



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES IZTACALA**

**Evaluación de un biodigestor piloto para la digestión anaerobia de lodos primarios de la planta de tratamiento de aguas residuales, a escala de Atotonilco, Hidalgo.”**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**BIOLOGO**

**P R E S E N T A:**

**ROGELIO MONTEERRUBIO VALDIVIA**



**DIRECTOR DE TESIS:  
Mtro. EZEQUIEL VIDAL DE LOS SANTOS  
2016**

**Ciudad de México**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## Dedicatoria

A mis padres por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, en toda mi educación, tanto académica, como de la vida, por su incondicional apoyo perfectamente mantenido a través del tiempo. Todo este trabajo ha sido posible gracias a ellos.

A mi maestro, Ezequiel Vidal de los Santos por su gran apoyo y motivación para la culminación de mis estudios profesionales y para la elaboración de esta tesis.

A los sinodales quienes estudiaron y aprobaron el trabajo presente.

Y todos los que me apoyaron para escribir y concluir esta tesis.

# Contenido

1.- Resumen

2.- Introducción

3.- Justificación

4.- Objetivos

4.1.-Objetivo General

4.2.-Objetivo Particular

5.- La PTAR Atotonilco

5.1.- Calidad del Agua Residual

5.2.- Proceso de Tratamiento

5.3.- Proceso Fisicoquímico

5.4.- Manejo de Lodos

5.5.- Proceso Anaerobio

5.6.- Bioquímica y Microbiología del Proceso

5.7.- Cogeneración

6.- Materiales y Métodos

7.- Resultados

8.- Análisis de Resultados

9.- Discusión

10.- Conclusiones

11.- Recomendaciones

12.- Referencias

Anexos

# 1.- Resumen

La demanda de agua potable en el Valle de México alcanza un caudal de 64 m<sup>3</sup>/seg, a costa de la sobre explotación de los acuíferos subterráneos y la importación de aguas superficiales de las cuencas vecinas, lo que ha generado numerosos impactos ambientales, sociales y económicos en toda la región. Más grave aún, es la consecuente generación de aguas residuales servidas, que históricamente se han exportado hacia la cuenca del río Tula sin tratamiento alguno, degradando cuerpos de agua y suelos en el Valle del Mezquital.

Actualmente, las aguas residuales del Valle de México se depuran en su mayor parte en la planta de tratamiento de Aguas Residuales de Atotonilco, Hgo. La planta se encuentra en proceso de consolidación, Durante las pruebas de arranque se determinaron los parámetros de operación en una planta a escala piloto anexa a la salida del emisor central de la Ciudad de México, en donde se examinaron a detalle el comportamiento de los procesos de sedimentación, proceso biológico de lodos activados y filtración.

Una de las necesidades técnicas la constituyó la elaboración de pruebas de tratabilidad de los lodos generados en el proceso, con el propósito de avalar el arranque de las unidades a escala industrial. Básicamente se buscaba la certeza de que dichos lodos podrían digerirse mediante procesos anaerobios con la producción de gas combustible.

La actividad experimental consistió en el diseño y construcción de un reactor anaerobio a escala de laboratorio para realizar pruebas de producción de metano mediante la digestión anaerobia de los lodos primarios de la planta piloto. El reactor fue inoculado con lodos procedentes de una planta externa para acelerar la estabilización en la producción de gas y operado en la modalidad batch, en virtud de que los flujos de alimentación fueron muy pequeños.

El sistema fue controlado mediante un procesador de computadora, para remitir los datos a una terminal remota y permitir su operación de forma automatizada. Los gases generados fueron monitoreados mediante un sensor específico para metano modelo MQ2, el volumen del gas fue captado por una probeta y cuantificado por el volumen desplazado de agua dentro de la misma.

## 2.- Introducción

La demanda de agua potable en la zona metropolitana del valle de México (ZMVM) detonó en la década 1965-1975 un incremento sostenido que inició con la construcción de una batería de 230 pozos profundos que aportaron 14 m<sup>3</sup>/s. El suministro de las aguas subterráneas se elevó desde entonces hasta alcanzar un caudal de 43.3 m<sup>3</sup>/s. Ello provocó diversos impactos sociales, económicos y ambientales dentro y fuera de la cuenca del valle de México.

Los impactos más relevantes incluyen el agotamiento de manantiales, desaparición de lagos y humedales, reducción del caudal base en ríos, eliminación de vegetación nativa, pérdida de ecosistemas, degradación de la calidad de agua, incremento en los costos de extracción, asentamientos diferenciales y agrietamientos del terreno (Escolero, 1993; Carrillo-Rivera et al, 2007).

La Ciudad de México fundada en una zona lacustre, ha enfrentado a lo largo de su historia retos importantes para el manejo del agua, como lo representan la conformación de la misma de la cuenca del Valle donde se asienta y por otra parte el enorme crecimiento de la población y de la mancha urbana, así como los caudales de aguas residuales y pluviales a desalojar por los sistemas de drenaje.

El abastecimiento de aguas subterráneas ha cumplido con una vida útil de 25 años, lo que determinó diversificar las fuentes de abastecimiento para atender la creciente demanda de agua potable. Al caudal anterior, se sumó el aporte de 13.46 m<sup>3</sup>/s del sistema Cutzamala, que importó agua de las presas localizadas en el estado de México y Michoacán, además de 5.86 m<sup>3</sup>/s del Lerma y 2.05 m<sup>3</sup>/s de otros aprovechamientos superficiales. Lo anterior acumula un caudal de 64 m<sup>3</sup>/s.

El sistema Cutzamala opera desde 1982 y está constituido básicamente por las presas Villa Victoria, Valle de Bravo, Chilesdo, Colorines, el Bosque, Tuxpan, Ixtapan del Oro y el Barraje, seis plantas de bombeo, 212 km de conducciones, dos tanques de regulación y una planta potabilizadora.

En la cuenca del Valle de México se localiza una de las concentraciones urbano-industriales más grandes del mundo, que en las últimas tres décadas, ha triplicado su población.

En esta megalópolis, cuestiones como el abastecimiento y la distribución del agua para el consumo urbano e industrial, el desalojo de las aguas pluviales y el tratamiento de las aguas residuales, configuran grandes desafíos para la política hidráulica y la acción concertada de las instituciones y la sociedad.

El Valle de México enfrenta una condición sumamente delicada: sobreexplotación de mantos acuíferos, insuficiente capacidad de drenaje, la emisión de aguas negras (a las que solo se sana en menos de un 10%) y poca conciencia de ahorro y uso eficiente del líquido vital.

La contraparte de la demanda de agua potable es la generación de las correspondientes aguas residuales. Actualmente las aguas residuales generadas por la ZMVM, se envían a los cursos de agua de la cuenca del Río Tula en el estado de Hidalgo. Gran parte del volumen se ha empleado sin tratamiento, en el riego agrícola en más de 80,000 ha de cultivos, principalmente alfalfa y maíz. Las aguas residuales irrigan los cultivos agrícolas en los distritos de riego 003 Tula, 100 Alfajayucan y 112 Ajacuba.

La zona metropolitana tenía hasta el 2015 una capacidad de tratamiento de las aguas residuales de 8 m<sup>3</sup>/s y parte de ella se reusa en algunos servicios urbanos. Adicionalmente, existen proyectos en distintos procesos de gestión para incrementar la capacidad de tratamiento de la ciudad de México en 54 m<sup>3</sup>/s. (Tabla 1).

La planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) Atotonilco, por ahora, es la más grande de América Latina y la tercer planta más grande del mundo con una capacidad de 35,000 lps. 23,000 lps operacionales y 12,000 lps adicionales en temporada de lluvias. (Tabla 1).

| PTAR                    | Capacidad (m <sup>3</sup> /s) | Proyecto (m <sup>3</sup> /s) |
|-------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| Abasolo                 | 0.015                         |                              |
| Acueducto de Guadalupe  | 0.080                         |                              |
| Cerro de la Estrella    | 4.0                           |                              |
| Chapultepec             | 0.0150                        | 0.260                        |
| Coyoacán                | 1.2                           |                              |
| Ciudad Deportiva        | 0.230                         |                              |
| Aragón – Tlacos         | 0.5                           |                              |
| El Llano                | 0.250                         |                              |
| El Rosario              | 0.030                         |                              |
| Iztacalco               | 0.013                         |                              |
| La Lupita               | 0.015                         |                              |
| Parrés                  | 0.001                         |                              |
| Pemex Picacho           | 0.025                         |                              |
| Reclusorio Sur          | 0.030                         |                              |
| San Andrés Mixquic      | 0.030                         |                              |
| San Lorenzo             | 0.225                         |                              |
| San Luis Tlaxialtemalco | 0.150                         |                              |
| San Miguel Xicalco      | 0.00                          |                              |
| San Nicolás Tetelco     | 0.020                         |                              |
| San Pedro Atocpan       | 0.060                         |                              |
| Tlaltelolco             | 0.022                         |                              |
| Bosque de las Lomas     | 0.022                         |                              |
| Tlalnepantla 1          | 0.100                         |                              |
| Berriozabal             |                               | 2.0                          |
| Nextlalpan              |                               | 9.0                          |
| Guadalupe               |                               | 0,5                          |
| Zumpango                |                               | 1.5                          |
| Vaso de Cristo          |                               | 4.0                          |
| Caracol                 |                               | 2.0                          |
| <b>Atotonilco</b>       |                               | <b>35.0</b>                  |
| <b>Capacidad Total</b>  | <b>7,0</b>                    | <b>54.2</b>                  |

Tabla 1. Plantas de tratamientos situadas en el Valle de México

La ZMVM es un sistema complejo que se abastece de agua por los pozos de la misma cuenca y desde hace 26 años, importa agua de otras cuencas: Lerma y Cuetzamala, proveniente de los Estados de México y Michoacán. Por otro lado, desde el Siglo XVIII, descarga sus aguas residuales a la cuenca del Río Tula en el Estado de Hidalgo.

En los años veinte la construcción del sistema de presas del poniente y desde 1961 la del interceptor del poniente, que junto con el gran canal y el túnel emisor central constituyen las tres salidas artificiales de la cuenca de México.

El Túnel Emisor Oriente (TEO) es una obra hidráulica subterránea para desalojar las aguas residuales y pluviales del Valle de México que está en construcción a profundidades que van de 60 a 200 metros bajo la superficie. El TEO recibirá las aguas residuales y pluviales provenientes de los túneles Interceptor Oriente y el Río de los Remedios, cuyos caudales confluirán en la lumbrera L-2 del Túnel Río de los Remedios. A partir de ahí el agua se conducirá por gravedad por el TEO hasta el sitio denominado El Salto, en el Estado de Hidalgo, para su tratamiento en la PTAR Atotonilco.

El agua tratada se destinara al riego para las zonas aledañas, para que de esta forma se eliminen elementos patógenos en las siembras, ya que anteriormente se regaban con aguas crudas.

El lodo producido en la PTAR Atotonilco será estabilizado y deshidratado cumpliendo con un porcentaje de sequedad en los lodos igual o mayor al 28% y con las características de un lodo tipo C de acuerdo a la Norma NOM-004-SEMARNAT-2002. Estos lodos son para usos forestales, mejoramiento de suelos, de uso agrícola y la norma establece que deben contener las siguientes características:

- Indicador bacteriológico de contaminación (Coliformes fecales NMP/g base seca): menor a 2,000,000
- Patógenos (salmonella SSP NMP/g base seca): menor de 300
- Parásitos (huevos helmintos/g en base seca): menor de 35

### 3.-Justificación

La PTAR Atotonilco se circunscribe dentro del programa de Saneamiento para el Valle de México de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Dentro de sus objetivos se plantea el mejoramiento de la calidad del agua residual generada en la ZMVM, delimitada ésta por la propia Cuenca del mismo nombre y en los distritos agrícolas aledaños, estableciendo condiciones acordes con la normatividad vigente y buscando la protección de la población que habita y trabaja en la zona de influencia del proyecto. (Conagua, 2012)

El tratamiento de las aguas residuales por la vía del método convencional de lodos activados resuelve satisfactoriamente las metas de calidad de las aguas tratadas, no obstante conllevan la generación de importantes volúmenes de lodos cuyo manejo y disposición final implican elevados costos de operación. La digestión anaerobia se aplicará como una opción de estabilización de esos lodos, lo que reduce sensiblemente las características de peligrosidad sanitaria y los costos de disposición final, con el valor agregado de la producción de biogás.

La digestión anaerobia se realizará en reactores, completamente mezclados y régimen térmico mesofílico (15 - 40 °C) para asegurar altas tasas de degradación de materia orgánica y uso eficiente del equipo. El sistema opera con tiempo de retención hidráulico bajo y carga orgánica alta.

El diseño de un modelo a escala de laboratorio de un reactor anaerobio buscará identificar las variables operativas, con el propósito de definir los parámetros de operación de reactores a mayores escalas, incluyendo la escala de piloto y la escala industrial. La modificación de los tiempos de retención hidráulica, mezclas de lodos y régimen térmico definirán el volumen óptimo del reactor y los mejores valores de reducción de materia orgánica y producción de biogás.

Las pruebas experimentales gravitarán en torno a las variables operacionales que definirán los valores aplicables a escala piloto y en su caso a escala industrial. En

primer término, se determinará el régimen térmico más apropiado. Usualmente, el proceso anaerobio se distingue por su naturaleza termófila, no obstante el clima templado que priva en el altiplano puede favorecer a una mejor adaptación microbiana al régimen mesófilo.

La segunda variable a valorar es el tiempo de retención hidráulica, dado el carácter de mezcla completa del reactor. El criterio de carga para dimensionar los reactores, seleccionado por la CONAGUA, es la carga orgánica en kg/d. A partir de ese valor se explorará el comportamiento de la producción de gas y en consecuencia, la eficiencia bioquímica del sistema a distintos tiempos de retención hidráulica.

La tercera variable se relaciona con el carácter de los lodos de alimentación. Toda vez que se generarán tres corrientes de lodos que se mezclarán en una sola, se explorará la conveniencia de separarlos para su tratamiento.

Finalmente, la PTAR aplicará un proceso de estacional cuya principal característica será la adición de agentes coagulantes sobre un tren de tratamiento primario único, con base en el uso de sulfato férrico, se determinará el efecto del floculante sobre el proceso de producción de gas.

## 4.- Objetivos

### 4.1.- Objetivo General

- ✓ Evaluar un biodigestor experimental para pruebas de tratabilidad de lodos procedentes de la planta de tratamiento a nivel piloto, de las aguas residuales del Valle de México.

#### 4.2.- Objetivos Particulares

- ✓ Diseñar un reactor a escala de laboratorio para la estabilización de lodos primarios y secundarios de la planta de tratamiento piloto de Atotonilco, Hgo.
- ✓ Analizar la calidad del efluente e influente del reactor y en su caso evaluar la producción de gas.
- ✓ Evaluar las condiciones de arranque y operación en función de la eficiencia, producción de gas e insumos empleados en la operación del reactor piloto.



*Figura 1. Portal de salida de los emisores de aguas residuales*

## 5.- La PTAR Atotonilco

La planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) se localiza en los límites de las localidades de San José Acozulco, Municipio de Atotonilco de Tula y Melchor Ocampo (El Salto), municipio de Tepeji del Río, en el estado de Hidalgo, entre los

paralelos 19° 58'12" y 19° 57'11" de latitud norte y los meridianos 99°17'06" y 99°18'17" de longitud oeste. El polígono del predio tiene una superficie de 158.51 ha. La fisiografía es propia de la ladera de un cerro con un desnivel de más de 60.00 m y lo cruzan el canal de aguas para riego El Salto-Tlamaco y la vía del Ferrocarril México-Querétaro. (Fig. 1)



Figura 2. Ubicación de a PTAR Atotonilco (Fuente: CONAGUA, 2012).

El objetivo principal de la PTAR es el tratar y sanear el agua residual del Valle de México, de esta forma se aprovechará en su totalidad las aguas crudas vertidas en el valle del mezquital, así se solucionarían problemas de inundación que ocurren durante la época de lluvia, como también el mejoramiento de la calidad del agua para uso agrícola, buscando la protección que habita y trabaja en la zona de influencia del programa.

La PTAR Atotonilco fue construida con un tren de tratamiento biológico denominado Tren de Procesos Convencionales, (TPC) un Tren de Procesos Químicos, (TPQ) un Tren de Tratamientos de Lodos, (TTL) un sistema de cogeneración eléctrica y un sistema de terrazas denominado monorrelleno para el depósito de los lodos estabilizados..



Figura 3. Vista General de la PTAR Atotonilco.

## 5.1 Calidad del Agua Residual

La calidad del agua residual fue evaluada minuciosamente por la Conagua durante varios meses con el propósito de elaborar las bases para la licitación del proyecto de la PTAR Atotonilco. Los valores promedios se detallan en la Tabla 2 y destaca condiciones diferenciadas según la estacionalidad. De modo que durante el verano el caudal es de 27 m<sup>3</sup>/seg, en tanto que durante la época de lluvias este se eleva hasta 58 m<sup>3</sup>/seg. Lo que impone un desafío para la operación de la planta, toda vez que no se puede remitir ese caudal bastante diluido a los reactores biológicos.

La concentración de materia orgánica medida como DBO<sub>5</sub> se sitúa en 229 mg/l en la época de estiaje y se diluye hasta 113 mg/l durante los meses lluviosos. Estos valores son congruentes con los reportados en la literatura para las aguas residuales urbanas.

Llama la atención la baja concentración de sólidos sedimentables en la época de sequías, del orden de 2.4 ml/l y la reportada para la temporada lluviosa, 1.6 ml/l, donde por el arrastre de material terrígeno de las calles se esperaría que fuese más elevado.

| Tabla 2. Calidad del Agua residuales de la Ciudad de México en el Emisor Central a la salida del Portal de Tlamaco |            |                       |         |                        |        |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|-----------------------|---------|------------------------|--------|
| Parámetro                                                                                                          | Unidades   | Estiaje               |         | Lluvia                 |        |
|                                                                                                                    |            | Concentración         | Cargas* | Concentración          | Carga* |
| Temperatura                                                                                                        | °C         | 19,7                  |         | 20,2                   |        |
| pH                                                                                                                 |            | 7,7                   |         | 7,61                   |        |
| Alcalinidad-CaCO <sub>3</sub>                                                                                      | mg/l       | 475,5                 |         | 388,7                  |        |
| SST                                                                                                                | mg/l       | 252,0                 | 224,4   | 290,4                  | 219,2  |
| SSV                                                                                                                | mg/l       | 165,7                 | 156,2   | 113,2                  | 91,8   |
| DBO <sub>5</sub> total                                                                                             | mg/l       | 229,6                 | 265,8   | 107,2                  | 106,6  |
| DBO <sub>5</sub> soluble                                                                                           | mg/l       | 95,0                  | 120,6   | 40,8                   | 30,6   |
| N-Kjeldahl                                                                                                         | mg/l       | 45,0                  | 36,9    | 28,4                   | 23,2   |
| N-NH <sub>3</sub>                                                                                                  | mg/l       | 33,4                  | 49,9    | 22,3                   | 20,9   |
| N-NO <sub>3</sub>                                                                                                  | mg/l       | < 1,5                 |         | < 1,5                  |        |
| Nitritos                                                                                                           | mg/l       | < 0,015               |         | < 0,015                |        |
| Sulfatos                                                                                                           | mg/l       | 78,4                  |         | 75,8                   |        |
| Fósforo total                                                                                                      | mg/l       | 8,0                   | 7,5     | 5,4                    | 4,6    |
| Grasas y aceites                                                                                                   | mg/l       | 53,8                  |         | 22,2                   |        |
| Sulfuros                                                                                                           | mg/l       | 2,6                   |         | 1,9                    |        |
| Coliformes fecales                                                                                                 | NMP/100 ml | 3,6 * 10 <sup>8</sup> |         | 1,48 * 10 <sup>8</sup> |        |
| Huevos de Helminetos                                                                                               | Huevos/l   | 0,4                   |         | 0                      |        |
| Conductividad                                                                                                      | Ms/m       | 142,5                 |         | 103,3                  |        |
| DQO                                                                                                                | mg/l       | 526,6                 | 551,0   | 309,6                  | 303,4  |
| DQO soluble                                                                                                        | mg/l       | 210,3                 | 252,0   | 126,6                  | 108,3  |
| Materia flotante                                                                                                   |            | Ausente               |         | Ausente                |        |
| Ortofosfato                                                                                                        | mg/l       | 6,4                   |         | 4,7                    |        |
| Sílice                                                                                                             | mg/l       | 30,3                  |         | 33,6                   |        |
| S. sedimentables                                                                                                   | ml/l       | 2,4                   |         | 1,6                    |        |
| SAAM                                                                                                               | mg/l       | 11,9                  |         | 8,8                    |        |
| Arsénico                                                                                                           | mg/l       | < 0,01                |         | < 0,01                 |        |
| Cadmio                                                                                                             | mg/l       | < 0,005               |         | < 0,005                |        |
| Cianuro                                                                                                            | mg/l       | < 0,025               |         | < 0,025                |        |
| Cromo                                                                                                              | mg/l       | < 0,05                |         | < 0,05                 |        |
| Cobre                                                                                                              | mg/l       | < 0,03                |         | < 0,05                 |        |
| Mercurio                                                                                                           | mg/l       | < 0,001               |         | < 0,001                |        |
| Níquel                                                                                                             | mg/l       | < 0,05                |         | < 0,05                 |        |
| Plomo                                                                                                              | mg/l       | < 0,01                |         | < 0,03                 |        |
| Zinc                                                                                                               | mg/l       | 0,4                   |         | 0,14                   |        |

|            |      |      |      |       |      |
|------------|------|------|------|-------|------|
| Magnesio   | mg/l | 24,7 |      | 19,18 |      |
| Caudal (Q) | M3/s | 27,2 | 18,9 | 58,0  | 51,1 |

## 5.2.- Proceso de Tratamiento

Este proceso es el encargado de la degradación biológica del material que contiene el agua residual y está compuesto por:

- Clarificación primaria
- Tratamiento biológico
- Clarificación secundaria
- Desinfección
- Obra de descarga

El agua residual ingresará a la planta a través del Túnel Emisor Central (y posteriormente recibirá la proveniente del Túnel Emisor Oriente (TEO)). Consiste de un pre tratamiento que incluye rejillas y desarenadores; el tratamiento primario que se realizará en tanques de sedimentación; el tratamiento secundario en reactores biológicos alimentados con aeradores y un tratamiento terciario consistente en un proceso de desinfección, para ser enviados a los canales de riego y el excedente remitido a la presa Endhò.

La principal función de los clarificadores es remover los sólidos de mayor tamaño que reúnen materia flotante como la grasa y el agua se destina al clarificador secundario después de la oxigenación de la misma. El objetivo principal del clarificador secundario es separar el agua de la población de microorganismos, donde son regresados al sistema de oxigenación donde se eliminarán en gran parte a los microorganismos patógenos libres del agua residual.



Figura 4 Tanques clarificadores primarios.

El proceso biológico de Lodos Activados consiste en una matriz gelatinosa de bacterias filamentosas. La población bacteriana es predada por una comunidad de protozoarios. Bacterias de los géneros *Pseudomonas*, *Alcaligenes*, *Bacillus* y *Flavobacterium* son las dominantes. El proceso involucra el mezclado de lodos con el desecho a tratar, recirculación en un tanque de mezclado y ulterior aeración del licor. Al abandonar el reactor los lodos son enviados para su separación al sedimentador secundario, recirculando una parte del lodo para mantener el proceso. El arranque puede demandar de 4-6 meses. La remoción de DBO total por este proceso es de 90-95%. El tiempo de retención va de 4 a 6 hr.

Los sólidos orgánicos provenientes del clarificador primario y secundario son bombeados a los biodigestores donde los microorganismos anaeróbicos rompen los sólidos de una forma más estable. Los sólidos se quedan en el biodigestor durante 18-20 días, donde son desactivados para su disposición final la cual es la composta.

La desinfección en el TPC es llevada a cabo por una corriente receptora, que contiene cloro mezclado con aguas residuales para matar organismos que pudieron haber pasado por el clarificador secundario, el bióxido de azufre es utilizado para remover el cloro residual de las aguas tratadas antes de ser soltados a corrientes receptora.

Los lodos generados durante el proceso serán sometidos a un proceso de estabilización, previo a su disposición final de manera segura en el monorrelleno de la planta, para su finalidad en obra de descarga.

Este proceso funcionará durante la época de estiaje y lluvias, mientras que el TPQ solo tratará los excedentes.



Figura 5. Reactores de Lodos Activados.

### 5.3.- Proceso Físicoquímico

Este proceso está determinado por:

- Físicoquímico para la sedimentación lamelar
- Sedimentación lamelar. Espesador
- Físicoquímico para los filtros de malla
- Filtración de malla rotativos
- Desinfección mediante cloro gas

La sedimentación es el proceso natural para separar partículas pesadas en el agua que se encuentran en su seno de suspensión y son removidas por la acción de la gravedad. Las impurezas naturales pueden encontrarse en las aguas según sus tres estados de suspensión en función del diámetro:

- Suspensiones hasta diámetros de  $10^{-4}$  cm
- Coloides entre  $10^{-4}$  y  $10^{-6}$  cm
- Soluciones para diámetros aun menores de  $10^{-6}$  cm

La turbiedad y el color del agua son principalmente causados por partículas muy pequeñas denominadas partículas coloidales. Estas partículas permanecen en suspensión en el agua por tiempo prolongado y pueden atravesar un medio filtrante muy fino. Para eliminar estas partículas se recurre a los procesos de coagulación y floculación. La floculación tiene por objetivo favorecer con la ayuda de mezcla lenta el contacto entre las partículas desestabilizadas. Estas partículas se aglutinan para formar un floc que pueda ser fácilmente eliminado por procedimientos de decantación y filtración.

Dependiendo estos estados de dispersión dan lugar a distintos tipos de procedimientos para eliminar las impurezas; estos pueden ser por sedimentación, aglutinación de coloides para su remoción y transformar compuestos insolubles en solubles para su aglutinación y así permitir la sedimentación.

El floc es frágil, este se rompe en partículas que pueden atravesar el filtro y alterar la calidad del agua producida.

Para la descontaminación más completa de las aguas residuales se utiliza el gas cloro ( $\text{Cl}_2$ ) ya que permanece en el efluente del agua y puede prolongar el efecto de la desinfección aun después del tratamiento inicial contra organismos patógenos, es efectivo en la oxidación de ciertos compuestos orgánicos e inorgánicos y elimina ciertos olores desagradables que salen al medio ambiente.

El procedimiento incluye el pretratamiento y el tratamiento primario. Solo que en este caso, previo a la sedimentación se añadirán agentes floculantes para remover la mayor cantidad de material suspendido posible y luego serán desinfectadas antes de remitirlas al cuerpo receptor.

## 5.4.- Manejo de Lodos

En la PTAR Atonilco se llevará a cabo el manejo de lodos al tamizar, espesar, estabilizar y deshidratar los lodos provenientes de las fuentes de generación: Clarificación Primaria, TPC y TPQ. En este proceso se estabilizará y se generará biogás, para la retroalimentación y auto consumo de la PTAR.

El proceso se llevará a cabo mediante:

- Tamizado de lodos primarios
- Espesamiento de lodos primarios
- Espesamiento de lodos secundarios
- Tamizado de lodos del TPQ
- Digestión anaerobia mesofílica
- Sistema de calentamiento de lodos
- Deshidratación
- Proceso de limpieza de biogás
- Almacenamiento de biogás
- Cogeneración

Los lodos son introducidos de manera continua o intermitente al reactor completamente cerrado, permaneciendo en su interior durante periodos variables. El lodo una vez estabilizado, contiene un bajo contenido de materia orgánica y microorganismos patógenos. El tratamiento permite lograr porcentajes de remoción de 50-60 % de la demanda bioquímica de oxígeno y 50-65% de los sólidos volátiles.

El biogás es una mezcla de gases formada principalmente por metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), y pequeñas proporciones de  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{H}_2$  y  $\text{NH}_3$ . La composición final del gas depende tanto del sustrato utilizado como el funcionamiento del sistema de digestión. El metano es un gas combustible, por lo que el biogás puede ser aprovechado como una fuente alterna de energía. El biogás posee un potencial calorífico aproximado de  $22\ 400\ \text{kJ/m}^3$ , para una proporción de metano del 65%.

## 5.5.- Proceso Anaerobio

La digestión es un proceso controlado por el que la materia orgánica es metabolizada por bacterias anaerobias, en ausencia de oxígeno, con la producción de metano y dióxido de carbono, trazas de Hidrogeno, amoniaco y ácido sulfhídrico, así como lodo residual (biomasa + material inerte). El tratamiento anaerobio resalta la baja producción de biomasa y hasta 90% de gas (metano + CO<sub>2</sub>)<sup>(1)</sup>.

Las comunidades microbiológicas en las operaciones anaerobias son primeramente procariotas, con miembros de los reinos Bacteria y Archaea involucrados. Por ello se enfatiza sobre el comportamiento del complejo y las interacciones entre ambos grupos que son fundamentales para un funcionamiento exitoso de la comunidad metanogénica <sup>(3)</sup>.

La digestión anaerobia del material orgánico es realizada por un consorcio de microorganismos que actúan sinérgicamente. La digestión ocurre en cuatro etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis.

Las macromoléculas de proteínas, grasas y polímeros de carbohidratos (celulosa y almidón) son fragmentadas a través de la hidrólisis a aminoácidos, cadenas largas de ácidos grasos y azúcares. Estos productos son entonces fermentados durante la acidogénesis para formar ácidos grasos volátiles de tres, cuatro y cinco carbonos, como ácidos acético, propiónico, butírico y valérico. En la acetogénesis, las bacterias consumen estos productos de la fermentación y generan ácido acético, dióxido de carbono e hidrógeno. Finalmente, los organismos metanogénicos consumen el acetato, el hidrógeno y el dióxido de carbono para producir metano. La metanogénesis utiliza tres rutas bioquímicas para producir el metano.

Las rutas junto con la estequiometría de las reacciones globales son:

- a. Metanogénesis acetotrófica:  $\text{CH}_3\text{COOH} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{CH}_4$ .
- b. Metanogénesis hidrogenotrófica:  $\text{CO}_2 + \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$
- c. Metanogénesis metilotrófica:  $4\text{CH}_3\text{OH} + 6\text{H}_2 \rightarrow 3\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$

El Metanol se muestra como el sustrato para la ruta metilotrófica, aunque otros sustratos metilados pueden ser convertidos. Los azúcares y polímeros conteniendo

azúcares como el almidón y la celulosa producen un mol de acetato por mol de azúcar degradada. Ya que la metanogénesis acetotrófica es la ruta primaria utilizada, el cálculo teórico de la producción se realiza a menudo usando únicamente esta ruta<sup>(8)(11)</sup>.

Teóricamente el biogás producido contendría 50 % de metano y 50 % de CO<sub>2</sub>. Sin embargo, la acetogénesis típicamente produce algo de H<sub>2</sub> y por cada cuatro moles de H<sub>2</sub> consumido por los metanógenos hidrogenotróficos, un mol de CO<sub>2</sub> se convierte en metano. Los sustratos distintos del azúcar como las grasas y las proteínas pueden producir cantidades más grandes de H<sub>2</sub> que conducen a un contenido más alto de metano. Más aún, el H<sub>2</sub> y el acetato pueden ser sustratos bioquímicos para otros productos. Por lo tanto la producción de biogás global y el contenido de metano variarán para distintos sustratos, consorcios biológicos y condiciones del digestor. Típicamente el contenido de metano en el biogás varía de 40 a 70 % (por volumen) <sup>(11)</sup>.

La temperatura influye sobre aspectos físico-químicos del proceso. La solubilidad de los gases generados desciende al aumentar la temperatura, favoreciendo la transferencia líquido-gas. Esto supone un efecto positivo para el caso de gases como NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S, dada su toxicidad sobre el crecimiento de los microorganismos anaerobios. Una posible desventaja de este fenómeno es que el descenso de la solubilidad del CO<sub>2</sub> provocaría un aumento del pH, lo que generaría, en lodos de elevada concentración de amonio, posibles situaciones de inhibición por NH<sub>3</sub>. Por otra parte, la solubilidad de la mayoría de las sales aumenta con la temperatura de manera que la materia orgánica es más accesible para los microorganismos, aumentando así la velocidad del proceso. Además, la viscosidad de sólidos y semisólidos disminuye al aumentar la temperatura, lo que implica menores necesidades de agitación <sup>(9)</sup>.

Los lodos procedentes del tratamiento primario y secundario serán sujetos a un acondicionamiento previo a su disposición final:

- **Espesamiento:** consiste en eliminar el agua por gravedad o por flotación.
- **Digestión anaerobia:** Los lodos concentrados se digieren anaerobiamente, con el concurso de microorganismos fermentadores y metanogénicos para producir gas combustible (metano e hidrógeno).
- **Deshidratación:** proceso mecánico que elimina el agua de los lodos formando una pasta semisólida que será desinfectada previamente a su disposición final.
- **Disposición final:** Los lodos deshidratados y desinfectados son depositados en el monorrelleno. Después de un periodo de residencia, se remueve y se podrán utilizar para mejoramiento de suelos improductivos.

El manejo de los lodos primarios representa un problema serio, ya que son susceptibles de descomposición, generan fuertes olores y son atractores de moscas y demás fauna nociva.

Los reactores anaerobios son de grandes dimensiones (más de 1 000 m<sup>3</sup> de capacidad), trabajan a temperaturas mesofílicas (20 °C a 40 °C), o termofílicas (más de 40 °C) poseen sofisticados sistemas de control y en el caso de la PTAR Atotonilco están conectados a equipos de cogeneración que brindan como productos finales; calor, electricidad y un efluente sólido de alto contenido proteico, para usarse como fertilizante o alimento de animales <sup>(2)</sup>.

Para que se inicie el proceso se necesita una temperatura mínima de 4 °C a 5 °C y no se debe sobrepasar una máxima de alrededor de 70 °C. Se realiza generalmente una diferenciación en tres rangos de temperatura de acuerdo al tipo de bacterias que predominan en cada una de ellas <sup>(1)</sup>.

Los principales componentes del biogás son el metano (CH<sub>4</sub>) y el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), y pequeñas cantidades de varios compuestos trazas <sup>(4)</sup>.

Los estudios de estimación de generación de biogás han cobrado fuerza debido al aumento en la demanda energética y a que los residuos urbanos sin un manejo apropiado, pueden producir problemas de contaminación de aire, agua y suelo, con el consecuente riesgo de la salud pública <sup>(6)</sup>.

Una vez desactivado el lodo y libre de patógenos, se denomina “biol”. El biol es utilizado en la agricultura como abono y por ser rico en nutrientes, puede tener un valor comercial, aunque en el proyecto de la PTAR Atotonilco será obsequiado a los agricultores que soliciten este tipo de composta.



Figura 6. Biodigestores de Lodos primarios y secundarios

## 5.6.- Bioquímica y microbiología del proceso

La conversión de la materia orgánica contenida en el lodo se produce en tres etapas:

- Hidrolisis: transformación de los compuestos de alto peso molecular en compuestos que puedan servir como fuente de energía y de carbono.
- Acidogénesis: conversión bacteriana de los compuestos producto de la primera fase en compuestos intermedios de menor peso molecular.
- Metanogénesis: conversión por organismos Archaea de los compuestos intermedios en productos finales simples, metano y dióxido de carbono.

Un primer grupo de microorganismos se encarga de hidrolizar los polímeros orgánicos y lípidos para formar elementos estructurales básicos como monosacáridos, aminoácidos y compuestos relacionados.

Un segundo grupo fermenta los productos de la hidrólisis para producir ácidos orgánicos simples, básicamente el ácido acético. Este grupo está formado por bacterias facultativas y anaerobias estrictas, llamadas de forma conjunta acidogénicas. En este grupo se han identificado algunas especies como: *Clostridium spp*, *Peptococcus anaerobus*, *Bifidobacterium spp*, *Desulphovibrio spp*, *Corynebacterium spp*, *Lactobacillus*, *Actinomyces*, *Staphilococcus*, y *Escherichia coli*.

El tercer grupo de microorganismos es conformado por microorganismos estrictamente anaerobios, conocidas como Archaea metanogénicas o formadoras de metano. Estas convierten el hidrógeno y el ácido acético, en gas metano y dióxido de carbono. Los principales géneros de microorganismos que se han identificado incluyen: *Methanobacterium spp*, *Methanobacillus spp*, *Mathanococcus spp*, *Methanosarcina spp*. Las Archaea más importantes de este grupo, son las que degradan el ácido acético y el ácido propiónico. Las Archaea tienen tasas de crecimiento muy lentas, razón por la cual se considera que su metabolismo es un factor limitante del proceso de tratamiento (Figura 7).

La estabilización del lodo se alcanza cuando se produce el metano y dióxido de carbono. El gas metano es altamente insoluble, y su desprendimiento de la solución representa la estabilización real del lodo. Las Archaea metanogénicas sólo pueden utilizar determinados sustratos para producir el metano. Actualmente se conoce que las sustancias que sirven como sustrato son: dióxido de carbono, hidrógeno, formiato, acetato, metanol, metilaminas y monóxido de carbono.

En un digestor anaerobio, las principales vías de producción metano son: conversión de hidrógeno y dióxido de carbono en metano y agua, y conversión de acetato en metano y dióxido de carbono. Los organismos acidogénicos y metanogénicos comparten una relación simbiótica; los metanógenos convierten los productos finales de la fermentación (acetato, formiato e hidrógeno) en metano y dióxido de carbono. Dado que los metanógenos están en capacidad de utilizar el hidrógeno, logran mantener una presión parcial del hidrógeno extremadamente baja y el equilibrio de las reacciones de fermentación se desplaza a la formación de productos más oxidados.

Las Archaea metanogénicas (Arqueas productoras de metano) están ampliamente distribuidas en la naturaleza en ambientes anóxicos; con mayor frecuencia se encuentran en ambientes terrestres en suelos, bosques y praderas, fondos de aguas continentales, en especial en pantanos y humedales y en los fondos marinos. Este último ambiente les genera competencia con microorganismos reductores de sulfatos por el acetato y el hidrógeno disponibles para su supervivencia, sustratos que pueden ser reemplazados por las metilaminas, excretadas por animales marinos <sup>(3)</sup>. En el suelo, agua y otros ambientes como el rumen, la disponibilidad de los sustratos depende de la acción metabólica de otros microorganismos que degradan compuestos orgánicos a acetato, formiato, metilamina, metanol y metilmercaptano entre otros. Estos son utilizados por las bacterias metanogénicas en la producción de metano.

Existen varios grupos de Archeae metanogénicas que se diferencian entre sí por su morfología; se pueden encontrar bacilos y cocos filamentosos, agrupados en cadenas, diplococos, tétradas y racimos. Pueden desarrollarse a temperaturas que van desde a 38°C a 75°C y su afinidad al Gram es variable <sup>(4)</sup>. Su metabolismo se caracteriza por integrar las vías biosintéticas y bioenergéticas para la producción de ATP. En condiciones de ausencia de hidrógeno, oxidan compuestos para la obtención de electrones <sup>(5)</sup>. Estas bacterias permiten ser empleadas en diferentes procesos biotecnológicos en sistemas anaerobios: como componente de biorreactores para descomposición de basura orgánica <sup>(6)</sup>, para la producción de gas metano a partir de estiércol de ganado (porcino y bovino) <sup>(7)</sup>.

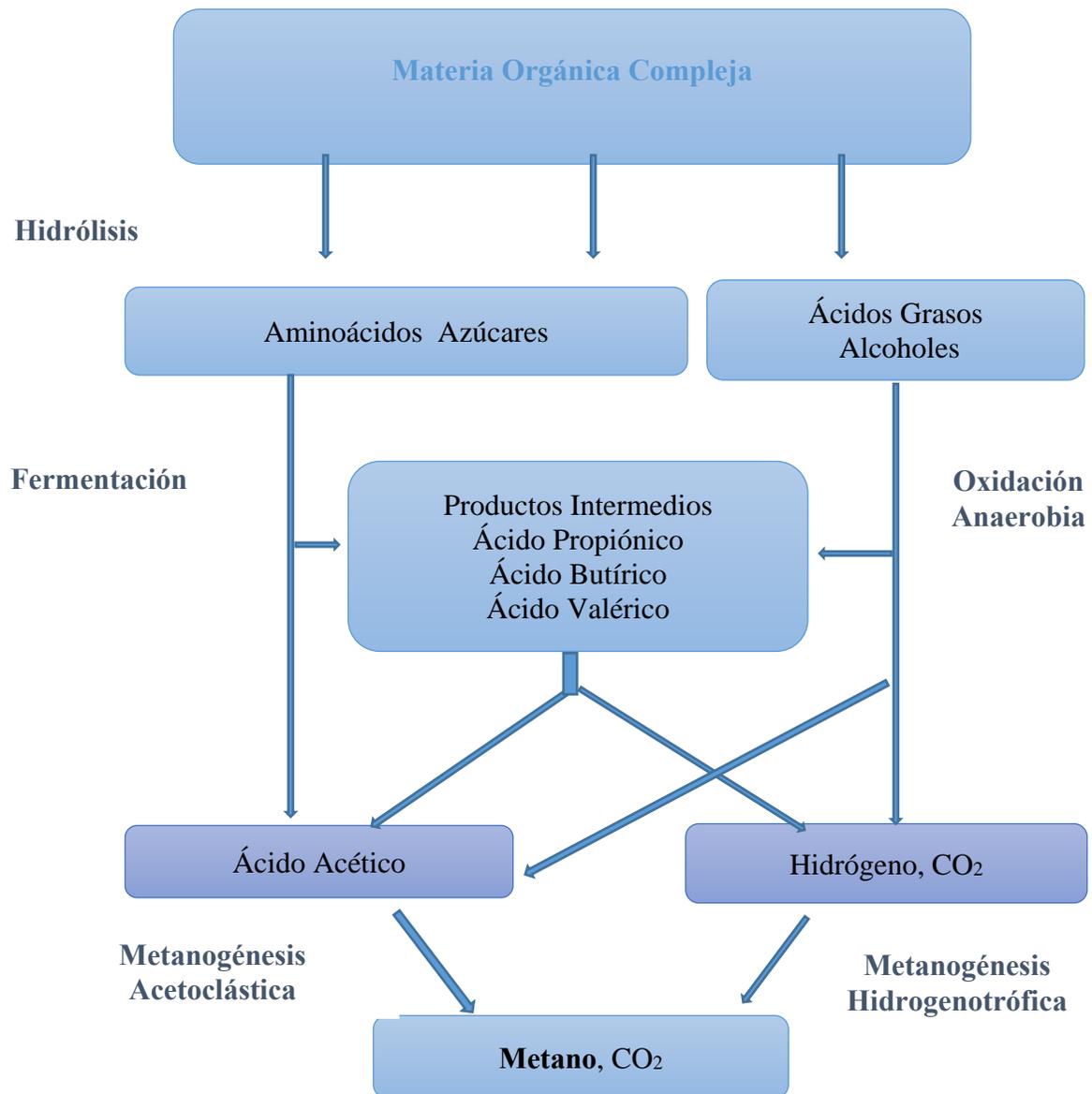


Figura 7 Rutas metabólicas para la producción de Metano por la vía anaerobia.

## 5.7.- Cogeneración

Las plantas de tratamiento de aguas residuales mediante proceso biológico de lodos activados, ya sean urbanas como industriales, tienen la característica de generar grandes cantidades de lodos primarios y secundarios. Estos lodos a través de un proceso de digestión anaerobia, son transformados en biogás y lodos residuales estabilizados, que tienen aplicación agrícola como mejoradores de suelo. El biogás, dependiendo del contenido de metano que posea, tiene un mayor o menor poder calorífico, que en cualquier caso es utilizado en un sistema de cogeneración.

En las plantas de tratamiento de aguas residuales, la energía producida en el proceso de cogeneración se utiliza para mantener constante la temperatura del digestor anaerobio (a 36 °C) y para calentar previamente los lodos digeridos antes del proceso de deshidratación y consecuentemente, aumentar la eficacia de esta operación.

La generación de energía eléctrica se realizará en una central integrada por 12 motogeneradores a biogás con capacidad de 2.7 MW cada uno. La central tendrá una capacidad total de 32.6 MW con una producción estimada anual de energía eléctrica de 200.5 GW y un consumo estimado anual de 90.2 millones de m<sup>3</sup> de biogás. Procedente de los biodigestores de la PTAR Atotonilco.



Figura 8. Sistema de cogeneración

## 6.- Materiales y Métodos

Reactor Anaerobio. El modelo de reactor construido consiste de un recipiente cilíndrico de PVC, de 60 cm de alto por 15.2 cm de diámetro. Ambos extremos están sellados herméticamente con dos tapas del mismo material, empotradas en dos coples de 9.2 cm de ancho, respectivamente. Cuenta con cinco perforaciones: entrada de lodo en la parte inferior, salida de lodo digerido a la altura de 43 cm, una salida para purgas en la parte inferior a la misma altura de la entrada, una salida de gas en la tapa superior y una perforación para el sensor de temperatura. Una vez sellado, se forró con aluminio repujado junto con un serpentín de cobre.



Figura 9. Biodigestor piloto

Control de Temperatura y pH. El reactor fue equipado con un serpentín de agua caliente para elevar la temperatura del contenido. Se le colocó una camisa de papel aluminio para conservar la temperatura. El agua provenía de un depósito dentro del que se colocó un calentador, una resistencia, que se encendía y apagaba automáticamente según se alcanzaba la temperatura requerida. Para la circulación del agua se empleó una bomba de 200 gph. La temperatura interna del reactor fue registrada por un sensor electrónico DS18B20, conectado al sistema de control. Junto con el sensor de temperatura se colocó un sensor de pH modelo 3550 a un conversor de salida digital pH/ORP, la cual tomó los datos y los envió a la tarjeta arduino para la colecta de datos en tiempo real directamente en el lodo.



Figura 10. pH y temperatura en tiempo real

Sistema de Agitación. Se utilizó un motor de alto torque FAULHABER MOTOREN 2342L01C R acoplado a una flecha con dos aspas para mantener la agitación a baja velocidad, (Figuras 11, 12, 13 y 14). Las aspas de ventiladores unidos a un tornillo de gusano se forraron con una manguera automotriz a presión para evitar la corrosión. La digestión se realizó en el reactor mezclando los lodos de forma homogénea, por el agitador cuyo eje está empotrado en el techo del recipiente.



Figuras 11, 12, 13 y 14. Sistema de movimiento del lodo

Alimentación del efluente y drenado. El reactor se diseñó con tres aberturas para lodo, una de entrada y dos de salida. La entrada se colocó en la parte superior del reactor y funcionará únicamente cuando el reactor sea de operación continua. El ingreso del lodo se realizaba de modalidad batch, La salida inferior funciono para el drenaje los excesos de lodo en la modalidad de mezclado completo.

Colecta de gas. La salida de gas se conecta a un recipiente de polipropileno de alta presión. El recipiente se le adaptó un sensor electrónico MQ-2, para detectar los diferentes tipos de gases generados por el reactor y el volumen aproximado (Figuras 16 y 17). Los gases detectados incluyen el metano, gas LP, i-butano, propano, alcohol, hidrogeno y humo. El gas continúa hacia una probeta graduada para respaldar los datos obtenidos del sensor por la medida de volumen de gas producida en la probeta (Fig. 22).



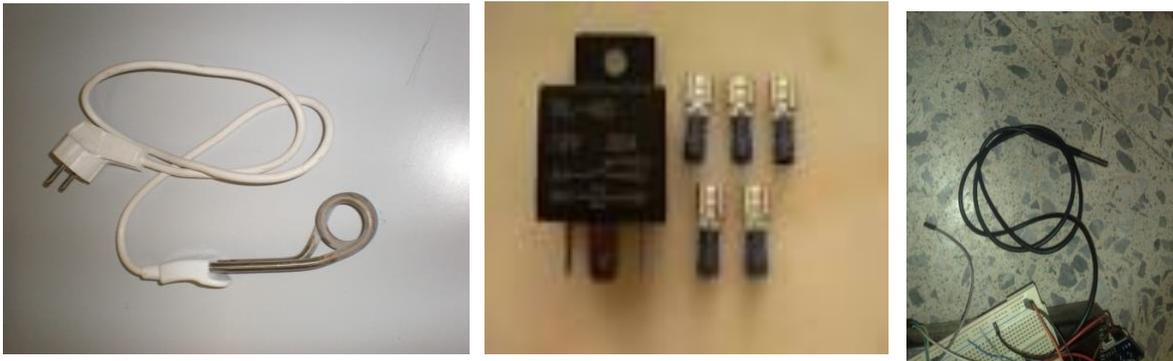
Figura 15. Sistema completo



Figuras 16 y 17. Sistema de registro del metano (MQ-2)

Sistema de Control. El reactor fue equipado con diversos dispositivos electrónicos para operar el sistema. El sensor de temperatura DS18B20, fue acoplado con la resistencia para calentar el agua, conectadas por un relevador. Cuando la temperatura del agua registrada por el sensor alcanzaba el valor programado, el relevador desconectaba la resistencia y cuando la temperatura disminuía la conectaba nuevamente, manteniendo constante la temperatura (Figuras 18, 19 y 20).

Los sensores de temperatura, gas, agitador y calentador se conectan al módulo de control. El módulo de control es un micro-procesador arduino, conectado a una



Figuras 18, 19 y 20. Resistencia de agua conectada al relevador controlado por el termómetro en el reactor. computadora PC. Con apoyo de un programa de interconexión mostrado en el anexo 2 con una interfaz a Excel y utilizando el ambiente modem de la PC se transmiten los datos a estaciones de cómputo remotas, obteniendo resultados en tiempo real (Fig. 21).

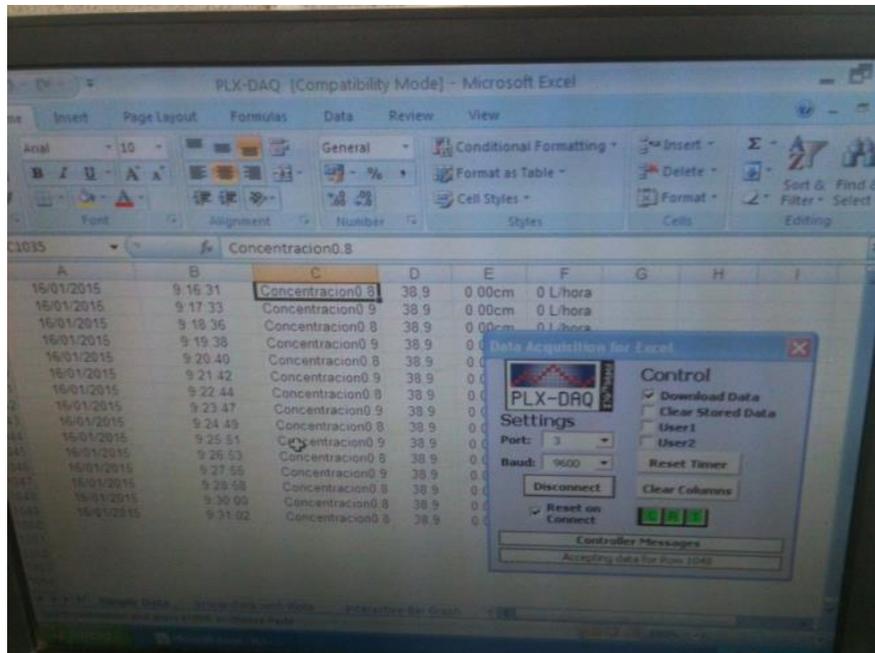


Figura 21. Adquisición de datos por plx-DAQ

El código de programación administrado por el compilador del procesador Arduino para el control e interfaz de obtención de datos en tiempo real se programó para registrar datos de presencia de gas metano, variación de temperatura y pH cada 5 minutos dentro del biodigestor presentado en el anexo 2.

## SISTEMA DE ENERGIA PARA FALLOS

Para reducir las fallas en la alimentación eléctrica de la planta piloto se instaló un No break UPS Zigor EBRO 400, con duración de almacenamiento de energía de hasta 2 horas, de esta forma aunque se perdieran las conexiones remotas, el equipo del biodigestor continuó trabajando adecuadamente y se conservaron las bitácoras obtenidas por el programa plx-DAQ. El programa de almacenamiento de datos plx-DAQ, es una extensión de la plataforma convencional de Excel, que trabaja en conjunto con la tarjeta arduino para el procesamiento de los datos en tiempo real.

## Determinaciones Analíticas

La PTAR Atonilco cuenta con una planta a escala piloto que generó los principales parámetros de calidad de agua y de diseño para la construcción de la instalación a escala industrial, realiza diversas determinaciones analíticas que fueron examinadas para estimar los cálculos de alimentación para el biodigestor experimenta.

La planta piloto cuenta con un kit analítico marca Hatch y un pequeño laboratorio para realizar las mediciones más importantes.

Para el biodigestor experimental se realizaron las siguientes determinaciones analíticas:

| Parámetro                     | Unidad | Procedimiento analítico | Influente | Reactor | Efluente |
|-------------------------------|--------|-------------------------|-----------|---------|----------|
| pH                            |        | Potenciómetro           |           | X       |          |
| Temperatura                   | °C     | Termómetro              |           | X       |          |
| Alcalinidad total             | mg/l   | Titulométrico           | X         |         |          |
| Sólidos totales               | mg/l   | Gravimétrico            | X         |         | X        |
| Sólidos volátiles             | mg/l   | Gravimétrico            | X         |         | X        |
| Sólidos suspendidos           | mg/l   | Gravimétrico            | X         |         | X        |
| Sólidos suspendidos volátiles | mg/l   | Gravimétrico            | X         |         | X        |
| Gas metano                    | ppm    | Sensor                  |           | X       | X        |
| N-NH3                         | mg/l   | Colorimétrico           |           | X       |          |

El pH fue monitoreado mediante un potenciómetro con adaptación al programa en arduino en tiempo real y osciló entre 6.8 y 7.2

La temperatura fue determinada por el sensor DS18B20 en tiempo real con ligeras oscilaciones para la temperatura ideal para las bacterias anaerobias definida en 39°C.

Las pruebas de alcalinidad fueron realizadas mediante el kit hach modelo AL-DT con rangos de 10-4,000 mg/l.

Los resultados de los Sólidos Totales, (ST) Sólidos Volátiles, (SV) Sólidos Suspendidos, (SS) y Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV) fueron obtenidos mediante la Norma Oficial Mexicana. Esta Norma se complementa con las Normas Oficiales Mexicanas siguientes:

DGN-AA-3-1975.- Método de Muestreo de Aguas Residuales.

DGN-AA-14-1975.- Método de Muestreo en Cuerpos Receptores Superficiales.

#### DEFINICIONES.

Para los efectos de esta Norma se establecen las siguientes definiciones:

Sólidos totales.

Es la suma de los sólidos en suspensión, sólidos disueltos y sólidos coloidales en agua.

Sólidos suspendidos totales.

Son aquellos sólidos constituidos por sólidos sedimentales, sólidos en suspensión y sólidos coloidales.

Sólidos sedimentales.

Son los materiales que se depositan en el fondo de un recipiente debido a la operación de sedimentación.

Sedimentación.

Es la operación por medio de la cual, las partículas sólidas suspendidas en un líquido, se asientan debido a la fuerza de la gravedad.

Sólidos en suspensión.

Son los sólidos dispersos en agua y cuyo tamaño de particular es mayor de 100 nm.

Sólidos disueltos.

Son las sustancias orgánicas e inorgánicas solubles presentes en agua.

Sólidos totales volátiles.

Es la cantidad de materia, capaz de volatilizarse por el efecto de la calcinación a 550°C en un tiempo de 15 a 20 minutos.

Sólidos suspendidos volátiles.

Son aquellos sólidos constituidos por sólidos sedimentales, sólidos en suspensión y sólidos coloidales, capaces de volatilizarse por el efecto de la calcinación a 550°C en un tiempo de 15 a 20 minutos.

#### FUNDAMENTO.

Los métodos se basan en la evaporación y calcinación de la muestra, en donde los residuos de una y otra operación sirven de base para el cálculo del contenido de sólidos.

#### MUESTREO

La muestra se extrae según sea el caso, como se indica en la Norma Oficial Mexicana, Método de Muestreo en Aguas Residuales. DGN-AA-3 en vigor, o bien, de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana, Método de Muestreo en Cuerpos Receptores Superficiales, DGN.AA.14 en vigor.

#### APARATOS Y EQUIPO.

Balanza analítica, con sensibilidad de 0.0001 g.

Cápsula de porcelana, de 200 ml de capacidad.

Mufla eléctrica capaz de mantener una temperatura de 550 (+-)25°C

Estufa con control de temperatura capaz de tener de 103°C a 105°C.

Equipo para evaporación previa (ya sea placa de calentamiento, baño maría, baño de arena, mantilla de calentamiento o cualquier otro medio de calentamiento adecuado).

Desecador con deshidratante adecuado.

Medio filtrante apropiado a cada tipo de muestra.

Bomba de vacío o eyector

Equipo usual de laboratorio.

#### PROCEDIMIENTO.

Para sólidos totales y sólidos totales volátiles.

En función de la cantidad de sólidos probables, se toma una cantidad de muestra que contenga como mínimo 25 mg de sólidos totales, generalmente, 100 ml de muestra es un volumen adecuado.

La muestra se transfiere a la cápsula que previamente ha sido puesta a peso constante a 550°C.

Se procede a secar la muestra en la estufa a 103-105°C hasta peso constante.

NOTA: Con el objeto de abatir el tiempo de la prueba, se recomienda una preevaporación, reduciendo a la muestra a un volumen mínimo tal que se eviten proyecciones o pérdidas de la misma. La muestra una vez preevaporada se introduce en la estufa y se lleva a sequedad hasta peso constante.

Se deja enfriar en desecador hasta temperatura ambiente y se pesa.

Expresión de resultados.

El contenido de sólidos totales, se calcula con la siguiente formula:

$$ST = \frac{(G1 - G)}{V} \times 1000$$

En donde:

ST = sólidos totales, en mg/l.

G1 = peso de la cápsula con el residuo, después de la evaporación en mg.

G = peso de la cápsula vacía, en mg.

V = volumen de muestra, en ml.

La cápsula conteniendo el residuo se introduce a la mufla a 550°C durante 15 a 20 minutos.

Para conocer el contenido de sólidos totales volátiles, procede de la manera siguiente.

Se saca la cápsula, se deja enfriar en desecador y se pesa.

El contenido de sólidos totales volátiles, se calcula con la siguiente expresión:

$$STV = \frac{(G1 - G2)}{V} \times 1000$$

En donde:

STV = sólidos totales volátiles, en mg/l.

G2 = peso de la cápsula con el residuo, después de la calcinación en mg.

## 7.-Resultados

### Biodigestor

El diseño final del biodigestor incluyó los siguientes elementos: Deposito de PVC de 7 l de volumen. Tapas removibles en ambos extremos. Perforaciones de alimentación para entrada de lodos, salida de los lodos de purga, salida de sobrenadantes, salida de gas y entrada de cables de dispositivos de medición de pH, Temperatura y Sensor de Gas; entrada para empotrado del agitador. El biodigestor fue rodeado por un serpentín de cobre por el que circulaba agua caliente para mantener una temperatura apropiada a las condiciones mesofílicas.

El Sistema de circulación del agua contenía un depósito con una resistencia eléctrica, una bomba peristáltica y un sensor de temperatura dentro del biodigestor y un dispositivo relevador que controlaba el encendido y apagado de la resistencia en función de la temperatura de operación seleccionada. En la tapa superior del biodigestor se empotró un sistema de agitación consistente en un motor, una flecha y dos juegos de aspas, que fueron programados a una velocidad definida para mantener el mezclado completo dentro del depósito de lodos en digestión.

Lodo de Inóculo.- Estos procedieron de la PTAR que la Comisión Estatal de Aguas y Saneamiento (CEAS) opera en la ciudad de Querétaro, Qro. El reactor fue alimentado con una mezcla de lodos de inóculo y lodos provenientes del sedimentador primario de la planta de tratamiento piloto, en una proporción de 25:75 % respectivamente.

Se destaca que la selección de los lodos del sedimentador primario obedeció a la mayor cantidad de materia orgánica soluble que las aguas crudas poseen, en contraste con los lodos del sedimentador secundario, que mayoritariamente son formados por materia orgánica particulada. En términos prácticos, resulta más fácil digerir materia orgánica soluble que la biomasa bacteriana particulada de los lodos secundarios. Lo anterior, con el objeto de acelerar la estabilización del biodigestor.

### Arranque del Biodigestor

Los valores aplicados al reactor fueron los siguientes:

T°: 37° (+/- 0.6°C/d)

Carga orgánica inicial: 0.16 kg SSV/m<sup>3</sup>-d.

pH: 6.8 - 7.2.

Alcalinidad: 1500 - 3000 mg/l

Acidos grasos volátiles (AGVs)= 50 – 300 mg/l

Relación AGV/Alcalinidad dentro del digestor: 0.1 - 0.2

N-NH<sub>3</sub>= 50 – 1000 mg/l

Concentración de SV del lodo de alimentación = 2130 mg/l

Carga orgánica: 1.6 y 3.2 kg SV/m<sup>3</sup>-d

Cálculo del volumen de lodo primario de alimentación para el biodigestor:

Volumen del Reactor: 7.0 litros

Carga orgánica establecida: 0.16 kg SV/m<sup>3</sup>-d

Se agregaron 1000 mg/l de alcalinidad (CaCO<sub>3</sub>)

Volumen de Alimentación de lodos primarios: = 7.0 l volumen del digestor \* 0.16 kg SV/m<sup>3</sup>-d \* 1 m<sup>3</sup>/1000 l \* 1000 000 mg/1.0 kg \* 1.0 l/2130 mg/l = 0.52 l = 525.8 ml

Cálculos para la adición de alcalinidad:

Peso de Reactivo = 7.0 l x 1000 mg/l CaCO<sub>3</sub> \* 1 mol CaCO<sub>3</sub>/100 g \* 1 mol Ca(OH)<sub>2</sub>/1mol CaCO<sub>3</sub> \* 74 g/1 mol Ca(OH)<sub>2</sub> x 100 g producto comercial/90 g producto puro x 1 g/1000 mg = 5.75 g Ca(OH)<sub>2</sub>

El Ca(OH)<sub>2</sub> se diluyó en agua destilada para añadirlo al biodigestor.

La operación del proceso fue tipo batch en virtud que el flujo de alimentación era demasiado pequeño.

| Tabla 4. Resultados de alimentacion |                          |           |          |          |
|-------------------------------------|--------------------------|-----------|----------|----------|
| Determinaciones                     | Alimentación del reactor |           |          |          |
|                                     | 470 ml                   |           | 130 ml   | 230ml    |
|                                     | Lodos primarios          | Digestor  | Digestor | Digestor |
| pH                                  |                          | 6.8 – 7.3 |          |          |
| ST                                  | 3,840 mg/l               | 30,420    | 28,600   | 33,530   |
| SV                                  | 2,360 mg/l               | 21,400    | 19,760   | 22,650   |

## Producción de Gas



Figura 22. Volumen desplazado

Los datos de la presencia de gas detectados por el sensor MQ2, fueron compilados por el procesador arduino y remitidos a un archivo Excel, Los valores de 1.0 corresponden a la presencia de metano, de acuerdo a las especificaciones del sensor, mientras que los relativos a 8.0 correspondieron al dióxido de carbono.

El biodigestor se reinició por segunda vez, inoculando nuevos lodos de la PTAR de Querétaro y se elevó la temperatura hasta 39°C con un rango de más menos 1°C, un pH de 7.8. La temperatura antes de ingresar al reactor fue de 20.3°C, Sólidos Totales (ST) = 31,940 y Sólidos Volátiles (SV) = 24,140

La producción de gas comenzó a las 72 horas con la ayuda del inóculo, lo que demostró la viabilidad del lodo semilla.

La alimentación se realizó cada 24 horas y en cada caso hubo de analizarse las características de los lodos para la alimentación. Los datos fueron: SSV=8,860 SST=17,420. El volumen de lodo primario de alimentación fue de: 126.41 ml.

El lodo recién alimentado fue rápidamente metabolizado, lo que se reflejó en la producción de gas que alcanzó a desplazar un volumen de 225 ml en la probeta.

Los valores obtenidos por el sensor en el momento de la alimentación (marcado con la flecha) se muestran en la Tabla 5.

:

| Fecha             | Hora            | Concentración de Gas (ppm) | Temperatura °C |
|-------------------|-----------------|----------------------------|----------------|
| 16/01/2015        | 10:40:30        | 0.6                        | 39.0           |
| 16/01/2015        | 10:41:32        | 0.6                        | 38,9           |
| 16/01/2015        | 10:42:34        | 0.6                        | 39.0           |
| 16/01/2015        | 10:43:37        | 0.6                        | 39.0           |
| 16/01/2015        | 10:44:39        | 0.6                        | 39.0           |
| 16/01/2015        | 10:45:41        | 0.6                        | 39.0←          |
| 16/01/2015        | 10:46:43        | 2.0                        | 39.0           |
| 16/01/2015        | 10:47:45        | 2.3                        | 38,8           |
| <b>16/01/2015</b> | <b>10:48:48</b> | <b>2.4</b>                 | <b>38,7</b>    |
| 16/01/2015        | 10:49:50        | 2.3                        | 38,6           |
| 16/01/2015        | 10:50:52        | 2.3                        | 38,7           |
| 16/01/2015        | 10:51:54        | 2.2                        | 38,7           |
| 16/01/2015        | 10:52:56        | 2.3                        | 38,7           |
| 16/01/2015        | 10:53:59        | 2.2                        | 38,7           |
| 16/01/2015        | 10:55:01        | 2.3                        | 38,7           |
| 16/01/2015        | 11:29:13        | 1.7                        | 39,3           |
| 16/01/2015        | 11:30:15        | 1.7                        | 39,3           |
| 16/01/2015        | 11:31:17        | 1.7                        | 39,3           |
| 16/01/2015        | 11:32:19        | 1.6                        | 39,4           |
| 16/01/2015        | 11:33:21        | 1.6                        | 39,4           |
| 16/01/2015        | 12:03:26        | 1.3                        | 39,5           |
| 16/01/2015        | 12:04:28        | 1.2                        | 39,5           |
| 16/01/2015        | 12:05:30        | 1.2                        | 39,5           |
| 16/01/2015        | 12:06:32        | 1.2                        | 39,5           |
| 16/01/2015        | 12:07:34        | 1.2                        | 39,5           |
| 16/01/2015        | 12:08:37        | 1.2                        | 39,5           |
| 16/01/2015        | 12:09:39        | 1.2                        | 39,5           |

Tabla 5. Producción de gas del reactor anaerobio de prueba.  
Datos compilados del programa y reactor en Excel.

## 8.-Análisis de Resultados

El proceso inició con el arranque del reactor. Para ello, se inoculó con lodo semilla procedente de la PTAR de Querétaro el domingo 11 de noviembre de 2014. Se elevó la temperatura hasta 37°C con un rango de más menos 1.0 °C y un pH de 7.7. La temperatura antes de ingresar al reactor fue de 20.3 °C, los Sólidos Totales (SST) de 31,940 mg/l y Sólidos Suspendedos Volátiles (SSV) de 24,140 mg/l.

Una vez estabilizado el reactor inició el registro de la presencia de gas. Se analizaron los lodos de alimentación y los datos fueron: SSV, 8,860 mg/l; SST, 17,420 mg/l.

Por razones logísticas el reactor hubo de reiniciarse al menos cuatro veces, para lo cual fue necesario repetir la siembra cada vez. El inóculo mostró una buena capacidad de estabilización, al cabo de 96 horas se iniciaba la formación de gas metano, con una producción intermitente que oscilaban de 0,9 a 2,0 ppm/2 min.

Las pruebas de tratabilidad se realizaron con una carga orgánica constante, medida en términos de sólidos suspendidos volátiles, de  $k = 0,16 \text{ kg SSV/m}^3\cdot\text{d}$  y Un Volumen constante de 7,0 l.

Los lodos primarios de la planta se colectaban y concentraban periódicamente, por lo que las concentraciones de SSV variaban en cada proceso de alimentación. Para corregir las variaciones en concentración se aplicó la siguiente ecuación:

$$V_{\text{Alim.}} = (\text{Volumen de lodos en el reactor}) [ \text{l} ] * (\text{Carga orgánica alimentada}) [\text{kg SSV/m}^3\cdot\text{d}] * (1.0 / 1000) [\text{m}^3 / \text{l}] * (106) [\text{mg/kg}] / (\text{Concentración de SSV en el lodos de alimentación,}) [\text{mg/l}]$$

La primera alimentación al arranque registró una concentración de SSV de 2,130 [mg/l], por lo que el volumen de lodos nuevos para obtener la carga presupuesta fue:

$$V_{\text{alim}} = [(7.0 \text{ l}) * (0.16 \text{ kg SSV/m}^3 \cdot \text{d}) * (1,0 \text{ m}^3/10^3 \text{ l}) * (10^6 \text{ mg/kg})]/(2130 \text{ mg SSV /l})$$

$$V_{\text{alim}} = 0.525 \text{ [ l / d ]}$$

$$V_{\text{alim}} = 525,8 \text{ [ ml / d ]}$$

La siguiente alimentación registró una concentración de SSV de 8 860 mg/l, para lo cual se aplicó una alimentación de lodos primarios concentrados de:

$$V_{\text{alim}} = [(7.0 \text{ l}) * (0.16 \text{ kg SSV/m}^3 \cdot \text{d}) * (1.0 \text{ m}^3/10^3 \text{ l}) * (10^6 \text{ mg/kg})]/(8 860 \text{ mg SSV /l})$$

$$V_{\text{alim}} = 0.126 \text{ [ l / d ]}$$

$$V_{\text{alim}} = 126.41 \text{ [ ml / d ]}$$

Se alimentó el reactor con los 126.41 ml y la probeta observó un desplazamiento de líquido de 225 ml. El sensor de gases registró la presencia de gas combustible a una tasa que varió de 2.4 a 1,7 ml/2 min. (Tabla 3).

Lo anterior sugiere una conversión aproximada de materia orgánica a gas combustible del orden del 25% en un periodo de 24 horas.

## 9.- Discusión

La digestión anaerobia es un proceso empleado en la estabilización de lodos procedentes de plantas de tratamiento de aguas residuales. Consiste en la degradación de la materia orgánica en ausencia de oxígeno molecular, teniendo como resultado biogás y un efluente con menor contenido de materia orgánica degradable <sup>(5)</sup>.

El arranque del sistema anaerobio consistió en la inoculación de lodo semilla procedente de la planta de tratamiento anaerobio de la ciudad de Querétaro. Posteriormente se seleccionó un valor inicial de carga orgánica de 0.16 kg SV/m<sup>3</sup>-d. Lo anterior permitió la degradabilidad del lodo nuevo. Todo el proceso se realizó bajo condiciones de operación de volumen constante, reactor completamente mezclado, temperatura mesofílica y operación batch <sup>(6)</sup>.

El reactor de prueba, inició con un volumen de lodos de 7.0 litros, con un inóculo procedentes de la PTAR de Querétaro de características termófilas (45°C). Se determinaron los parámetros iniciales para conocer las características del lodo, de lo que destaca la concentración de Sólidos Totales de 31 940 mg/l y Sólidos Suspendidos Volátiles de 24 140 mg/l. Los lodos de pruebas, fueron lodos primarios generados por la planta piloto de la PTAR Atotonilco la cual registró concentración de sólidos suspendidos volátiles con un rango de valores de 2 300 mg/l y 8 860 mg/l, respectivamente y se adaptó a las características mesofílica (39°C), posteriormente la alimentación del reactor se realizó dos veces por semana, martes y viernes, conforme a las lecturas de SSV. No fue posible cambiar el proceso batch a continuo, debido al volumen relativamente pequeño que no permitió una tasa de alimentación mínima.

## 10.- Conclusiones

1. Las pruebas de tratabilidad de lodos primarios procedentes de la planta piloto de la PTAR de Atotonilco utilizando un digestor anaerobio, tipo batch, completamente mezclado, con régimen térmico mesofílico confirmaron que el proceso de estabilización anaerobia es viable técnicamente.
2. El reactor fue arrancado con inóculos de lodo semilla procedente del digestor de la planta de tratamiento de la CONAGUA de Querétaro. Se utilizaron volúmenes de 7.0 litros en cada reinicio. La estabilización del reactor se alcanzó a las 72 horas y a partir de ese momento se inició la alimentación con lodo fresco.
3. El reactor operó a una carga constante de  $0,16 \text{ kg/SSV/m}^3\cdot\text{d}$ . La variable de control fue la determinación de sólidos suspendidos volátiles y la explicativa producción de gas.
4. Dado el carácter batch del reactor no fue posible determinar las concentraciones de SSV a la salida. Durante todo el proceso no se realizaron purgas de lodos. La producción de gas fue detectada utilizando un sensor electrónico de metano y después medido volumétricamente en una probeta graduada por desplazamiento hidráulico.
5. Dadas las dimensiones del reactor y el diámetro de la entrada, se dificulta el bombeo continuo de lodos, cuya densidad tiende a ocluir la bomba, obstaculizando el flujo de alimentación, por ello no se realizaron pruebas bajo la modalidad continua.

## 11.-Recomendaciones

En virtud de que la naturaleza de lodos primarios generados en la planta piloto de la PTAR Atotonilco permiten su digestión por la vía anaerobia con producción de biogás, se recomienda continuar con el escalamiento de las pruebas para tornarlo continuo.

Diseñar un modelo piloto de un m<sup>3</sup> o más de volumen, mantener las condiciones mesofílicas y de agitación continua. Acoplar una bomba de lodos con capacidad suficiente para ingresar los lodos. El reactor debe ser alimentado por la parte superior, con dos salidas, una superior para el fluente digerido y una inferior para purgas de mantenimiento. La producción de gas debe remitirse a un rotámetro para medir el volumen generado, posteriormente a un lavador de gas que remueva el contenido de compuestos azufrados y finalmente enviado a compresión para su empleo.

Incluir sistemas de control remoto con sensores en el interior del reactor para determinar los cambios de temperatura, pH y DQO con el propósito de intervenir oportunamente cuando haya amenazas de desestabilización.

Realizar pruebas de aumento en la carga orgánica para definir el nivel máximo operable bajo las condiciones de Tiempo de Retención Hidráulica constante.

## 12.- Referencias

- 1.-Ahring B., Sandberg M., Angelidaki I., (1994). Volatile fatty acids as indicators of process imbalance in anaerobic digestors, Springer-Verlag, Denmark, pp 559-565
- 2.-Avendaño, (2010). Diseño y construcción de un digestor anaerobio de flujo pistón que trate los residuos generados en una explotación ganadera de la localidad de loja, Ecuador, empleando tecnologías apropiadas, Universidad Politécnica de Madrid, España.
- 3.-Castro-González (1997). Tratamiento anaerobio de lodos de purga de una planta de lodos activados. Tec. Cien. IMIQ 12-1-2 (Mex) pp. 10.25
- 4.-Cubero G., (2011). Evaluación de un sistema de digestión anaerobia para estabilización de los lodos provenientes de las aguas residuales, Corporación PIPASA, Costa Rica.
5. Conagua (2012), Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Atotonilco. Contrato No. GAPDS-GFOO-DFMEXHGO-10-001-LP1. Memoria Documental. (Mex.) 106 pp
- 5.-Del Villar García A., (2010). Guía de tratamientos avanzados de aguas residuales urbanas, Grupo E1 de Economía Ambiental de la Universidad de Alcalá, España.
- 6.-De la Madrid Cordero E., (2008). Agua y agricultura en México y el mundo, Financiera Rural, México.
- 7.-Flores, B., J. et al. (2014). Planta de tratamiento de Aguas Residuales Atotonilco. La sustentabilidad de México. XXIV Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Aidis. Monterrey 2-6 de noviembre. (Mex.) 9 pp.
- 8.-Hilbert, (2009). Manual para la producción de biogás, Instituto de Ingeniería Rural, Argentina.
- 9.-Instituto Nacional de Estadística, (2005). II Censo de Población y vivienda Geografía e Informática (INEGI), México.
- 10.-Kartik R. (2011). Impacts of the use of magnesia versus iron on mesophilic anaerobic digestion and odors in wastewater. Thesis Mast. (USA) pp. 88.

- 11.-Leal Ascencio M., (2005). Tecnologías convencionales de tratamiento de agua y sus limitaciones Instituto de Tecnología del agua, México.
- 12.-López Figueroa P., (1997). El agua: Tecnología de su distribución y uso, Promotora General de Estudios, S.A, España.
- 13.-Luege Tamargo J., (2007). Diseño de plantas potabilizadoras tipo de tecnología simplificada, CONAGUA, México.
- 14.-Luege Tamargo J., (2008). Interrelaciones agua y salud pública de México, Organización Meteorológica Mundial, México.
- 15.-Mamais, D., Pitt, P.A., Cheng, Y.W., Loiacono, J., Jenkins, D. (1994). Determination of ferric chloride dose to control struvite precipitation in anaerobic sludge digesters. Wat. Environ. Res, United States.
- 16.-Marín Ocampo A., (2013). Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de aguas residuales con el proceso de lodos activados, Comisión Estatal del Agua de Jalisco, (Méx.).
- 17.-Martí, (2006). Phosphorus precipitation in anaerobic digestion process, Boca Raton Florida, Estados Unidos.
- 18.-Martínez G., (2003). Formación de depósitos de estruvita en EDARs, Universidad de la Rioja, España.
- 19.-Márquez F., (2005). Estudio del tratamiento de lodos provenientes de pisciculturas mediante un sistema de digestión anaerobio, Universidad Católica de Temuco, Chile.
- 20.-Mata et al., (2000). Anaerobic digestion of organic solid waste an overview of research achievement and perspectives, Bioresource technology, Estados Unidos.
- 21.-Metcalf & Eddy, (2003). Wastewater Engineering: Treatment and Reuse McGraw-Hill, Estados Unidos.
- 22.-Mynor Romero, Universidad Rafael Landívar, (Boletín Electrónico No. 08) tratamientos utilizados en potabilización de agua, España.
- 23.-Muñoz Cruz A., (2008). Caracterización y tratamiento de aguas residuales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México.
- 24.-Nicholas P. Sisto, Tecnológico de Monterrey, (2010). Manejo sustentable del uso de agua y crecimiento urbano, México.

- 25.-Noyola, (1990). Tratamiento anaerobio de aguas residuales: una experiencia de adaptación de tecnología en México. En: Memorias de las Conferencias sobre: Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales en América Latina Ciudad Universitaria, México.
- 26.-Puente González A., (2001). La agricultura de México antes y después de las reformas económicas de los noventas. Un análisis nacional y regional en el distrito de riego "rio Yaqui", Research Scholar, México.
- 27.-Puhakka, J.A., et al. (1988). Effect of temperature on anaerobic digestion of pulp and paper industry wastewater sludges. Wat. Sci. Tech. Vol. 20 No. 1 (USA) pp. 193-201.
- 28.-Raport, J. et al. (2008). Current Anaerobic Digestion Technologies Used for Treatment of Municipal Organic Solid Waste. California Integrated Waste Management Board. (USA) 90 pp.
- 29.-Rice E., Baird R., Eaton A., Clesceri L., (2012). Standard Methods for the examination of water and wastewater, APHA, United States.
- 30.-Svetlana, O. et al. (2011). The effect of iron salt on anaerobic digestion and phosphate release to sludge liquor. Sci. Future of Lithuania. 3 (5) (Lit) pp. 123-126.
- 31.-Tavares *et al.*, (2002). Parámetros operacionales UASB tratando liquido percolado de desechos domésticos, Memorias del VI simposio Italo Brasileiro de ingeniería sanitaria y ambiental, Brasil.

## ANEXO 1

### Componentes del BIO-DIGESTOR

- 1.- Tubo de pvc de 60 cm de alto por 15.2 cm de diámetro, con sus coples y tapas
- 2.- Espigas npt de ½"
- 3.- Manguera automotriz para recubrimiento de metales
- 4.- Cinta teflón
- 5.- Mangueras para entradas y salidas npt
- 6.- 8 mts de tubo de cobre
- 7.- Cemento para pvc
- 8.- Aspas para agitación
- 9.- Tornillo de gusano de 80 cm de largo
- 10.- Tuercas de seguridad
- 11.- Probeta de 250 mL
- 12.- Filtro de agua de alto rendimiento
- 13.- Aluminio para repujado
- 14.- Envase de polipropileno de altos psi's

### CONTROL

- 1.- Computadora con procesador Pentium 4 o superior, monitor, mouse, teclado
- 2.- Motor de alto torque FAULHABER MOTOREN 2342L01C R
- 3.- Relevadores de 12v
- 4.- Tarjeta Arduino
- 5.- Cables
- 6.- Sensor de temperatura DS18B20
- 7.- 2 Sensores MQ-2
- 8.- Caja de protección
- 9.- No break UPS Zigor EBRO 400
- 10.- Sensor de pH 3550 para Arduino
- 11.- Tarjeta PH/ORP
- 12.- Cable cruzado de red

### SOFTWARE

- 1.- Compilador Arduino
- 2.- PLX-DAQ
- 3.- Excel
- 4.- Teamweaver
- 5.- Windows xp

## ANEXO 2

### PROGRAMA DEL CODIGO ARDUINO Y CONEXIONES

```
// TEMPERATURA DS18B20
// GND -> GND Negro          VCC -> 5V Rojo          DQ -> D12 Blanco
// MOTOR
```

```

// 0V - 5V -> D9 Naranja      GND -> GND Negro      0V - 5V -> D11
BcoCafe
// GASES MQ-2 ENTRADA
// VCC -> 5V Rojo      GND -> GND Negro      S -> A0 Cafe
// GASES MQ-2 SALIDA
// VCC -> 5V Rojo      GND -> GND Negro      S -> A2 Cafe
// PH POTENCIOMETRO
// VCC -> 5V Blanco      GND -> GND Verde      S -> A1 Amarillo
// CALEFACTOR
// Control -> D7 Blanco Verde      GND -> GND Verde
// SONAR
// VCC -> 5V LARGO      GND -> GND
// PASO GAS
// VCC -> VCC      GND -> GND      RPM -> D2
// DISTANCIA
// VCC -> VCC      GND -> GND      TRG -> D4
ECHO -> D5
#include <OneWire.h>
#include <Time.h>
int val=0;          //Valor
int ROW=0;          //Renglon
int LABEL=1;        //Etiqueta
int motorpin=9;     //Pin motor
int motorpin1=11;
int motorvolt=255; //Velocidad del motor
int motorvolt1=255;
int sensorpinT=6;  //pin temperatura
OneWire ds(sensorpinT);
int sensorpinCE=analogRead(A0); //pin concentracion gas ENTRADA
int sensorpinCS=analogRead(A2); //pin concentracion gas SALIDA
int sensorpinPH=analogRead(A1); //pin ph
int sensorpinU = 12;
int cm;
int ctrlTemp=7;    //pin Control de Temperatura
int tiempoCtrl=1;
float volumen=0;   //modificar pulso para ph
float volumenS=0; //volumen salida
unsigned long pulso; //ultrasonico variable para medir el pulso
float distancia;  //distancia
int SensorpinDstnc = 5; //pin distancia
int PulsopinDstnc=4; //pin pulso
volatile int Vueltavent; //RPM variable conteo de vueltas
int Calc;
int SensorpinVG = 2; //pin sensor rpm
void setup(void)
{ pinMode(motorpin,OUTPUT); //motor salida controlada
  pinMode(motorpin1,OUTPUT);

```

```

pinMode(ctrlTemp,OUTPUT);           //Calefactor salida controlada
pinMode(SensorpinVG, INPUT);        //pin RPM
attachInterrupt(0, rpm, RISING);     //interrupcion y llamada rpm
Serial.begin(9600);
Serial.println("LABEL,Fecha,Hora,Gas,Temp,Dist,L/min"); //PARA EXCEL
}
void loop(void)
{ Serial.print("DATA,DATE,TIME ,");
  analogWrite(motorpin, motorvolt); //motor
  analogWrite(motorpin1, motorvolt1);
  sensorpinCE=analogRead(A0);       //Detector de Gas ENTRADA
  sensorpinCS=analogRead(A2);       //Detector de Gas SALIDA
  /*long duration, cm;               //Sonar
  pinMode(sensorpinU, OUTPUT);
  digitalWrite(sensorpinU, LOW);
  delayMicroseconds(2);
  digitalWrite(sensorpinU, HIGH);
  delayMicroseconds(5);
  digitalWrite(sensorpinU, LOW);
  pinMode(sensorpinU, INPUT);
  duration = pulseIn(sensorpinU, HIGH);
  cm = (duration)/29/2;
  Serial.print(", Deteccion movimiento a ");
  Serial.print(cm);
  Serial.print(" cm, ");
  */
  volumen=(float)sensorpinCE/1024*5.0; //concentraciones ENTRADA
  volumen=volumen-2.0;
  if(volumen<0)
  { volumen=0;
  }
  Serial.print("Concentracion");
  Serial.print(volumen,1);
  Serial.print(",");
  if(volumenS<3.1 && volumenS>2.9)
  { Serial.print(" **Gas LP ** "); }
  if(volumenS<2.1 && volumenS >1.8)
  { Serial.print(" **Humo ** ");
  }

  /* volumenS=(float)sensorpinCS/1024*5.0; //concentraciones SALIDA
  volumenS=volumenS-2.0;
  if(volumenS<0)
  { volumenS=0;
  }
  Serial.print("Concentracion ");
  Serial.print(volumenS,1);

```

```

Serial.print(",");
if(volumenS<3.1 && volumenS>2.9)
{ Serial.print(" **Gas LP ** "); }
if(volumenS<2.1 && volumenS >1.8)
{ Serial.print(" **Humo ** "); } */
/*float phl;                //ph
float phr;
sensorpinPH=analogRead(A1);
phl=(float)sensorpinPH;    //para temp 25C
phr=0.0178*phl-6.889;
// phr= 7-((2.5-(phl/200))/(0.257179+(0.000941468*temperatura))); /grados
centigrados
if( phr > 0.0 )
{ Serial.print("PH ");
  Serial.print(phr,1);
}
else
{ Serial.print("PH desconectado");
}
Serial.print(",");
*/
float temp=getTemp();      //temperatura
Serial.print(temp,1);
Serial.print(",");
if(temp < 39)              //Calefactor
{ if(tiempoCtrl % 2 == 0)
  { analogWrite(ctrlTemp,255);
  }
  else
  { analogWrite(ctrlTemp,0);
  }
  tiempoCtrl=tiempoCtrl+1;
}
else
{ analogWrite(ctrlTemp,0);
}
pinMode(PulsopinDstnc, OUTPUT);    //ultrasonico pin salida
digitalWrite(PulsopinDstnc, HIGH); //activamos
delayMicroseconds(10);             //pausa 10 microsegundos
digitalWrite(PulsopinDstnc, LOW);   //desactivamos
pinMode(SensorpinDstnc, INPUT);     //pin entrada
pulso = pulseIn(SensorpinDstnc, HIGH); //pulso del sensor
distancia = ((float(pulso/1000.0))*34.32)/2;
Serial.print(distancia);
Serial.print("cm");
Serial.print(",");
Vueltavent = 0;                    //inicializar variable

```

```

    delay (1000);                //espera 1 seg para movimiento
    Calc = (Vueltavent * 60 / 5.5);    //(frecuencia x 60) / 5.5Q, = flujo promedio
L/hora
    Serial.print (Calc, DEC);        //Prints the number calculated above
    Serial.print (" L/hora\r\n");
    Serial.println(" ");           //Salto
    delay(60000);
}
void rpm ()                      //RPM valvula
{ Vueltavent++;                  //cambio en el voltaje RPM
}
float getTemp()                  //Tomar temperatura
{ byte data[12];
  byte addr[8];
  if ( !ds.search(addr))
  { ds.reset_search();
    return -1000;
  }
  if( OneWire::crc8(addr,7) != addr[7])
  { Serial.println("CRC invalido");
    return -1000;
  }
  if( addr[0] != 0x10 && addr[0] != 0x28)
  { Serial.println("Dispositivo no reconocido");
    return -1000;
  }
  ds.reset();
  ds.select(addr);
  ds.write(0x44,1);
  byte present=ds.reset();
  ds.select(addr);
  ds.write(0xBE);
  for (int i=0; i<9; i++)
  { data[i]=ds.read();
  }
  ds.reset_search();
  byte MSB =data[1];
  byte LSB =data[0];
  float TRead= ((MSB<<8) | LSB);
  float Temperature =TRead /16;
  return Temperature;
}

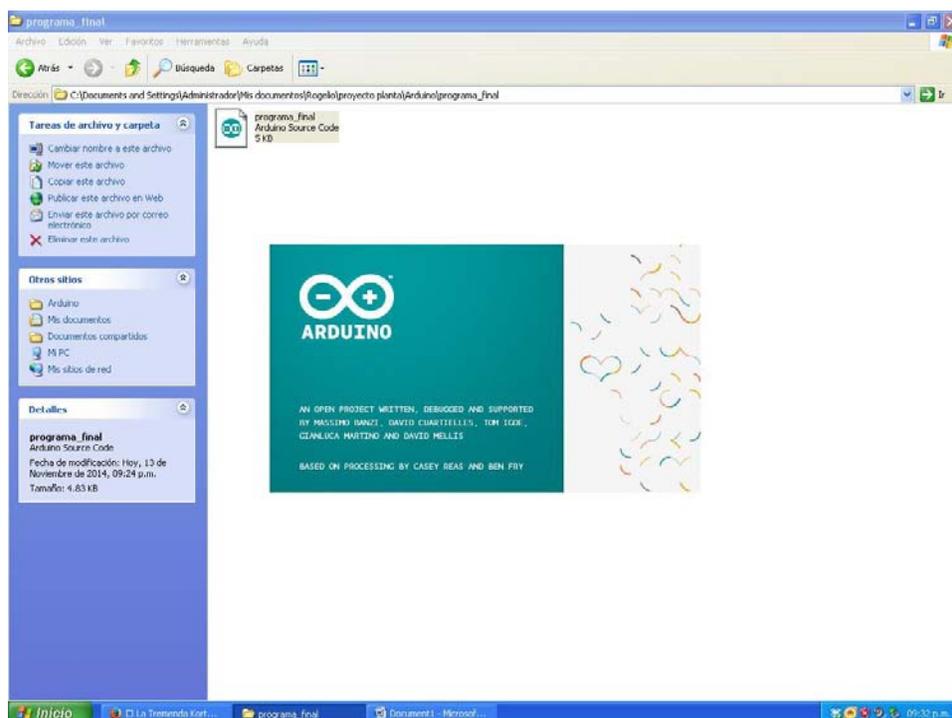
```

## ANEXO 3

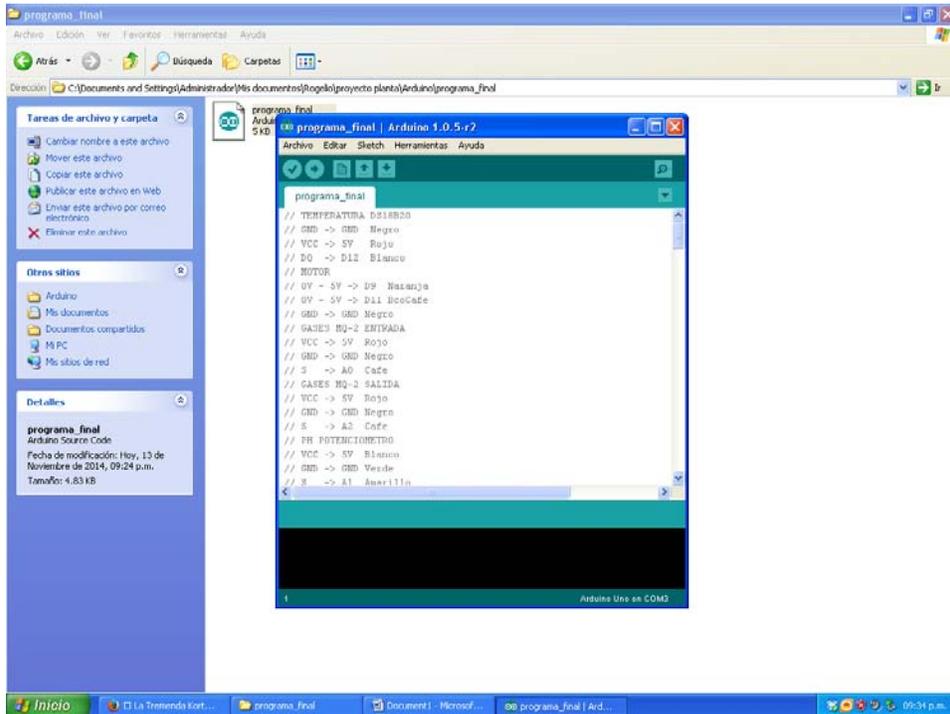
### Control del Biodigestor

La computadora Pentium 4 con sistema operativo Windows xp, fue conectada al abastecimiento de red proporcionado por la PTAR, por medio de cable UDP categoría 5 con conectores RJ-45 para el rendimiento del internet a distancia, mediante las siguientes instrucciones para el programa de control remoto.

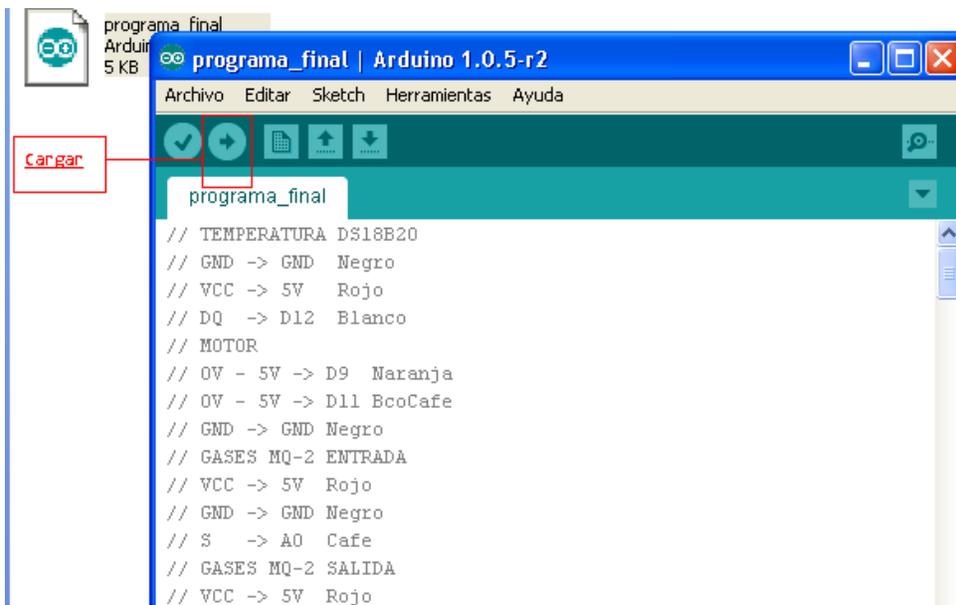
- 1.- Prender la computadora (al momento en que el botón de encendido es presionado comenzarán a funcionar todos los componentes del reactor, el agitador, sensores, control de temperatura, etc.)
- 2.- Abrir el compilador
- 3.-Mandara una pantalla de esta forma:



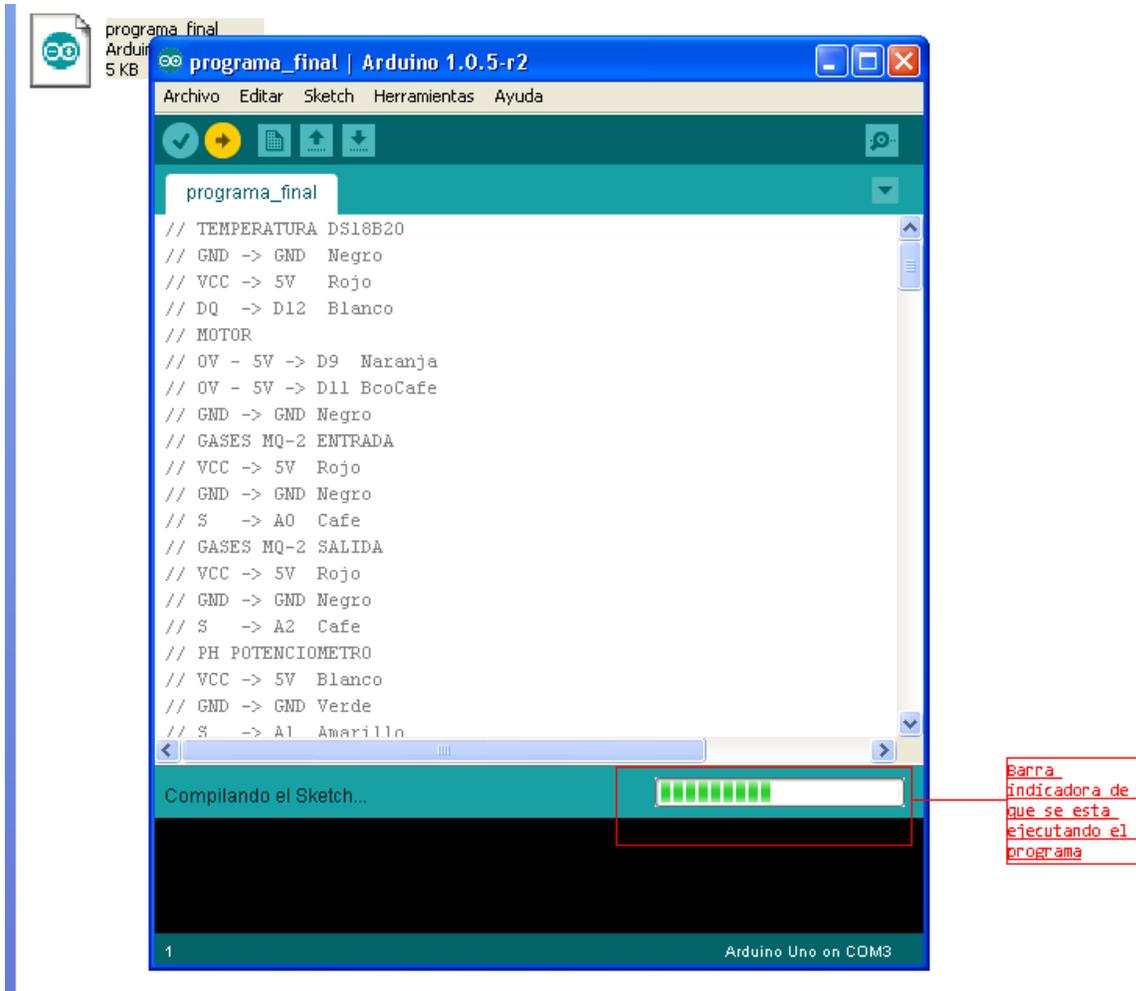
#### 4.- Ejecutar el programa



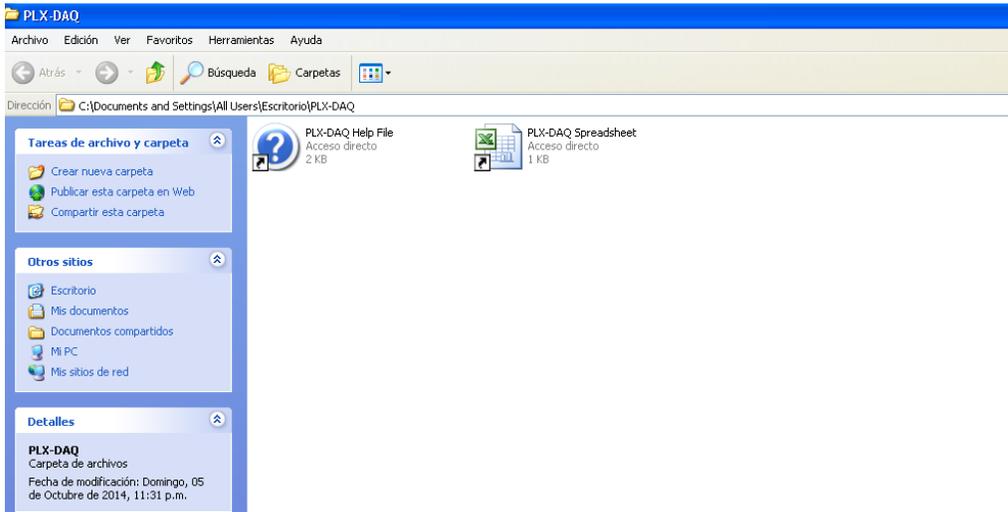
#### 5.- Presionar la orden en el icono cargar:



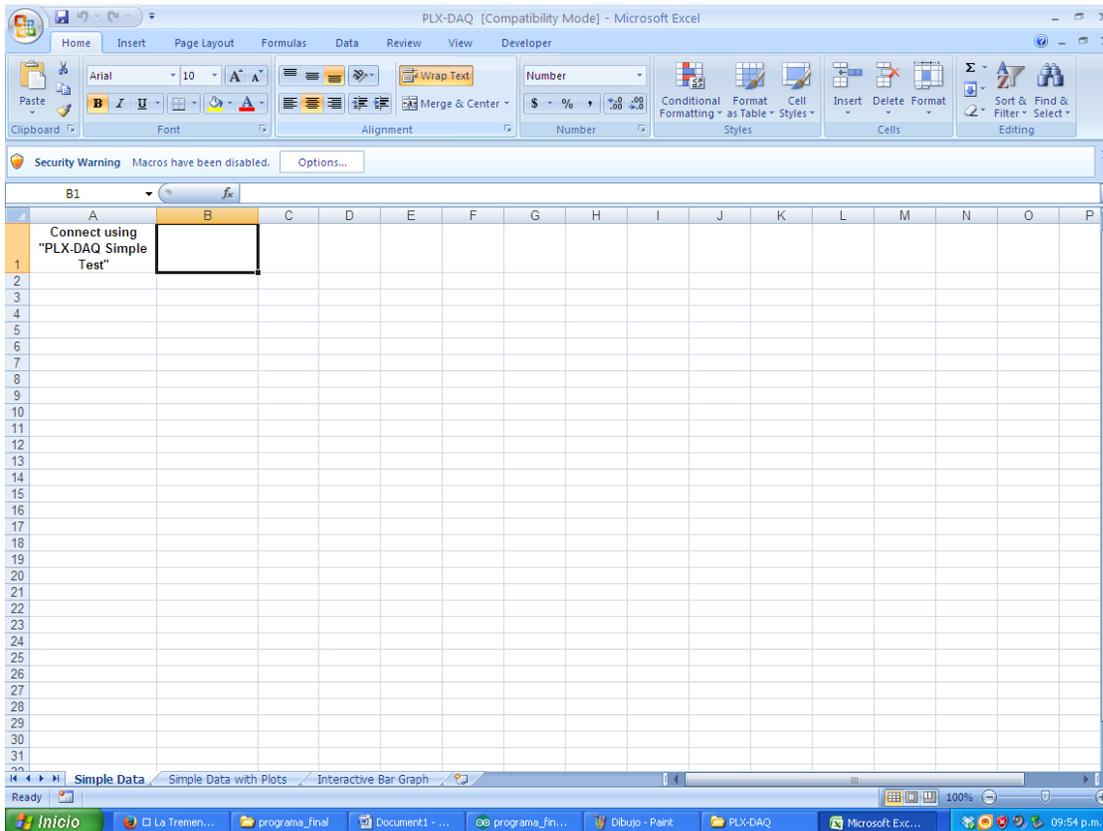
6.- Comenzará a ejecutar el programa y se activaran todos los sensores, además del agitador



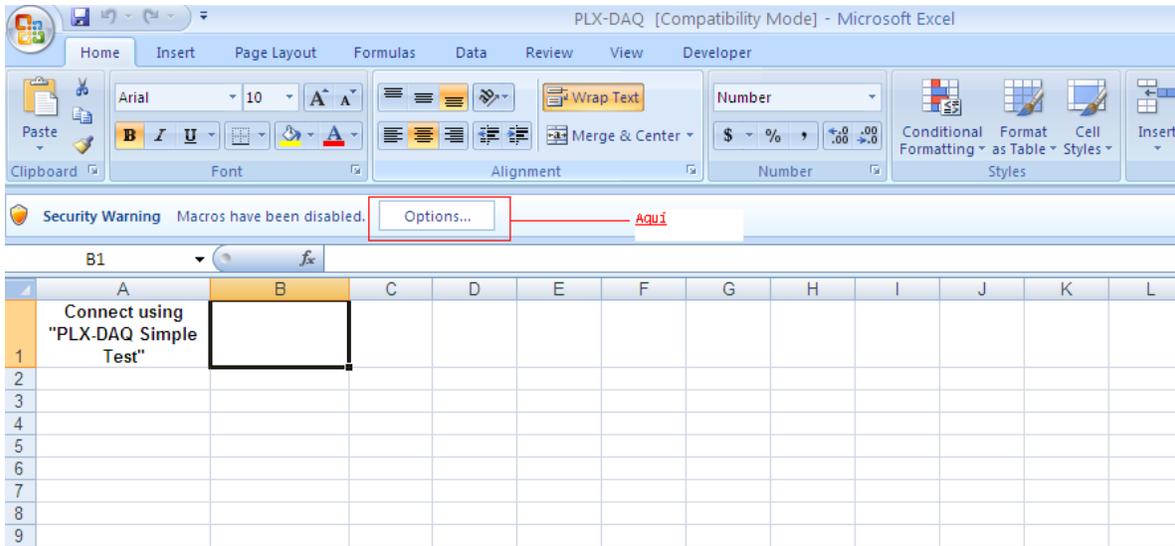
7.- Una vez que terminado el proceso, se abre el captador de datos PLX-DAQ.



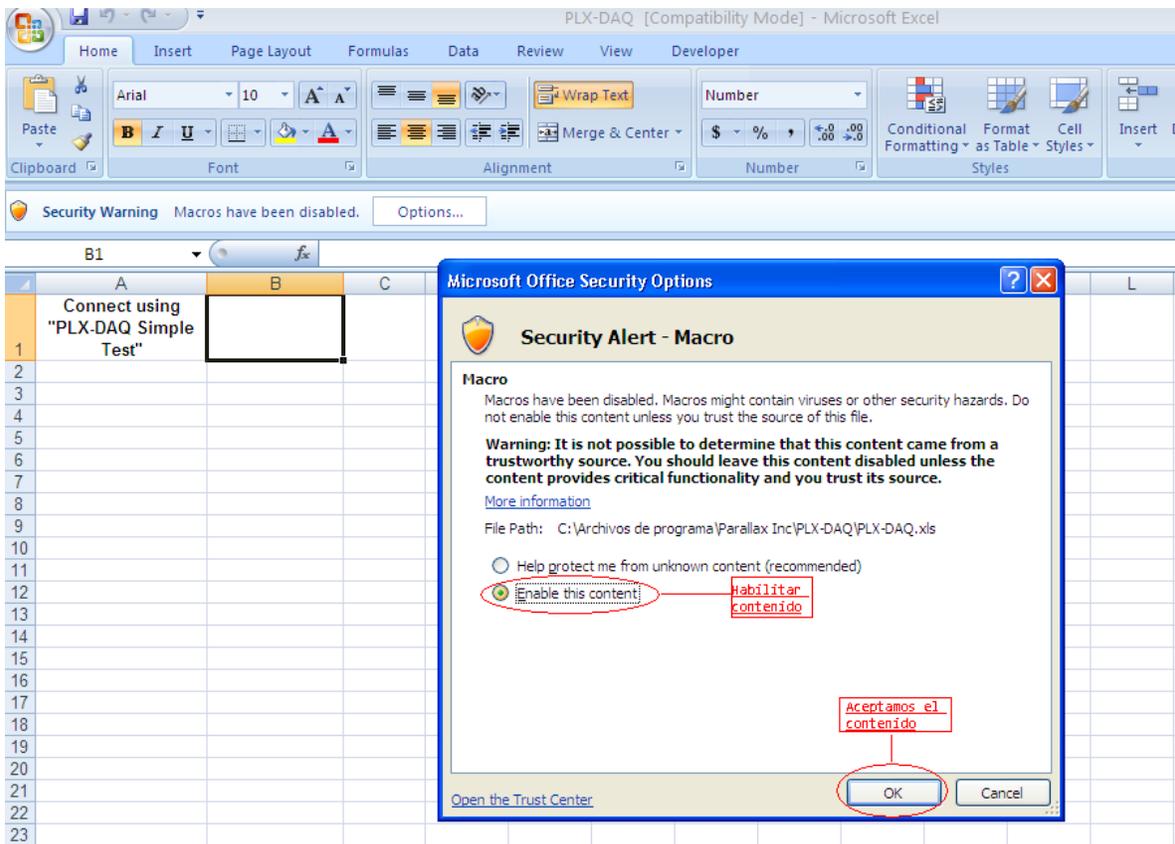
8.- Ejecutar PLX-DAQ Spreadsheet, que es el archivo de Excel programado para efectuar la macro y aparecerá lo siguiente:



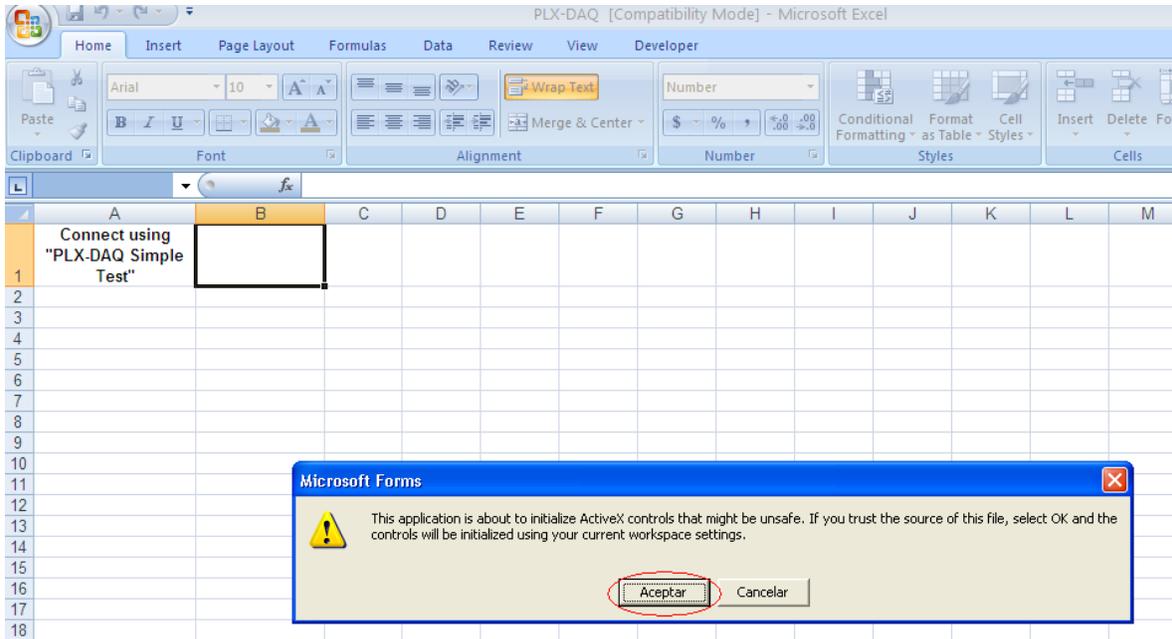
9.-Abrir la pestaña options:



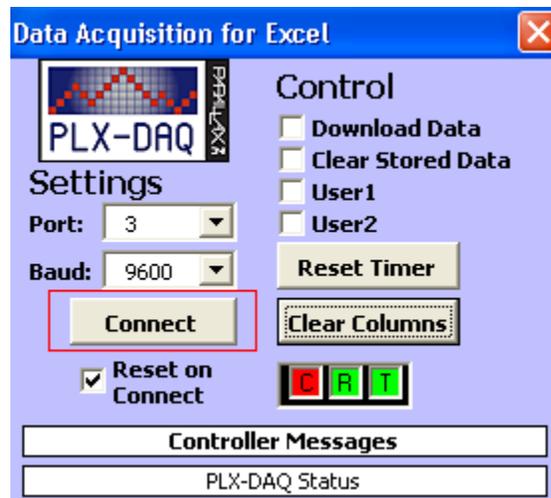
10.- Iniciar  una ventana alterna, se habilita la macro y se ejecuta ok:



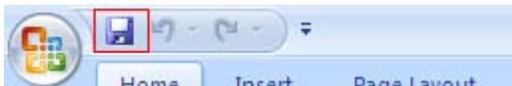
11.- Se aceptan los controles:



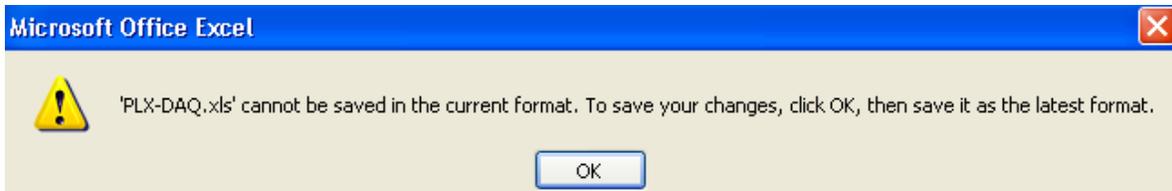
12.-Aparece la ventana de Data Acquisition for Excel, presionar connect:



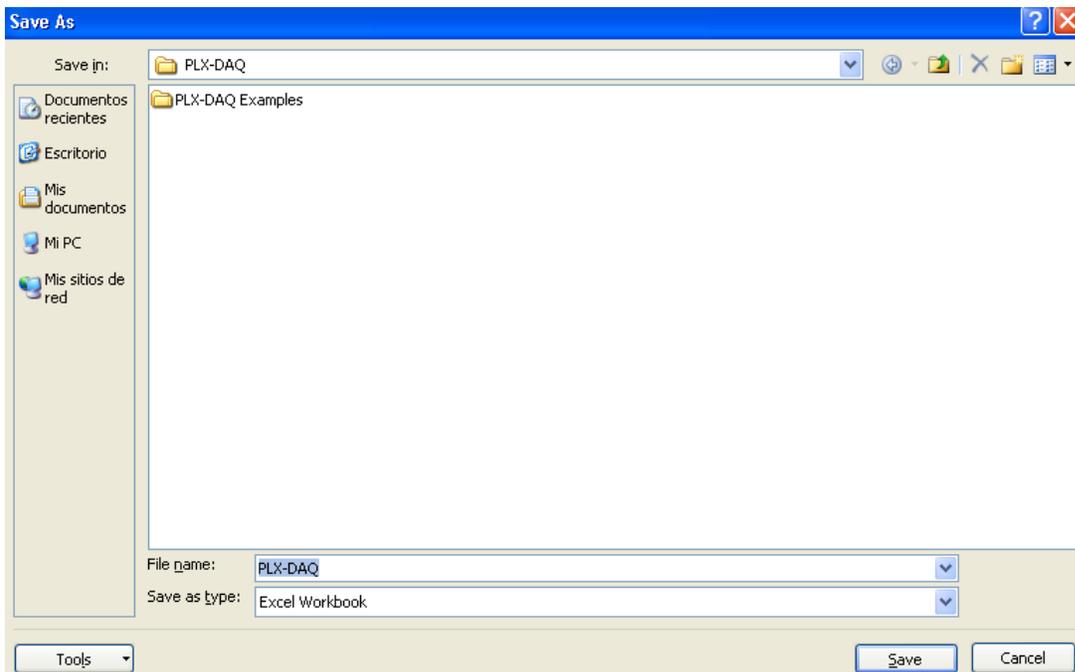
13.-Comenzará a generar los datos por minuto. Se ejecuta el ícono guardar:



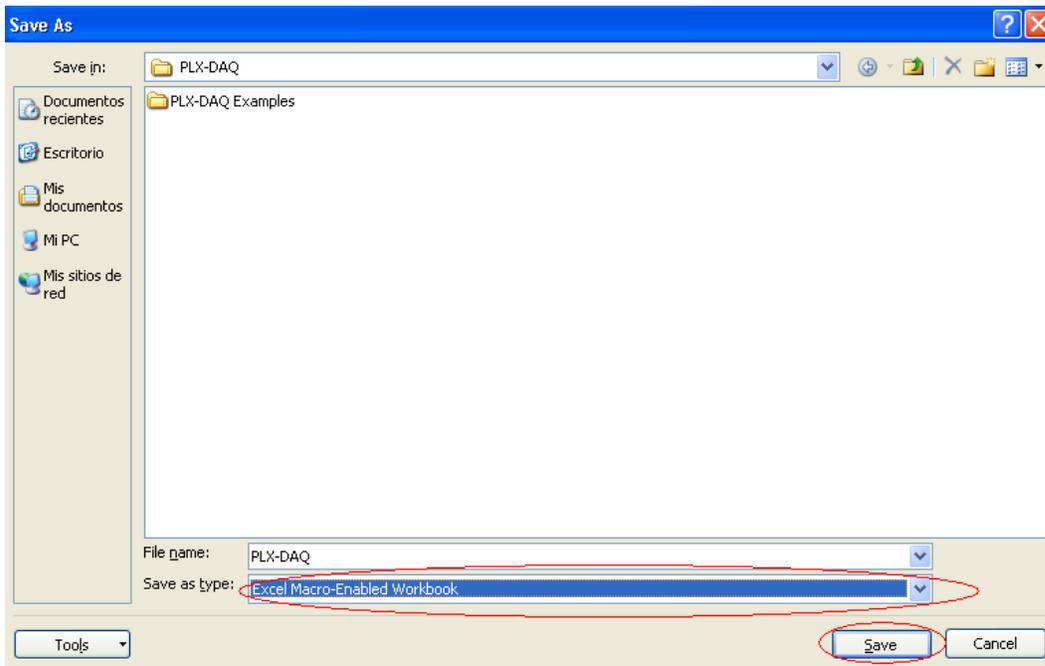
Muestra lo siguiente:



14.- Al Presionar ok, se tiene lo siguiente:



15.-Dar clic en la pestañita de Save as type, seleccionamos Excel Macro Enabled Workbook y posteriormente damos clic en Save:

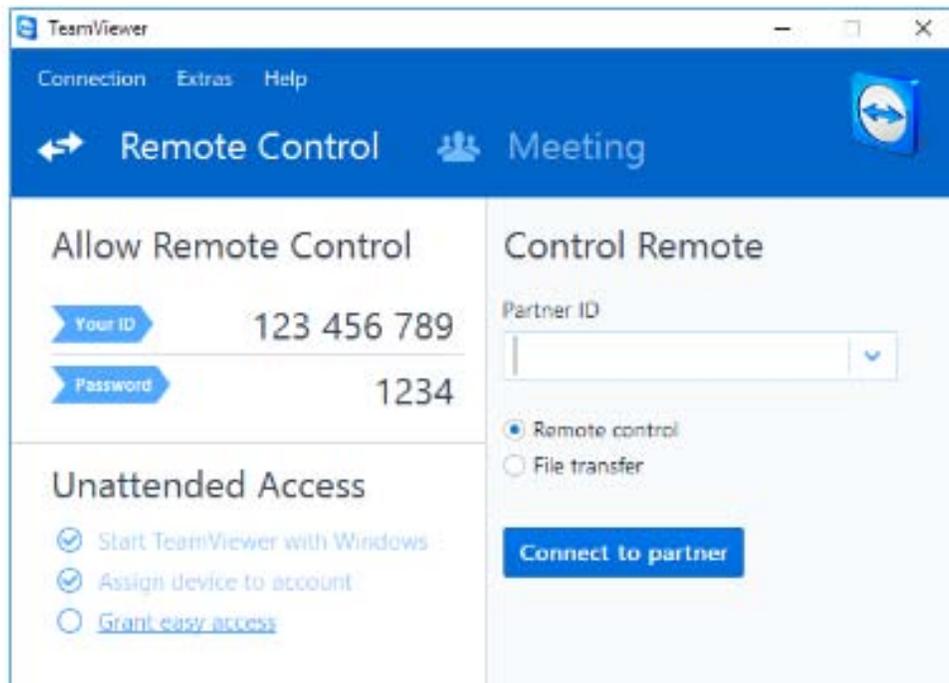


16.-Ya realizado esto, los datos son almacenados

## Control Remoto

Para conectarse con un asociado para una sesión de control remoto, seguir los siguientes pasos:

- 1.- Iniciar Teamviewer en ambas computadoras
- 2.- Hacer clic en la pestaña Control remoto
- 3.- Solicitar al asociado que inicie sesión en Teamviewer
- 4.- Solicitar al asociado la ID y contraseña de Teamviewer
- 5.- Introducir la ID del asociado en el cuadro combinado de ID de asociado
- 6.- Hacer clic en el botón de opción control remoto
- 7.- Dar clic en el botón conectar con asociado
- 8.- Se abrirá el cuadro de dialogo autenticación de Teamviewer
- 9.- Introducir la contraseña del ordenador remoto
- 10.- Iniciar sesión
- 11.- La conexión será exitosa



Al haber una conexión virtual remota, podremos utilizar ese equipo de cómputo tal cual como si estuviéramos en la misma (escritorio remoto).

## ANEXO 4

| Fecha      | Hora | Concentraciones de<br>gas | Temp° |
|------------|------|---------------------------|-------|
| 01/11/2015 | 9:32 | Concentracion0.0          | 38.8  |
| 01/11/2015 | 9:33 | Concentracion0.1          | 38.8  |
| 01/11/2015 | 9:34 | Concentracion0.1          | 38.8  |
| 01/11/2015 | 9:35 | Concentracion0.2          | 38.8  |
| 01/11/2015 | 9:36 | Concentracion0.2          | 38.8  |
| 01/11/2015 | 9:37 | Concentracion0.3          | 38.8  |
| 01/11/2015 | 9:38 | Concentracion0.3          | 38.9  |
| 01/11/2015 | 9:39 | Concentracion0.4          | 38.9  |
| 01/11/2015 | 9:40 | Concentracion0.4          | 38.9  |
| 01/11/2015 | 9:41 | Concentracion0.5          | 38.9  |
| 01/11/2015 | 9:42 | Concentracion0.5          | 38.9  |
| 01/11/2015 | 9:43 | Concentracion0.6          | 38.9  |
| 01/11/2015 | 9:44 | Concentracion0.6          | 38.9  |
| 01/11/2015 | 9:45 | Concentracion0.7          | 38.9  |
| 01/11/2015 | 9:46 | Concentracion0.7          | 38.9  |
| 01/11/2015 | 9:47 | Concentracion0.7          | 39    |
| 01/11/2015 | 9:48 | Concentracion0.7          | 39    |
| 01/11/2015 | 9:49 | Concentracion0.8          | 39    |
| 01/11/2015 | 9:50 | Concentracion0.8          | 39    |
| 01/11/2015 | 9:51 | Concentracion0.8          | 39.1  |
| 01/11/2015 | 9:52 | Concentracion0.9          | 39.1  |
| 01/11/2015 | 9:53 | Concentracion0.9          | 39.1  |
| 01/11/2015 | 9:54 | Concentracion0.9          | 39.1  |
| 01/11/2015 | 9:55 | Concentracion0.9          | 39.1  |
| 01/11/2015 | 9:56 | Concentracion1.0          | 39.1  |
| 01/11/2015 | 9:57 | Concentracion1.0          | 39.1  |
| 01/11/2015 | 9:58 | Concentracion1.0          | 39.1  |

|            |       |                  |      |
|------------|-------|------------------|------|
| 01/11/2015 | 10:00 | Concentracion1.0 | 39.1 |
| 01/11/2015 | 10:01 | Concentracion1.0 | 39.2 |
| 01/11/2015 | 10:02 | Concentracion1.0 | 39.2 |
| 01/11/2015 | 10:03 | Concentracion1.1 | 39.2 |
| 01/11/2015 | 10:04 | Concentracion1.1 | 39.2 |
| 01/11/2015 | 10:05 | Concentracion1.1 | 39.2 |
| 01/11/2015 | 10:06 | Concentracion1.1 | 39.2 |
| 01/11/2015 | 10:07 | Concentracion1.1 | 39.2 |
| 01/11/2015 | 10:08 | Concentracion1.1 | 39.2 |
| 01/11/2015 | 10:09 | Concentracion1.1 | 39.2 |
| 01/11/2015 | 10:10 | Concentracion1.1 | 39.2 |
| 01/11/2015 | 10:11 | Concentracion1.1 | 39.2 |
| 01/11/2015 | 10:12 | Concentracion1.1 | 39.2 |
| 01/11/2015 | 10:13 | Concentracion1.1 | 39.3 |
| 01/11/2015 | 10:14 | Concentracion1.1 | 39.2 |
| 01/11/2015 | 10:15 | Concentracion1.1 | 39.3 |
| 01/11/2015 | 10:16 | Concentracion1.1 | 39.3 |
| 01/11/2015 | 10:17 | Concentracion1.1 | 39.3 |
| 01/11/2015 | 10:18 | Concentracion1.1 | 39.3 |
| 01/11/2015 | 10:19 | Concentracion1.1 | 39.3 |
| 01/11/2015 | 10:20 | Concentracion1.1 | 39.3 |
| 01/11/2015 | 10:21 | Concentracion1.1 | 39.3 |
| 01/11/2015 | 10:22 | Concentracion1.1 | 39.3 |
| 01/11/2015 | 10:23 | Concentracion1.1 | 39.3 |
| 01/11/2015 | 10:24 | Concentracion1.1 | 39.4 |
| 01/11/2015 | 10:25 | Concentracion1.1 | 39.4 |
| 01/11/2015 | 10:26 | Concentracion1.1 | 39.4 |
| 01/11/2015 | 10:28 | Concentracion1.1 | 39.4 |
| 01/11/2015 | 10:29 | Concentracion1.1 | 39.4 |
| 01/11/2015 | 10:30 | Concentracion1.1 | 39.4 |
| 01/11/2015 | 10:31 | Concentracion1.1 | 39.4 |

|            |       |                  |      |
|------------|-------|------------------|------|
| 01/11/2015 | 10:32 | Concentracion1.1 | 39.4 |
| 01/11/2015 | 10:33 | Concentracion1.1 | 39.4 |
| 01/11/2015 | 10:34 | Concentracion1.1 | 39.4 |
| 01/11/2015 | 10:35 | Concentracion1.0 | 39.4 |
| 01/11/2015 | 10:36 | Concentracion1.1 | 39.4 |
| 01/11/2015 | 10:37 | Concentracion1.1 | 39.4 |
| 01/11/2015 | 10:38 | Concentracion1.0 | 39.4 |
| 01/11/2015 | 10:39 | Concentracion1.0 | 39.4 |
| 01/11/2015 | 10:40 | Concentracion1.0 | 39.4 |
| 01/11/2015 | 10:41 | Concentracion1.0 | 39.4 |
| 01/11/2015 | 10:42 | Concentracion1.0 | 39.4 |
| 01/11/2015 | 10:43 | Concentracion1.0 | 39.4 |
| 01/11/2015 | 10:44 | Concentracion1.0 | 39.4 |
| 01/11/2015 | 10:45 | Concentracion1.0 | 39.4 |
| 01/11/2015 | 10:46 | Concentracion1.0 | 39.3 |
| 01/11/2015 | 10:47 | Concentracion1.0 | 39.3 |
| 01/11/2015 | 10:48 | Concentracion1.0 | 39.3 |
| 01/11/2015 | 10:49 | Concentracion1.0 | 39.3 |
| 01/11/2015 | 10:50 | Concentracion1.0 | 39.3 |
| 01/11/2015 | 10:51 | Concentracion1.0 | 39.3 |
| 01/11/2015 | 10:52 | Concentracion0.9 | 39.3 |
| 01/11/2015 | 10:53 | Concentracion0.9 | 39.3 |
| 01/11/2015 | 10:54 | Concentracion0.9 | 39.3 |
| 01/11/2015 | 10:56 | Concentracion0.9 | 39.3 |
| 01/11/2015 | 10:57 | Concentracion0.9 | 39.3 |
| 01/11/2015 | 10:58 | Concentracion0.9 | 39.3 |
| 01/11/2015 | 10:59 | Concentracion0.9 | 39.3 |