

## FIRING TEST DEL MOTOR MONOPROPELENTE DE 1,5N PARA APLICACIONES ESPACIALES

Manavella, Luciano <sup>(2)</sup>  
Micheloud, Pablo D. <sup>(2)</sup>  
Salomone, Javier E. <sup>(1)(2)(\*)</sup>  
Gonzalez, Gustavo J. <sup>(1)(3)</sup>  
Jazni, Jorge E. <sup>(1)(3)</sup>  
Cova, Walter J. D. <sup>(1)(4)</sup>

<sup>(1)</sup> Instituto Universitario Aeronáutico, Centro de Investigaciones Aplicadas, Departamento Sistemas Electromecánicos

<sup>(2)</sup> Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba, Departamento Mecánica

<sup>(3)</sup> Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba, CUDAR

<sup>(4)</sup> Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional La Rioja, Departamento Electrónica

<sup>(\*)</sup> Dirección Postal: Chubut 33 - B° Alberdi - C.P.: X5000LYA - Córdoba - Pcia. Córdoba - Argentina -  
E-mail: jsalomone@scdt.frc.utn.edu.ar

### RESUMEN

La utilización en el ámbito espacial de motores de monopropelente, habida cuenta de la criticidad implicada por el fallo, impone que éstos atraviesen exitosamente una exigente serie de ensayos de calificación y aceptación. Tales ensayos requieren del desarrollo de facilidades especiales, dada la peligrosidad inherente a la manipulación del combustible, la sensibilidad que deben poseer los sensores en especial para motores de bajo nivel de empuje, reducido consumo, altas presiones, etc.

Uno de los ensayos fundamentales es el denominado *Firing Test* en el que se determina del nivel de empuje del motor, el tiempo de respuesta, rugosidad de empuje, temperaturas del lecho catalítico, de salida de gases, temperatura del asiento de válvula de control de flujo, etc. Se presentan los resultados obtenidos y los medios desarrollados para su medición, para el caso de motores de 1.5 N de empuje nominal.

### 1.-INTRODUCCION

Los primeros ensayos del motor monopropelente de 1.5 N se realizaron en las instalaciones que posee el Centro de Investigaciones Aplicadas (CIA) del Instituto Universitario Aeronáutico (IUA) y sirvieron de base para la validación de los procedimientos de manipulación y carga del combustible, la puesta en marcha de los protocolos de ensayo, la verificación del banco de suministro de

combustible, del banco de medición de empuje, del sistema de adquisición y los protocolos de contingencia. Estos ensayos permitieron visualizar el correcto nivel de empuje de los motores, acorde al nivel de presurización del combustible y al caudal suministrado. Fue necesaria la realización de ciertos ajustes en el software del sistema de adquisición, la implementación de un sistema de amortiguamiento y la materialización de un vínculo rígido entre la mesa soporte del espécimen y la celda de carga.

Para realizar los ensayos se utilizó un REA (*Reaction Engine Assembly*), cuya constitución se pasa a detallar: se parte del conjunto DTM (*Dual Thruster Module*) que se compone de 2 REA:

$$\text{DTM} = \text{REA A} + \text{REA B} + \text{Assembly Fixtures}$$

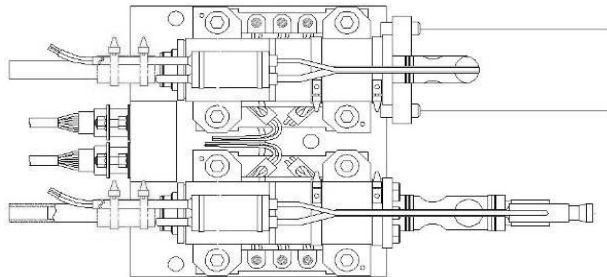


Figura 1. Configuración del DTM

Cada REA está integrado por  
 $\text{REA} = \text{Thrust Control Valve} + \text{Thruster Chamber}$

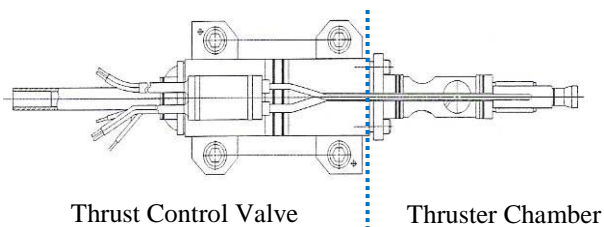


Figura 2. Configuración del REA

El REA ensayado fue desarrollado y construido por el CIA-IUA por convenio con CONAE. Particularmente en los ensayos se utilizó la válvula de control N°3 y el *thruster chamber* N°3, por lo que se designó al conjunto **REA N°3**.

## 2.- DESCRIPCIÓN DE LAS FACILIDADES PARA EL ENSAYO

### 2.1.- Banco de medición

Este banco se utiliza para medir el empuje generado por el REA y las temperaturas de diversos puntos críticos elegidos convenientemente.

El REA fue montado sobre un soporte desplazable en el plano horizontal, un grado de libertad, solidario a una celda de carga (Figura 3).

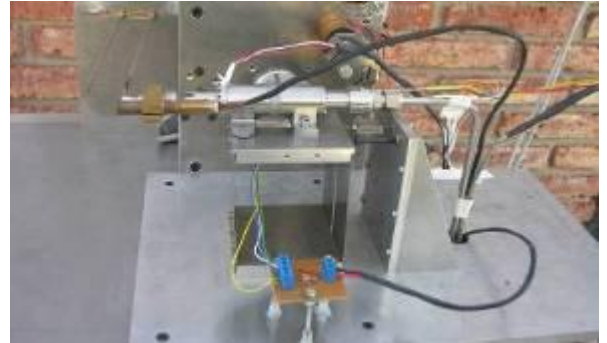


Figura 3. Montaje del REA



Figura 4. Estructura banco de medición

Todo el conjunto se apoyó y fijó a una estructura de tubos rectangulares, configurando de este modo el “banco de medición de empuje” (Figura 4). Este banco está equipado también con sensores de temperatura (termocuplas tipo K y termoresistores PT 100) y un amortiguador electromagnético del tipo de corrientes de torbellino, el cual no se utilizó en este ensayo.

### 2.2.- Banco de alimentación

Este banco se utiliza para suministrar hidracina al REA, filtrada y en condiciones adecuadas de presión (Figura 5).



Figura 5. Banco de alimentación y presurizante (N2)

Dicho banco dispone de comandos a distancia que se operan a través de una PC y requiere también de maniobras de tipo manual para su funcionamiento durante el ensayo. Está equipado con un recipiente para alojar hidracina con capacidad de 1 litro, un caudalímetro másico, un transductor de presión y filtros (grado de filtración: 7 micrones); estos últimos se encuentran colocados en la entrada de nitrógeno y en la salida de hidracina.

La presión de suministro de combustible se logra mediante nitrógeno, proveniente de un depósito de alta presión, ingresando al tanque de combustible vía un regulador de presión.

El conjunto (banco de medición de empuje + banco de alimentación + tubo de nitrógeno) se colocó dentro de un gazebo (Figura 5).

### 2.3.- Sensores utilizados en el ensayo

Los diferentes sensores utilizados en el ensayo se detallan en la Tabla 1

SENSOR	MARCA	MODELO	RANGO	CANT.
Celda de carga	Futek	LSB 200 (L2357)	2,5 N	1
Transductor de presión	Taber	2403 SAT	50 bar	1
Termocuplas	Novasen S.A.	Tipo "K"	1000 °C	3
Termoresistencias	Novasen S.A.	PT 100	200 °C	2
Caudalímetro	Rheonik	RHM015	10 gr/s	1

Tabla 1 – Sensores utilizados

Estos elementos permiten medir las variables de interés observadas durante el ensayo.

### 2.4.- Datos registrados

Durante el ensayo se midieron y registraron los siguientes parámetros:

DESCRIPCION	ABREV.	UNIDAD
Empuje	E	Newton
Presión de ingreso de combustible	PIC	Psi
Presión del presurizante (N <sub>2</sub> )	PP	Psi
Caudal de combustible	CC	gr/s
Temperatura del lecho catalico	TLC	Celsius
Temperatura de la tobera	TT	Celsius
Temperatura de gases	TG	Celsius
Temperatura de la válvula	TV	Celsius
Temperatura de ingreso de combustible	TIC	Celsius

Tabla 2 – Parámetros medidos

La Figura 6 muestra las referencias descriptas en la Tabla 2.

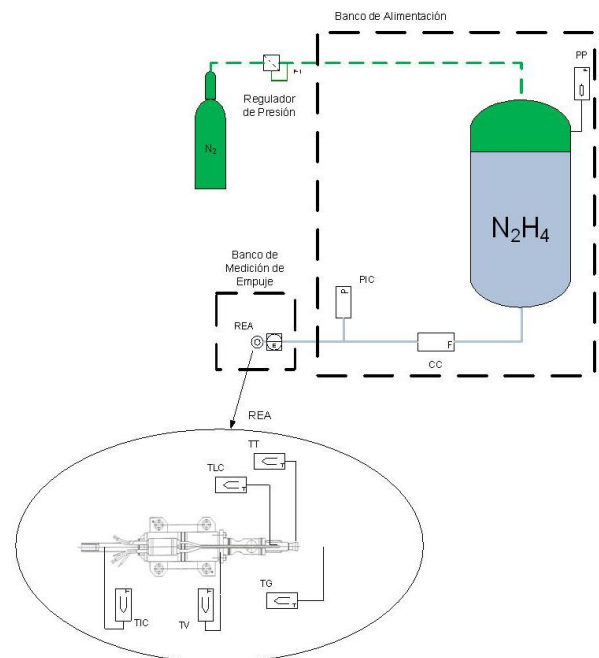


Figura 6. Referencias

### 3.- EJECUCIÓN DEL ENSAYO

La ejecución y conducción de los ensayos fué realizada por personal especialmente entrenado. Se contó además con grupos de apoyo para la integración de los diversos componentes del sistema previos al ensayo , manipulación de sustancias peligrosas, Higiene y Seguridad, operadores del sistema de adquisición, etc.



Figura 7. Personal afectado al ensayo



Figura 8. Traje hermético con suministro de aire

#### 3.1.- Protocolo de ensayo

Todo el proceso, desde la preparación y puesta a punto del equipamiento hasta la limpieza final del REA ensayado, se llevó a cabo siguiendo un protocolo que detalla la secuencia de los pasos a seguir. Dicho protocolo se utiliza para evitar cometer errores durante la ejecución del ensayo.

#### 3.2.- Secuencia del ensayo

Finalizada la preparación y puesta a punto del equipamiento, se realizaron 5 disparos de precalentamiento, utilizando el modo automático del software “Hidracina.vi”, manteniendo 1 segundo ON y 1 segundo OFF las válvulas del REA (UpsV – DownsV). Cabe aclarar que las 2 válvulas en serie del REA abren y cierran simultáneamente.

A partir de aquí, se continuó el ensayo siguiendo las secuencias mostradas en la Tabla 3

Secuencia	Tiempo ON (seg)	Tiempo OFF (seg)	Nº de pulsos	Pulsos acumulados
1	1	1	10	10
2	5	5	3	13
3	5	0	1	14
4	30	0	1	15
5	1	1	30	45
6	10	5	30	75
7	30	1	22	97

Tabla 3 – Secuencia de ensayo

El tiempo total de funcionamiento del REA (sumatoria de tiempos ON x N° de pulsos) durante el ensayo fue de **1050 segundos**.

La masa total de hidracina que atravesó el lecho catalítico es el promedio del caudal observado (0,58 gr/s) por el tiempo de funcionamiento mencionado en el párrafo precedente, lo que arroja una masa de 609gr de hidracina.

#### 3.3.- Datos obtenidos

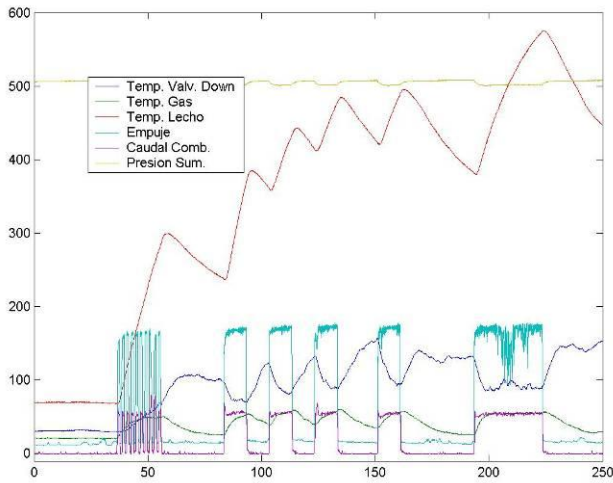
La Tabla 4 muestra valores que fueron recopilados del documento de diseño del REA [1], los cuales se utilizan como referencia para comparar los valores obtenidos del ensayo.

Combustible	Hidracina (N <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )
Catalizador	Shell 405®
Empuje	1,55 N
Caudal de combustible	0,6774 gr/s
Impulso específico	233,25 s
Presión de ingreso de combustible	485 psi (33 bar)

Tabla 4 – Datos de diseño del REA

Los datos recolectados y luego analizados, corresponden a la secuencia de disparos 1, 2, 3 y

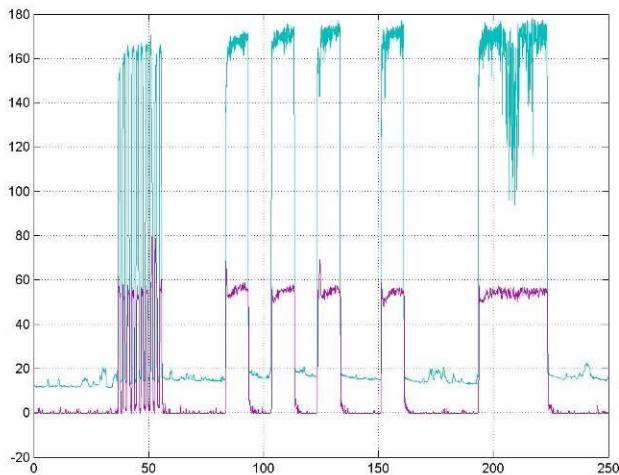
4. Estos datos fueron filtrados y procesados para obtener las graficas que se observan a continuación (Figura 9 a Figura 15).



**Figura 9. Superposición de parámetros y referencia de colores**

La Figura 9 muestra una grafica que superpone todos los parámetros medidos, que se identifican con diferentes colores.

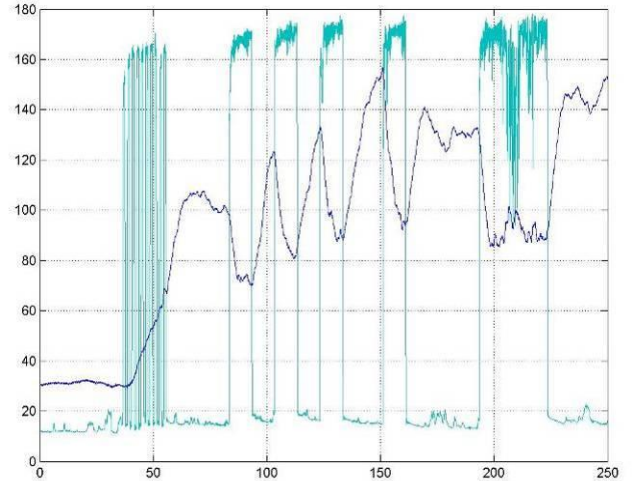
En el eje de ordenadas se reflejan los valores de Empuje ( $1 \times 10^{-2}$  Newton), Temperaturas ( $^{\circ}\text{C}$ ), Caudal ( $1 \times 10^{-2}$  gr/s) y Presión (psi); el eje de abscisas representa el valor del tiempo en segundos.



**Figura 10. Empuje / caudal de combustible vs tiempo [ $10^{-2}\text{N} / 10^{-2}\text{gr vs. s}$ ]**

Como se observa en la Figura 10, el valor de empuje no parte de cero, puesto que se aplicó una precarga de  $15 \times 10^{-2}$  N entre el REA y la

celda de carga para garantizar el contacto permanente entre ambos y minimizar errores en la medición. El valor medio del empuje obtenido es de 1,7 N y el caudal medio consumido es de 0,58 gr/s.

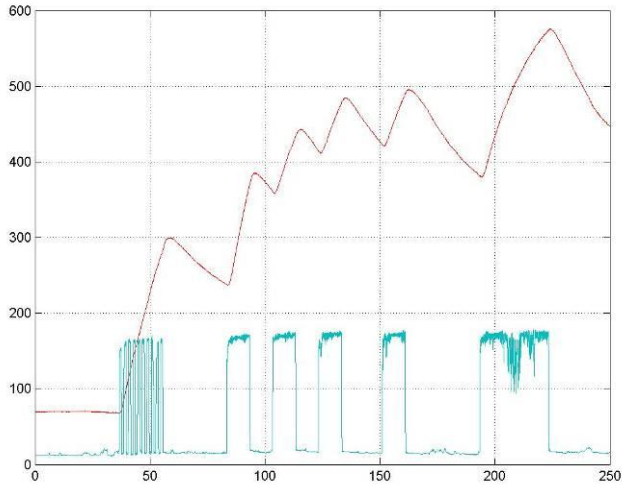


**Figura 11. Empuje / temperatura de la válvula vs tiempo [ $10^{-2}\text{N} / ^{\circ}\text{C vs. s}$ ]**

En la Figura 11 se puede observar el comportamiento de la temperatura de la válvula, la que cae cuando hay empuje y aumenta cuando cesa dicho empuje. Ello ocurre porque cuando hay empuje el combustible (hidracina) circula y refrigera la válvula, extrayendo el calor generado y transferido desde el lecho catalítico, haciendo que disminuya la temperatura; por el contrario, al dejar de circular el combustible, el calor se acumula aumentando por consecuencia el valor de la temperatura.

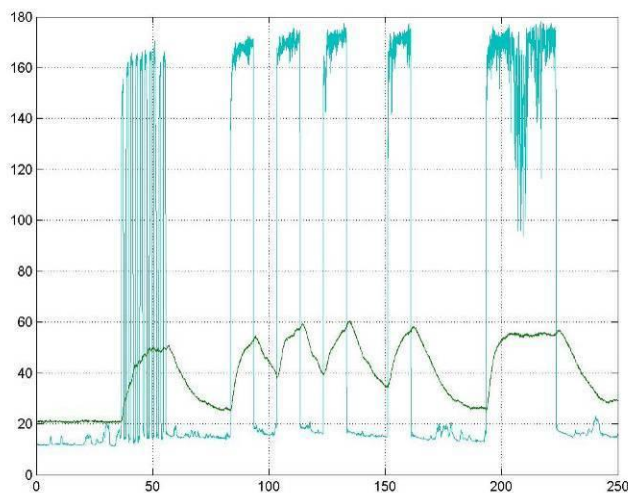
El gráfico de la Figura 12 muestra la evolución de la temperatura en el lecho catalítico. Como era de esperar, dicha temperatura aumenta durante los ciclos de empuje del motor, debido a la reacción química exotérmica generada por la descomposición del combustible al entrar en contacto con el catalizador.





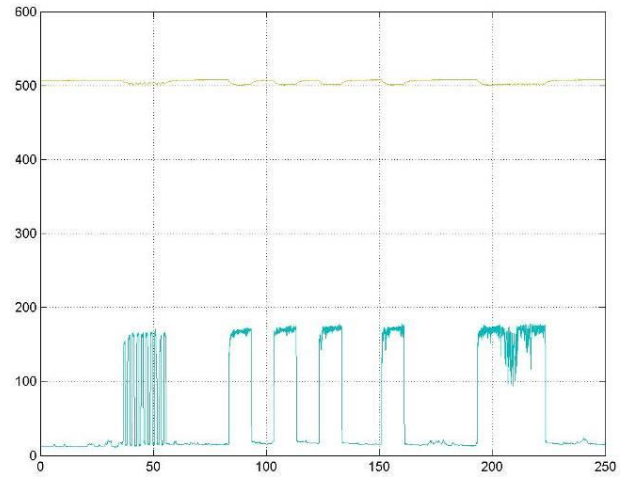
**Figura 12. Empuje / temperatura del lecho catalítico vs tiempo [ $10^{-2}N / ^\circ C$  vs. s]**

Realizando el ajuste de una función exponencial a la curva de temperatura del lecho catalítico, mostrada en la Figura 12, que arranca en 190s se puede extrapolar un valor final cercano a los  $655^\circ C$ , para estas condiciones ambientales de ensayo. Este valor es de gran importancia ya que permite inferir la temperatura máxima que alcanzaría el lecho catalítico en un ensayo de *Total Throughput*, que consiste en evaluar el comportamiento del REA en funcionamiento continuo durante un tiempo que se aproxima a 85000 s.



**Figura 13. Empuje / temperatura de gases vs tiempo [ $10^{-2}N / ^\circ C$  vs. s]**

La temperatura de los gases a la salida (Figura 13), medida a una distancia de 30 mm de la boca de la tobera, no superó los  $60^\circ C$ .



**Figura 14. Empuje / presión de ingreso de combustible vs tiempo [ $10^{-2}N / psi$  vs. s]**

La presión de ingreso de combustible se fijó en 500 psi, 15 psi por encima del valor requerido, para absorber la pérdida de carga que ocasionan los componentes del circuito hidráulico hasta llegar al REA. Dicha presión se mantuvo estable durante todo el ensayo.

Para analizar el comportamiento del REA en régimen, se filtraron y procesaron los datos obtenidos en las secuencias de ensayo 5 y 6 respectivamente.

El objetivo perseguido fue observar el valor máximo que alcanza la temperatura del lecho catalítico y la temperatura de la válvula, sin perder de vista el empuje generado por el REA.

En la Figura 15 se observa que la temperatura del lecho catalítico crece y se estabiliza alrededor de los  $600^\circ C$ , alcanzando un valor máximo de  $620^\circ C$  aproximadamente. Este valor es importante porque tiene efectos sobre la vida útil del catalizador.

Por otro lado, se observa también que la temperatura de la válvula no superó el valor de  $200^\circ C$ , asegurando que la integridad de los sellos blandos de la válvula no es puesta en riesgo.

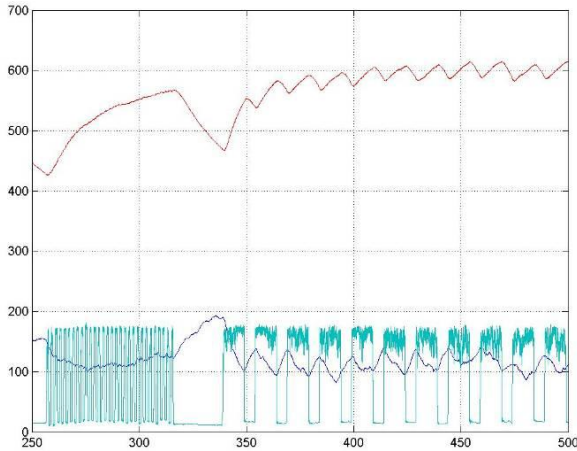


Figura 15. Empuje/temperatura del lecho catalítico / temperatura de la válvula vs. tiempo [ $10^{-2}N/^\circ C/^\circ C$  vs. s]

También en la Figura.15 se visualiza el efecto refrigerante que produce el combustible al fluir por el asiento de DownsV denotado por el descenso de temperatura en contraposición con lo que sucede en el lecho catalítico

## CONCLUSIONES

Haciendo una evaluación del ensayo se concluye que fue exitoso, ya que el REA no sufrió daños o roturas durante su ejecución y los parámetros medidos resultan muy próximos a los valores establecidos y calculados en el diseño.

Cabe aclarar que este ensayo fue realizado a presión y temperatura ambiente y no en condiciones de vacío parcial como realmente opera el REA durante su vida útil en el espacio. Es de esperar que en estas condiciones las temperaturas sean más elevadas, debido a una menor disipación, y el valor del empuje algo mayor.

## AGRADECIMIENTOS

La presente investigación fue desarrollada en el marco del proyecto de investigación "Análisis del comportamiento termomecánico de un motor monopropelente" UTN-FRC y apoyada financieramente por el CONICET. Los autores agradecen a estas instituciones el apoyo brindado.

## REFERENCIAS

[1] SALOMONE, J. E. - JAZNI, J. E.- LAGIER, S.- COVA, W.J.D.- GONZALEZ, G. J.- YASIELSKI, R.

**Desarrollo de motor monopropelente de 1,5 N Para control de actitud y órbita de satélites- AATE 2007**

[2] CAGLIOLO, C. M. - SALOMONE, J. E. JAZNI, J. E. -

LAGIER, S. **Análisis del comportamiento térmico del conducto de alimentación de combustible en motores monopropelente de bajo empuje- AATE 2007**

[3] GONZÁLEZ, G. J.- JAZNI, J.E.- COVA, W.J. D.

SALOMONE, J.E.- YASIELSKI, R. **Manejo de hidracina – almacenamiento y transferencia a contenedores y vehículos- AATE 2007.**