

# Análisis del ariete hidráulico para diferentes configuraciones

---

## Analysis configurations for a ramp pump

**JABID EDUARDO QUIROGA-MÉNDEZ**

*MSc. Ingeniería Mecánica*

*Profesor Titular Escuela de Ingeniería Mecánica*

*Universidad Industrial de Santander*

*jabib@uis.edu.co*

*Bucaramanga, Colombia*

**CARLOS ANDRÉS SIERRA-GALLO**

*Ingeniero Mecánico*

*Universidad Industrial de Santander*

*kandres.sierra@gmail.com*

*Bucaramanga, Colombia*

**GERSON EDUARDO BIANCHA-GUTIERREZ**

*Ingeniero Mecánico.*

*Universidad Industrial de Santander*

*gersonedu0506@hotmail.com*

*Bucaramanga, Colombia*

*Fecha de inicio: 29/03/2013*

*Fecha de aceptado: 05/11/2013*

**Forma de citar:** QUIROGA, Jabid, SIERRA, Carlos, BIANCHA, Gerson. Análisis del ariete hidráulico para diferentes configuraciones. Rev. UIS.Ingenierías, 2013, vol.12, n.2, p.p 29-34.

### RESUMEN

En este trabajo se estudia la influencia de algunos parámetros en la operación del ariete hidráulico. Las variables analizadas son el resorte de la válvula de impulso, el volumen del acumulador, la carrera de la válvula de impulso y la relación de las áreas de impulso y descarga en la eficiencia del ariete. El análisis experimental se realiza en un prototipo de ariete hidráulico destinado para usos investigativos que permite variar sus parámetros. Adicionalmente, un modelo teórico del ariete es propuesto y validado usando los resultados experimentales. El modelo propuesto permite extender el estudio de los parámetros analizados incluyendo un análisis específico de la carrera de la válvula de impulso. De los resultados obtenidos se concluye que el resorte de la válvula de impulso y la relación de las áreas de las válvulas de impulso y descarga influye significativamente en la eficiencia del ariete. Por otro lado, el acumulador no representa significativa influencia en la eficiencia del ariete.

**PALABRAS CLAVES:** Bomba de Ariete, sistemas de bombeo, energía alternativa.

### RESUME

In this paper the influence of some parameters in the operation of a ramp pump is studied: delivery valve spring, pressure chamber volume, stroke of the delivery valve and the ratio of the delivery valve area to the waste valve area. Experimental studies are performed in a dedicated test bench for this purpose. Additionally, an analytical model is proposed and validated using experimental data. The developed model allows to extent the study of the ramp pump including a specific analysis of the delivery valve. Based on experimental and theoretical results can be concluded that the delivery valve spring and the ratio of the delivery valve area to the waste valve area affect significantly the ramp pump efficiency. On the other hand, the pressure chamber volume does not represent significant influence on the efficiency of the ramp pump.

**KEYWORDS:** Ramp pump, pumping systems, alternative energies

## 1. INTRODUCCIÓN

La bomba de ariete es un sistema que aprovecha la energía de presión acumulada en una columna de fluido para transmitir esta energía a una corriente. En la literatura se reportan investigaciones que van desde la experimentación de algunos de sus parámetros hasta la proposición de modelos matemáticos de su comportamiento. Dentro de las investigaciones de la influencia de los parámetros del ariete en su operación sobresale (Cararo, 2007) en donde se estudió experimentalmente el volumen, el diámetro de descarga y el material del acumulador. Adicionalmente, se experimentó con la posición de las válvulas de descarga e impulso con respecto al cuerpo del ariete hidráulico. En esta investigación se determinó que estadísticamente los mejores rendimientos se presentan cuando el acumulador tiene un volumen pequeño y se construye con material elástico. Adicionalmente, diámetros de descarga del acumulador de mayor tamaño y la posición horizontal de la válvula de impulso reportaron un mejor desempeño del ariete. En este estudio no se consideró la influencia de la carrera de la válvula de impulso.

En cuanto a la formulación de modelos teóricos del ariete hidráulico en (Filipan, 2003) se propuso un modelo utilizando la ecuación de continuidad y que simplificaba el modelo matemático propuesto por (Krol, J., 1976) a solo 3 periodos. En (Krol, J., 1976) el modelamiento del ariete se realiza dividiendo el ciclo de operación de éste en 7 periodos. Los modelos propuestos en (Filipan, 2003), (Krol, J., 1976) no tienen en cuenta las pérdidas presentes en la válvula de impulso por fuerzas de arrastre y pérdidas por efecto tobera.

En (Silva, 2009) se propone investigar la influencia del volumen del acumulador en la eficiencia del ariete. Se experimenta con cuatro acumuladores de material elástico, cada uno con una capacidad diferente. Resultados experimentales permiten concluir un mejor rendimiento volumétrico para los acumuladores de mayor volumen. En la experimentación las eficiencias obtenidas fueron alrededor del 10%. Estos resultados contradicen los resultados obtenidos en (Cararo, 2007). En (Silva, 2009) no se consideraron alturas de alimentación superiores a un metro, variable que afecta significativamente la eficiencia del sistema. Basado en lo anterior, no está clara la influencia del volumen del acumulador en el desempeño del ariete. En (Zoller, F.; et al., 2013) se experimentó la influencia del peso y la carrera de la válvula de impulso en la eficiencia y el caudal descargado. Resultados experimentales permiten concluir que para baja disponibilidad de agua se requiere reducir al máximo el peso y la carrera de la válvula.

Jabid Eduardo Quiroga-Méndez, Carlos Andrés Sierra-Gallo,  
Gerson Eduardo Biancha-Gutierrez

Por otro lado, cuando la disponibilidad de agua es considerable la carrera se puede ampliar y el peso puede ser elegido en el punto óptimo de la curva de entrega.

En este trabajo se propone un modelo teórico de una bomba de ariete, el cual se valida usando datos experimentales para diferentes configuraciones de éste. El modelo teórico propuesto permite el estudio de la influencia de la variación del volumen de acumulador, la constante del resorte de la válvula de impulso y la relación de las áreas de las válvulas de impulso y descarga para determinar su influencia en el desempeño del ariete.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Golpe de Ariete

El golpe de ariete es un fenómeno transitorio que se produce en los conductos cuando se presentan variaciones en el flujo. Cuando el flujo es interrumpido, en virtud del principio de conservación de la energía, se disminuye la energía cinética transformándose en un trabajo de compresión del fluido y en el trabajo necesario para dilatar la tubería. Esta transformación de energía produce una sobrepresión o un golpe de ariete positivo. Por el contrario, cuando se restablece el flujo rápidamente se puede producir una depresión, o golpe de ariete negativo.

### 2.2 Funcionamiento del Ariete Hidráulico

La Figura 1 muestra el esquema de la configuración del modelo de ariete hidráulico para la realización de los experimentos.

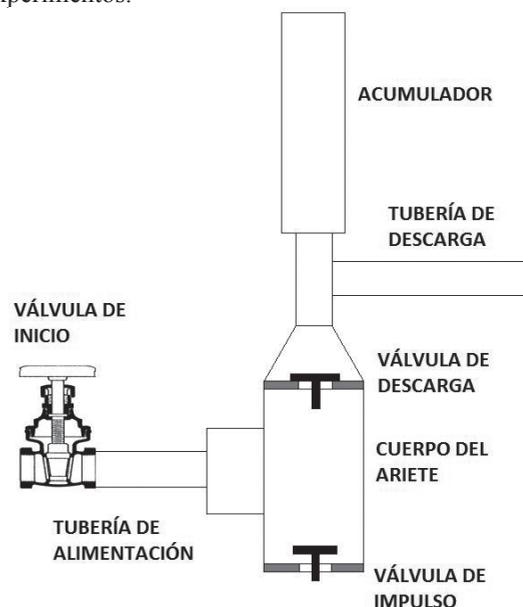


Figura 1. Esquema del ariete Hidráulico

El ciclo de bombeo que ocurre en un ariete hidráulico se describe mediante los siguientes pasos:

El ciclo de bombeo se inicia con la apertura de la válvula alimentación, el agua se acelera hasta alcanzar una velocidad que produce el cierre de la válvula de impulso produciendo el golpe de ariete; con la sobrepresión generada se abre la válvula de descarga y el agua pasa a la tubería de descarga; la salida del agua reduce la presión y las válvulas vuelven a su posición inicial iniciando un nuevo ciclo.

### 3. DESARROLLO

El estudio del funcionamiento y desempeño del ariete hidráulico se realiza de forma teórica y experimental. Los resultados teóricos se comparan con los experimentales y se determina la influencia de algunas variables en la eficiencia del ariete hidráulico. Los parámetros seleccionados para el análisis experimental son:

- La constante elástica de los resortes de la válvula de impulso.
- El volumen del acumulador.
- Las áreas de las válvulas de impulso y descarga.
- La carrera de la válvula de impulso

La experimentación se realiza a través del siguiente procedimiento:

Se ajusta un valor de carrera de válvula y se registran los valores de las alturas de alimentación y descarga, caudal de descarga y caudal perdido por la válvula de impulso. Se gradúa nuevamente el sistema a otro valor de carrera de válvula y se vuelven a medir los caudales. Este procedimiento se replica para los demás experimentos planteados. La eficiencia del ariete se determina usando (1)

$$\eta = \frac{h_{des} * q_{des}}{H_{ali} * Q_t} \quad (1)$$

Donde  $h_{des}$  y  $H_{ali}$  son las alturas de descarga y alimentación respectivamente,  $q_{des}$  es el caudal descarga y  $Q_t$  es el caudal total que corresponde al caudal de descarga más el caudal perdido.

El modelo analítico usado en esta investigación se implementa en la plataforma de interfaz gráfica de Matlab (GUI), este programa permite realizar un estudio del ariete hidráulico para varias configuraciones dependiendo de la carrera de la válvula de impulso.

El modelo matemático utilizado se basa principalmente en el planteado en (Krol, J., 1976). Este modelo se ha modificado para incluir las fuerzas de arrastre y pérdidas por efecto tobera en las válvulas. La ecuación de movimiento (2) es aplicable a todos los periodos y el factor de pérdidas se determina usando la ecuación (3).

$$H - \left[ 1 + \sum k + f \left( \frac{L}{D} \right) + R \right] \frac{v^2}{2g} = \frac{L}{g} \frac{dv}{dt} \quad (2)$$

$$Z = 1 + \sum k + f \left( \frac{L}{D} \right) + R \quad (3)$$

Donde  $H$  es la altura de alimentación,  $k$  es la constante de pérdidas por elementos,  $f$  es el coeficiente de fricción tubería,  $R$  es la constante de pérdidas por turbulencia en la válvula de impulso,  $v$  es la velocidad del agua,  $L$  es la longitud de la tubería de alimentación,  $D$  es el diámetro de la tubería,  $g$  es la aceleración de la gravedad y  $Z$  es el factor de pérdidas. La ecuación básica de golpe de ariete que determina la ganancia de cabeza se muestra en (4).

$$\Delta H = -\Delta v \frac{c}{g} \quad (4)$$

La anterior ecuación se deriva al suponer un cierre instantáneo de la válvula, lo que produce una desaceleración del fluido transformando la energía cinética en energía de presión. Las ecuaciones (5-11) ilustran la obtención de la ecuación (4).

$$F_i = -m * \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (5)$$

$$m = \rho l A \quad (6)$$

$$F_i = -\rho l A * \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (7)$$

$$\Delta p = \frac{F_i}{A} \quad (8)$$

$$\Delta p = -\rho l * \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (9)$$

Donde  $F_i$  es la fuerza inercial,  $m$  es la masa,  $\rho$  es la densidad,  $l$  es la longitud del paquete de fluido considerado,  $A$  es la sección transversal de la tubería,  $\Delta v$  es el cambio de velocidad del fluido y  $\Delta p$  es el diferencial de presión. En la ecuación (10) se establece la variable  $c$  que corresponde a la la velocidad promedio o celeridad de la onda de presión en la tubería. Reemplazando (10) en (9) se obtiene (11).

$$c = \frac{l}{\Delta t} \quad (10)$$

$$\Delta p = -\rho * \Delta v * c \quad (11)$$

Que es la misma ecuación (4) pero en términos de presión. En esta ecuación  $\Delta v = v - v'$ , en la cual  $v$  es la velocidad inicial del fluido y  $v'$  la velocidad final para cierre de la válvula. Por las condiciones de operación del ariete el  $\Delta v = v$  Para cierre total de la válvula  $v'=0$ .

Con la fórmula de JOUKOWSKI se expresa la celeridad de la onda de presión en una tubería

$$c = \frac{\sqrt{\frac{E_0}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{E_0 D}{E \delta}}} \quad (12)$$

Donde  $E_0$  es el módulo de elasticidad del fluido,  $D$  es el diámetro de la tubería,  $E$  es el módulo de elasticidad del material de la tubería y  $\delta$  es el espesor de la tubería. Las pérdidas menores  $h_m$  se calculan usando (13), las pérdidas de presión por fricción  $h_f$  se determinan usando (14) y la pérdida por turbulencia  $h_{turb}$  en la válvula de impulso en (15).

$$h_m = \sum k \frac{v^2}{2g} \quad (13)$$

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (14)$$

$$h_{turb} = R \frac{v^2}{2g} \quad (15)$$

El valor de  $R$  depende de la forma y la carrera del obturador de la válvula de impulso. Este factor se determina experimentalmente y a partir del coeficiente de descarga  $Cd$  usando (16).

$$R = 1 / (Cd)^2 \quad (16)$$

El coeficiente de descarga para las válvulas se determina usando (17)

$$Cd = \frac{Q_{medido}}{A_{tub} * \sqrt{2gH}} \quad (17)$$

Donde  $Q$  es el caudal de alimentación y  $A$  es el área de la tubería de alimentación. La fuerza de arrastre en la válvula de impulso  $Ff$  se determina usando (18)

$$Ff = \rho v^2 A \quad (18)$$

La fuerza necesaria para cerrar la válvula de impulso debida al resorte de la válvula  $Fr$ , se calcula usando (19).

$$Fr = W = Kr * S \quad (19)$$

Donde  $Kr$  es la constante del resorte de la válvula de impulso y  $S$  es la carrera de la válvula de impulso. La fuerza de arrastre  $F$  producida por el fluido sobre la válvula de impulso es obtenida usando (20).

$$F = C_a * (\rho v^2 A) \quad (20)$$

Donde  $C_a$  es el coeficiente de arrastre, en el caso estudiado se utilizó un  $C_a = 1,17$  que corresponde a un disco,  $\rho$  es la densidad del agua a la temperatura del fluido,  $v$  es la velocidad del agua y  $A$  es el área transversal de la válvula de impulso. Las pérdidas debidas al ciclo de bombeo  $hr$  se determinan usando (21).

$$h_r = \frac{v^2}{2g} \left[ f \frac{L}{D} + \sum k \right] \left( 1 - \frac{h}{h_{max}} \right) \quad (21)$$

De la ecuación (4) tenemos.

$$h + h_r = v - v' \frac{c}{g} \quad (22)$$

Donde  $h$  es la sobrepresión alcanzada por el golpe de ariete. Para cierre total de la válvula  $v' = 0$  y sin pérdidas  $h_r = 0$ . Por lo tanto se obtiene la ecuación (23)

$$h_{max} = v \frac{c}{g} \quad (23)$$

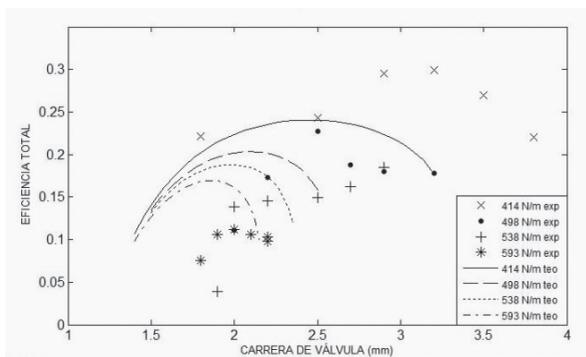
## 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se realizó un análisis estadístico de DUNCAN mediante el cual, con la comparación de los valores medios de los experimentos para cada variable, se determina qué valor de variable en cada experimento es significativamente mayor, menor o igual con respecto a los demás.

### 4.1 Análisis de la influencia de la constante del resorte de la válvula de impulso

En este experimento se establecieron los siguientes parámetros en el ariete; diámetro de la válvula impulso 40 mm, diámetro de la válvula de descarga 40 mm, altura de alimentación 1.2 m, altura de descarga 6.1 m y el volumen del acumulador de 1.16 litros. Los resultados teóricos se comparan con los experimentales y se muestran en la Figura 2. En esta Figura se

observa que la eficiencia total del ariete presenta una forma de parábola cóncava, lo cual indica que hay un valor máximo de carrera total para una determinada configuración. Por otro lado, en la Figura 2 se observa que a medida que la constante del resorte aumenta la eficiencia total disminuye, debido a que para una menor constante del resorte el cierre de la válvula de impulso es más rápido, lo que hace que se acerque a cero aumentando la sobrepresión según la ecuación (9). Así mismo, a medida que la constante del resorte de la válvula de impulso aumenta, la curva obtenida por el modelo analítico del ariete se mueve hacia la izquierda, según se aprecia en la Figura 2. Este corrimiento se produce debido a que para una altura de alimentación del sistema se requiere de una fuerza específica en la válvula de impulso. Si esta altura se mantiene constante en los experimentos al aumentar la constante del resorte de la válvula de impulso el desplazamiento de este resorte será menor.



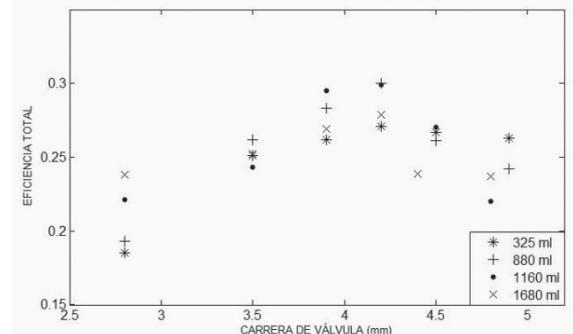
**Figura 2.** Resultados experimentales de la constante del resorte de la válvula de impulso

#### 4.2 Análisis de la influencia del volumen del acumulador

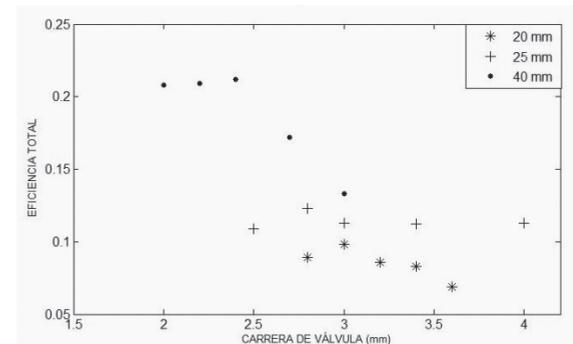
En este experimento las condiciones de funcionamiento fueron las mismas del experimento anterior, solo se modificaron los volúmenes del acumulador manteniendo fija la constante del resorte de la válvula de impulso. En la Figura 3 se muestran los resultados experimentales para los acumuladores. El análisis Duncan para la experimentación con los acumuladores permite concluir que el volumen del acumulador no tiene una influencia significativa en la eficiencia global del sistema, el aumento de caudal descargado no es considerable aún si se varía el volumen. Adicionalmente, en la experimentación se observó que un volumen de acumulador mayor presenta un flujo de salida del ariete más continuo.

#### 4.3 Análisis de la combinación de las áreas de las válvulas de descarga e impulso

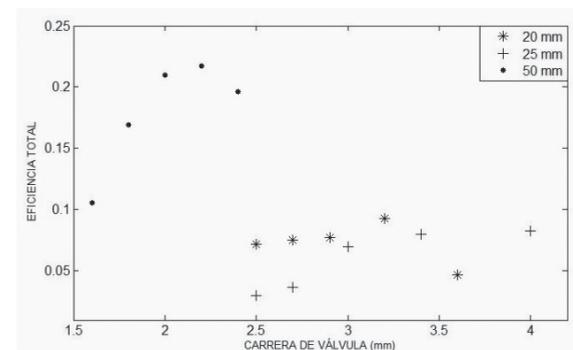
En este experimento se establecieron los siguientes parámetros en el ariete: Altura de alimentación de 1.2 m, altura de descarga 4.5 m, la constante del resorte se determina dependiendo del área de la válvula de impulso y un volumen del acumulador de 1.16 litros. En las Figuras 4a, 4b y 4c se observa que a medida que la válvula de impulso tiene un área mayor (mayor diámetro) manteniendo fija el área de la válvula de descarga, se tiene una mayor eficiencia



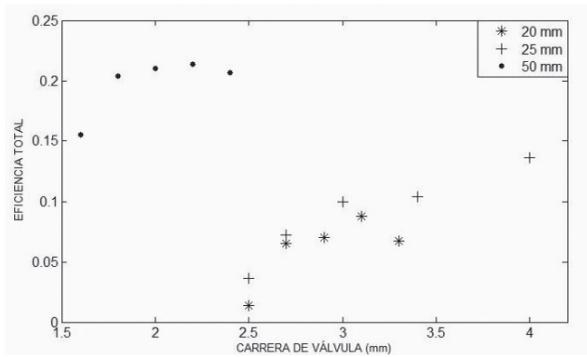
**Figura 3.** Resultados experimentales de los acumuladores



**Figura 4a.** Efecto del diámetro de la válvula de impulso en la eficiencia para un diámetro de válvula de descarga de 25 mm



**Figura 4b.** Efecto del diámetro de la válvula de impulso en la eficiencia para un diámetro de válvula de descarga de 40 mm



**Figura 4c.** Efecto del diámetro de la válvula de impulso en la eficiencia para un diámetro de válvula de descarga de 50 mm

El análisis Duncan para la experimentación con las áreas permite concluir que la configuración de las válvulas ejerce una influencia significativa en la eficiencia global del sistema. Una mayor área en la válvula de descarga permite una mayor salida del fluido lo cual reduce las pérdidas en la descarga.

## 5. CONCLUSIONES

Basado en los resultados experimentales y en el análisis teórico se puede concluir que el resorte de la válvula de impulso afecta de manera significativa la eficiencia global del sistema, se determinó que hay un límite superior y uno inferior en la constante del resorte para un debido funcionamiento del ariete. Por lo tanto, para un valor de la constante del resorte menor el valor la eficiencia global es mayor, esto se confirmó para bajas alturas de alimentación.

Por otro lado, la experimentación permite concluir que el volumen del acumulador del ariete no influye de forma sustancial en la eficiencia global del ariete, pero su tamaño incide en las condiciones de flujo en la descarga, produciendo un flujo menos intermitente en la medida en que se aumente el volumen del acumulador. La relación de las áreas de las válvulas de impulso y de

descarga afecta considerablemente la eficiencia global del sistema, se requiere que el área de la válvula de descarga sea igual o mayor que el área de la válvula de impulso. Si se mantiene el área de la válvula de descarga fija, el aumento del área de la válvula de impulso producirá un ariete más eficiente. Adicionalmente, una válvula de descarga con mayor área permite un mayor flujo másico en el sistema.

## 6. REFERENCIAS

CARARO, D.C., Damasceno, F.A.,Griffante, G., Alvarenga, L.A. 2007. *Hydraulic ram pump manufacturer features using alternative materials* | [Características construtivas de um carneiro hidráulico com materiais alternativos]. Revista Brasileira de Engenharia Agricola e Ambiental 11 (4) , pp. 349-354.

FILIPAN, V.; Virag, Z.; Bergant, A. (2003). Mathematical Modelling of a Hydraulic Ram Pump System | [Matematično modeliranje hidravličnega ovna]. *Strojniski Vestnik/Journal of Mechanical Engineering* 49 (3) , pp. 137-149

KROL, J. "The automatic hydraulic ram: Its theory and design". Paper N° 76-JE-17. ASME. 1976.

SILVA, Jorge Luis Andrade da; NEBEL, Álvaro Luiz Carvalho; COLLARES, Gilberto Loguércio; TAVARES, Vitor Emanuel Quevedo. *Teste de um carneiro hidráulico usando duas câmaras de ar e materiais alternativos*. Disponible en: [http://www.ufpel.edu.br/cic/2009/cd/pdf/EN/EN\\_01639.pdf](http://www.ufpel.edu.br/cic/2009/cd/pdf/EN/EN_01639.pdf).

ZOLLER F.; Woudstra J.; Van der Wiel M. *Hydraulic ram pumping in rural community development*. Rijswijk University of Professional Technical Education, the Netherlands and Biogas Technology Africa CC, Durban, South Africa. 2013