciones controladas con el fin de describir el efecto que tienen en la variable dependiente (El volumen de biogás producido) en el biodigestor simulado.

Los experimentos se dieron para distintos valores de temperatura y tiempo de residencia, encontrando así los valores óptimos con los cuales se mejora la producción de biogás en el biodigestor simulado, según (Tamayo, 1995) la investigación del tipo experimental presenta las siguientes etapas: Revisión bibliográfica, Identificación y definición del problema, Definición de hipótesis y variables, Diseño de plan experimental, Prueba de confiabilidad de datos, Realización del experimento, Tratamiento de datos.

3.3. **Nivel de Investigación**

La investigación por el nivel de conocimientos adquiridos se desarrolla en un nivel:

Explicativo, porque explica la influencia del Sistema de Control automático con software (causa) en la producción de biogás de un biodigestor simulado (efecto) y se verifica mediante un prueba de hipótesis.



3.4. Método de Investigación

3.4.1 Método General

Münch y Ángeles, (1990) exponen las reglas del **método científico** planteando las siguientes etapas: Formulación precisa y específica del problema, Proponer hipótesis bien definidas y fundamentadas, Someter a la hipótesis a una contrastación rigurosa, No declarar verdadera una hipótesis hasta confirmarla satisfactoriamente, Analizar si la respuesta puede plantearse de otra forma.

3.4.2 Método Específico

Método inductivo, debido a que a partir de los resultados obtenidos de la simulación de un biodigestor de referencia a las condiciones de temperatura y tiempo de residencia de un determinado lugar (Apata-Concepción), podemos generalizar esta información para biodigestores instalados en otros lugares (Huancavelica).

3.5. Diseño de Investigación

El diseño de la investigación es de tipo Experimental Unifactorial completamente al Azar con grupo control y Post-Prueba, empleando un método probabilístico de muestreo aleatorio simple, donde los datos serán obtenidos directamente del software de simulación y procesados con métodos de estadística descriptiva,

Cuyo diseño es el siguiente:

GE ₁	A	X ₁	O ₁
GE ₂	A	X ₂	O ₂
GE ₃	A	X ₃	O ₃
...
GE _i	A	X _i	O _i
GC	A	—	O _k

Donde:

GE_i = GRUPO EXPERIMENTAL i (datos del biodigestor controlado)

GC = GRUPO DE CONTROL (datos del biodigestor no controlado)

A = Grupo Seleccionado aleatoriamente

O_i = Observación de la producción de biogás en el grupo experimental.

87

O_k = Observación de la producción de biogás en el grupo de control

X_i = Distintos valores de la temperatura de operación.

El diseño puede tener varios grupos experimentales, en otros términos se evalúa el efecto en la producción de biogás de distintos valores de la temperatura en i experimentos aleatorios al grupo experimental y en un solo grupo control.

Análisis estadístico: Mediante el criterio t-student se probará la hipótesis alternativa (H_1) de la investigación expresada por: **H_1** : El sistema de control automático con software optimiza el promedio mensual de producción de biogás en un porcentaje mayor al 20% en el biodigestor simulado.

3.6. Población, Muestra y Muestreo

3.6.1 Población

La población en la que se desarrollara este trabajo está conformada por el universo de datos de la investigación el cual es el conjunto de datos medidos directamente del biodigestor, los cuales son el volumen de biogás producido diariamente, de acuerdo a diversos investigadores el experimento debe de desarrollarse en un periodo de prueba de 1 año o lo que es equivalente a 12 meses, por lo tanto si tomamos un dato por día se haría un total de 365 datos, de donde:

$$N = 365$$

3.6.2 Muestra

Para determinar cuál es el tamaño apropiado de la muestra con un nivel de confianza altamente significativo (99%), con un error como máximo del 10%, en nuestra investigación utilizamos el muestreo aleatorio simple calculando el tamaño de la muestra mediante la fórmula de Spiegel:

$$n = \frac{n_0}{1 + \frac{n_0}{N}} \tag{3.1}$$

$$n_0 = \frac{z_{\alpha}^2 \cdot \sigma^2}{E^2} \tag{3.2}$$

$$\sigma^2 = P \times Q \tag{3.3}$$

Donde:

n : Tamaño óptimo de la muestra

n_0 : Tamaño aproximado de la muestra

N : Tamaño de la población bajo estudio ($N=365$)

z_{α} : Valor z correspondiente al nivel de significancia

σ^2 : Varianza de la variable

P : Proporción estimada o esperada de la variable, si no se conoce se reemplaza por 0.5

$$Q = 1 - P$$

Cálculo del valor Z, para un nivel de confianza altamente significativo tenemos:

$$\text{Nivel de Confianza: } 1 - \alpha = 0.99$$

$$\text{Nivel de significancia: } \alpha = 0.01$$

De la tabla de distribución normal calculamos $Z_{\alpha} = Z_{0.01} = -Z_{0.99} = -2.32$

Finalmente reemplazamos los valores en la fórmula 3.2:

$$n_0 = \frac{z_{\alpha}^2 \cdot \sigma^2}{E^2} = \frac{(-2.33)^2 \cdot (0.5 \times 0.5)^2}{(0.05)^2} = 33.64$$

Luego reemplazamos en la ecuación 3.1, para el cálculo del tamaño óptimo de la muestra:

$$n = \frac{n_0}{1 + \frac{n_0}{N}} = \frac{33.64}{1 + \frac{33.64}{365}} = 30.80 \approx 31$$

Por lo tanto el tamaño óptimo de nuestra muestra es igual a: $n = 31$ datos, que son los datos tomados diariamente durante un mes con 31 días.

3.7. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

3.7.1 Técnicas de Recolección de Datos

La técnica utilizada para la recolección de datos se basa en la selección y representación por variables, para la Prueba de Hipótesis y de las Variables:

- Elaboración de cuadros estadísticos para verificar el comportamiento de las variables.
- Pruebas estadísticas: Gráficas de tendencias, gráficas circulares, barras horizontales, polígonos de frecuencia.

3.7.2 Instrumento de Recolección de Datos

Para la recolección diaria de datos de **producción de biogás, gas metano y CO₂, asimismo datos de alimentación al biodigestor, y tiempos de carga y descarga**, se utilizará como instrumento el software BIOSIM 1.2, herramienta que fue desarrollada en el entorno de programación LabVIEW 9.0 para la simulación del

82

proceso de producción de biogás en un biodigestor tubular, el software registra toda esta información y la almacena en su base de datos.

3.8. Procedimiento de recolección de datos

Para procesar los datos del trabajo de investigación se usará herramientas software; SPSS versión 20.0, que permitirán elaborar cuadros y el análisis estadístico correspondiente para la validación de las hipótesis planteando una relación de causa-efecto demostrando la hipótesis con el método T-Student, los datos serán obtenidos directamente de la base de datos generada por el software de simulación BIOSIM 1.2, el cual simula a las condiciones de operación el proceso de producción de biogás en un biodigestor tubular de 10m³ de capacidad, utilizando como materia prima excretas de ganado vacuno, a continuación se describe detalladamente el cálculo de los parámetros de operación y los modelos matemáticos utilizados para simular dinámicamente el proceso.

3.9. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

3.9.1 Cálculo del Volumen de Biogás Producido diariamente

Para calcular el volumen de biogás producido por un digestor se debe tener en cuenta los siguientes aspectos, según estudio detallados en el marco teórico (inciso 2.2.3), donde se considera los principales Factores que Influyen en la Producción de Biogás: Materia orgánica disponible, Materia orgánica total disponible, Sólidos totales (ST), Sólidos volátiles (SV), Potencial de producción de metano, Tiempo de retención (TR), Temperatura.

Con todos estos factores, según diversas investigaciones procedemos a describir y evaluar cuáles de ellos **son las variables de mayor impacto en el proceso de producción de biogás en un biodigestor de 10m³ de capacidad.**

3.9.1.1 Materia Orgánica Disponible.

Esta materia orgánica disponible ingresan al biodigestor mezcladas con agua libre de cloro como ya se ha descrito en el marco teórico, a esta mezcla se le conoce como **SUSTRATO** y será nuestro único insumo para la producción de biogás, para nuestro caso tenemos como único residuo orgánico alimentado al biodigestor a las excretas producidas por Ganado Vacuno, además de estas se tienen otras fuentes mas pero por simplicidad

para la simulación solo trabajamos con esta como única materia orgánica disponible. (Marchaim, 1992).

3.9.1.2 Materia Orgánica Total disponible.

Es la cantidad de residuos orgánicos (excretas de ganado vacuno) alimentados diariamente al biodigestor, dado a que no conocemos la cantidad óptima asumimos un valor inicial de **50Kg. de Estiércol Vacuno alimentado Diariamente**, por lo cual nuestra base de cálculo será:

$$E = \frac{50Kg}{dia} \dots\dots\dots (3.4)$$

3.9.1.3 Peso de Animal Requerido (W_A)

Es el peso total de la especie animal requerida, para nuestro caso de Ganado Vacuno, el cual es calculado mediante la fórmula siguiente:

$$E = W_A \times e \dots\dots\dots (3.5)$$

Donde:

E = Cantidad total estiércol en Kg requerido diariamente ($\frac{Kg}{dia}$)

e = Cantidad promedio de estiércol en Kg. por cada 1000Kg de peso del animal

El valor de e, lo encontramos en la tabla siguiente:

Tabla 3.1. Contenido y tipo de materia orgánica

No	Fuente	w _a	e	st	sv	N _p	P _p	K _p	ST/T	SV/ST
1	Vaca	500	86	12	10	0.45	0.094	0.29	14%	83%
2	Toro	500	58	8.5	7.2	0.34	0.092	0.21	15%	85%
3	Becerro	40	62	5.2	2.3	0.27	0.066	0.28	8%	44%
4	Cerdo	70	84	11	8.5	0.52	0.18	0.29	13%	77%
5	Oveja	60	40	11	9.2	0.42	0.087	0.32	28%	84%
6	Chivo	50	41	13	--	0.45	0.11	0.31	32%	0%
7	Caballo	400	51	15	10	0.3	0.071	0.25	29%	67%
8	Gallina	2.2	85	22	17	0.84	0.3	0.3	26%	77%
9	Roedor	2	64	16	12	1.1	0.3	0.4	25%	75%
10	Pavo	8	47	12	9.1	0.62	0.23	0.24	26%	76%
11	Pato	3	110	31	19	1.5	0.54	0.71	28%	61%

Fuente y elaboración: (American Society of Agricultural Engineers, 1993)

Donde:

w_a = Peso promedio del animal en Kg.



e = Cantidad total de residuo (estiércol) promedio en Kg. por cada 1000Kg de peso del animal.

st = Contenido promedio de sólidos totales en Kg. por cada 1000Kg de peso del animal.

sv = Contenido promedio de sólidos volátiles en Kg. por cada 1000Kg de peso del animal.

Np = Contenido promedio de nitrógeno en gramos por Kg de sustancia.

Pp = Contenido promedio de fósforo en gramos por Kg de sustancia.

Kp = Contenido promedio de potasio en gramos por Kg de sustancia.

ST/T = Porcentaje de ST sobre el total de estiércol.

SV/ST = Porcentaje de sólidos volátiles sobre sólidos totales.

De donde para el caso de ganado vacuno tenemos:

$$e = \frac{86Kg}{1000Kg \text{ de Animal}} \dots\dots\dots (3.6)$$

Reemplazando (3.4) y (3.2) y despejando en (3.3) calculamos W_A , el peso promedio de animal requerido por día:

$$W_A = \frac{E}{e} = \frac{\left(\frac{50Kg}{día}\right)}{\left(\frac{86Kg}{1000Kg \text{ de Animal}}\right)} = 581.4 \frac{Kg \text{ de Animal}}{día} \dots\dots\dots (3.7)$$

3.9.1.4 Sólidos totales (ST)

Es la materia orgánica seca, sin la humedad. Valores promedio de ST de algunos sustratos por cada 1000Kg de peso del animal se muestran en la Tabla 3.4

$$ST = W_A \times st \dots\dots\dots (3.8)$$

Para nuestro caso (Ganado Vacuno) de la tabla tenemos:

$$st = \frac{12Kg}{1000Kg \text{ de peso del Animal}} \dots\dots\dots (3.9)$$

Reemplazando calculamos, la materia orgánica seca o sólidos totales requeridos diariamente:

$$ST = W_A \times st = \left(581.4 \frac{Kg \text{ de Animal}}{día}\right) \times \left(\frac{12Kg}{1000Kg \text{ de peso del Animal}}\right)$$

79

$$ST = 6.977 \frac{Kg}{día} \dots\dots\dots (3.10)$$

3.9.1.5 Contenido de sólidos volátiles totales (SV)

Es la parte del total de sólidos que se puede transformar en biogás. Tomamos los valores SV de algunos sustratos se muestran en la Tabla 3.4.

$$SV = W_A \times sv \dots\dots\dots (3.11)$$

Para nuestro caso (Ganado Vacuno) de la tabla tenemos:

$$sv = \frac{10Kg}{1000Kg \text{ de peso del Animal}} \dots\dots\dots (3.12)$$

Reemplazando encontramos el contenido de solidos volátiles totales:

$$SV = W_A \times sv = \left(581.4 \frac{Kg \text{ de Animal}}{día} \right) \times \left(\frac{10Kg}{1000Kg \text{ de peso del Animal}} \right)$$

$$SV = 5.814 \frac{Kg}{día} \dots\dots\dots (3.13)$$

3.9.1.6 Potencial de producción de metano (P_{CH4})

Se refiere al volumen de metano producido por masa de sólidos volátiles en m³ de CH₄/Kg.SV]. En la tabla 3.3 se presenta valores referenciales en la producción de metano.

Tabla 3.2. Potencial de producción de metano (P_{CH4}) de varios residuos

RESIDUO ORGÁNICO	P _{CH4} [m ³ CH ₄ /KgSV]
Vaca	0.2
Res	0.35
Desecho Municipal	0.2
Cerdo	0.45
Gallina	0.39
Aguas Negras	0.406

Fuente y elaboración: (Sánchez, 2008)

Con lo cual para nuestro caso (Ganado Vacuno) tenemos:

$$P_{CH4} = 0.2 \frac{m^3 CH_4}{KgSV} \dots\dots\dots (3.14)$$

3.9.1.7 Volumen de Biogás Producido (V_{BIOGÁS})

El volumen de biogás producido por el biodigestor cargado con materia orgánica para ciertas condiciones de tiempo de retención y temperatura es calculado mediante la fórmula empírica de desarrollada por **Chen Y.R. en su obra "Kinetic analysis of anaerobic digestion of pig manure and its design implications"**

Je

publicado en la sociedad Americana de Ingenieros Agrícolas ASAE en el año de 1983.

$$V_{BIOGÁS} = P_{CH_4} \times SV \times \left(1 - \frac{K_0}{U_0 \cdot TR^{0.7} - 1 + K_0}\right) \dots\dots\dots (3.15)$$

$$K_0 = 0.6 + 0.0006e^{(0.1185 \times SV)} \dots\dots\dots (3.16)$$

$$U_0 = 0.013 \times T - 0.129 \dots\dots\dots (3.17)$$

Dónde:

$V_{BIOGÁS}$ = Volumen producido de biogás producido diariamente (m³Biogás/día)

K_0 = Es la *constante de descomposición de los sólidos volátiles* en el tiempo, además es una cantidad adimensional.

U_0 = Es el *crecimiento de producción de biogás* con el cambio de temperatura por día (m³ /día)

TR = Tiempo de retención (días) T = Temperatura (°C)

Como no sabemos inicialmente cual será la temperatura óptima ($T_{\text{óptima}}$) ni tampoco el tiempo de retención más óptimo ($TR_{\text{óptimo}}$), asumimos los valores

iniciales de: T=20°C TR=20 días

También necesitamos el valor calculado de solidos volátiles totales:

$$SV = 5.814 \frac{Kg}{día} \dots\dots\dots (3.18)$$

Y reemplazando en la ecuación 3.14, encontramos el valor de la constante de descomposición de los sólidos volátiles:

$$K_0 = 0.6 + 0.0006e^{(0.1185 \times SV)} = 0.6 + 0.0006e^{(0.1185 \times 5.814)}$$

$$K_0 = 0.601195$$

También hallamos el crecimiento de producción de biogás:

$$U_0 = 0.013 \times T - 0.129 = 0.013 \times (20) - 0.129$$

$$U_0 = 0.131$$

72

Con lo cual el volumen en metros cubicos de biogás producido **a partir de 50Kg/día de Residuos Orgánicos de Ganado Vacuno a una T=20°C y con un tiempo de residencia de TR=20 días** es de:

$$V_{BIOGAS} = P_{CH_4} \times SV \times \left(1 - \frac{K_0}{U_0 \cdot TR^{0.7} - 1 + K_0} \right)$$

$$V_{BIOGAS} = \left(0.2 \frac{m^3 CH_4}{Kg SV} \right) \times \left(5.814 \frac{Kg SV}{día} \right) \times \left(1 - \frac{0.601195}{0.131 \times 20^{0.7} - 1 + 0.601195} \right)$$

$$V_{BIOGAS} = 0.1159 \frac{m^3 BIOGAS}{día} \dots\dots\dots (3.19)$$

3.9.1.8 Volumen de Metano y CO₂ Producido

El volumen producido de Metano y CO₂ es calculado haciendo uso de la tabla de composición del biogás:

Tabla 3.3. Composición del Biogás

Componentes	Porcentaje
Metano (CH ₄)	60 – 80
Dióxido de carbono (CO ₂)	30 – 40
Hidrógeno (H ₂)	5 – 10
Nitrógeno (N ₂)	1 – 2
Monóxido de carbono (CO)	0 – 1.5
Oxígeno (O ₂)	0.1
Ácido sulfhídrico (H ₂ S)	0 – 1
Vapor de Agua	0.3

Fuente y elaboración: (Kléber & Manitio, 2010)

En donde se aprecia que para **un mínimo rendimiento esperado**, tomamos en consideración la siguiente composición:

Tabla 3.4. Principales Componentes del Biogás

Componente	Porcentaje
Metano (CH ₄)	60%
Dióxido de carbono (CO ₂)	40%

Fuente y elaboración: (Kléber & Manitio, 2010)

Por lo cual a partir de la ecuación (3.19), calculamos la producción de dióxido de carbono (CO₂) y el volumen de biogás producido por día:

$$V_{BIOGAS} = 0.1159 \frac{m^3 BIOGAS}{día} \dots\dots\dots (3.19)$$

$$V_{METANO} = 0.1159 \frac{m^3 BIOGAS}{día} \times \left(\frac{60m^3 METANO}{100m^3 BIOGAS} \right) = 0.0695 \frac{m^3 METANO}{día}$$

26

$$V_{CO_2} = 0.1159 \frac{m^3 \text{BIOGAS}}{día} \times \left(\frac{40m^3 CO_2}{100m^3 \text{BIOGAS}} \right) = 0.0464 \frac{m^3 CO_2}{día}$$

Con lo cual el volumen en metros cubicos de Biogás producido **a partir de 50Kg/día de Residuos Orgánicos de Ganado Vacuno a una T=20°C y con un tiempo de residencia de TR=20 días** es de:

Tabla 3.5. Producción simulada de biogás a T=20°C y TR=20 días

PRODUCTO	Producción diaria	Porcentaje
Biogás	$0.1159 \frac{m^3 \text{BIOGAS}}{día}$	100%
Metano (CH ₄)	$0.0695 \frac{m^3 \text{METANO}}{día}$	60%
Dióxido de carbono (CO ₂)	$0.0464 \frac{m^3 CO_2}{día}$	40%

3.9.1.9 Calculo de la T_{óptima} (°C) y el TR_{óptimo} (días)

Con el modelo matemático desarrollado por Chen Y.R. (1983) se puede estimar el volumen de biogás producido (V_{BIOGAS}) diariamente por el biodigestor, **esta producción depende principalmente de la temperatura (T) y el tiempo de retención (TR), según este investigador ambas son las variables más influyentes en el proceso de producción de biogás mediante biodigestores** (Chen, 1983), motivo por el cual procedemos a simular la producción de biogás para distintas temperaturas y tiempos de retención:

- Dependencia de la producción (V_{BIOGAS}) con el tiempo de retención (TR)

Utilizando el modelo matemático de Chen y la herramienta software LabVIEW podemos simular el comportamiento de la producción de metano para distintos tiempos de residencia y en función de la temperatura para valores desde 20 hasta 50°C, los resultados de la simulación mediante software () se muestran a continuación:

Figura 3.1. Datos Alimentados para simulación de la producción a distintos TR

E : 50.0000 Kg/día	TR : 1 20.00 días	WA : 581.3953 Kg Animal
e : 86.00 Kg/1000Kg Animal	TR : 2 25.00 días	Uo : 0.521000
sv : 10.00 Kg/1000Kg Animal	TR : 3 30.00 días	Ko : 0.601195
P _{CH4} : 0.20 m ³ CH ₄ /KgSV	TR : 4 35.00 días	
SV : 5.8140 Kg/día	T _{INICIAL} : 20.00 °C	
	T _{FINAL} : 50.00 °C	

FS

Figura 3.2. Gráfica de la simulación de **PRODUCCIÓN DE BIOGÁS** a distintos valores de tiempo de residencia (TR) para $20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 50^{\circ}\text{C}$

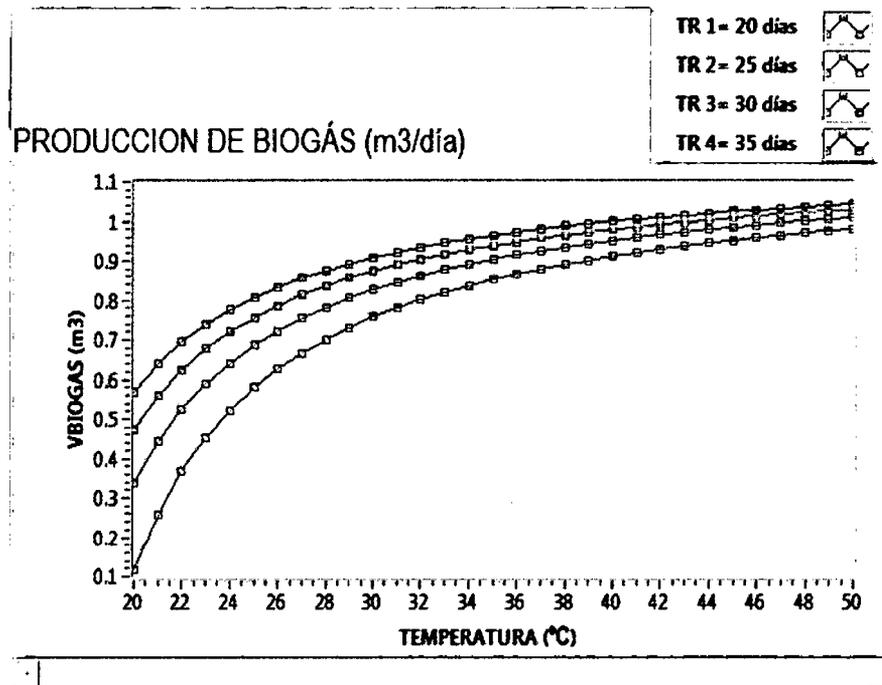


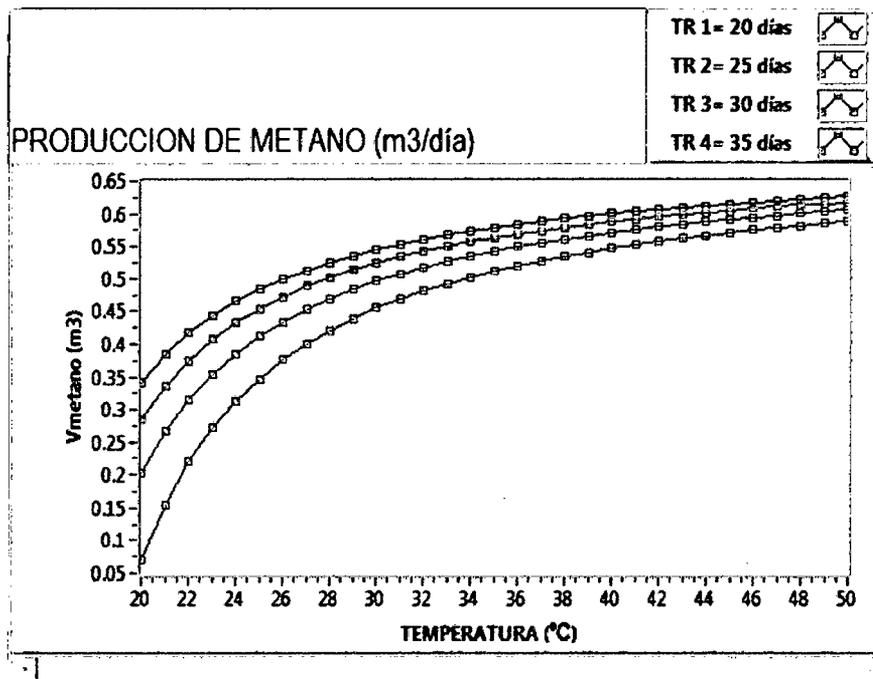
Figura 3.3. Resultados de la simulación de **PRODUCCIÓN DE BIOGÁS** a distintos valores de tiempo de residencia (TR) para $20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 50^{\circ}\text{C}$

PRODUCCIÓN DE BIOGÁS (m3/día)

Temperatura (°C)	TR1=20días	TR2=25días	TR3=30días	TR4=35días
20.000000	0.4115931	0.338509	0.475969	0.569981
21.000000	0.259159	0.443460	0.559320	0.639476
22.000000	0.367911	0.524704	0.624630	0.694387
23.000000	0.453299	0.589459	0.677184	0.738868
24.000000	0.522121	0.642281	0.720387	0.775634
25.000000	0.578772	0.686192	0.756531	0.806532
26.000000	0.626219	0.723270	0.787215	0.832863
27.000000	0.666535	0.754995	0.813590	0.855569
28.000000	0.701216	0.782449	0.836503	0.875351
29.000000	0.731367	0.806439	0.856594	0.892740
30.000000	0.757820	0.827583	0.874355	0.908144
31.000000	0.781216	0.846358	0.890168	0.921887
32.000000	0.802057	0.863141	0.904338	0.934222
33.000000	0.820739	0.878234	0.917107	0.945355

74

Figura 3.4. Gráfica de la simulación de **PRODUCCIÓN DE METANO** a distintos valores de tiempo de residencia (TR) para $20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 50^{\circ}\text{C}$



Fuente y elaboración: PROPIA DE LOS AUTORES

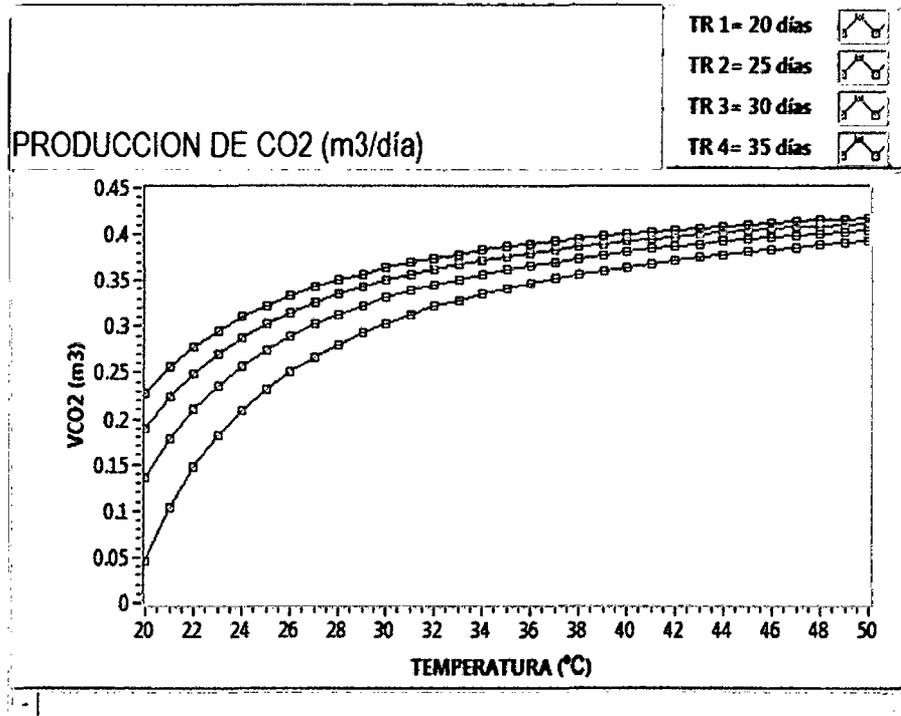
Figura 3.5. Resultados de la simulación de **PRODUCCIÓN DE METANO** a distintos valores de tiempo de residencia (TR) para $20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 50^{\circ}\text{C}$

PRODUCCIÓN DE METANO (m3/día)

Temperatura (°C)	TR1=20días	TR2=25días	TR3=30días	TR4=35días
20.000000	0.069558	0.203105	0.285581	0.341989
21.000000	0.155495	0.266076	0.335592	0.383685
22.000000	0.220747	0.314823	0.374778	0.416632
23.000000	0.271980	0.353675	0.406311	0.443321
24.000000	0.313273	0.385369	0.432232	0.465381
25.000000	0.347263	0.411715	0.453919	0.483919
26.000000	0.375731	0.433952	0.472329	0.499718
27.000000	0.399921	0.452997	0.488154	0.513341
28.000000	0.420730	0.469459	0.501902	0.525211
29.000000	0.438820	0.483864	0.513957	0.535644
30.000000	0.454692	0.496550	0.524613	0.544887
31.000000	0.468730	0.507815	0.534101	0.553132
32.000000	0.481234	0.517885	0.542603	0.560533
33.000000	0.492443	0.526940	0.550264	0.567213

73

Figura 3.6. Gráfica de la simulación de **PRODUCCIÓN DE CO₂** a distintos valores de tiempo de residencia (TR) para $20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 50^{\circ}\text{C}$



Fuente y elaboración: PROPIA DE LOS AUTORES

Figura 3.7. Resultados de la simulación de **PRODUCCIÓN DE CO₂** a distintos valores de tiempo de residencia (TR) para $20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 50^{\circ}\text{C}$

PRODUCCIÓN DE CO₂ (m³/día)

Temperatura (°C)	TR1=20días	TR2=25días	TR3=30días	TR4=35días
20.000000	0.046372	0.135403	0.190388	0.227992
21.000000	0.103663	0.177384	0.223728	0.255790
22.000000	0.147165	0.209882	0.249852	0.277755
23.000000	0.181320	0.235784	0.270874	0.295547
24.000000	0.208849	0.256913	0.288155	0.310254
25.000000	0.231509	0.274477	0.302612	0.322613
26.000000	0.250487	0.289308	0.314886	0.333145
27.000000	0.266614	0.301998	0.325436	0.342228
28.000000	0.280487	0.312980	0.334601	0.350140
29.000000	0.292547	0.322576	0.342638	0.357096
30.000000	0.303128	0.331033	0.349742	0.363258
31.000000	0.312486	0.338543	0.356057	0.368755
32.000000	0.320823	0.345256	0.361735	0.373689
33.000000	0.328296	0.351294	0.366843	0.378142

72

En las figuras 3.2 a 3.7 puede apreciarse claramente que la **producción de Biogás aumenta cuando existe un mayor Tiempo de Residencia (TR)**, evaluando a una misma temperatura de 20°C, para un tiempo de residencia de 20 días, la producción de biogás es de **0.115931 m³/día** y para un tiempo de residencia de 35 días es de **0.569981 m³/día**, de donde se observa que para mayores tiempos de residencia la producción de biogás por día se incrementa, por lo que sería recomendable un tiempo de residencia mayor. Al término de la simulación se obtiene los resultados siguientes para biogás:

PRODUCCIÓN DE BIOGÁS (m³/día)

Temperatura (°C)	TR1=20días	TR2=25días	TR3=30días	TR4=35días
38.000000	0.891094	0.935483	0.965776	0.987939
39.000000	0.901829	0.944272	0.973285	0.994529
40.000000	0.911748	0.952409	0.980241	1.000641
41.000000	0.920941	0.959962	0.986706	1.006325
42.000000	0.929484	0.966992	0.992728	1.011623
43.000000	0.937444	0.973550	0.998351	1.016575
44.000000	0.944879	0.979684	1.003615	1.021212
45.000000	0.951839	0.985432	1.008552	1.025564
46.000000	0.958368	0.990830	1.013193	1.029657
47.000000	0.964505	0.995910	1.017562	1.033512
48.000000	0.970285	1.000698	1.021693	1.037151
49.000000	0.975737	1.005219	1.025576	1.040590
50.000000	0.980889	1.009494	1.029261	1.043845

Fuente y elaboración: PROPIA DE LOS AUTORES

Al término de la simulación a 50°C si observamos la producción de biogás para un tiempo de residencia de 30 días, el cual es **1.029261 m³/día** y si lo comparamos con la producción par un TR de 35 días de **1.043846 m³/día** vemos que la diferencia es de tan solo **0.014585 m³/día** lo cual representa sólo un 1.41% de incremento, con lo cual **para no prolongar demasiado el proceso** tomamos como un valor óptimo:

$$TR_{\text{óptimo}} = 30 \text{ días} \dots\dots\dots (3.20)$$

21

- Dependencia de la producción ($V_{\text{BIOGÁS}}$) con la Temperatura

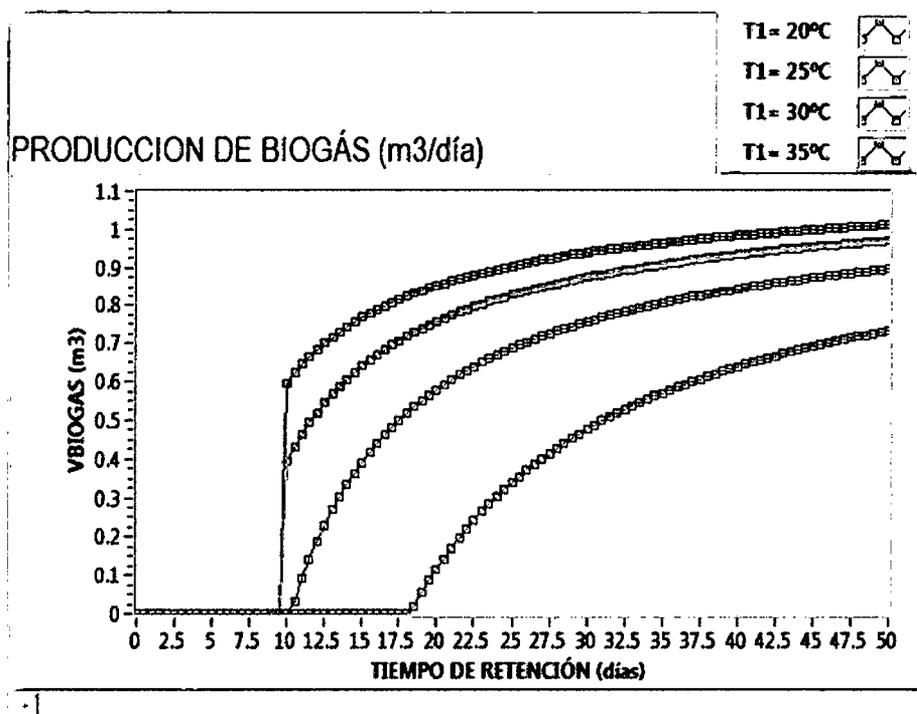
Del mismo modo utilizando el modelo matemático de Chen y la herramienta software LabVIEW podemos simular el comportamiento de la producción de metano para distintas temperaturas y en función del tiempo de retención para valores desde 10 hasta 50 días, los resultados de la simulación mediante software se muestran a continuación:

Figura 3.8. Datos Alimentados para simulación de la producción a distintas $T(^{\circ}\text{C})$

E: 50.0000 Kg/día	T ₁ : 20.00 °C	W _A : 581.3953 Kg Animal
e: 86.00 Kg/1000Kg Animal	T ₂ : 25.00 °C	K ₀ : 0.601195
sv: 10.00 Kg/1000Kg Animal	T ₃ : 30.00 °C	U ₀₁ : 0.131000
P _{CH4} : 0.20 m ³ CH ₄ /KgSV	T ₄ : 35.00 °C	U ₀₂ : 0.196000
SV: 5.8140 Kg/día	T _{RFINAL} : 50.00 días	U ₀₃ : 0.261000
		U ₀₄ : 0.326000

Fuente y elaboración: PROPIA DE LOS AUTORES

Figura 3.9. Gráfica de la simulación de **PRODUCCIÓN DE BIOGÁS** a distintos valores de temperatura (T) para $10 \text{ días} \leq TR \leq 50 \text{ días}$



Fuente y elaboración: PROPIA DE LOS AUTORES

Figura 3.10. Resultados de la simulación de **PRODUCCIÓN DE BIOGÁS** a distintos valores de temperatura (T) para $10 \text{ días} \leq TR \leq 50 \text{ días}$

PRODUCCIÓN DE BIOGÁS (m3/día)

TR (días)	T1=20°C	T2=25°C	T3=30°C	T4=35°C
10.000000	0.000000	0.000000	0.393992	0.596777
10.500000	0.000000	0.030980	0.430588	0.621649
11.000000	0.000000	0.089447	0.463407	0.644117
11.500000	0.000000	0.141491	0.493022	0.664525
12.000000	0.000000	0.188137	0.519891	0.683152
12.500000	0.000000	0.230201	0.544392	0.700229
13.000000	0.000000	0.268344	0.566832	0.715949
13.500000	0.000000	0.303102	0.587470	0.730473
14.000000	0.000000	0.334917	0.606521	0.743936
14.500000	0.000000	0.364157	0.624166	0.756455
15.000000	0.000000	0.391131	0.640561	0.768130
15.500000	0.000000	0.416100	0.655838	0.779046
16.000000	0.000000	0.439286	0.670112	0.789277
16.500000	0.000000	0.460877	0.683482	0.798889

Fuente y elaboración: PROPIA DE LOS AUTORES

Figura 3.11. Gráfica de la simulación de **PRODUCCIÓN DE METANO** a distintos valores de temperatura (T) para $10 \text{ días} \leq TR \leq 50 \text{ días}$

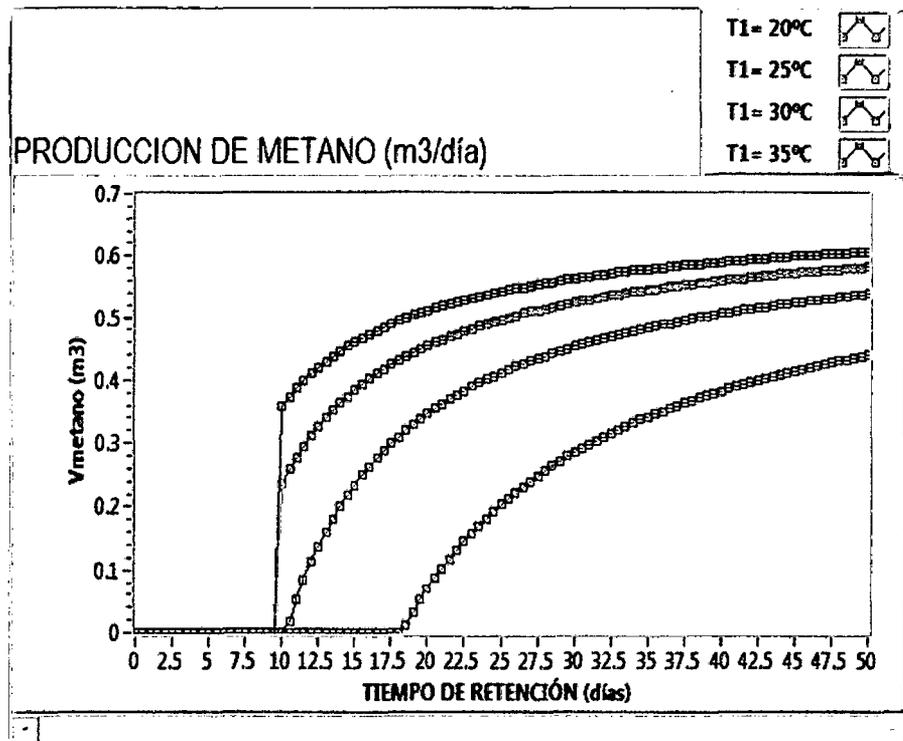


Figura 3.12. Resultados de la simulación de **PRODUCCIÓN DE METANO** a distintos valores de temperatura (T) para $10 \text{ días} \leq TR \leq 50 \text{ días}$

PRODUCCIÓN DE METANO (m3/día)

TR (días)	T1=20°C	T2=25°C	T3=30°C	T4=35°C
10 000000	0 000000	0 000000	0 236395	0 358066
10 500000	0 000000	0 018588	0 258353	0 372989
11 000000	0 000000	0 053668	0 278044	0 386470
11 500000	0 000000	0 084895	0 295813	0 398715
12 000000	0 000000	0 112882	0 311935	0 409891
12 500000	0 000000	0 138121	0 326635	0 420137
13 000000	0 000000	0 161006	0 340099	0 429569
13 500000	0 000000	0 181861	0 352482	0 438284
14 000000	0 000000	0 200950	0 363912	0 446362
14 500000	0 000000	0 218494	0 374499	0 453873
15 000000	0 000000	0 234679	0 384336	0 460878
15 500000	0 000000	0 249660	0 393503	0 467428
16 000000	0 000000	0 263571	0 402067	0 473566
16 500000	0 000000	0 276526	0 410089	0 479334

Fuente y elaboración: PROPIA DE LOS AUTORES

Figura 3.13. Gráfica de la simulación de **PRODUCCIÓN DE CO₂** a distintos valores de temperatura (T) para $10 \text{ días} \leq TR \leq 50 \text{ días}$

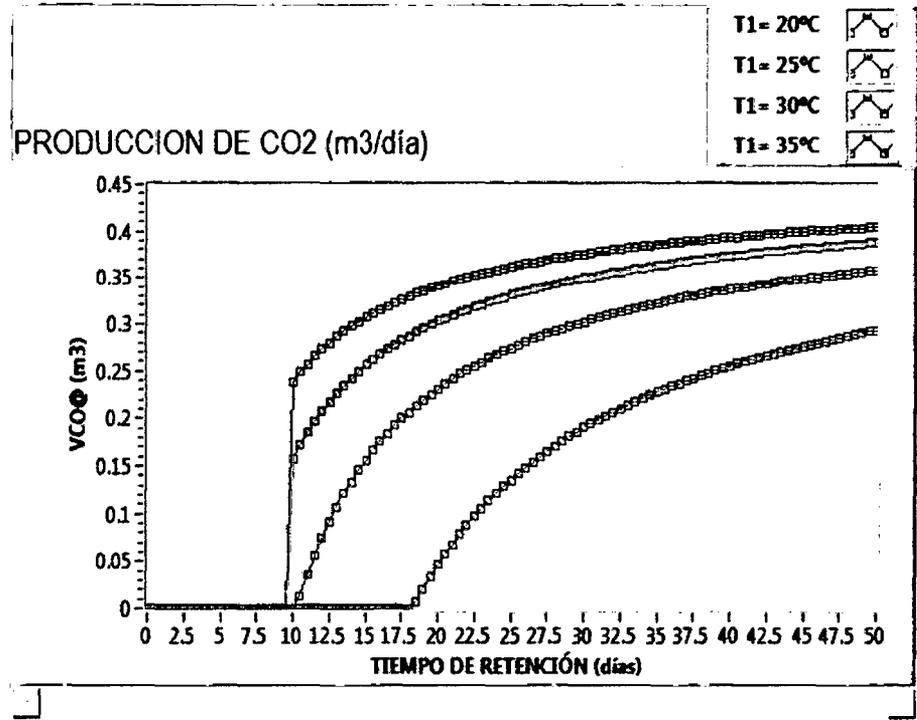


Figura 3.14. Resultados de la simulación de **PRODUCCIÓN DE CO₂** a distintos valores de temperatura (T) para $10 \text{ días} \leq TR \leq 50 \text{ días}$

PRODUCCIÓN DE CO₂ (m³/día)

TR (días)	T1=20°C	T2=25°C	T3=30°C	T4=35°C
10.000000	0.000000	0.000000	0.157597	0.238711
10.500000	0.000000	0.012392	0.172235	0.248659
11.000000	0.000000	0.035779	0.185363	0.257647
11.500000	0.000000	0.056596	0.197209	0.265810
12.000000	0.000000	0.075255	0.207956	0.273261
12.500000	0.000000	0.092081	0.217757	0.280092
13.000000	0.000000	0.107338	0.226733	0.286380
13.500000	0.000000	0.121241	0.234988	0.292189
14.000000	0.000000	0.133957	0.242608	0.297574
14.500000	0.000000	0.145663	0.249666	0.302582
15.000000	0.000000	0.156453	0.256224	0.307252
15.500000	0.000000	0.166440	0.262335	0.311618
16.000000	0.000000	0.175714	0.268045	0.315711
16.500000	0.000000	0.184351	0.273393	0.319556

Fuente y elaboración: PROPIA DE LOS AUTORES

Figura 3.15. Al término de la simulación se obtiene los resultados siguientes para biogás:

PRODUCCIÓN DE BIOGÁS (m³/día)

TR (días)	T1=20°C	T2=25°C	T3=30°C	T4=35°C
27.000000	0.400539	0.717537	0.848318	0.919714
27.500000	0.414421	0.724640	0.853040	0.923240
28.000000	0.427734	0.731483	0.857598	0.926647
28.500000	0.440514	0.738081	0.862001	0.929941
29.000000	0.452794	0.744446	0.866257	0.933128
29.500000	0.464603	0.750593	0.870372	0.936213
30.000000	0.475969	0.756531	0.874355	0.939201
30.500000	0.486916	0.762272	0.878212	0.942097
31.000000	0.497459	0.767827	0.881949	0.944905
31.500000	0.507649	0.773203	0.885571	0.947630
32.000000	0.517476	0.778411	0.889085	0.950275
32.500000	0.526968	0.783458	0.892495	0.952843
33.000000	0.536143	0.788352	0.895806	0.955339
33.500000	0.545018	0.793100	0.899022	0.957766

Si tomamos como referencia el tiempo de retención óptimo encontrado de la ecuación (3.20), $TR_{\text{óptimo}}=30\text{días}$ y de acuerdo con las figuras 3.19 a la 3.14, la **producción de Biogás aumenta cuando existe mayor Temperatura (T)**, para una temperatura de 30°C la producción es de $0.874355\text{ m}^3/\text{día}$ y para una temperatura de 35°C es de $0.939201\text{ m}^3/\text{día}$, si comparamos ambos resultados vemos que la diferencia es de tan solo $0.064846\text{ m}^3/\text{día}$ lo cual representa sólo un 7.41% de incremento.

Por tal razón sería recomendable que el digester se encuentre operando a 35°C o más, pero esto **demandaría la utilización una fuente de calor exterior para climas fríos** como es el caso de la Región Huancavelica y principalmente por la noche donde la temperatura ambiental desciende, lo cual se traduce en un **INCREMENTO DE LOS COSTOS DE OPERACIÓN**, entonces concluimos que la temperatura más óptima sin incrementar demasiado los costos de operación es la de 30°C según se sustenta en el marco teórico esto le corresponde al rango mesofílico.

$$T_{\text{óptima}} = 30^{\circ}\text{C} \dots\dots\dots (3.21)$$

En conclusión se ha identificado las variables más relevantes del proceso las cuales son las que se muestran en la tabla siguiente y también sus valores óptimos, los resultados se resumen a continuación:

Tabla 3.6. Variables de mayor impacto en el proceso de producción de biogás en un biodigestor de 10m^3 de capacidad y sus valores óptimos

VARIABLE DEL PROCESO	Valor Óptimo
Temperatura en el interior del biodigestor	$T_{\text{óptima}} = 30^{\circ}\text{C}$
Tiempo de retención hidráulico	$TR_{\text{óptimo}} = 30\text{días}$

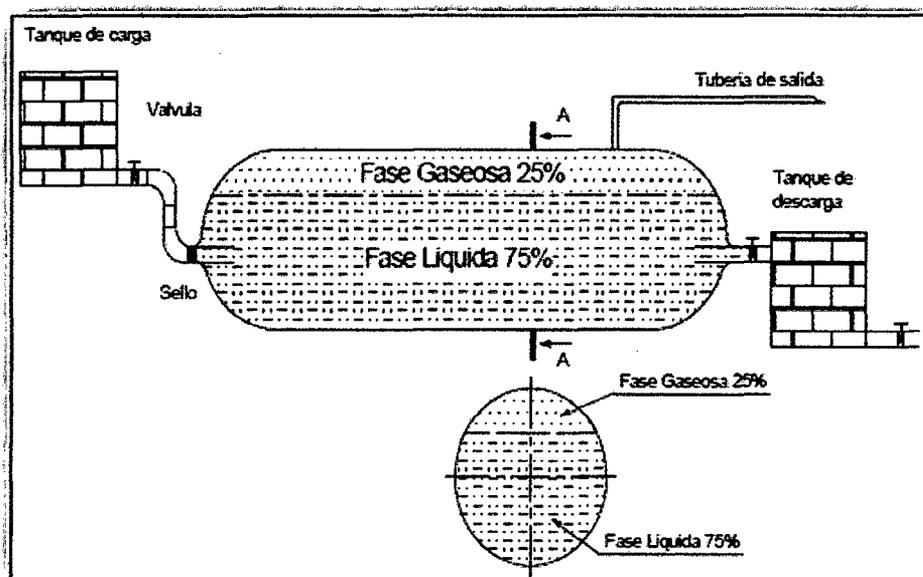
3.9.1.10 Cálculo del Volumen de Diseño del Biodigestor (V_{DB})

Es el volumen de biomasa que puede ser alojada en el interior del biodigestor (**volumen de diseño del biodigestor V_{DB}**), ya que se sabe por diseño que le biodigestor no debe ser completamente llenado de biomasa si no que se

requiere también un volumen adecuado para almacenar el biogás y de este resultado requerimos calcular la **cantidad óptima de materia prima** que debe ser alimentada diariamente.

Para calcular el volumen de diseño del digestor (V_{DB}), es necesario considerar las características de diseño del digestor tipo TUBULAR de PRUEBA, en cual describe que el **75% del volumen debe estar constituido por la fase líquida (Biomasa) y el 25% debe contener la fase gaseosa (Biogás)** (Wheatley, 2010), este volumen también sirve como campana o gasómetro que contiene al biogás. En la figura continua se muestra esta distribución.

Figura 3.16. Esquema General de un Biodigestor TUBULAR.



Fuente y elaboración: (Wheatley, 2010)

De acuerdo al gráfico anterior se puede apreciar que el volumen de diseño del biodigestor calculado (V_{DB}) es el volumen de la fase líquida (V_L) que debe tener el digestor, el mismo que contiene a la mezcla de sustrato-agua y **es el 75% del volumen total de biodigestor y para la fase gas (V_G) es el 25% restante.**

Por lo tanto el cálculo es el siguiente:

$$V_{DB} = V_L = 75\% V_T$$

$$V_L = V_T \times \left(\frac{75}{100}\right) \dots\dots\dots (3.22)$$

$$V_G = V_T \times \left(\frac{25}{100}\right) \dots\dots\dots (3.23)$$

$$V_T = V_L + V_G \dots\dots\dots (3.24)$$

Donde:

V_{DB} = Volumen de diseño del biodigestor (m^3)

V_L = Volumen de la fase líquida del digestor (m^3)

V_G = Volumen de la fase gaseosa del digestor (m^3)

Desarrollando los cálculos tenemos:

$$V_T = 10m^3 \dots\dots\dots (3.25)$$

$$V_{DB} = V_L = (10m^3) \times \left(\frac{75}{100}\right) = 7.5m^3 \dots\dots\dots (3.26)$$

$$V_G = (10m^3) \times \left(\frac{25}{100}\right) = 2.5m^3 \dots\dots\dots (3.27)$$

Lo cual indica que para aprovechar la máxima capacidad del biodigestor se requiere 7.5m³ de biomasa (fase líquida) como volumen de diseño del biodigestor y 2.5m³ de espacio vacío para almacenar el biogás producido (fase gaseosa).

3.9.1.11 Cálculo de la Alimentación Óptima para el Biodigestor de 10m³ de capacidad

Según el Anexo A El volumen real del Biodigestor instalado en el distrito de Apata – Concepción – Junín el cual constituye nuestro SISTEMA REAL o de REFERENCIA para lo cual:

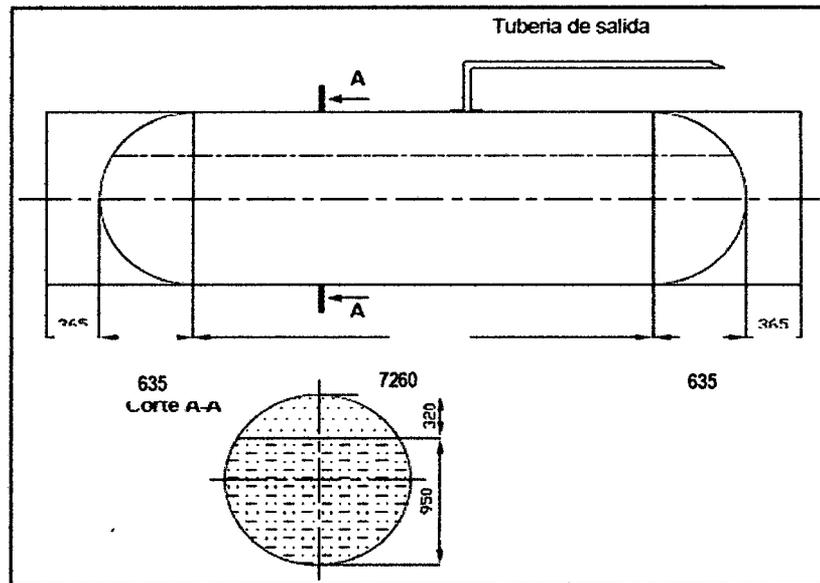
$V_{BR} = 10m^3$ (Volumen Del Biodigestor Real)

Las dimensiones reales del biodigestor de la figura 3.17, son las siguientes:

$D = 1.27m$

$L = 8.53m$

Figura 3.17. Dimensiones Reales del Biodigestor de 10m³ TUBULAR (mm)



Fuente y elaboración: (CIDELSA SAC, 2012)

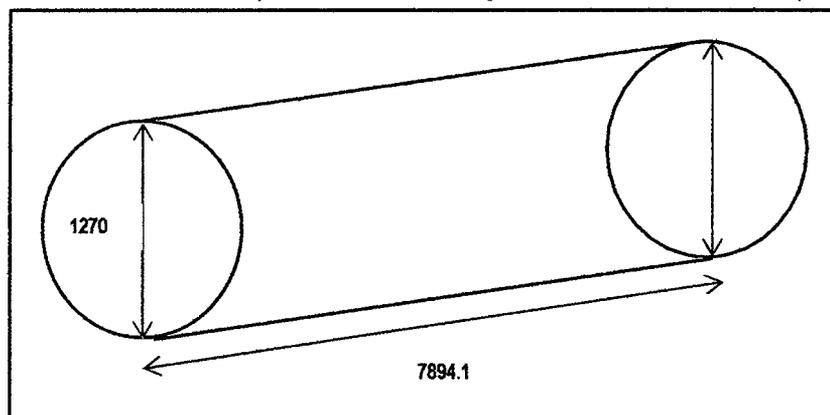
También las dimensiones equivalentes para un cilindro perfecto son las siguientes:

$$V_{DR} = 10m^3 \dots\dots\dots (3.28)$$

$$D = 1.27m \dots\dots\dots (3.29)$$

$$L = 7.8941m \dots\dots\dots (3.30)$$

Figura 3.18. Dimensiones Equivalentes del Biodigestor de 10m³ TUBULAR (mm)



Fuente y elaboración: (CIDELSA SAC, 2012)

Para determinar la alimentación óptima que debe de ingresar al biodigestor se requiere considerar que el estiércol contiene un gran porcentaje de agua, que

oscila entre 80-90%, de los análisis de muestras se pudo determinar que de una masa de 100 Kg de estiércol de vaca fresca, 81.41 Kg son agua (Lahura, 2011). Razón por la cual en términos de volumen asumimos que 1Kg. de estiércol vacuno equivale a 1litro de agua. Sin embargo, es necesario conocer las relaciones entre el sustrato y el agua dependiendo de la fuente proveedora. A continuación, la tabla 3.7 se presenta estas relaciones para diferentes animales y aves de corral.

Tabla 3.7. Relación estiércol - agua para diferentes tipos de fuentes

Animal	Relación Estiércol : agua
Bovino estabulado	1:1
Bovino semiestabulado	1:1
Porcinos peso > 50 Kg.	1:1-2-3
Aves peso ≈ 2 Kg.	1:1
Equino	1:1-3

Fuente y elaboración: (Acuña, 2008)

Por lo tanto la cantidad de sustrato que ingresa al digestor es la suma del agua más el estiércol.

A continuación el volumen del digestor se calcula con la siguiente relación (Kléber & Manitio, 2010):

$$V_L = E \times TR \times F_D \dots\dots\dots (3.31)$$

Dónde:

V_{DD} = Volumen de diseño del digestor o de la fase líquida [Litros].

E = Cantidad de estiércol que ingresa al digestor [Kg /día].

TR = tiempo de retención en días.

F_d = Factor de dilución del residuo.

El factor de dilución depende del tipo de sustrato, de acuerdo a la Tabla 3.1, la relación Estiércol - agua (1:1) para bovinos (ganado vacuno), nos indica que puede haber una relación alimentación en proporción de **1 parte en peso de Estiércol por 1 una parte en peso de Agua**, por lo tanto para nuestro sistema:

$$F_d = 1 \text{ estiércol} + 1 \text{ de agua}$$

$$F_d = 2 \dots\dots\dots (3.32)$$

Entonces **la cantidad de agua cargada (W)** siempre se estimara usando el factor de dilución F_d (1:1) mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{E_{optimo}}{W_{optimo}} = \frac{1}{1}$$

$$W_{optimo} = \frac{1}{1} \times E_{optimo} \dots\dots\dots (3.33)$$

A partir de esto podemos calcular la cantidad de estiércol y de agua óptimos que debe de ingresar la biodigestor diariamente, a partir de la ecuación 3.8 y 3.13 tenemos:

$$V_L = 7.5m^3 = 7500Litros \dots\dots\dots (3.34)$$

$$E_{optimo} = \frac{V_L}{(TR_{optimo} \times F_d)} \dots\dots\dots (3.35)$$

Donde:

V_L = Volumen de la fase líquida del biodigestor [Litros].

E_{optimo} = Cantidad de estiércol óptimo que ingresa al digestor [Kg. /día].

TR_{optimo} = tiempo de retención óptimo en días.

$F_d = 2$: Factor de dilución para Estiércol de ganado vacuno

Reemplazando los datos, de las ecuaciones 3.32, 3.34 y los valores óptimos de la tabla 3.6:

$$E_{optimo} = \frac{V_L}{(TR_{optimo} \times F_d)} = \frac{7500}{(30 \times 2)}$$

$$E_{optimo} = 125 \frac{Kg}{día} \dots\dots\dots (3.36)$$

También la cantidad de agua óptima requerida es calculada de las ecuaciones 3.33:

$$W_{optimo} = \frac{1}{1} \times E_{optimo} \dots\dots\dots (3.33)$$

$$W_{optimo} = 125 \frac{Kg}{día} \dots\dots\dots (3.42)$$

Tabla 3.8. Parámetros óptimos de operación en la producción de biogás

Parámetro de operación	Valor Óptimo
Temperatura en el interior del biodigestor	$T_{optima} = 30^\circ C$
Tiempo de retención hidráulico	$TR_{optimo} = 30días$

Cantidad de Estiércol óptimo alimentado al biodigestor	$E_{optimo} = 125 \frac{Kg}{día}$
Cantidad de agua óptima alimentada al biodigestor	$W_{optimo} = 125 \frac{Kg}{día}$

Fuente y elaboración: PROPIA DE LOS AUTORES

3.9.1.12 Cálculo de la producción óptima del biodigestor a condiciones óptimas

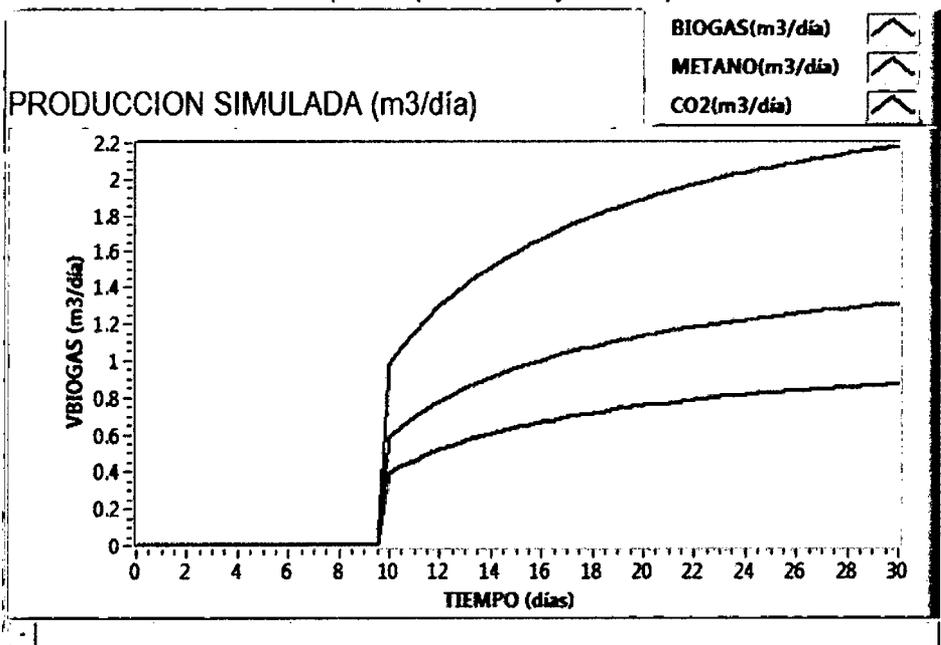
Para el cálculo de la producción óptima necesitamos ingresar al simulador del proceso los valores presentados en la tabla 3.8, los cuales son los valores óptimos de los parámetros de operación que deberán mantenerse constantes durante todo el proceso.

Figura 3.19. Datos Alimentados simulación de la producción óptima de biogás

E: 125.0000 Kg/día	T: 30.00 °C	W _A : 1453.4884 Kg Animal
e: 86.00 Kg/1000Kg Animal	TR: 30.00 días	SV: 14.5349 Kg/día
sv: 10.00 Kg/1000Kg Animal		K ₀ : 0.603359
P _{CH4} : 0.20 m ³ CH ₄ /KgSV		

Fuente y elaboración: PROPIA DE LOS AUTORES

Figura 3.20. Gráfica de la simulación de **PRODUCCIÓN DE BIOGÁS** a condiciones óptimas (TR=30días y T=30°C)



Fuente y elaboración: PROPIA DE LOS AUTORES

Figura 3.21. Resultados de la simulación de **PRODUCCIÓN DE METANO** a condiciones óptimas (TR=30días y T=30°C)

PRODUCCIÓN SIMULADA (m3/día)

Tiempo (días)	BIOGÁS	METANO	CO2
24 000000	2 037670	1 222602	0 815068
24 500000	2 052534	1 231521	0 821014
25 000000	2 066812	1 240087	0 826725
25 500000	2 080540	1 248324	0 832216
26 000000	2 093749	1 256250	0 837500
26 500000	2 106471	1 263882	0 842588
27 000000	2 118732	1 271239	0 847493
27 500000	2 130558	1 278335	0 852223
28 000000	2 141973	1 285184	0 856789
28 500000	2 152998	1 291799	0 861199
29 000000	2 163655	1 298193	0 865462
29 500000	2 173963	1 304378	0 869585
30 000000	2 183938	1 310363	0 873575

En las figuras 3.20 y 3.21 se presentan los resultados de la simulación para la producción de biogás si se mantienen constantes las condiciones óptimas de operación: tiempo de retención TR=30días y temperatura T=30°C, se estima la máxima cantidad producida de biogás en metros cúbicos por día, esta producción es ideal y es la que espera alcanzarse implementando el sistema de control automatizado en el biodigestor simulado.

Tabla 3.9. Producción estimada de biogás a condiciones óptimas de operación obtenidas mediante Simulación.

Producción estimada (simulación)	Valor máximo esperado
Volumen de biogás	$V_{BIOGÁS} = 2.184 \frac{m^3}{día}$
Volumen de metano	$V_{METANO} = 1.31 \frac{m^3}{día}$
Volumen de CO ₂	$V_{CO2} = 0.874 \frac{m^3}{día}$

Fuente y elaboración: PROPIA DE LOS AUTORES

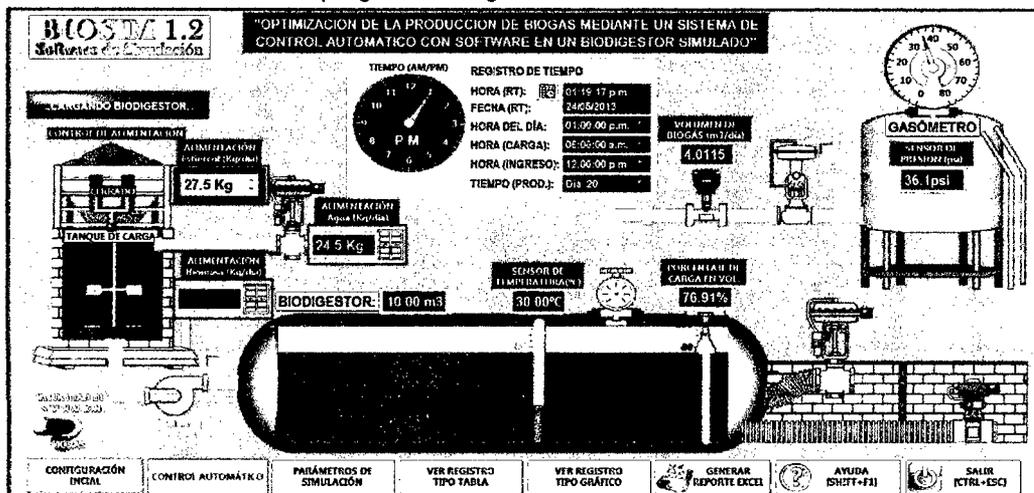
59

CAPÍTULO IV RESULTADOS

4.1. Presentación de Resultados

En este inciso se presentan los resultados obtenidos en la presente investigación, tal como ya se había descrito nuestra instrumento de recolección de datos lo constituye el software de simulación y control del proceso denominado **BIOSIM 1.2 desarrollado en el entorno de programación gráfica LabVIEW versión 12.0**, este software fue programado utilizando el modelo matemático desarrollado por **Chen Y.R. en su obra "Kinetic analysis of anaerobic digestion of pig manure and its design implications" publicado en la sociedad Americana de Ingenieros Agrícolas ASAE en el año de 1983**, dicho modelo fue implementado en el software para la simulación dinámica del proceso y la predicción del volumen producido de biogás a partir de excretas de ganado vacuno en un biodigestor de 10m³ de capacidad, el resultado de este trabajo se describe a continuación, y se empieza mostrando el panel principal del software:

Figura 4.1. Panel Principal del software BIOSIM 1.2 desarrollado en el entorno de programación gráfico LabVIEW versión 9.0.



Fuente y elaboración: PROPIA DE LOS AUTORES

4.1.1. El software BIOSIM 1.2

A continuación se describe como resultado las características del software BIOSIM 1.2, el funcionamiento de cada una de las herramientas y elementos de control y la manera de ingresar y visualizar la información, y por último la interpretación.

4.1.1.1. Ventana de inicio de software

Esta ventana es la primera en mostrarse al ejecutar el archivo **BIOSIM 1.2.exe** del menú de inicio de Windows (INICIO/BIOSIM1.2/BIOSIM 1.2.exe), el software puede ser ejecutado en sistemas operativos Windows xp o posterior de 32 o 64bits, en esta etapa se cargan todos los componentes y la base de datos al software de manera que pueda iniciar sin ningún problema.

Figura 4.2. Ventana de inicio de software



4.1.1.2. Ventana de configuración de resolución de pantalla

Esta ventana anuncia que se requiere configurar la resolución de pantalla de Windows, a 1280x800píxels o superior, para mostrar correctamente todos los componentes del software, esto se puede hacer ingresando a **Panel de control\Todos los elementos de Panel de control\Pantalla\Resolución de pantalla**, se lanza la ventana tal como se muestra en la figura:

37

Figura 4.3. Ventana resolución de pantalla en Windows 7.

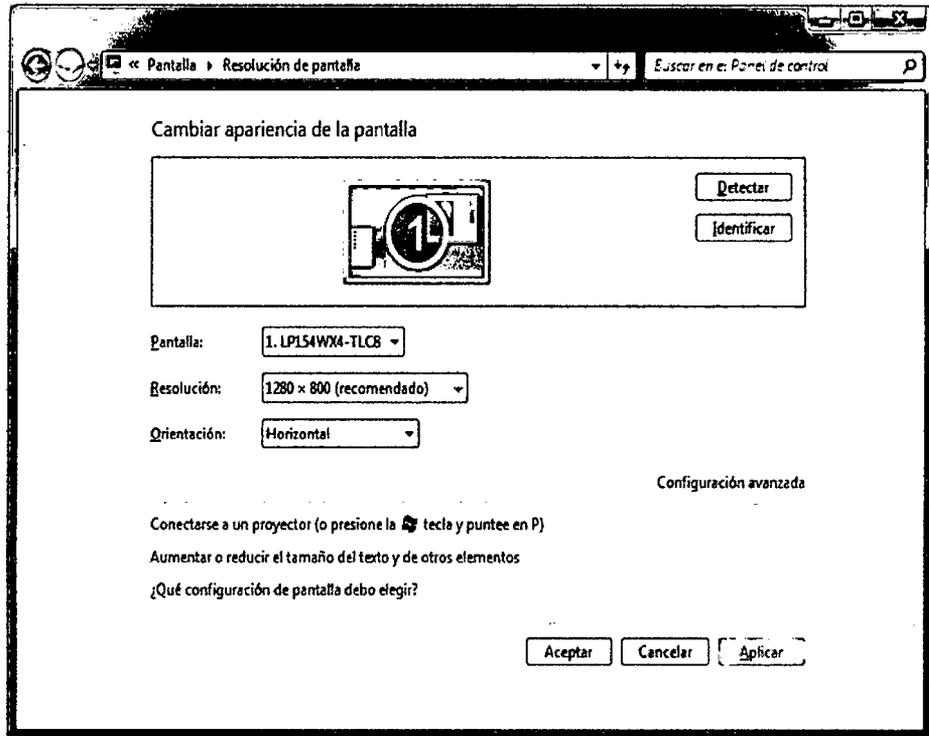
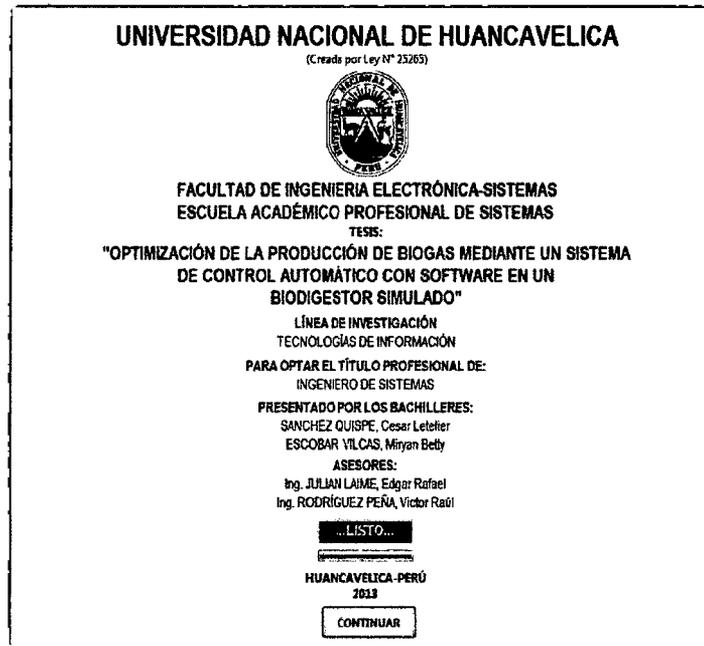


Figura 4.4. Ventana de configuración de resolución de pantalla en el software.



4.1.1.3. Ventana de bienvenida en el software

En esta ventana se muestra información referente al proyecto de investigación donde está el fundamento del desarrollo del software, así como los autores, asesores y la institución a la que pertenecen.



4.1.1.4. Ventana de configuración inicial del software

En esta ventana se configuran los parámetros de operación que se mantendrán constantes durante toda la simulación del proceso de producción de biogás, en términos generales si se quiere ingresar y/o modificar la información debe de hacerse en los cuadros que tiene botones de incremento/decremento los cuales se denominan **controles** como por ejemplo para el tiempo de residencia, el software toma a este valor como un **CONTROL** y los recuadros que no presentan los botones mencionados son **INDICADORES** y no pueden ser modificados debido a que su valor depende de uno o más controles, y solo sirven para visualizar resultados, esto se aplica para todas las ventanas y cuadros de diálogo del software.

El manejo e ingreso de la información en la ventana de configuración inicial constituye la primera etapa para que el software pueda comenzar a ejecutarse, aquí ingresamos la información de acuerdo a la **tabla 3.8** la cual presenta los valores óptimos estimados en el capítulo III:

SS

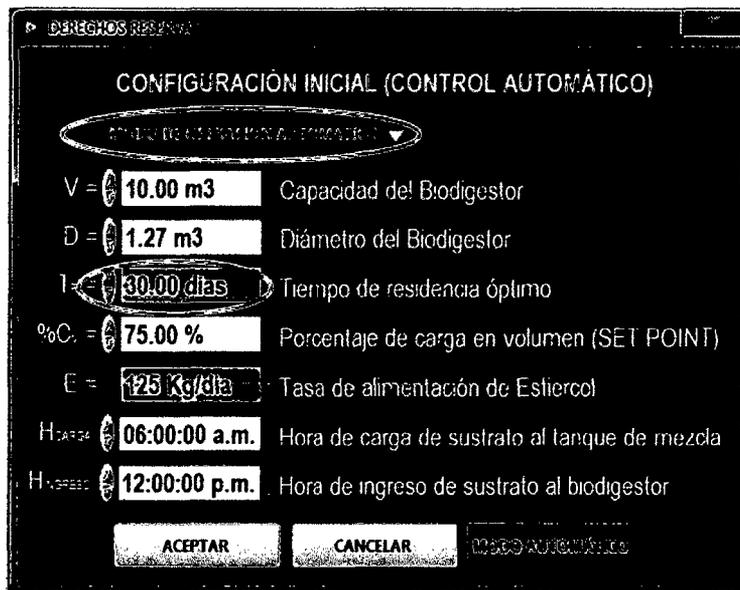
Tabla 4.1. : Parámetros óptimos de operación en la producción de biogás

Parámetro de operación	Valor Óptimo
Temperatura en el interior del biodigestor	$T_{\text{optima}} = 30^{\circ}\text{C}$
Tiempo de retención hidráulico	$TR_{\text{optimo}} = 30\text{días}$
Cantidad de Estiércol óptimo alimentado al biodigestor	$E_{\text{optimo}} = 125 \frac{\text{Kg}}{\text{día}}$
Cantidad de agua óptima alimentada al biodigestor	$W_{\text{optimo}} = 125 \frac{\text{Kg}}{\text{día}}$

Fuente y elaboración: PROPIA DE LOS AUTORES

Al pulsar el botón configuración inicial del menú principal se muestra la siguiente ventana:

Figura 4.5. Ventana de Configuración inicial del software con TR=30



Fuente y elaboración: PROPIA DE LOS AUTORES

En esta ventana aparece un pestaña para el modo de operación del software MANUAL/AUTOMÁTICO de cual seleccionamos el modo de operación AUTOMATICO, también se puede programar la hora de carga en el tanque de mezcla y la de ingreso al biodigestor, de este modo se alimentara diariamente, a las mencionadas horas. Aquí entonces nuestra base de cálculo de alimentación al sistema es de 125Kg de Estiércol por día y con un tiempo de residencia 30 días.

Hay que mencionar que si modificamos el tiempo de residencia a un de 40 días, observamos como también cambia la tasa de alimentación de estiércol 94Kg/día ya que esta es una función del mencionado tiempo de residencia, esto se muestra en la figura siguiente:

Figura 4.6. Ventana de configuración inicial con TR=40.

DERECHOS RESERVADOS

MODO DE OPERACIÓN AUTOMÁTICO

V = 10.00 m3 Capacidad del Biodigestor

D = 1.27 m3 Diámetro del Biodigestor

T = 40.00 dias Tiempo de residencia óptimo

%C = 75.00 % Porcentaje de carga en volumen (SET POINT)

E = 94 Kg/dia Tasa de alimentación de Estiercol

H_CARGA = 06:00:00 a.m. Hora de carga de sustrato al tanque de mezcla

H_INGRESO = 12:00:00 p.m. Hora de ingreso de sustrato al biodigestor

ACEPTAR CANCELAR MODO AUTOMÁTICO

Fuente y elaboración: PROPIA DE LOS AUTORES

Es necesario también configurar los parámetros de simulación, para lo cual se debe pulsar el botón de PARAMETROS DE SIMULACIÓN del menú principal e ingresar los valores ya estimados en capítulo anterior (ecuaciones 3.10, 3.11, 3.12), con lo cual se muestra la siguiente ventana:

Figura 4.7. Ingreso de parámetros de simulación del proceso.

DERECHOS RESERVADOS

PARAMETROS DE SIMULACION DEL PROCESO

G = 66.00 Kg/1000Kg Animal Estiercol producido por cada 1000Kg de Animal

S = 10.00 Kg/1000Kg Animal Solidos Volátiles por cada 1000Kg de Animal

PC14 = 0.20 m3CH4/KgSV potencial de producción de metano

T = 30.00 °C Temperatutra en el interior del biodigestor

TR = 30.0000 dias TIEMPO DE RESIDENCIA ÓPTIMO

E = 125.0000 Kg/dia ALIMENTACION TOTAL DE ESTIERCOL

SV = 14.5349 Kg/dia CONTENIDO TOTAL DE SOLIDOS VOLATILES

YA = 1453.4884 Kg Animal PESO TOTAL DE ANIMAL REQUERIDO

Uy = 0.261000 Crecimiento de la Producción de metano con la T(°C)

Kp = 0.603359 Descomposición de los solidos volátiles en el tiempo

Vmax = 2.671020 m3CH4/dia PRODUCCION MAXIMA PROYECTADA DE METANO

Vmax2 = 1.780680 m3CO2/dia PRODUCCION MAXIMA PROYECTADA DE CO2

Ventgas = 4.481700 m3BIOGÁS/dia PRODUCCION MAXIMA PROYECTADA DE BIOGÁS

ACEPTAR CANCELAR

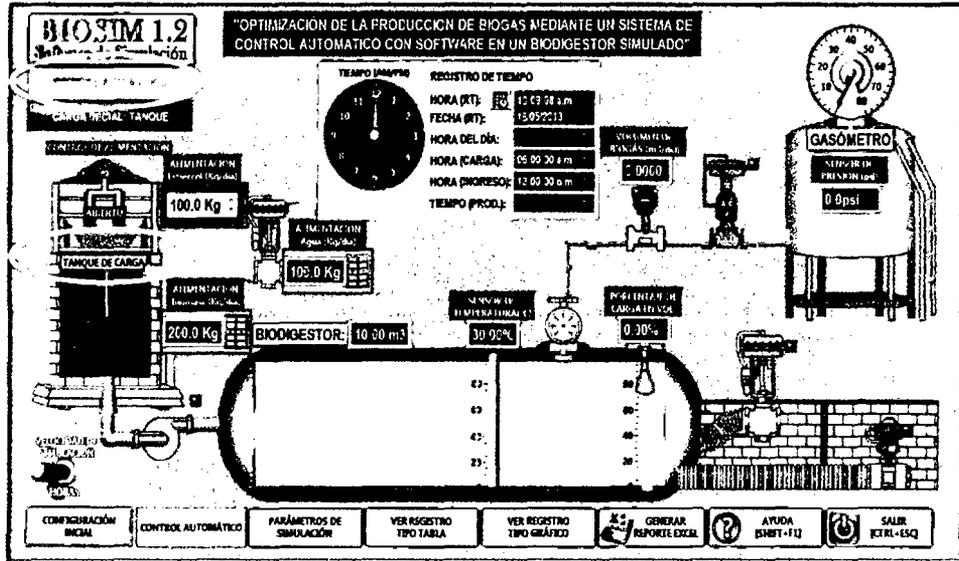
4.1.1.5. Carga Inicial en el tanque de Mezcla

Cuando se haya ingresado todos los datos en la configuración inicial y los parámetros de simulación del proceso como ya se describió, se inicia automáticamente la etapa de Carga Inicial en el tanque de Mezcla ya que el sistema cuenta con una cámara de recepción de la materia prima la cual como ya se explicó en el capítulo anterior consiste en una **mezcla de agua y estiércol de ganado vacuno**, estas cantidades son calculadas a partir del tiempo de residencia y las dimensiones del biodigestor y su dosificación se encuentra controlada mediante un **sensor de peso para el estiércol** y un **sensor de flujo para el agua**, con lo cual ingresan las cantidades exactas, para ser homogenizadas mediante un sistema de agitación. En tanto dure esta etapa se aprecia un mensaje intermitente de **CARGA INICIAL TANQUE** y al terminar el mensaje cambia indicando la nueva etapa.

Para el ingreso de la materia prima al tanque de mezcla se cuenta con **una tolva en donde se deposita diariamente todo el estiércol de ganado vacuno producido**, y luego el software se encarga de activar un control de paso que permite el ingreso hasta que el sensor de peso indique que se tiene la cantidad programada en el software.

Para el ingreso del agua se cuenta con una **electroválvula tipo ON/OFF**, el cual permite el ingreso de la cantidad requerida de agua hasta que se alcance el peso total apropiado, el cual en la parte de cálculo según la proporción de ingreso se determinó en 1:1 esto quiere decir que por cada kilogramo de estiércol se debe alimentar también 1 kilogramo de agua.

Figura 4.8. Etapa de carga inicial en el tanque de mezcla.

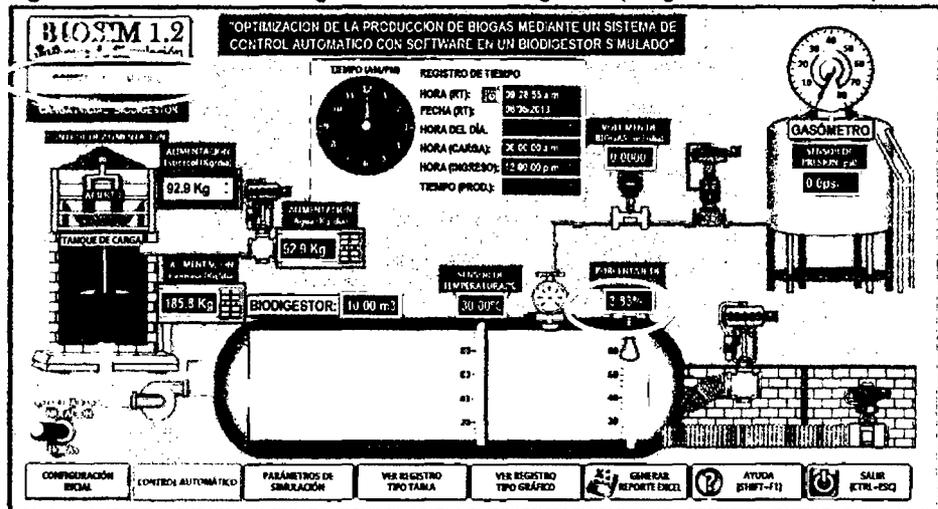


ingreso de la tolva de excreta de ganado como la válvula de alimentación de agua, para pasar a la siguiente etapa.

4.1.1.6. Carga Inicial en el Biodigestor

La primera carga o carga inicial de la mezcla en el biodigestor se realiza previamente al inicio del proceso, esta se da permitiendo bombeando la biomasa del tanque de mezcla, para lo cual se activa la BOMBA DE ALIMENTACION, la cual se torna de color verde lo que indica que esta activada.

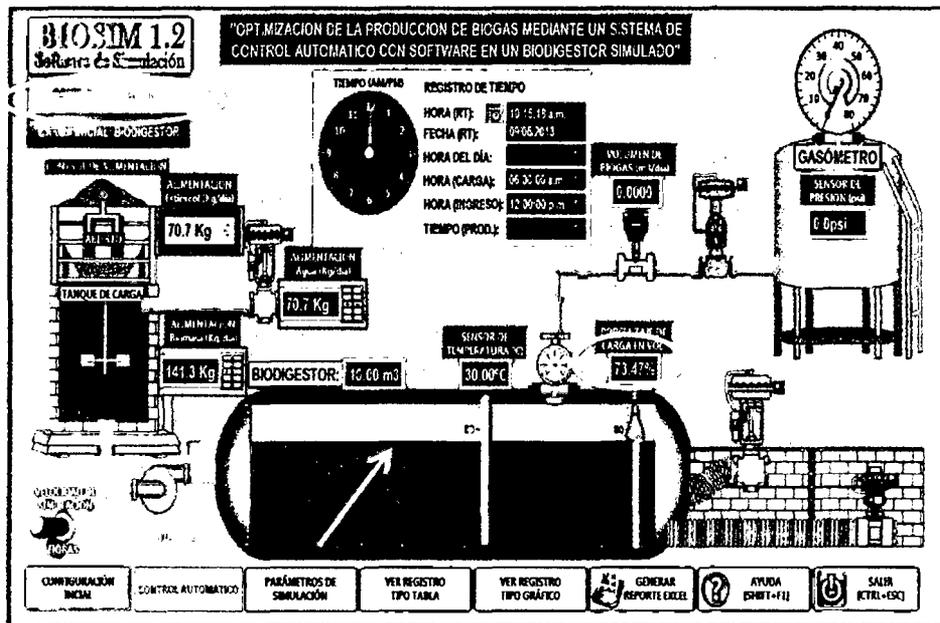
Figura 4.9. Proceso de carga inicial en el biodigestor (carga inicial al 3.83%)



Fuente y elaboración: PROPIA DE LOS AUTORES

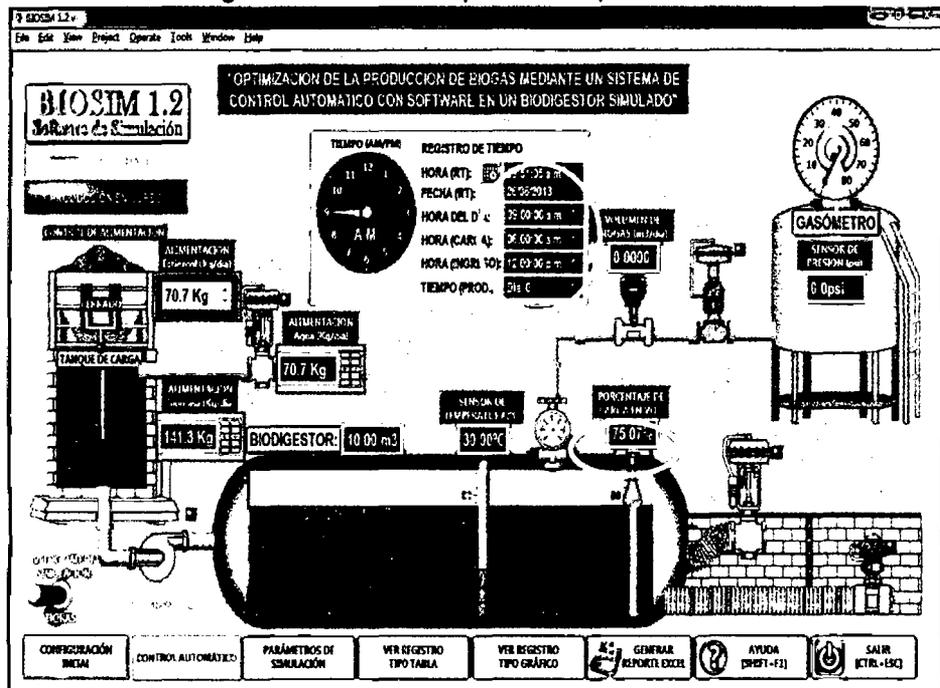
51

Figura 4.10. Proceso de carga inicial en el biodigestor (carga al 73.47%)



Luego continua la carga hacia el biodigestor hasta alcanzar un porcentaje de carga del 75% como ya se determinó en el apartado anterior, se muestra el siguiente comportamiento:

Figura 4.11. Inicio del proceso de producción



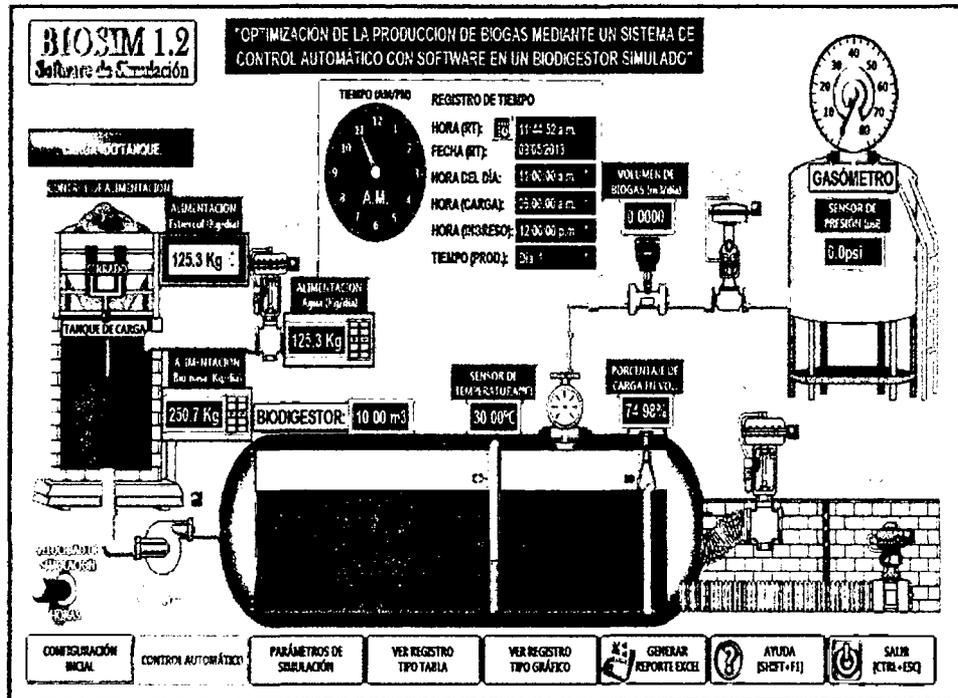
Fuente y elaboración: PROPIA DE LOS AUTORES

Cuando la carga de biomasa en el interior del biodigestor ha alcanzado el 75% termina el proceso de carga inicial y se apaga la BOMBA DE ALIMENTACIÓN con lo cual se da pase a la siguiente etapa.

4.1.1.7. Carga o Alimentación diaria al biodigestor

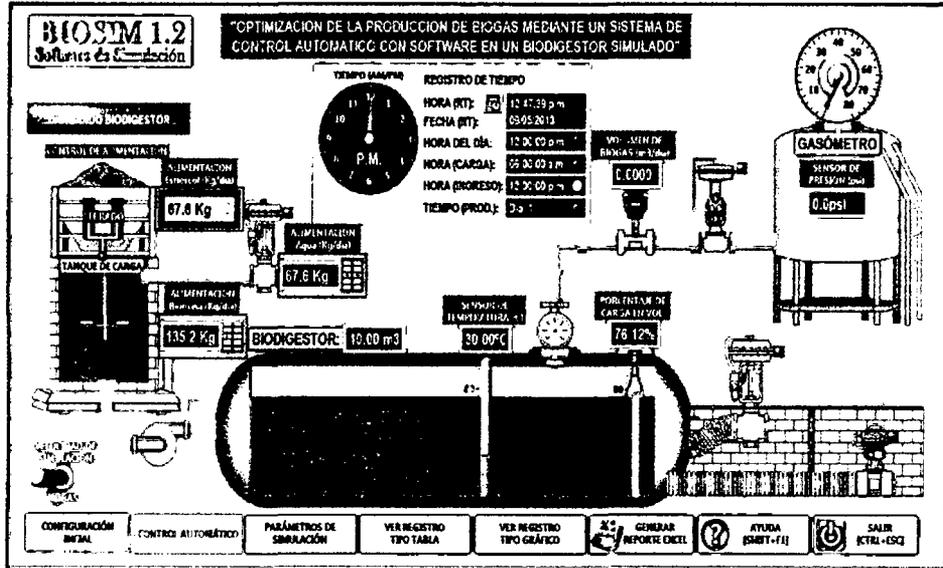
Para que el biodigestor pueda producir biogás diariamente, tiene que ser alimentado diariamente la cantidad especificada de 250Kg de biomasa (125Kg de Estiércol y 125Kg de agua), de esto se encarga el sistema, es por ello que se requería especificar una hora determinada para la carga al tanque de mezcla y también para el ingreso al biodigestor. Cuando se haya dejado de alimentar al equipo se tendrá que la producción ira descendiendo hasta quedar en las proximidades de cero, y para evitar esto hay que alimentar continuamente al equipo, esto se puede ver en la imagen siguiente:

Figura 4.12. Carga diaria al tanque de mezcla (06:00:00a.m.)



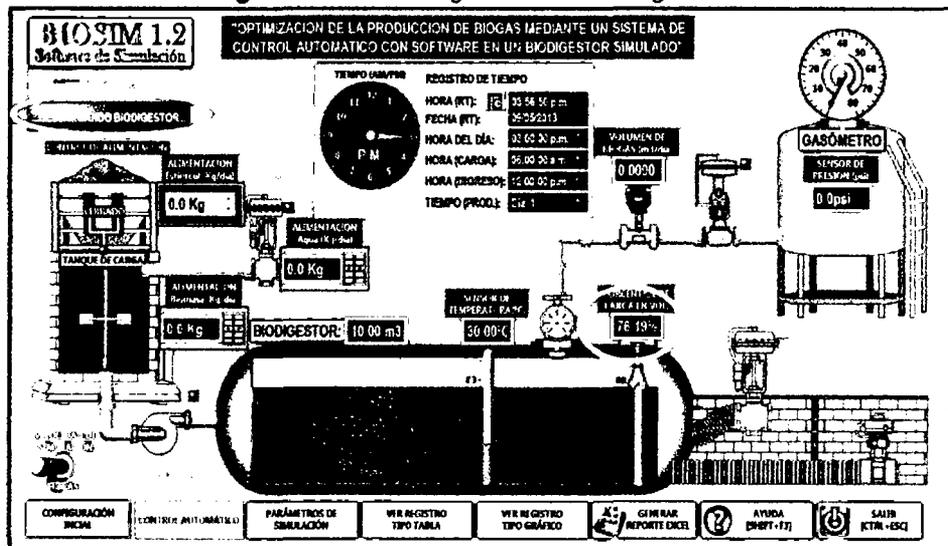
Fuente y elaboración: PROPIA DE LOS AUTORES

Figura 4.13. Alimentación diaria al biodigestor (12:00:00p.m.)



También es necesario indicar que al igual que se alimenta diariamente al biodigestor para mantener el 75% de carga también es necesario descargar los subproductos como resultado de la descomposición como son el BIOL y el BIOSOL, los cuales como ya se mencionó en capítulos anteriores son usados como abono orgánico por su alto contenido en minerales debido a que ellos no se descomponen ni volatilizan, estas corrientes son controladas mediante las correspondientes VÁLVULAS DE BIOL y BIOSOL, cada una de ellas dispone de una cámara de concreto por separado para el almacenamiento correspondiente y posterior disposición.

Figura 4.14. Descarga diaria del biodigestor

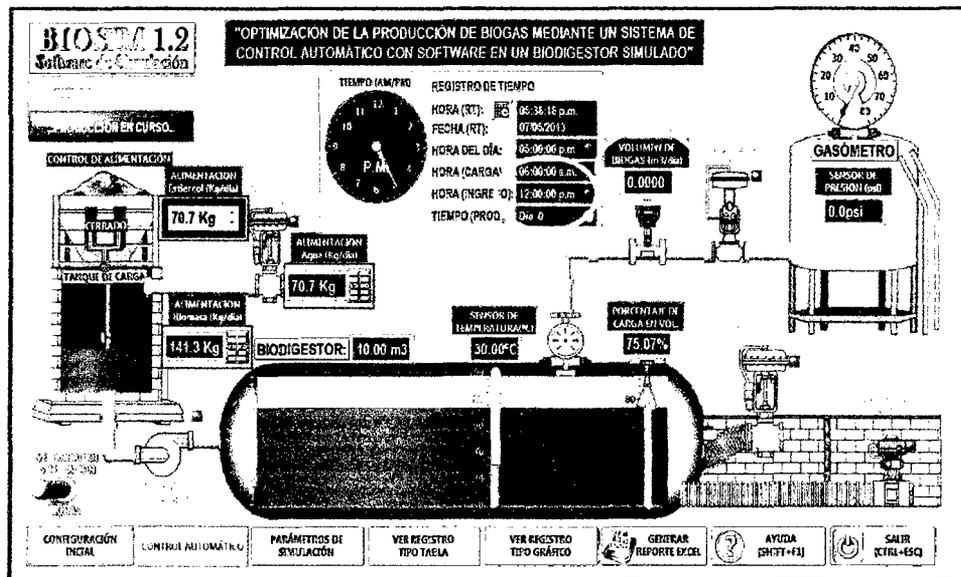


El etapa de descarga de biodigestor permitirá controlar y mantener una carga del 75% la cual aumenta cada vez que ingresa biomasa la biodigestor, por lo tanto si el sistema no se encuentra controlado y se continua con la alimentación podría llegar a saturarse causando daños al equipo, esta es una razón más para implementar en este sistema un control automático.

4.1.1.8. La etapa de producción de biogás

En el marco teórico se describió como es el proceso de descomposición de la materia orgánica contenida en el interior del biodigestor y la producción de biogás, cuando el biodigestor está con la carga adecuada al 75% de su capacidad total la cual es de 10m³ se cierran todas las entradas y salidas, para que las bacterias puedan hacer el trabajo de descomponer esta materia orgánica en biogás y otros subproductos, este proceso se lleva a cabo de manera anaeróbica (sin presencia de aire).

Figura 4.15. Inicio del proceso de producción de biogás (día 0)



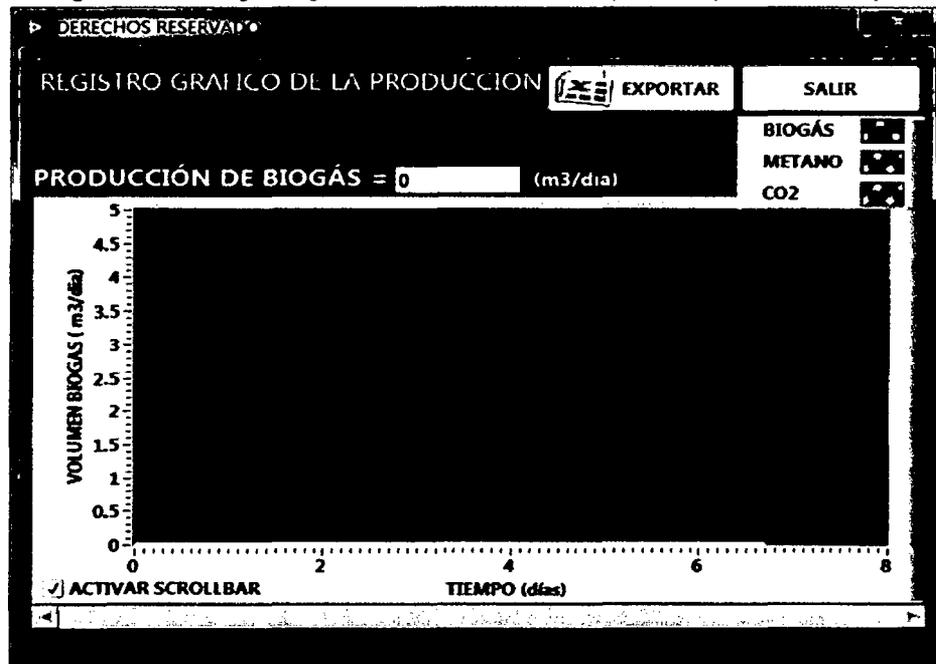
Al iniciarse el proceso se activa un RELOJ que cumple la tarea de REGISTRAR el tiempo transcurrido durante todo el proceso, como ya se describió en el capítulo 3 a solo a partir del décimo día se detecta presencia de biogás producido, debido a esto antes de los diez días al no detectarse presencia de biogás la válvula de salida de biogás permanece cerrada (de color rojo), así como también el sensor medidor de biogás producido marca cero.

Solo es hasta el décimo día cuando se puede detectar presencia de gas, para comprobar esto se puede pulsar en los botones de VER REGISTRO TIPO TABLA del menú principal, o VER REGISTRO TIPO GRAFICO, en donde podemos apreciar lo que se muestra en las siguientes figuras:

Figura 4.16. Registro histórico de evolución del proceso (hasta el día 1)

FECHA	HORA	DIA	BIOPRODUCCION	BIOGAS(m3)	METANO(m3)	CO2(m3)	CONTROL
mié 08 de may de 2013	11:00:00 p.m.	Día 0	0.875	0.000	0.000	0.000	AUTOMÁTICO
mié 09 de may de 2013	12:00:00 a.m.	Día 0	0.917	0.000	0.000	0.000	AUTOMÁTICO
mié 09 de may de 2013	01:00:00 a.m.	Día 0	0.958	0.000	0.000	0.000	AUTOMÁTICO
mié 09 de may de 2013	02:00:00 a.m.	Día 1	1.000	0.000	0.000	0.000	AUTOMÁTICO
mié 09 de may de 2013	03:00:00 a.m.	Día 1	1.042	0.000	0.000	0.000	AUTOMÁTICO
mié 09 de may de 2013	04:00:00 a.m.	Día 1	1.083	0.000	0.000	0.000	AUTOMÁTICO
mié 09 de may de 2013	05:00:00 a.m.	Día 1	1.125	0.000	0.000	0.000	AUTOMÁTICO
mié 09 de may de 2013	06:00:00 a.m.	Día 1	1.167	0.000	0.000	0.000	AUTOMÁTICO
mié 09 de may de 2013	07:00:00 a.m.	Día 1	1.208	0.000	0.000	0.000	AUTOMÁTICO
mié 09 de may de 2013	08:00:00 a.m.	Día 1	1.250	0.000	0.000	0.000	AUTOMÁTICO

Figura 4.17. Registro gráfico de la evolución del proceso (hasta el día 6)

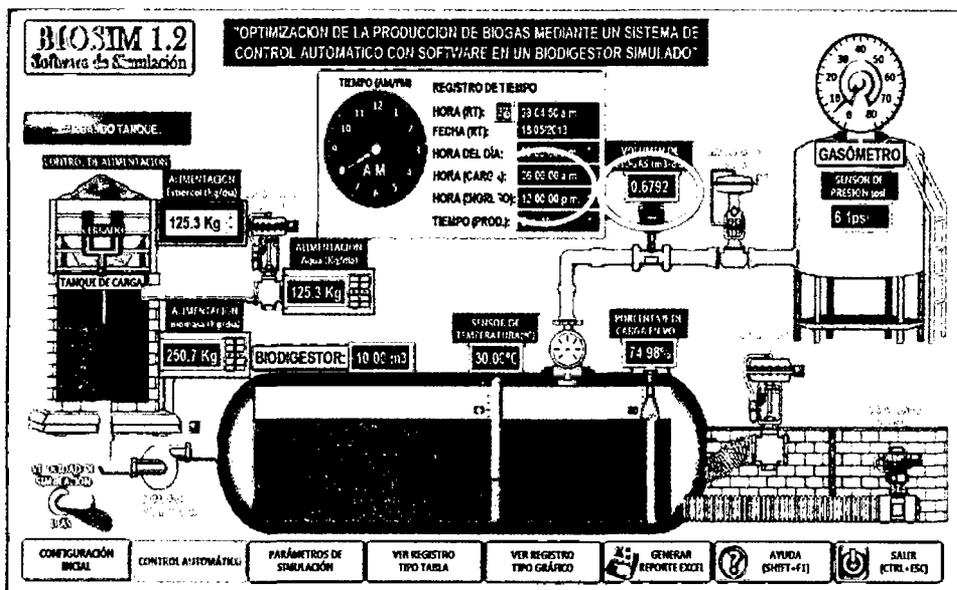


Fuente y elaboración: PROPIA DE LOS AUTORES

A partir del décimo día se detecta la presencia de pequeñas cantidades de biogás esto por lo cual la VÁLVULA DE BIOGÁS se activa permitiendo el paso y almacenamiento de biogás en la cámara conocida como GASÓMETRO. Por lo

cual hasta que la producción se estabilice la presión en gasómetro se irá incrementando progresivamente.

Figura 4.18. Producción de biogás a partir del décimo día.



La producción a partir del décimo día y su incremento hasta estabilizarse puede verificarse progresivamente también en los registros tipo tabla y gráficos.

Figura 4.19. Registro histórico de la producción de biogás (simulación)

DERECHOS RESERVADOS

REGISTRO HISTÓRICO DE LA PRODUCCIÓN

EXPORTAR SALIR

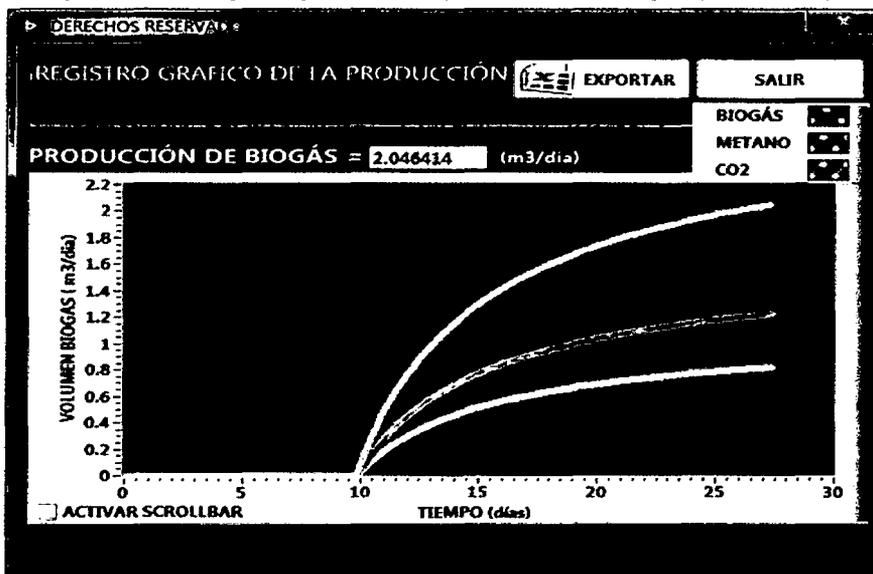
HORA DEL SISTEMA: 04:40:45 p.m. domingo, 25 de agosto de

REGISTRO HISTÓRICO AUTOINDEXADO

FECHA	HORA	DÍA	TIEMPO(días)	BIOGAS(m ³)	METANO(m ³)	CO ₂ (m ³)	CONTROL
sáb. 07 de sep de 2013	08:00:00 p.m.	Día 13	13.208	1.022	0.613	0.409	AUTOMÁTICO
sáb. 07 de sep de 2013	09:00:00 p.m.	Día 13	13.250	1.030	0.618	0.412	AUTOMÁTICO
sáb. 07 de sep de 2013	10:00:00 p.m.	Día 13	13.292	1.037	0.622	0.415	AUTOMÁTICO
sáb. 07 de sep de 2013	11:00:00 p.m.	Día 13	13.333	1.045	0.627	0.418	AUTOMÁTICO
dom. 08 de sep de 2013	12:00:00 a.m.	Día 13	13.375	1.052	0.631	0.421	AUTOMÁTICO
dom. 08 de sep de 2013	01:00:00 a.m.	Día 13	13.417	1.060	0.636	0.424	AUTOMÁTICO
dom. 08 de sep de 2013	02:00:00 a.m.	Día 13	13.458	1.067	0.640	0.427	AUTOMÁTICO
dom. 08 de sep de 2013	03:00:00 a.m.	Día 13	13.500	1.074	0.644	0.430	AUTOMÁTICO
dom. 08 de sep de 2013	04:00:00 a.m.	Día 13	13.542	1.081	0.649	0.432	AUTOMÁTICO
dom. 08 de sep de 2013	05:00:00 a.m.	Día 13	13.583	1.088	0.653	0.435	AUTOMÁTICO

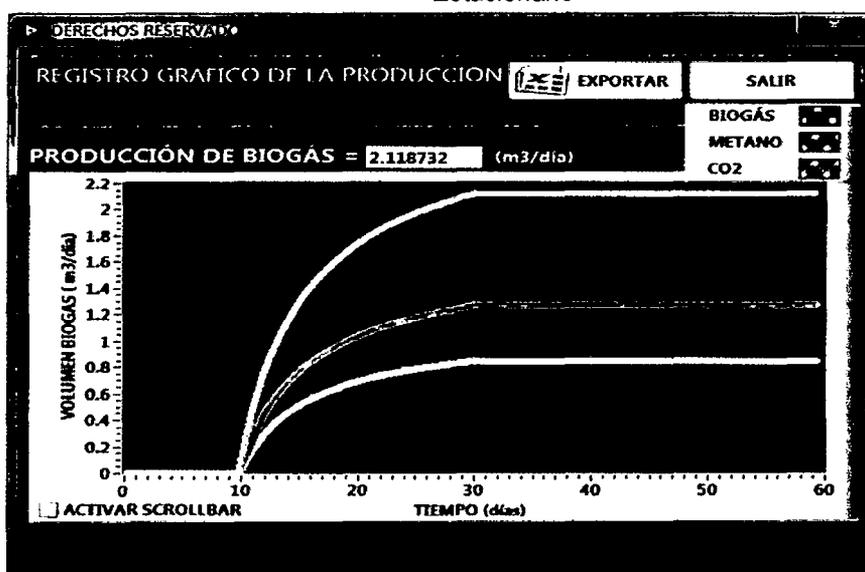
Fuente y elaboración: PROPIA DE LOS AUTORES

Figura 4.20. Registro gráfico de la producción de biogás (simulación)



Como se puede apreciar tanto en la gráfica como en la tabla a partir del DECIMO DÍA es solo cuando se detecta la producción de biogás, y esta se irá incrementando hasta estabilizarse aproximadamente en el día 30, a partir del cual si no se modifican las condiciones de operación y la tasa de alimentación la producción diaria se hará constante, este comportamiento se puede ver mejor en la gráfica de evolución del proceso. Mostrado en la siguiente imagen:

Figura 4.21. Registro Gráfico de la producción de biogás al alcanzar el Estado Estacionario



Fuente y elaboración: PROPIA DE LOS AUTORES

El biodigestor incrementa en nivel de carga de la materia prima (biomasa) al activar la BOMBA DE ALIMENTACIÓN y se mantiene el nivel de carga a un 75% al activar las válvulas de salida de BIOL y BIOSOL, este trabajo se realiza diariamente en la hora especificada (Configuración Inicial) por lo que al estar controlado por el software (Modo Automático) las condiciones de operación no varían y el sistema es totalmente autónomo.

4.2. Discusión de Resultados

4.2.1. Validación del modelo matemático empleado para la simulación

Para la validación del modelo requerimos datos experimentales con los que se puedan comparar los datos simulados por el software, para este propósito tomamos como referencia los datos medidos experimentalmente del biodigestor instalado en Apata-Concepción-Junín estos datos fueron extraídos de la tesis **“INSTALACIÓN DE UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN EL COMPLEJO AGROPECUARIO DEL DISTRITO DE APATA-CONCEPCIÓN-JUNÍN”**. UNSCH, **Tesis del 2011**, de la Ingeniera Fabiola Lahura Romero, cuya copia fiel se presenta en el anexo 01 de la página 126, los parámetros de operación y la producción promedio obtenida diariamente se resumen en la tabla siguiente:

Tabla 4.2. Parámetros operación y producción de biogás en el biodigestor del distrito de Apata-Concepción-Junín

Datos experimentales sin control automático	Valor
Temperatura de operación en el interior del biodigestor	<i>variable</i>
Cantidad de Estiércol alimentado al biodigestor	$E_{experimental} = 50 \frac{Kg}{día}$
Cantidad de agua alimentada al biodigestor	$W_{experimental} = 50 \frac{Kg}{día}$
Producción Promedio mensual alcanzada	$V_{BIOGÁS} = 0.436 \frac{m^3}{día}$

Fuente: (Lahura, 2011)

4.2.1.1. La producción de biogás simulada vs experimental

Si utilizamos los mismos datos de alimentación para la simulación con el modelo matemático de Chen, y las temperaturas con tiempos registrados experimentalmente **SIN CONTROL AUTOMÁTICO**, obtenemos los resultados mostrados a continuación:

Tabla 4.3. Datos alimentados para el cálculo de la producción con el modelo matemático de Chen

PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR	UNIDADES
Alimentación diaria de Estiércol:	E	50	Kg/día
Cantidad promedio de Estiércol:	e	86	Kg/1000Kg Animal
Contenido promedio de solidos volátiles:	sv	10	Kg de SV/Kg de Animal
Potencial de producción de metano:	PCH4	0.2	m3 CH4/Kg de SV
PESO TOTAL DE ANIMAL REQUERIDO:	WA	581.39534	Kg de Animal/día
SOLIDOS VOLATILES TOTALES:	SV	5.8139534	Kg de SV/día

Fuente y elaboración: PROPIA DE LOS AUTORES

Tabla 4.4. Fórmulas empleadas en el modelo matemático de Chen

$U_0 = 0.013 \times T - 0.129$	Uo	en tabla
$K_0 = 0.6 + 0.0006e^{(0.1185 \times SV)}$	Ko	0.601194978
$V_{BIOGAS} = P_{CH4} \times SV \times \left(1 - \frac{K_0}{U_0 \cdot TR^{0.7} - 1 + K_0}\right)$	VBIOGAS	en tabla

Tabla 4.5. Resultados de la simulación a las condiciones de operación (temperatura y tiempo de retención) experimentales y SIN SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO

VARIABLES		PARÁMETROS DE OPERACIÓN			Sin control automático		
t (días)	T (°C)	PCH4	SV	Ko	Uo	Simulación	Experimental
1	23.58	0.2	5.81395349	0.60119498	0.17754	0	0
2	23.4	0.2	5.81395349	0.60119498	0.1752	0	0.0287
3	23.5	0.2	5.81395349	0.60119498	0.1765	0	0.0676
4	24.89	0.2	5.81395349	0.60119498	0.19457	0	0.0742
5	23.5	0.2	5.81395349	0.60119498	0.1765	0	0.1112
6	24.5	0.2	5.81395349	0.60119498	0.1895	0	0.119
7	25.89	0.2	5.81395349	0.60119498	0.20757	0	0.1351
8	25.89	0.2	5.81395349	0.60119498	0.20757	0	0.1453
9	25.7	0.2	5.81395349	0.60119498	0.2051	0	0.1346
10	26.58	0.2	5.81395349	0.60119498	0.21654	0.144438561	0.1603
11	25.8	0.2	5.81395349	0.60119498	0.2064	0.174037111	0.1674

42

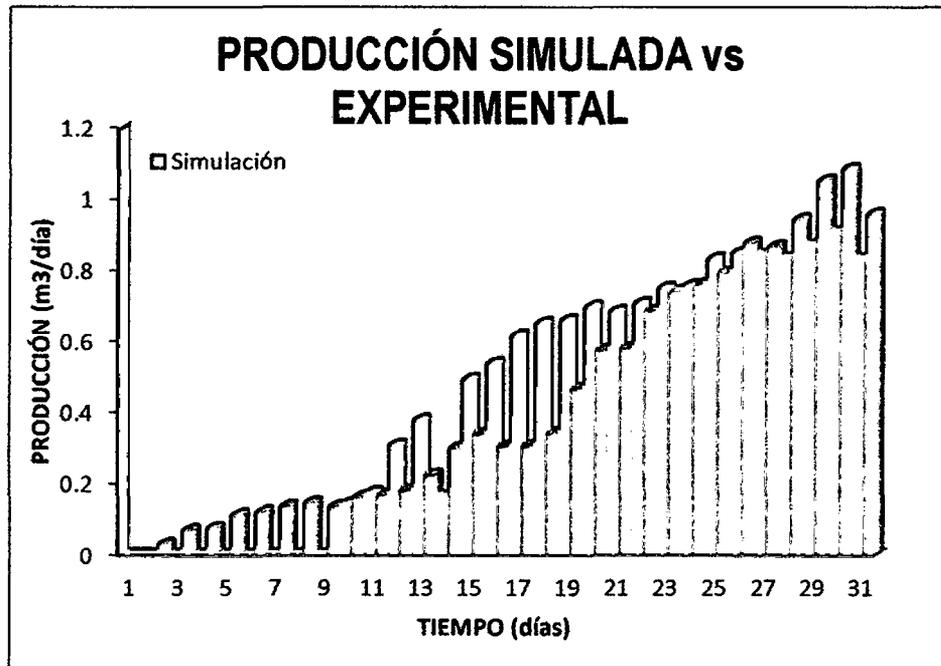
12	26.35	0.2	5.81395349	0.60119498	0.21355	0.307326558	0.18
13	26.39	0.2	5.81395349	0.60119498	0.21407	0.377663202	0.2219
14	23.25	0.2	5.81395349	0.60119498	0.17325	0.16428037	0.3002
15	26.58	0.2	5.81395349	0.60119498	0.21654	0.492324209	0.3379
16	26.68	0.2	5.81395349	0.60119498	0.21784	0.537689302	0.3044
17	27.68	0.2	5.81395349	0.60119498	0.23084	0.616028148	0.3056
18	27.89	0.2	5.81395349	0.60119498	0.23357	0.651656231	0.3415
19	27.45	0.2	5.81395349	0.60119498	0.22785	0.66018513	0.4664
20	27.89	0.2	5.81395349	0.60119498	0.23357	0.69764045	0.5741
21	26.9	0.2	5.81395349	0.60119498	0.2207	0.684151	0.5801
22	27.01	0.2	5.81395349	0.60119498	0.22213	0.707229652	0.6859
23	27.85	0.2	5.81395349	0.60119498	0.23305	0.750037748	0.7427
24	27.55	0.2	5.81395349	0.60119498	0.22915	0.756561869	0.7613
25	30.2	0.2	5.81395349	0.60119498	0.2636	0.831513886	0.7941
26	30.58	0.2	5.81395349	0.60119498	0.26854	0.849080937	0.8761
27	29.85	0.2	5.81395349	0.60119498	0.25905	0.845521858	0.8671
28	28.8	0.2	5.81395349	0.60119498	0.2454	0.834564605	0.9424
29	30.28	0.2	5.81395349	0.60119498	0.26464	0.871014132	1.0507
30	32.26	0.2	5.81395349	0.60119498	0.29038	0.907783849	1.083
31	27.4	0.2	5.81395349	0.60119498	0.2272	0.832291084	0.958
					PROMEDIO:	0.441710319	0.436025806

Fuente de datos experimentales: (Lahura, 2011)

Elaboración: PROPIA DE LOS AUTORES

Si graficamos comparativamente los resultados obtenidos en la tabla 4.4, se puede apreciar que los resultados obtenidos con el modelo de Chen a las mismas condiciones no controladas (SIN CONTROL AUTOMÁTICO) son próximos a los resultados experimentales, de donde gráficamente se concluye que **“EL MODELO DE CHEN USADO PARA LA SIMULACION PREDICE CORRECTAMENTE EL PRODUCCIÓN DE BIOGÁS”**.

Figura 4.22. Resultados de producción: simulada con el modelo de Chen vs experimental del biodigestor de Apata-Concepción-Junín (SIN CONTROL AUTOMÁTICO)



Fuente de datos experimentales: (Lahura, 2011)

Elaboración: PROPIA DE LOS AUTORES

También se puede hacer un análisis de Error y comparar el promedio mensual de producción de biogás, para ello tomamos en consideración los datos del promedio mensual de la tabla 3.4 para la producción experimental y simulada:

Tabla 4.6. Producción promedio mensual simulada y experimental

	SIMULACION	EXPERIMENTAL
PROMEDIO MENSUAL:	0.441710319	0.436025806

Fuente de datos experimentales: (Lahura, 2011)

Elaboración: PROPIA DE LOS AUTORES

$$\%Error = \left(\frac{P_{simulada} - P_{experimental}}{P_{simulada}} \right) \times 100\% = \left(\frac{0.4417 - 0.4360}{0.4417} \right) \times 100\%$$

$$\%Error = 1.29\%$$

Con este resultado obtenido se **“VALIDAN LOS DATOS OBTENIDOS POR EL SIMULADOR”**

4.2.2. Evaluación de la producción No Optimizada (Experimental) vs Optimizada (Simulada con control automático)

Para evaluar la producción de biogás con el sistema de control automático implementado, es necesario simular la producción con parámetros de operación no optimizados y optimizados, estos datos se calcularon el capítulo III, y se muestran en las tablas siguientes:

Tabla 4.7. Parámetros operación no optimizados empleados en la producción.

Parámetros de operación no optimizados (Sin Control)	Valor
Temperatura de operación en el interior del biodigestor	<i>variable</i>
Tiempo de retención hidráulico	<i>variable</i>
Cantidad de Estiércol alimentado al biodigestor	$E_{experimental} = 50 \frac{Kg}{día}$
Producción Promedio mensual obtenida	$V_{BIOGÁS} = 0.436 \frac{m^3}{día}$

Fuente: (Lahura, 2011)

Tabla 4.8. Parámetros operación optimizados empleados en la producción.

Parámetros de operación optimizados (Con control)	Valor
Temperatura óptima en el interior del biodigestor	$T_{optima} = 30^{\circ}C$
Tiempo de retención hidráulico óptimo	$TR_{optimo} = 30días$
Cantidad de Estiércol alimentado al biodigestor	$E_{optimo} = 125 \frac{Kg}{día}$
Producción Promedio mensual obtenida	$V_{BIOGÁS} = 0.436 \frac{m^3}{día}$

Fuente y elaboración: PROPIA DE LOS AUTORES

Ingresando los datos de la tabla 4.7 a la ventana de configuración inicial del software (figura 4.23) podemos obtener una base de datos simulados de la producción de biogás, los cuales fueron procesados en el software estadístico SPSS 20.0 para obtener un valor promedio por cada transcurrido, los resultados se muestran en la tabla 4.8 (Producción con control optimizado):

Figura 4.23. Datos de la tabla 4.7 ingresados a la ventana de configuración inicial del software BIOSIM 1.2



Fuente y elaboración: PROPIA DE LOS AUTORES

Figura 4.24. Resultados de la simulación de producción a condiciones óptimas de la tabla 4.7 (SOFTWARE BIOSIM 1.2)

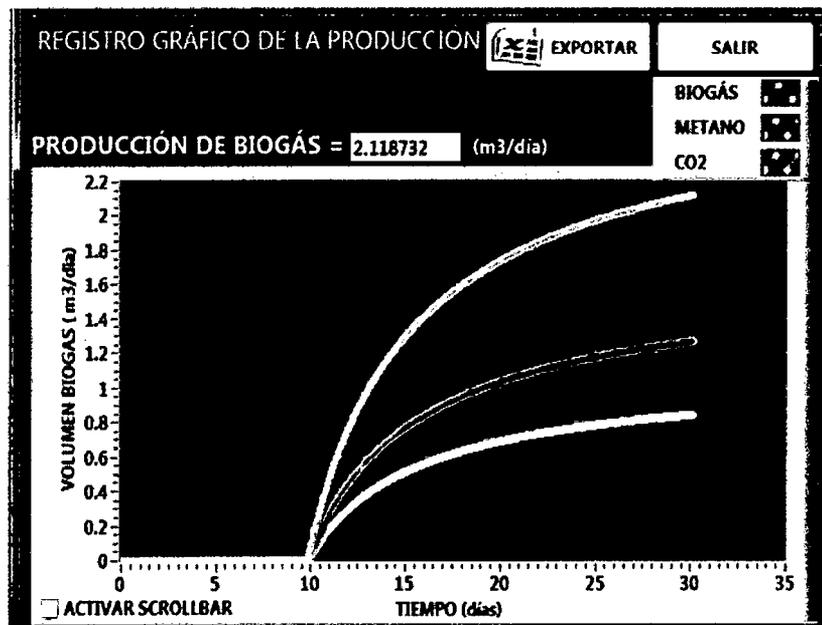


Tabla 4.9. Resultados de la producción experimental sin control vs producción optimizada con control

TR	Temperatura	Sin control	Temperatura	Con control
t (días)	T (°C)	Experimental	T (°C)	Optimizado
1	23.58	0	30.00	0.0000
2	23.4	0.0287	30.00	0.0000
3	23.5	0.0676	30.00	0.0000
4	24.89	0.0742	30.00	0.0000
5	23.5	0.1112	30.00	0.0000
6	24.5	0.119	30.00	0.0000
7	25.89	0.1351	30.00	0.0000
8	25.89	0.1453	30.00	0.0000
9	25.7	0.1346	30.00	.0067
10	26.58	0.1603	30.00	.2867
11	25.8	0.1674	30.00	.6222
12	26.35	0.18	30.00	.8732
13	26.39	0.2219	30.00	1.0689
14	23.25	0.3002	30.00	1.2259
15	26.58	0.3379	30.00	1.3550
16	26.68	0.3044	30.00	1.4632
17	27.68	0.3056	30.00	1.5555
18	27.89	0.3415	30.00	1.6350
19	27.45	0.4664	30.00	1.7044
20	27.89	0.5741	30.00	1.7657
21	26.9	0.5801	30.00	1.8200
22	27.01	0.6859	30.00	1.8686
23	27.85	0.7427	30.00	1.9124
24	27.55	0.7613	30.00	1.9522
25	30.2	0.7941	30.00	1.9883
26	30.58	0.8761	30.00	2.0214
27	29.85	0.8671	30.00	2.0518
28	28.8	0.9424	30.00	2.0799
29	30.28	1.0507	30.00	2.1060
30	32.26	1.083	30.00	2.1190
31	27.4	0.958	30.00	2.1190
	PROMEDIO:	0.43602580	PROMEDIO:	1.14841397

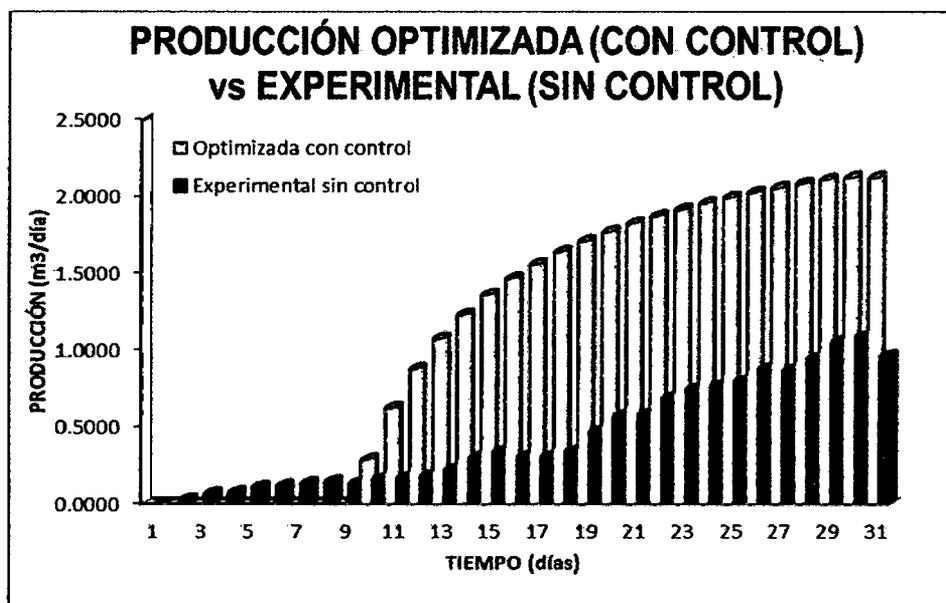
Fuente de datos experimentales: (Laura, 2011)

Fuente de datos simulados: Propia de los Autores (Software BIOSIM 1.2)

Si graficamos comparativamente los resultados obtenidos en la tabla 4.8, podemos ver claramente que los resultados de la **producción simulada CON CONTROL AUTOMÁTICO** (obtenidos a partir del simulador BIOSIM 1.2) son **sustancialmente**

mayores a la producción experimental SIN CONTROL AUTOMÁTICO (obtenidos del biodigestor real de Apata-Concepción-Junín).

Figura 4.25. Resultados de producción optimizada (con control) vs experimental del biodigestor de Apata-Concepción-Junín (sin control)



Fuente de datos experimentales: (Lahura, 2011)

Fuente de datos simulados: Propia de los Autores (Software BIOSIM 1.2)

Al cuantificar ambas producciones es posible determinar el porcentaje de incremento de la producción debido a las condiciones óptimas de operación y el sistema de control automatizado mediante software, obtenida mediante el software BIOSIM 1.2.

Tabla 4.10. Producción promedio mensual experimental (Sin control) vs simulada (con control)

	Experimental (Sin control)	Optimizada (Con control)
PROMEDIO MENSUAL:	0.43602580	1.14841397

Fuente de datos experimentales: (Lahura, 2011)

Fuente de datos simulados: Propia de los Autores (Software BIOSIM 1.2)

De donde, el porcentaje de incremento puede ser calculado mediante:

$$\%Incremento = \left(\frac{P_{optimizada} - P_{experimental}}{P_{experimental}} \right) \times 100\%$$

$$\%Incremento = \left(\frac{1.1484 - 0.4360}{0.4360} \right) \times 100\% = 163.40\%$$

Los resultados nos indican un incremento en la producción que representa un 163.40% de incremento con base en la producción experimental obtenida de $0.4360 \frac{m^3}{dia}$ del biodigestor de Apata-Concepción-Junín, esto debido a que las nuevas condiciones de operación encontradas son más óptimas comparadas con las registradas experimentalmente y gracias al sistema de control estas condiciones óptimas pueden ser mantenidas durante todo el proceso mejorando así la producción del biodigestor.

4.3. Prueba de hipótesis estadística.

La prueba de hipótesis que se realizó fue del tipo T-Student, para comparar las medias de la producción obtenida (Producción promedio mensual de biogás), lo cual se hizo por 2 métodos manualmente (con el uso de tablas estadísticas) y mediante el uso de software estadístico SPSS 20.0.

En primer lugar tenemos que plantear nuestro sistema de hipótesis, para ello tomamos nuestra hipótesis general como la hipótesis alternativa, ya que según diversos autores **“LA HIPÓTESIS ALTERNATIVA ES LA HIPÓTESIS QUE EL INVESTIGADOR DESEA PROBAR”**, por lo tanto nuestro sistema de hipótesis con base en la hipótesis general del inciso 2.3.1 se presenta como sigue:

4.3.1. Hipótesis Nula (H_0)

H_0 : El sistema de control automático con software no optimiza el promedio mensual de producción de biogás en un porcentaje mayor al 20% en el biodigestor simulado.

4.3.2. Hipótesis Alternativa (H_1)

H_1 : El sistema de control automático con software optimiza el promedio mensual de producción de biogás en un porcentaje mayor al 20% en el biodigestor simulado.

4.3.3. Sistema de hipótesis

Con lo cual nuestro *sistema de hipótesis* se representa como:

Hipótesis Nula : $\mu < \mu_0$

35

Hipótesis Alternativa : $\mu \geq \mu_0$

Dónde:

μ = Producción promedio mensual de biogás simulado con sistema de control automático (m³/día).

μ_0 = Producción Objetivo promedio mensual de biogás. (Valor a contrastar).

Es importante resaltar que el **VOLUMEN PROMEDIO DE BIOGÁS OBJETIVO** es el **VOLUMEN PRODUCIDO REAL CON UN INCREMENTO DEL 20%** y se define:

$$\mu_0 = (\mu_{experimental}) \times (120/100) \quad (4.1)$$

Para el cálculo de la producción promedio mensual ingresamos directamente al software SPSS 20 la producción experimental del biodigestor real de Apata-Concepción-Junín (Anexo 01) y la producción simulada generada por el software BIOSIM 1.2 lo que se ve en las figuras siguientes:

Figura 4.26. Configuración de variables en el software SPSS 20

	Nombre	Tipo	Anchura	Decimales	Etiqueta	Valores	Perdidos	Column
1	Dia_Sim	Númerico	7	0	Dia Sim.	Ninguna	Ninguna	7
2	Producc_Sim	Númerico	8	4	Producción Simulada (m3/día)	Ninguna	Ninguna	8
3	Dia_Exp	Númerico	7	0	Dia Exp.	Ninguna	Ninguna	8
4	Producc_Exp	Númerico	8	4	Producción Experimental (m3/día)	Ninguna	Ninguna	9
5	Producc_Obj	Númerico	8	4	Producción Objetivo (m3/día)	Ninguna	Ninguna	9
6								
7								
8								
9								
10								

Fuente y elaboración: PROPIA DE LOS AUTORES

54

Figura 4.27. Ingreso de producción experimental y simulada al software SPSS 20

	Dia Sim	Producc Sim	Dia Exp	Producc Exp	Producc Obj	var	var	var	var
1	1	.0000	1	.0155	.0186				
2	1	.0000	2	.0287	.0344				
3	1	.0000	3	.0676	.0811				
4	1	.0000	4	.0742	.0890				
5	1	.0000	5	.1112	.1334				
6	1	.0000	6	.1190	.1428				
7	1	.0000	7	.1351	.1621				
8	1	.0000	8	.1453	.1744				
9	1	.0000	9	.1346	.1615				
10	1	.0000	10	.1603	.1924				
11	1	.0000	11	.1674	.2009				
12	1	.0000	12	.1800	.2160				
13	1	.0000	13	.2219	.2663				

Fuente y elaboración: PROPIA DE LOS AUTORES

Donde:

Dia_Sim : Día simulado por el software BIOSIM 1.2

Produccion_Sim : Producción simulada por el software BIOSIM 1.2 con el sistema de control automático.

Dia_Exp : Día experimental de los datos del biodigestor de Apata-Concepción-Junin (Anexo 01)

Producc_Exp : Producción experimental del biodigestor de Apata-Concepción-Junin (Anexo 01)

Producc_Obj : Producción Objetivo el cual es la producción experimental con un incremento del 20% (datos calculados con la fórmula (4.1)).

33

Figura 4.28. Tabla estadística de la producción Experimental y Simulada (generado por el software SPSS 20)

	Producción Experimental (m3/día)				Producción Simulada (m3/día)			
	Media	Máximo	Mínimo	N total	Media	Máximo	Mínimo	N total
Día Exp. 1	.0155	.0155	.0155	1	.0000	.0000	.0000	24
2	.0287	.0287	.0287	1	.0000	.0000	.0000	24
3	.0676	.0676	.0676	1	.0000	.0000	.0000	24
4	.0742	.0742	.0742	1	.0000	.0000	.0000	24
5	.1112	.1112	.1112	1	.0000	.0000	.0000	24
6	.1190	.1190	.1190	1	.0000	.0000	.0000	24
7	.1351	.1351	.1351	1	.0000	.0000	.0000	24
8	.1453	.1453	.1453	1	.0000	.0000	.0000	24
9	.1346	.1346	.1346	1	.0067	.0700	.0000	24
10	.1603	.1603	.1603	1	.2867	.4650	.0890	24
11	.1674	.1674	.1674	1	.6222	.7540	.4790	24
12	.1800	.1800	.1800	1	.8732	.9750	.7640	24
13	.2219	.2219	.2219	1	1.0689	1.1500	.9830	24
14	.3002	.3002	.3002	1	1.2259	1.2920	1.1560	24
15	.3379	.3379	.3379	1	1.3550	1.4100	1.2970	24
16	.3044	.3044	.3044	1	1.4632	1.5100	1.4140	24
17	.3056	.3056	.3056	1	1.5555	1.5960	1.5140	24
18	.3415	.3415	.3415	1	1.6350	1.6700	1.5990	24
19	.4664	.4664	.4664	1	1.7044	1.7350	1.6730	24
20	.5741	.5741	.5741	1	1.7657	1.7930	1.7380	24
21	.5801	.5801	.5801	1	1.8200	1.8440	1.7950	24
22	.6859	.6859	.6859	1	1.8686	1.8900	1.8460	24
23	.7427	.7427	.7427	1	1.9124	1.9320	1.8920	24
24	.7613	.7613	.7613	1	1.9522	1.9700	1.9340	24
25	.7941	.7941	.7941	1	1.9883	2.0050	1.9720	24
26	.8761	.8761	.8761	1	2.0214	2.0360	2.0060	24
27	.8671	.8671	.8671	1	2.0518	2.0660	2.0380	24
28	.9424	.9424	.9424	1	2.0799	2.0930	2.0670	24
29	1.0507	1.0507	1.0507	1	2.1060	2.1180	2.0940	24
30	1.0830	1.0830	1.0830	1	2.1190	2.1190	2.1190	24
31	.9580	.9580	.9580	1	2.1190	2.1190	2.1190	24
Promedio	4365	1.0830	.0155	31	1.1484	2.1190	.0000	744

Al procesar los datos obtenemos un reporte completo que se presenta en el anexo 07, las gráficas más importantes se muestran en las figuras siguientes:

32

Figura 4.1. Tabla estadística de la producción Objetivo (generado por el software SPSS 20)

		Producción Objetivo (m3/día)			
		Media	Máximo	Mínimo	N total
Dia Exp.	1	.0186	.0186	.0186	1
	2	.0344	.0344	.0344	1
	3	.0811	.0811	.0811	1
	4	.0890	.0890	.0890	1
	5	.1334	.1334	.1334	1
	6	.1428	.1428	.1428	1
	7	.1621	.1621	.1621	1
	8	.1744	.1744	.1744	1
	9	.1615	.1615	.1615	1
	10	.1924	.1924	.1924	1
	11	.2009	.2009	.2009	1
	12	.2160	.2160	.2160	1
	13	.2663	.2663	.2663	1
	14	.3602	.3602	.3602	1
	15	.4055	.4055	.4055	1
	16	.3653	.3653	.3653	1
	17	.3667	.3667	.3667	1
	18	.4098	.4098	.4098	1
	19	.5597	.5597	.5597	1
	20	.6889	.6889	.6889	1
	21	.6961	.6961	.6961	1
	22	.8231	.8231	.8231	1
	23	.8912	.8912	.8912	1
	24	.9136	.9136	.9136	1
	25	.9529	.9529	.9529	1
	26	1.0513	1.0513	1.0513	1
	27	1.0405	1.0405	1.0405	1
	28	1.1309	1.1309	1.1309	1
	29	1.2608	1.2608	1.2608	1
	30	1.2996	1.2996	1.2996	1
	31	1.1496	1.1496	1.1496	1
	Promedio	.5238	1.2996	.0186	31

De los resultados se obtuvo la producción objetivo (que es el valor a contrastar) en la prueba de hipótesis,

$$\mu = 1.1484 \text{ (Producción Simulada)}$$

$$\mu_0 = 0.5238 \text{ (Producción objetivo)}$$

$$\text{Hipótesis Alternativa} : \mu \geq \mu_0$$

4.3.4. La prueba T-student con el software SPSS 20

El software SPSS 20 nos permite hacer una prueba T-student para validar nuestra hipótesis, con los datos ingresados el software, obtenemos los siguientes resultados:

3

Estadísticos para una muestra

	N	Media	Desviación típ.	Error típ. de la media
Producción Simulada (m3/día)	744	1.148414	.8502532	.0311718

Prueba para una muestra

	Valor de prueba = 0.5238					99% intervalo de confianza para la diferencia	
	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Inferior	Superior	
Producción Simulada (m3/día)	20.038	743	.000	.6246140	.544114	.705114	

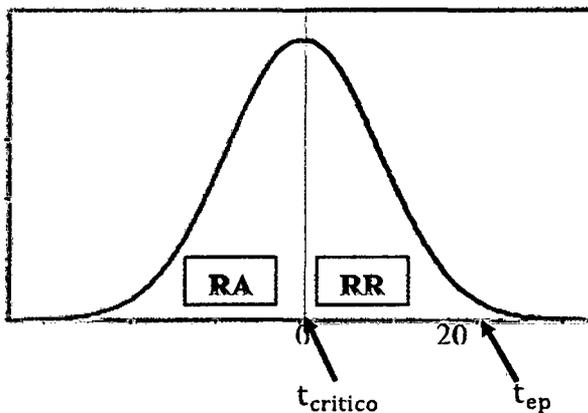
De donde observamos que el valor t del estadístico de prueba (t_{ep}), es mayor al valor crítico (t_c) ambos arrojados por el software:

$$t_{ep} = 20.038$$

$$t_c = 0$$

Entonces $t_{ep} > t_c$, por lo que **"SE RECHAZA LA HIPÓTESIS NULA Y SE ACEPTA LA HIPÓTESIS ALTERNATIVA"**

Figura 4.1. Gráfica de la prueba de hipótesis.



También podemos calcular manualmente utilizando tablas, obteniendo los mismos resultados ya que según la gráfica, el t_{ep} cae en la región de rechazo para H_0 :

- Cálculo de t-estadístico de prueba:

$$t_{ep} = \frac{\bar{x} - \mu_0}{S/\sqrt{n}}$$

$\bar{x} = 1.1484$: Media Aritmética de los datos simulados

$\mu_0 = 0.5238$: Producción objetivo

$S = 0.8502$: Desviación típica

$n = 744$: Numero de datos

$t_{ep} = 20.0386$

- Cálculo de t crítico:

Para una prueba de Hipótesis Altamente significativa (Confianza del 99%):

$1 - \alpha = 0.99$ $\alpha = 0.01$

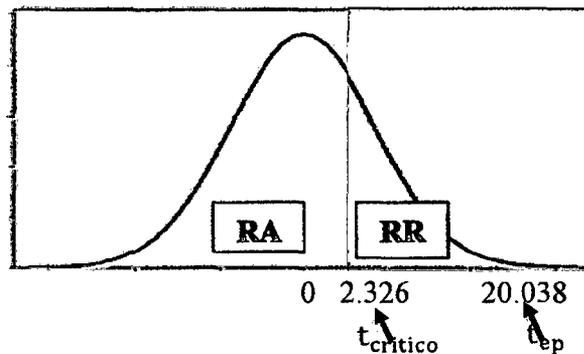
De la tabla de distribución T-Student Evaluamos: $t_{(\alpha),(n-1)}$

Grados de libertad: $(n-1) = 744 - 1 = 743$ Grados de libertad

$t_{0.01,743} = 2.326$

$t_{critico} = 2.326$

Figura 4.2. Grafica de la prueba de hipótesis.



Entonces $t_{ep} > t_c$, por lo cual **"SE RECHAZA LA HIPÓTESIS NULA Y SE ACEPTA LA HIPÓTESIS ALTERNATIVA"**.

Entonces podemos afirmar con una confianza del 99% que: **"EL SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO CON SOFTWARE OPTIMIZA EL PROMEDIO MENSUAL DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN UN PORCENTAJE MAYOR AL 20% EN EL BIODIGESTOR SIMULADO"**.

CONCLUSIONES

1. Se consiguió simular dinámicamente el proceso de producción de biogás mediante el software BIOSIM 1.2 desarrollado en LabVIEW versión 9.0, este software fue programado utilizando el modelo matemático desarrollado por Chen en su obra "Kinetic analysis of anaerobic digestion of pig manure and its design implications", dicho modelo fue implementado en el software para estimar la producción de biogás en biodigestores, esta herramienta permitió simular el proceso a distintas condiciones de operación de tiempo de retención y temperatura, luego evaluando la producción simulada a las mismas condiciones de tiempo y temperatura de datos experimentales y una razón de alimentación de estiércol de 50Kg/día, obtenemos una producción promedio mensual simulada de $0.4417\text{m}^3/\text{día}$ y una experimental de $0.4360\text{m}^3/\text{día}$ esto se muestra en la figura 4.22 y tabla 4.4.
2. Se logró identificar y controlar las variables de mayor impacto en el proceso de producción de biogás las cuales fueron la temperatura en el interior del biodigestor y el tiempo de retención hidráulico, los valores óptimos para estas variables fueron encontrados de diversas pruebas con el software BIOSIM 1.2 simulando la producción de biogás para prueba, encontrándose un valor óptimo de $T = 30^\circ\text{C}$ y $TR = 30\text{días}$, también la alimentación diaria de estiércol óptima fue estimada en $E = 125 \frac{\text{Kg}}{\text{día}}$, con un razón de dilución 1:1 es decir también alimentar $W = 125 \frac{\text{L}}{\text{día}}$, encontrándose también que a mayor tiempo de retención se requiere una menor cantidad de estiércol en la alimentación.
3. Para la validación de los resultados simulados mediante el modelo de Chen implementado en el software BIOSIM 1.2 se utilizaron como referencia los datos del biodigestor instalado en la localidad de Apata-Concepción-Junín de la tesis "Instalación de un sistema de producción de biogás en el complejo agropecuario del distrito de Apata-Concepción-Junín", UNSCH del año 2011 de la Ingeniera Fabiola Lahura Romero, cuya copia fiel se presenta en el anexo 01 de la página 126, con

estos datos experimentales y los resultados de la simulación se pudo contrastar resultados en donde se encontró un porcentaje de error de 1.29% para la producción mensual estimada, esto se muestra en la tabla 4.4 y la figura 4.22.

4. La relación de producción entre el biodigestor simulado con control automático y a condiciones óptimas (1.1484Kg/día) respecto a la producción del biodigestor real instalado en Apata-Concepción-Junín (0.4360Kg/día) sin control y sin optimizar es de 2.6339, lo que muestra claramente un incremento sustancial en la producción esto se justifica en gran parte en el incremento de la tasa de alimentación diaria de estiércol de 50Kg/día a 125Kg/día, y manteniendo temperatura y tiempo de retención constantes en valores óptimos de 30°C y 30 días.
5. De los resultados obtenidos y validados del simulador BIOSIM 1.2 operando a condiciones optimizadas, se ha encontrado un porcentaje de incremento de 163% respecto a la producción del biodigestor real de referencia con lo cual concluye en que el sistema propuesto mejora sustancialmente la producción de biogás en biodigestores, también que esta tecnología puede ser implementada en distintos lugares debido a que el simulador predice la producción a distintas temperaturas y tiempos de retención.

RECOMENDACIONES

1. Para la instalación del software BIOSIM 1.2 se recomienda sistema operativo Windows XP o superior de 32 bits.
2. Dentro de los requisitos de hardware se recomienda un procesador Corei Duo o superior, con una resolución de pantalla de 1024 x 800 pixeles, tarjeta de vídeo de 512 Mb o superior.
3. Para la generación de reportes por el software se recomienda tener instalado el Microsoft Office 2007 o superior.
4. Para que el software BIOSIM 1.2 pueda conectarse con un biodigestor real se requiere como interfaz la tarjeta de adquisición de datos NI-USB-6008 o 6009 de la marca National Instrument.
5. Para la medición del volumen de biogás producido por el sistema en un biodigestor real se requiere de un medidor electrónico de gas calibrado instalada directamente en la tubería de paso o un sensor de concentración de metano de 1000 a 10000ppm (partes por millón) instalado en la cámara de recepción de biogás.

BIBLIOGRAFÍA

1. Acuña, M. (2008). Dimensionamiento de una planta de Biogás. Machala-México: Instituto Nacional de Energía.
2. American Society of Agricultural Engineers. (1993). ASAE Standard D384. USA: American Society of Agricultural Engineers.
3. Chen, Y. (1983). Kinetic analysis of anaerobic digestion of pig manure and its design implications. Canada: Homas M.V.
4. CIDELSA SAC. (2012). Manual de instalación de un biodigestor tubular de geomembrana en zonas alto andinas. Lima: CIDELSA.
5. EPA U.S. (2009). Manual for developing biogas systems at commercial farms in the United States. New Jersey: EPA.
6. García, M. (2009). Automatización de procesos industriales. España: Alfa y Omega.
7. Gene, f. (1994). Feedback control of dynamic systems. Massachusets: Addison-Wesley.
8. Julián, E., & Valero, J. (2012). Automatización de procesos industriales mediante LabVIEW. Huancayo-Perú: Premier ISBN 978-612-00-0870-6.
9. Kléber, C., & Manitio, G. (2010). Diseño y construcción de un biodigestor para pequeñas y medianas granjas. Quito-Ecuador: Escuela Politécnica Nacional-Facultad de Ingeniería Mecánica.
10. Kuo, B. (2005). Automatic control systems. New Jersey: Prentice Hall.
11. Lahura, F. (2011). Instalación de un sistema de producción de biogás en el complejo agropecuario del distrito de Apata-Junín. Ayacucho: UNSCH.
12. Lajara, V., & Pelegri, S. (2009). Labview entorno gráfico de programación. Barcelona: Marcombo.
13. Marchaim, U. (1992). Biogas processes for sustainable development. Australia: FAO.
14. Ministerio de Agricultura. (2008). Plan Estratégico Regional del Sector Agrario de Hunacavelica 2009-2015. Hunacavelica.
15. National Instruments Corporation. (2010). LabVIEW user manual[®] Edition 2003. National Instruments Corporation. Austin-Texas: NI.
16. Ogata, K. (1998). Ingeniería de control moderna. México: Prentice Hall.

17. Sánchez, S. (2008). Energías renovables; conceptos y aplicaciones. Quito: Fundación Natura.
18. Shinsky, G. (1996). Sistemas de control de procesos, aplicación, diseño y sintonización. México: Mc Graw Hill.
19. Smith, C., & Corripio, A. (1991). Control Automático de Procesos, teoría y práctica. México: Limusa.
20. SNV Latin America. (2012). Estudio de factibilidad para un programa nacional de biodigestores en Perú. Lima: SNV.
21. Tamayo, M. (1995). Metodología Formal de la investigación científica. Mexico D.F.: Limusa S.A.
22. Wheatley, A. (2010). Anaerobic digestion a waste treatment technology. Barking-Canadá: Elsevier Science Publishers Ltd.

ANEXOS

ANEXO 01

Datos de producción de biogás Biodigestor Real Apata-Concepción-Huancayo

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y METALURGIA

Cuadro N°5.2
Datos de producción de biogás mes 2 (diciembre del 2010)

Días	T °C	h _{ie} (cm)	h _{re} (cm)	Presión (cm)	Vsist (m ³)	VCN (m ³)	pH	observaciones
1	23,58	3,2	5,8	1,7	0,0155	0,0099		
2	23,4	2,7	7,5	1,6	0,0287	0,0183		
3	23,5	2,2	13,5	1,8	0,0676	0,0431		
4	24,89	2,4	14,8	1,5	0,0742	0,0471		
5	23,5	2,2	20,8	1,8	0,1112	0,0710		
6	24,5	2,2	22,1	1,8	0,1190	0,0757		
7	25,89	3,2	25,8	1,8	0,1351	0,0856		
8	25,89	2,5	26,8	1,9	0,1453	0,0920	7,5	
9	25,7	2,2	24,7	1,8	0,1346	0,0852		
10	26,58	2,1	28,9	1,8	0,1603	0,1012		
11	25,8	2,5	30,5	1,7	0,1674	0,1060		
12	26,35	2,7	32,8	1,8	0,1800	0,1138		
13	26,39	3,8	40,9	1,7	0,2219	0,1402		
14	23,25	2,5	52,7	1,9	0,3002	0,1918		
15	26,58	2,2	58,7	1,9	0,3379	0,2134		
16	26,68	2,3	53,2	1,8	0,3044	0,1922		
17	27,68	2,7	53,8	1,8	0,3056	0,1923		
18	27,89	5,8	62,9	1,6	0,3415	0,2147	7,5	
19	27,45	6,7	84,7	1,8	0,4664	0,2938		
20	27,89	2,7	98,7	1,7	0,5741	0,3610		
21	26,9	5,9	102,9	1,8	0,5801	0,3660		
22	27,01	8,9	123,6	1,7	0,6859	0,4325		
23	27,85	4,1	128,3	1,8	0,7427	0,4671		
24	27,55	3,2	130,5	1,7	0,7613	0,4792		
25	30,2	2,2	135	1,8	0,7941	0,4956		
26	30,58	2,4	148,9	1,7	0,8761	0,5460		
27	29,85	2,2	147,2	1,8	0,8671	0,5417		
28	28,8	2,2	159,8	1,7	0,9424	0,5908	7,4	
29	30,28	3,2	178,9	1,8	1,0507	0,6555		
30	32,26	2,5	183,6	1,7	1,0830	0,6712		
31	27,4	8,7	168,9	1,8	0,9580	0,6034		

Fuente: Elaboración propia

Fuente y Elaboración: fabiola lahura romero. "instalación de un sistema de producción de biogás en el complejo agropecuario del distrito de apata – junín". unsch-ayacucho, tesis. 2011.

ANEXO 02

Resultados de simulación de la producción de Biogás para distintos valores del tiempo de residencia (TR) hasta una TFINAL=50°C ¹

T(°C)	V _{BIOGAS} (TR1=20días)	V _{BIOGAS} (TR2=25días)	V _{BIOGAS} (TR3=30días)	V _{BIOGAS} (TR4=35días)
15	0.673207	1.006789	1.201133	1.328362
16	0.951605	1.198795	1.346918	1.445588
17	1.129554	1.325156	1.444545	1.525001
18	1.253109	1.414622	1.514493	1.582357
19	1.343905	1.481294	1.567073	1.625724
20	1.413444	1.532898	1.608033	1.659663
21	1.46841	1.574025	1.640854	1.686949
22	1.512948	1.60757	1.667733	1.709362
23	1.54977	1.635453	1.690152	1.728101
24	1.580721	1.658997	1.709137	1.744
25	1.607101	1.679141	1.72542	1.757661
26	1.629853	1.696571	1.73954	1.769524
27	1.649677	1.711803	1.751901	1.779922
28	1.667105	1.725226	1.762812	1.789112
29	1.682546	1.737145	1.772514	1.797291
30	1.696321	1.7478	1.781199	1.804619
31	1.708687	1.757381	1.789017	1.811221
32	1.719849	1.766043	1.796092	1.8172
33	1.729974	1.773913	1.802526	1.822641
34	1.739201	1.781093	1.808401	1.827613
35	1.747645	1.787671	1.813789	1.832173
36	1.7554	1.79372	1.818746	1.836372
37	1.762548	1.799301	1.823322	1.84025
38	1.769158	1.804466	1.82756	1.843844
39	1.775287	1.80926	1.831496	1.847182
40	1.780987	1.813722	1.835162	1.850291
41	1.786302	1.817885	1.838583	1.853195
42	1.791268	1.821778	1.841784	1.855913
43	1.795919	1.825427	1.844785	1.858462
44	1.800284	1.828853	1.847604	1.860857
45	1.80439	1.832077	1.850258	1.863112
46	1.808257	1.835116	1.852761	1.865239
47	1.811907	1.837986	1.855125	1.867248
48	1.815357	1.840699	1.857361	1.86915
49	1.818623	1.84327	1.85948	1.870952
50	1.82172	1.845708	1.86149	1.872662

¹ Fuente y elaboración: PROPIA DE LOS AUTORES

21

ANEXO 03

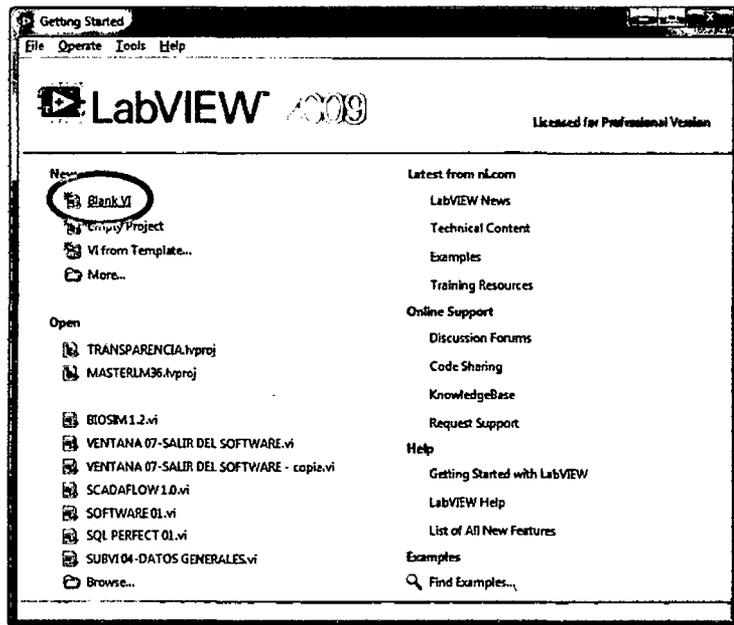
COSTO DE INSTALACIÓN DE UN BIODIGESTOR REAL

USO	DESCRIPCIÓN	UNIDADES X BD	PRECIO UNIT.	TOTAL (S/.)
INSTALACIÓN	Tubería de PVC de 1" x 5.0 m	8	14.90	119.20
	llaves de bola de 1"	2	7.90	15.80
	Codos de PVC 1"	6	2.60	15.60
	Uniones de 1" PVC	5	2.10	10.50
	Pegamento de PVC X 1/8 gal.	1	9.00	9.00
	Tee de 1" PVC	4	4.50	18.00
	Abrazaderas de dos orejas	5	3.50	17.50
	Teflón para gas	2	1.70	3.40
	Material aislante	2	8.80	17.60
	TOTAL Nuevos soles S/.			226.60
BIODIGESTOR	Tubería de PVC de 4" diam.	1	17.60	17.60
	Válvula de seguridad	1	25.80	25.80
	Llave de bola de 2" diám.	2	16.00	32.00
	Reducción PVC para desagüe 4" a 2"	1	4.00	4.00
	gasómetro en membrana PVC	1	224.90	224.90
	Kit de Reparación	1	180.00	180.00
	Biodigestor tubular de 10.0m ³	1	1146.71	1146.71
	TOTAL Nuevos soles S/.			1631.01
COBERTURA	Armadura de fierro para invernadero	Sin unid.	580.90	580.90
	Cobertura Invernadero (metro lineal)	10	45.20	452.00
	clavos x Kg	Sin unid.	1.00	8.50
	TOTAL Nuevos soles S/.			1041.40
	Mano de obra			1800.00
	Transporte de materiales			580.00
	TOTAL			5279.01

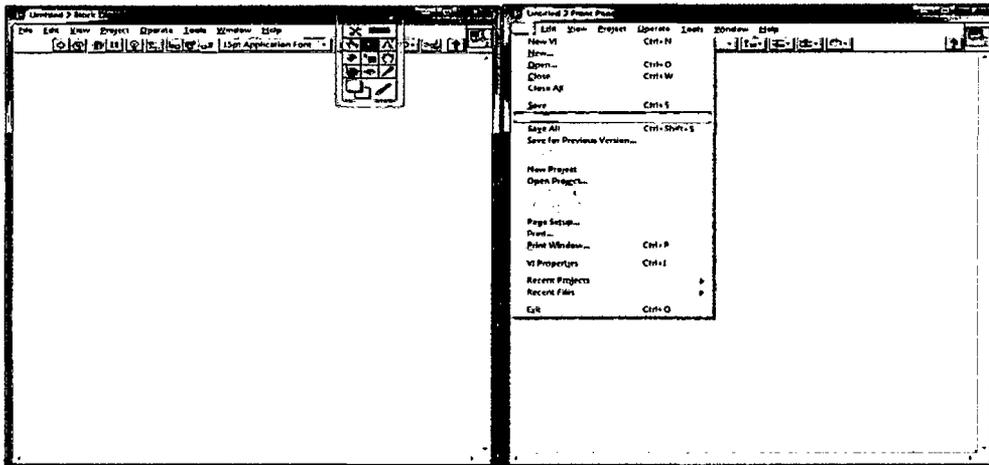
ANEXO 04

EL PROCESO DE DESARROLLO DEL SOFTWARE BIOSIM 1.2

El proceso de elaboración del software BIOSIM 1.2 como ya se describió en el capítulo IV se hizo en el entorno de programación gráfico LabVIEW versión 9.0, para lo cual se procede a describir todo el proceso de elaboración del software, empezamos creando un programa nuevo en la ventana de inicio del LabVIEW, en la opción BLANK VI:



A continuación se crea un VI nuevo (Instrumento Virtual en blanco) al cual se le denominará BIOSIM 1.2 en el menú FILE, el cual está constituido por dos ventanas: la ventana del panel frontal y la del Diagrama de bloques, lo que se muestra a continuación:



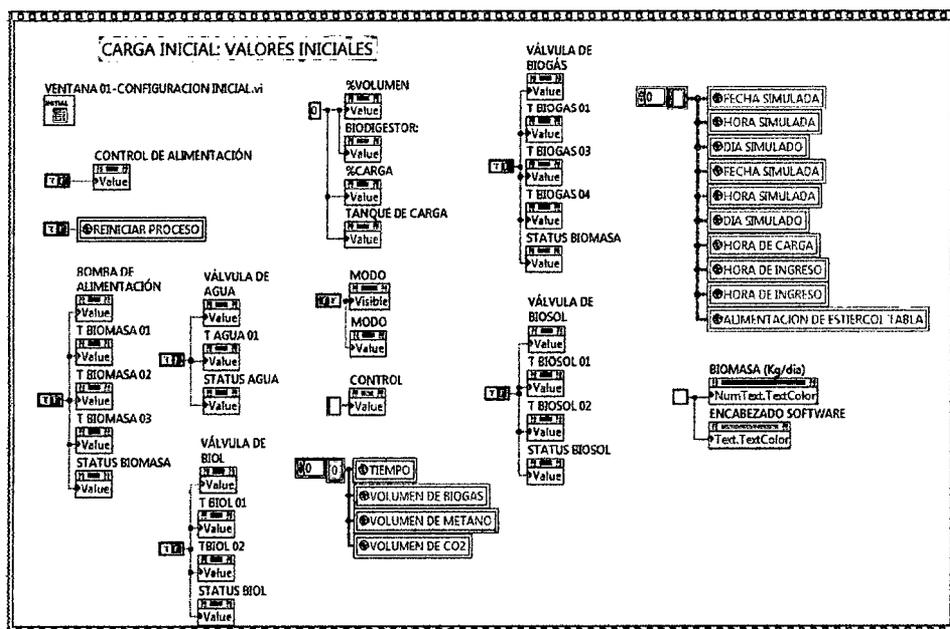
Concluido esto iniciamos con el desarrollo de las distintas etapas (bloques) de operación del software BIOSIM 1.2, lo cual se describe a continuación:

1. ETAPA DE CARGA INICIAL

Esta etapa constituye la etapa previa al proceso de producción de biogás por el biodigestor simulado y considera tanto los valores iniciales de las variables como de los parámetros de operación, esto se programó mediante una estructura tipo FLAT SEQUENCE STRUCTURE en la ventana del diagrama de bloques del programa, este tipo de estructura está constituido por 4 bloques, cada bloque constituye una subetapa de la Etapa de Carga Inicial y se ejecutan de manera secuencial es decir el bloque 2 solo se ejecuta si el bloque 1 terminó de ejecutarse.

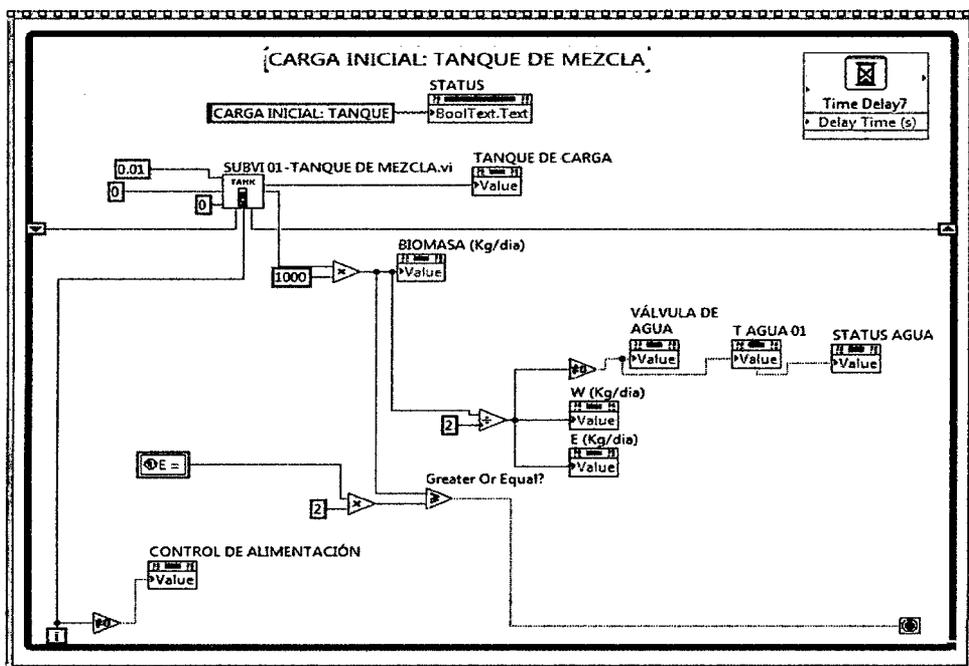
1.1. Módulo: Valores Iniciales

En este módulo se lanza la ventana de configuración inicial en la cual se asignan los valores iniciales para las distintas variables y parámetros de operación del biodigestor (carga inicial, tiempo, modo de operación, etc...), también se asignan valores a las demás variables que intervienen en la simulación, por ejemplo el estado inicial de las bombas y tuberías de las distintas corrientes involucradas, las cuales se muestran en el panel frontal de la aplicación.



1.2. Módulo: Tanque de Mezcla

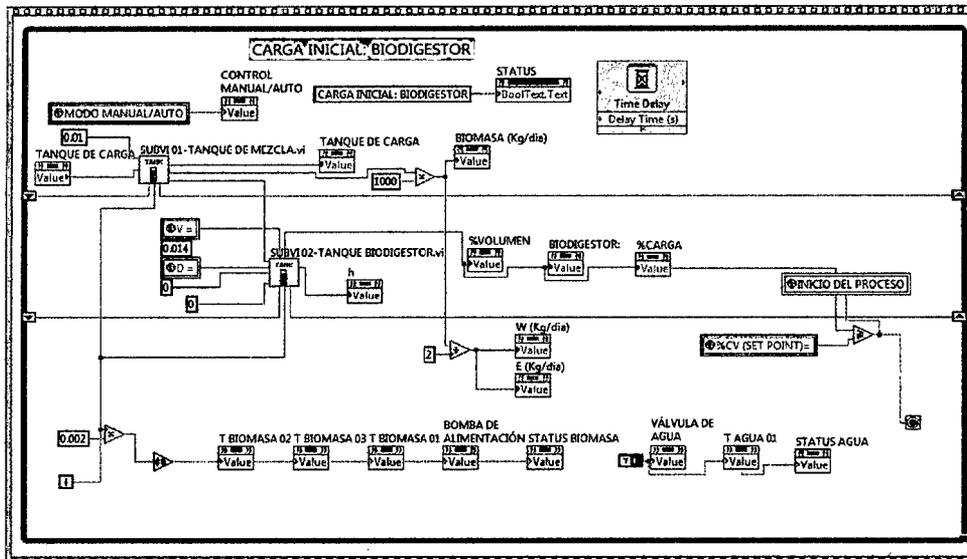
Este módulo se ejecuta dentro de un ciclo While, mediante el cual se alimenta el tanque de mezcla con el ingreso de estiércol y agua, depende de la cantidad de estiércol programada en la configuración inicial, el ciclo termina cuando el valor de la biomasa en el interior del tanque de Mezcla es igual o mayor al doble del peso de la alimentación, esto debido a la razón de alimentación 1:1 descrito en el capítulo III, es decir por cada kilogramo de estiércol se debe cargar también un kilogramo de agua, es por ello que para simplificar el peso total de la mezcla (biomasa) es igual al doble del peso de estiércol cargado.



1.3. Módulo: Biodigestor

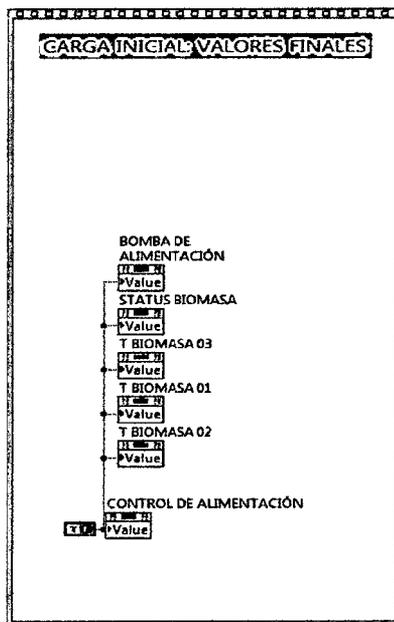
Este módulo se ejecuta dentro de un ciclo While, mediante en este módulo se ingresa toda la mezcla contenida previamente en el tanque de mezcla (estiércol y agua), esta mezcla ingresa mediante un bomba la cual se activa y permanece así hasta conseguir un 75% de carga en volumen en el interior del biodigestor, este valor fue previamente configurado como Set Point en la ventana de configuración inicial, cuando se ha alcanzado en volumen requerido, la bomba se desactiva y termina esta etapa del proceso dando lugar a la última etapa en donde se fijan los valores finales antes de iniciar la etapa siguiente.

A



El tiempo de ejecución de este ciclo While es controlado mediante un retardo de tiempo DELAY TIME, el cual figura como un icono de color celeste, también se aprecia que las tuberías y la bomba de la biomasa proveniente del tanque de carga se activan cuando hay ingreso de biomasa, las válvulas y las tuberías de alimentación de agua se encuentran cerrado (Status False).

1.4. Modulo: Valores Finales



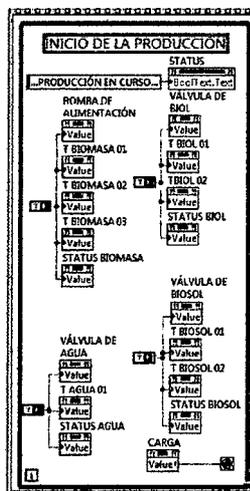
En este módulo se asignan los valores finales correspondientes a la etapa de carga inicial, estos valores son para la bomba de alimentación de biomasa y el control de alimentación de estiércol fresco al tanque de mezcla, estos controles deben de estar desactivados (Status False), para poder iniciar con el proceso de biodigestión.

2. ETAPA DE PRODUCCIÓN EN CURSO

En esta etapa el proceso de producción de biogás se encuentra en curso mediante el biodigestor simulado y considera los valores iniciales que fueron previamente ingresados en la etapa inicial, con todos los parámetros ya configurados y basado en los modelos matemáticos descritos en el capítulo III, se monitorea todo el proceso de producción, debido a que se ejecuta como una secuencia de comandos también se utilizó para esta parte una estructura tipo FLAT SEQUENCE STRUCTURE, este tipo de estructura está constituido por 6 bloques, cada bloque constituye una subetapa de la Etapa de Producción de biogás y se ejecutan de manera secuencial y repetitiva todos los días, debido a que la alimentación al sistema es continua y no puede detenerse.

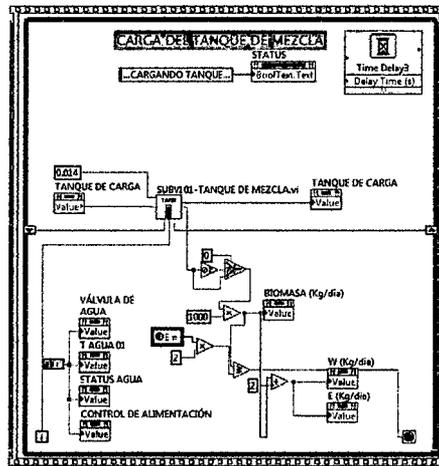
2.1. Módulo: Inicio de la Producción

Se ejecuta dentro de un ciclo WHILE, en este módulo la producción inicia cuando todas las válvulas y bombas se encuentran cerradas (False), y se espera la orden del control CARGA para terminar este bloque y pasar al siguiente para lo cual se envía TRUE al terminal LOOP CONDITION, el control carga fue programado para activarse en una determinada hora del día.



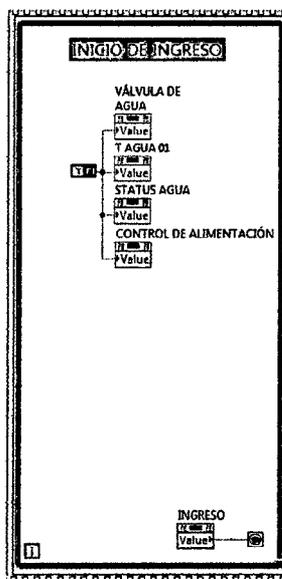
2.2. Módulo: Carga del tanque de Mezcla

Del mismo modo que el módulo anterior en este bloque se ejecuta dentro de un ciclo WHILE, el cual termina cuando se ha alcanzado la cantidad requerida para el tanque de mezcla con lo cual se envía la orden (True) al terminal LOOP CONDITION, esta cantidad optima se estimó en el capítulo III.



2.3. Módulo: Inicio de Ingreso

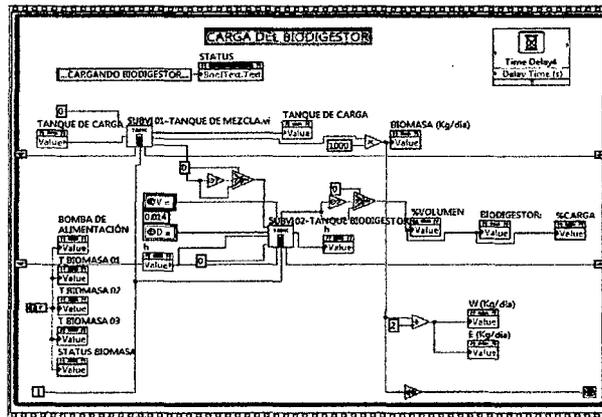
Es análogo a los otros dos módulos previos, y cierra todas la válvulas de alimentaciomn de agua, colocando los controles en False, esperando la orden del control INGRESO el cual fue programado para activarse a una determinada hora del día, diariamente, con lo cual se envía la orden (True) al terminal LOOP CONDITION.



A

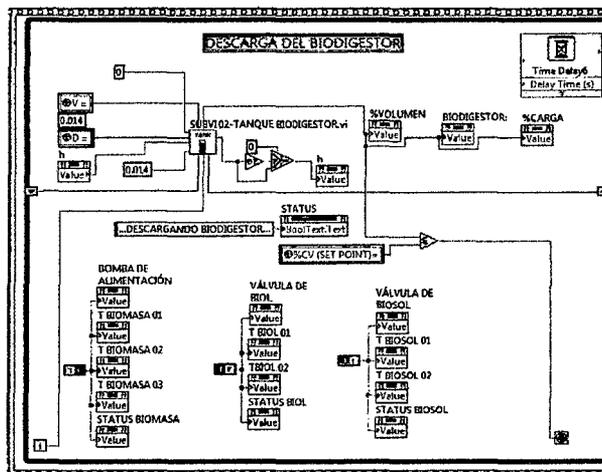
2.4. Módulo: Carga del Biodigestor

Este módulo opera análogamente a los anteriores, aquí se controla la carga que ingresa al biodigestor procedente del tanque de mezcla, esta carga es ingresada activando la bomba de alimentación, el bloque termina cuando la toda carga del tanque de mezcla se ha ingresado hacia el biodigestor (nivel cero en el tanque de mezcla), con lo cual se envía la orden (True) al terminal LOOP CONDITION para terminar este bloque.



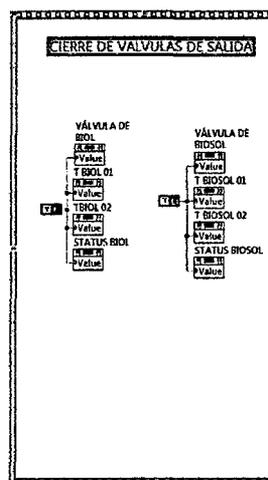
2.5. Módulo: Descarga del Biodigestor

Es análogo a los anteriores porque también trabaja dentro de un ciclo WHILE, mediante este bloque se regula el nivel de carga en el interior del biodigestor para que se mantenga en un 75% que es el valor óptimo encontrado en el capítulo III, cuando este valor se ha alcanzado se envía la orden (True) al terminal LOOP CONDITION y se da pase al siguiente bloque.



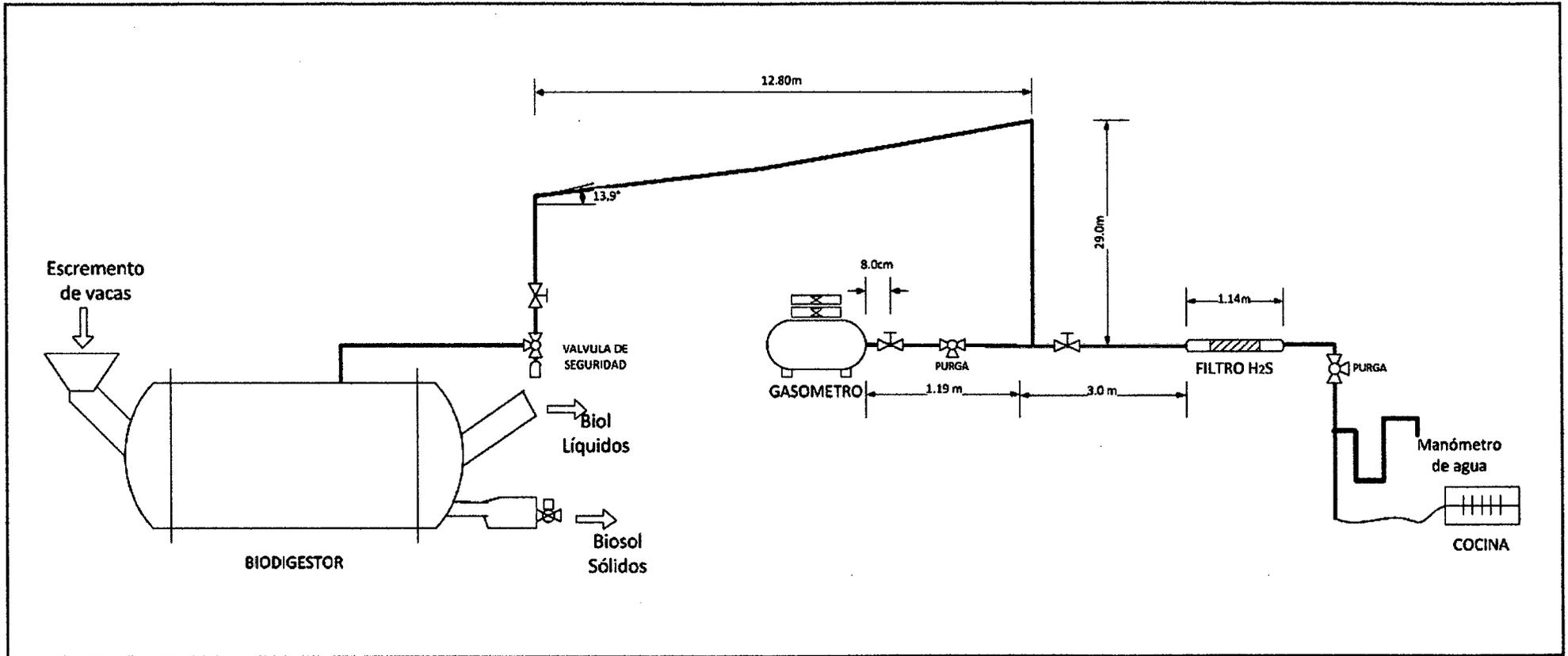
2.6. Módulo: Cierre de Válvulas de Salida

Este módulo constituye la parte final del proceso de alimentación diaria para dar lugar a la producción después de los primeros 10 días, mediante este módulo, se cierran las válvulas de salida de Biol y Biosol, los cuales son los subproductos de la transformación de la materia orgánica en biogás, estas válvulas se cierran una vez regulado el nivel de carga en el interior del biodigestor y para evitar que haya alguna fuga del sistema.



Esta etapa concluye de este modo y es repetida diariamente, ya que la alimentación es continua, luego de 10 días se puede apreciar las primeras trazas de biogás, y aproximadamente al día número 30 se ha alcanzado la máxima productividad la cual se mantendrá constante siempre en cuando se mantengan las mismas condiciones de alimentación diaria y controladas continuamente, para no alterar la producción.

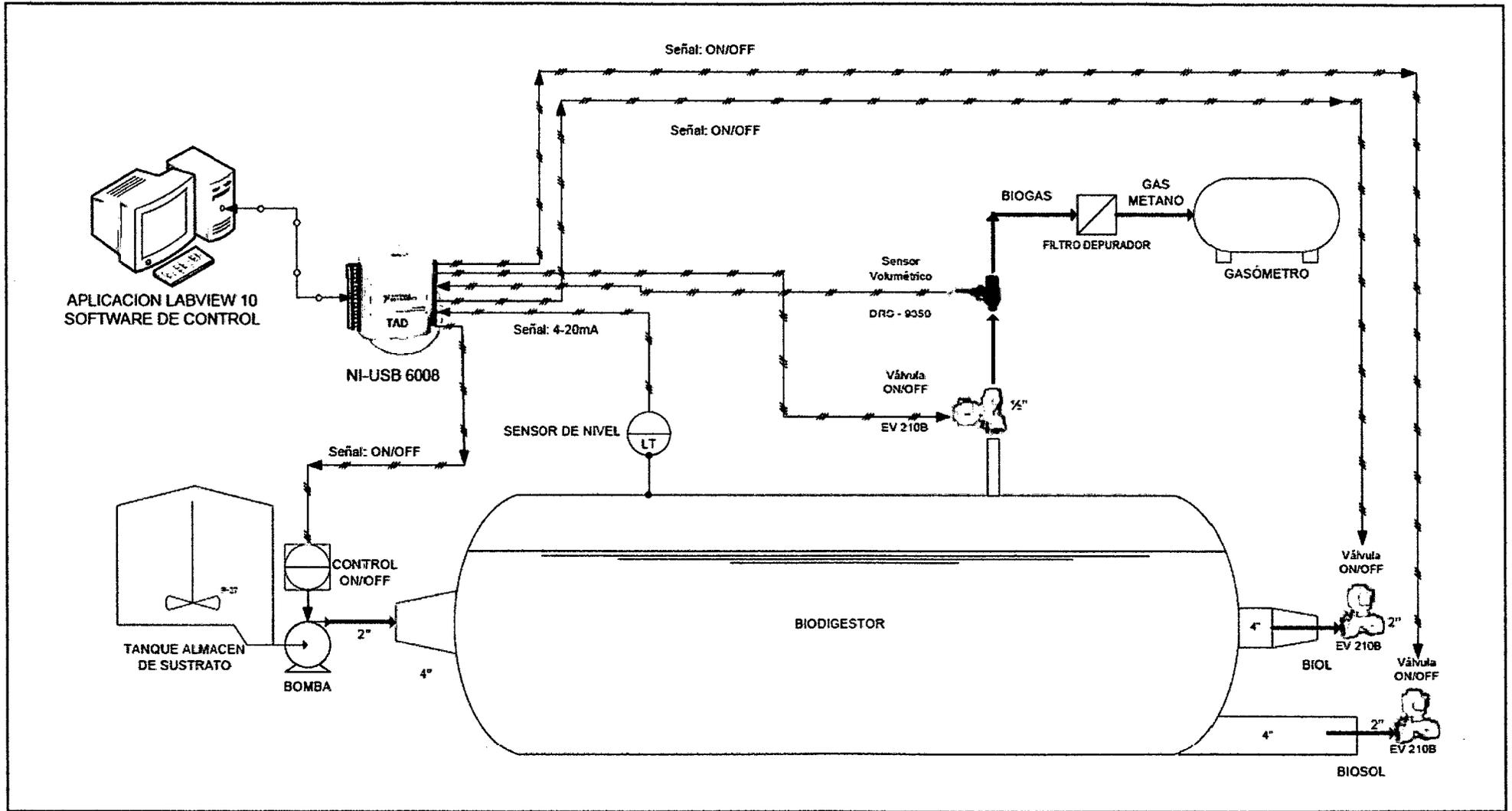
ANEXO 05: PRODUCCIÓN DE BIOGÁS MEDIANTE UN BIODIGESTOR DE 10m³-SIN SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO



Fente y elaboracio: (Marchaim, U. 1992)

12

ANEXO 06: PRODUCCIÓN DE BIOGÁS MEDIANTE UN BIODIGESTOR DE 10m³ CON SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO



11

ANEXO 07: Ingreso de datos y reporte completo del procesamiento estadístico para la prueba de hipótesis generado por el software SPSS versión 20.0

Ventana vista de Variables (Configuración de variables)

Datos PRODUCCION DE BIOGAS EN 1 MES.sav (Conjunto de datos) - IBM SPSS Statistics Editor de datos

Archivo Edición Ver Datos Transformar Analizar Marketing directo Gráficos Utilidades Ventana Ayuda

	Nombre	Tipo	Anchura	Decimales	Etiqueta	Valores	Perdidos	Columnas	Alineación
1	dia_Sim	Númerico	7	0	Dia Simulado	Ninguna	Ninguna	7	Derecha
2	volumen_Sim	Númerico	8	4	Volumen Sim (...)	Ninguna	Ninguna	8	Derecha
3	dia_Real	Númerico	7	0	Dia Real	Ninguna	Ninguna	8	Derecha
4	volumen_Real	Númerico	8	4	Volumen Real (...)	Ninguna	Ninguna	9	Derecha
5	volumen_Obj	Númerico	8	4	Volumen Objeti...	Ninguna	Ninguna	9	Derecha
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									

Vista de datos Vista de variables

IBM SPSS Statistics Processor está listo

Ventana vista de Datos (Ingreso de datos)

Datos PRODUCCION DE BIOGAS EN 1 MES.sav (Conjunto de datos) - IBM SPSS Statistics Editor de datos

Archivo Edición Ver Datos Transformar Analizar Marketing directo Gráficos Utilidades Ventana Ayuda

17: Visible: 5 de 5 variables

	dia_Sim	volumen_Sim	dia_Real	volumen_Real	volumen_Obj	var	var	var	var
1	0	.0000	1	.0155	.0186				
2	0	.0000	2	.0287	.0344				
3	0	.0000	3	.0676	.0811				
4	0	.0000	4	.0742	.0890				
5	0	.0000	5	.1112	.1334				
6	0	.0000	6	.1190	.1428				
7	0	.0000	7	.1351	.1621				
8	0	.0000	8	.1453	.1744				
9	0	.0000	9	.1346	.1615				
10	0	.0000	10	.1603	.1924				
11	0	.0000	11	.1674	.2009				
12	0	.0000	12	.1800	.2160				
13	0	.0000	13	.2219	.2663				
14	0	.0000	14	.2600	.2600				

Vista de datos Vista de variables

IBM SPSS Statistics Processor está listo

ANEXO 08: Reporte de prueba de hipótesis t-student en SPSS 20

* Tablas ersonalizadas.

```
CTABLES
/VLABELS VARIABLES=Dia_Exp Producc_Exp DISPLAY=LABEL
/TABLE Dia_Exp BY Producc_Exp [MEAN, MAXIMUM, MINIMUM, TOTALN F40.0]
/CATEGORIES VARIABLES=Dia_Exp ORDER=A KEY=VALUE EMPTY=EXCLUDE TOTAL=YES LABEL='Promedio' POSI
```

Tablas personalizadas

Notas

Resultados creados	26-AUG-2013 17:49:02
Comentarios	
Entrada Datos	D:\INGENIERIATOOL KITVALL CÁTEDRAS ESPECIALIZADAS\UNH\T ESIS PREGRADO UNH\TESIS OPTIMIZACION EN LA PRODUCCIÓN DE BIOGASYTESIS FINAL CORREGIDO 01\TESIS CONTROL CORREGIDO FINAL\PRUEBA DE HIPÓTESIS ESTADISTICA.sav
Conjunto de datos	Conjunto_de_datos1
Filtro	<ninguno>
Peso	<ninguno>
Dividir archivo	<ninguno>
Núm. de filas del archivo de trabajo	744
Sintaxis	CTABLES A/LABELS VARIABLES=Dia_Exp Producc_Exp DISPLAY=LABEL /TABLE Dia_Exp BY Producc_Exp [MEAN, MÁXIMUM, MÍNIMUM, TOTALN F40.0] /CATEGORIES VARIABLES=Dia_Exp ORDER=A KEY=VALUE EMPTY=EXCLUDE TOTAL=YES LABEL='Promedio' POSITION=AFTER.
Recursos Tiempo de procesador	00:00:00.02
Tiempo transcurrido	00:00:00.02

[Conjunto_de_datos1] D:\INGENIERIA TOOL KIT\ALL CATEDRAS ESPECIALIZADAS\UNH\TESIS PREGRADO UNH\TESIS OPTIMIZACION EN LA PRODUCCION DE BIOGAS\TESIS FINAL C ORREGIDO 01\TESIS CONTROL CORREGIDO FINAL\PRUEBA DE HIPOTESIS ESTADISTICA.sav

	Producción Experimental (m ³ /día)			
	Media	Máximo	Mínimo	N total
Día Exp. 1	.0155	.0155	.0155	1
2	.0287	.0287	.0287	1
3	.0676	.0676	.0676	1
4	.0742	.0742	.0742	1
5	.1112	.1112	.1112	1
6	.1190	.1190	.1190	1
7	.1351	.1351	.1351	1
8	.1453	.1453	.1453	1
9	.1346	.1346	.1346	1
10	.1603	.1603	.1603	1
11	.1674	.1674	.1674	1
12	.1800	.1800	.1800	1
13	.2219	.2219	.2219	1
14	.3002	.3002	.3002	1
15	.3379	.3379	.3379	1
16	.3044	.3044	.3044	1
17	.3056	.3056	.3056	1
18	.3415	.3415	.3415	1
19	.4664	.4664	.4664	1
20	.5741	.5741	.5741	1
21	.5801	.5801	.5801	1
22	.6859	.6859	.6859	1
23	.7427	.7427	.7427	1
24	.7613	.7613	.7613	1
25	.7941	.7941	.7941	1
26	.8761	.8761	.8761	1
27	.8671	.8671	.8671	1
28	.9424	.9424	.9424	1
29	1.0507	1.0507	1.0507	1
30	1.0830	1.0830	1.0830	1
31	.9580	.9580	.9580	1
Promedio	.4365	1.0830	.0155	31

* Tablas personalizadas.
CTABLES

7

```

/VLABELS VARIABLES=Dia_Sim Producc_Sim DISPLAY=LABEL
/TABLE Dia_Sim BY Producc_Sim [MEAN, MAXIMUM, MINIMUM, TOTALN F40.0]
/CATEGORIES VARIABLES=Dia_Sim ORDER=A KEY=VALUE EMPTY=EXCLUDE TOTAL=YES
LABEL='Promedio' POSI

```

Tablas personalizadas

		Notas
Resultados creados		26-AUG-2013 17.51.47
Comentarios		
Entrada	Datos	<u>D:\INGENIERIA\TOOL</u> KIT\ALL CATEDRAS ESPECIALIZADAS\UNH\T ESIS PREGRADO UNHVTESIS OPTIMIZACION EN LA PRODUCCIÓN DE BIOGASYTESIS FINAL CORREGIDO 01\TESIS CONTROL CORREGIDO FINAL\PRUEBA DE HIPÓTESIS ESTADISTICA.sav
	Conjunto de datos	Conjunto_de_datos1
	Filtro	<ninguno>
	Peso	<ninguno>
	Dividir archivo	<ninguno>
	Núm. de filas del archivo de trabajo	744
Sintaxis		CTABLES A/LABELS VARIABLES=Dia_Sim Producc_Sim DISPLAY=LABEL ATABLE Dia_Sim BY Producc_Sim [MEAN, MÁXIMUM, MÍNIMUM, TOTALN F40.0] /CATEGORIES VARIABLES=Dia_Sim ORDER=A KEY=VALUE EMPTY=EXCLUDE TOTAL=YES LABEL='Promedio' POSITION=AFTER.
Recursos	Tiempo de procesador	00:00:00.05
	Tiempo transcurrido	00:00:00.03

```

[Conjunto_de_datos1]  D:\INGENIERIA  TOOL  KIT\ALL  CATEDRAS
ESPECIALIZADAS\UNH\T  ESIS  PREGRADO  UNH\TESIS  OPTIMIZACION  EN  LA

```

PRODUCCION DE BIOGAS\TESIS FINAL C ORREGIDO 01\TESIS CONTROL
CORREGIDO FINAL\PRUEBA DE HIPOTESIS ESTADISTICA.sav

		Producción Simulada (m3/día)			
		Media	Máximo	Mínimo	N total
Dia Sim.	1	.0000	.0000	.0000	24
	2	.0000	.0000	.0000	24
	3	.0000	.0000	.0000	24
	4	.0000	.0000	.0000	24
	5	.0000	.0000	.0000	24
	6	.0000	.0000	.0000	24
	7	.0000	.0000	.0000	24
	8	.0000	.0000	.0000	24
	9	.0067	.0700	.0000	24
	10	.2867	.4650	.0890	24
	11	.6222	.7540	.4790	24
	12	.8732	.9750	.7640	24
	13	1.0689	1.1500	.9830	24
	14	1.2259	1.2920	1.1560	24
	15	1.3550	1.4100	1.2970	24
	16	1.4632	1.5100	1.4140	24
	17	1.5555	1.5960	1.5140	24
	18	1.6350	1.6700	1.5990	24
	19	1.7044	1.7350	1.6730	24
	20	1.7657	1.7930	1.7380	24
	21	1.8200	1.8440	1.7950	24
	22	1.8686	1.8900	1.8460	24
	23	1.9124	1.9320	1.8920	24
	24	1.9522	1.9700	1.9340	24
	25	1.9883	2.0050	1.9720	24
	26	2.0214	2.0360	2.0060	24
	27	2.0518	2.0660	2.0380	24
	28	2.0799	2.0930	2.0670	24
	29	2.1060	2.1180	2.0940	24
	30	2.1190	2.1190	2.1190	24
	31	2.1190	2.1190	2.1190	24
	Promedio	1.1484	2.1190	.0000	744

* Tablas personalizadas.
CTABLES

```

/VLABELS VARIABLES=Dia_Exp Producc_Obj DISPLAY=LABEL
/TABLE Dia_Exp BY Producc_Obj [MEAN, MAXIMUM, MINIMUM, TOTALN F40.0]

```

5

/CATEGORIES VARIABLES=Dia_Exp ORDER=A KEY=VALUE EMPTY=EXCLUDE TOTAL=YES
 LABEL='Promedio' POSI

Tablas personalizadas

Notas

Resultados creados	26-AUG-2013
Comentarios	17.55.10
Entrada Datos	D:\INGENIERIATOO KITVALL CÁTEDRAS ESPECIALIZADAS\UNH\T ESIS PREGRADO UNHVTESIS OPTIMIZACION EN LA PRODUCCIÓN DE BIOGASYTESIS FINAL CORREGIDO 01\TESIS CONTROL CORREGIDO FINAL\PRUEBA DE HIPÓTESIS ESTADISTICA.sav
Conjunto de datos	Conjunto_de_datos1
Filtro	<ninguno>
Peso	<ninguno>
Dividir archivo	<ninguno>
Núm. de filas del archivo de trabajo	744
Sintaxis	CTABLES A/LABELS VARIABLES=Dia_Exp Producc Obj DISPLAY=LABEL /TABLE Dia Exp BY Producc Obj [MEAN, MÁXIMUM, MÍNIMUM, TOTALN F40.0] /CATEGORIES VARIABLES=Dia Exp ORDER=A KEY=VALUE EMPTY=EXCLUDE TOTAL=YES LABEL='Promedio' POSITION=AFTER.
Recursos Tiempo de procesador	00:00:00.02
Tiempo transcurrido	00:00:00.02

[Conjunto_de_datos1] D:\INGENIERIA TOOL KIT\ALL CATEDRAS
 ESPECIALIZADAS\UNH\T ESIS PREGRADO UNH\TESIS OPTIMIZACION EN LA
 PRODUCCION DE BIOGAS\TESIS FINAL C ORREGIDO 01\TESIS CONTROL CORREGIDO
 FINAL\PRUEBA DE HIPOTESIS ESTADISTICA.sav

	Producción Objetivo (m3/día)			
	Media	Máximo	Mínimo	N total
Dia Exp. 1	.0186	.0186	.0186	1
2	.0344	.0344	.0344	1
3	.0811	.0811	.0811	1
4	.0890	.0890	.0890	1
5	.1334	.1334	.1334	1
6	.1428	.1428	.1428	1
7	.1621	.1621	.1621	1
8	.1744	.1744	.1744	1
9	.1615	.1615	.1615	1
10	.1924	.1924	.1924	1
11	.2009	.2009	.2009	1
12	.2160	.2160	.2160	1
13	.2663	.2663	.2663	1
14	.3602	.3602	.3602	1
15	.4055	.4055	.4055	1
16	.3653	.3653	.3653	1
17	.3667	.3667	.3667	1
18	.4098	.4098	.4098	1
19	.5597	.5597	.5597	1
20	.6889	.6889	.6889	1
21	.6961	.6961	.6961	1
22	.8231	.8231	.8231	1
23	.8912	.8912	.8912	1
24	.9136	.9136	.9136	1
25	.9529	.9529	.9529	1
26	1.0513	1.0513	1.0513	1
27	1.0405	1.0405	1.0405	1
28	1.1309	1.1309	1.1309	1
29	1.2608	1.2608	1.2608	1
30	1.2996	1.2996	1.2996	1
31	1.1496	1.1496	1.1496	1
Promedio	.5238	1.2996	.0186	31

T-TEST /TESTVAL=0.5238
 /MISSING=ANALYSIS
 /VARIABLES=Producc_Sim
 /CRITERIA=CI(.99).

Prueba T

Notas

Resultados creados		26-AUG-2013 18.00.04
Comentarios		
Entrada	Datos	D:\INGENIERIA\TOOL KIT\ALL CÁTEDRAS ESPECIALIZADAS\UNH\T ESIS PREGRADO UNHVTESIS OPTIMIZACION EN LA PRODUCCIÓN DE BIOGASYTESIS FINAL CORREGIDO 01\TESIS CONTROL CORREGIDO FINAL\PRUEBA DE HIPÓTESIS ESTADISTICA.sav
	Conjunto de datos	Conjunto_de_datos1
	Filtro	<ninguno>
	Peso	<ninguno>
	Dividir archivo	<ninguno>
	Núm. de filas del archivo de trabajo	744
Tratamiento de los perdidos	Definición de los ...	Los valores perdidos definidos por el usuario serán tratados como
	Casos utilizados	Los estadísticos de cada análisis se basan en los casos que no tienen datos perdidos ni quedan fuera de rango en cualquiera de las T-TEST /TESTVAL=0.5238 /MISSING=ANALYSIS A/ARIBLES=Producc S i m /CRITERIA=CI(.99).
Sintaxis		
Recursos	Tiempo de procesador	00:00:00.02
	Tiempo transcurrido	00:00:00.05

```
[Conjunto_de_datos1] D:\INGENIERIA TOOL KIT\ALL CATEDRAS
ESPECIALIZADAS\UNH\T ESIS PREGRADO UNHVTESIS OPTIMIZACION EN LA
PRODUCCION DE BIOGAS\TESIS FINAL C ORREGIDO 01\TESIS CONTROL CORREGIDO
FINAL\PRUEBA DE HIPOTESIS ESTADISTICA.SAV
```

Estadísticos para una muestra

	N	Media	Desviación tip.	Error tip. de la media
Producción Simulada (m3/día)	744	1.148414	.8502532	.0311718

Prueba para una muestra

	Valor de prueba = .5238				
	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	99% Intervalo de confianza .. Inferior
Producción (m3/día) i Simulada	20.038	743	.000	.6246140	.544114

Prueba para una muestra

	Valor de prueba ..
	99% Intervalo de confianza...
	Superior
Producción Simulada (m3/día)	.705114

ANEXO 09: MATRIZ DE CONSISTENCIA

PROBLEMA GENERAL		OBJETIVO GENERAL	HIPOTESIS GENERAL	VARIABLES	INDICADORES
¿En qué porcentaje se puede optimizar la producción de biogás mediante el sistema de control automático con software en un biodigestor simulado?		Optimizar la producción de biogás mediante un sistema de control automático con software en un biodigestor simulado.	El sistema de control automático con software optimiza el promedio mensual de producción de biogás en un porcentaje mayor al 20% en el biodigestor simulado.	<p>Independiente. X = Sistema de control automático con software.</p> <p>Dependiente. Y = La producción de biogás</p>	<p>X1 = Temperatura de Operación en el interior del biodigestor (°C)</p> <p>X2 = Tiempo de retención del biodigestor (días)</p> <p>Y1 = La cantidad de biogás producido (m³)</p>
PROBLEMAS ESPECIFICOS		OBJETIVOS ESPECIFICOS	HIPOTESIS ESPECIFICAS		
01	¿Cómo simular dinámicamente mediante software el proceso de producción de biogás en un biodigestor real?	Simular dinámicamente mediante software el proceso de producción de biogás en un biodigestor real.	Es posible simular dinámicamente el proceso de producción de biogás mediante el modelo matemático desarrollado por Chen, Y.R. (1983) y mediante la herramienta LabVIEW.		
02	¿Cómo controlar las variables de mayor impacto en el proceso de producción de biogás?	Controlar las variables de mayor impacto en el proceso de producción de biogás.	Para controlar la temperatura y el tiempo de retención las cuales son las variables de mayor impacto en el proceso de producción de biogás se requiere del software BIOSIM 1.2 desarrollado en LabVIEW con un algoritmo de control por tiempos ON/OFF.		
03	¿Cómo validar los resultados simulados de producción de biogás con datos reales de producción de biogás?	Validar los resultados simulados de producción de biogás con datos reales de producción de biogás.	Para validar los resultados simulados de producción de biogás con datos reales se requiere contrastarlos con datos experimentales del biodigestor instalado en el distrito de Apata-Concepción-Junín.		
04	¿Cuál es la relación de producción del biodigestor simulado con sistema de control automático respecto a un biodigestor real sin control?	Determinar la relación de producción del biodigestor simulado con sistema de control automático respecto a un biodigestor real sin control.	La relación de producción del biodigestor simulado con sistema de control automático respecto a un biodigestor real sin control es mayor a 1.		