

Capítulo 72

Diseño de un dispositivo para rehabilitación de rodilla a través de movimientos de flexión y extensión en pacientes adultos

Vergara, Mary^{1,3*}; Pachano, Leonardo¹; Provenzano, Sebastian¹; Diez y Riega Jesús²; Restrepo³, Magda; Segnini, José³

¹ Facultad de Ingeniería, Grupo de Diseño y Modelado de Máquinas, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.

² Facultad de Medicina, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela

³ Escuela de Diseño, Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Sede Ibarra. Ibarra, Ecuador

* vmaryjose@gmail.com

Resumen

En la mayoría de casos, la rehabilitación de rodilla se indica seguidamente de la intervención quirúrgica de esta articulación en busca de contribuir a la recuperación del paciente. Sin embargo, los elevados niveles de dolor asociados a la cirugía de rodilla evitan que los pacientes puedan ejercitar la articulación de manera independiente. Por ese motivo, el Movimiento Pasivo Continuo (MPC) es un tipo de rehabilitación común en estos casos. El MPC, se basa en el uso de un dispositivo diseñado para ejercitar la articulación en un rango de velocidad y amplitud controlado de acuerdo a las indicaciones del médico tratante. A nivel nacional, el uso de dispositivos de MPC se encuentra limitado debido al elevado costo que supone la importación de los mismos. En consecuencia, este trabajo propone el diseño de un dispositivo de bajo costo para rehabilitación pasiva de rodilla que tome en consideración el uso de materiales disponibles en el mercado. Herramientas de diseño asistido por ordenador permiten evaluar el comportamiento cinemático y estructural del dispositivo. Así, los esfuerzos y deformaciones totales estimadas mediante el método de elementos finitos muestran que la configuración geométrica y los elementos que se proponen para la manufactura del dispositivo resultan adecuados para garantizar el correcto funcionamiento bajo condiciones de operación críticas. Finalmente, el proceso de diseño implementado conlleva a un prototipo virtual basado en un mecanismo de cuatro barras, de un grado de libertad, actuado por un tornillo de potencia y un motor DC.

ISBN: 978-980-11-1858-9



9 789801 118589

1 Introducción

La rehabilitación pasiva indicada a pacientes luego de algún tipo de cirugía o evento traumático, encuentra su fundamento en el uso de dispositivos externos que inducen sobre la articulación afectada un movimiento controlado que facilita la recuperación progresiva del paciente. Bajo esa idea, El Movimiento Pasivo Continuo (MPC) es una modalidad de terapia postoperatoria basada en el uso de dispositivo que somete a la articulación a un rango de movimiento preestablecido y por un período de tiempo determinado (Rosero y col., 2001), buscando recuperar la movilidad de la articulación, disminuir el trabajo repetitivo de un fisioterapeuta y reducir el tiempo de recuperación (Ortega y col., 2011).

En la literatura, se hace referencia a varios trabajos que giran en torno al desarrollo de dispositivos para rehabilitación pasiva de miembros inferiores. En esos trabajos se plantea el uso de robots terapéuticos de tres grados de libertad en capacidad de realizar movimientos de flexión y extensión de rodilla, así como también abducción y aducción de cadera (Akdoğan col., 2011, Guzmán y col. 2014). Por otro lado, se han presentado diseños enfocados concretamente a la rehabilitación basados en mecanismos de cuatro barras con actuadores neumáticos de tipo REC (Rotary Elastic Chambers) (Wilkening y col., 2012), todos ellos sin considerar costos finales para adquisición de los mismos.

En Venezuela, según datos del Instituto Nacional de Estadística (INE) se estima que hay alrededor de 245000 personas con algún tipo de discapacidad musculoesquelética (Censo Nacional de Población y Vivienda, 2014). Esa cifra, que aunada al gran número de pacientes que requirieron rehabilitación física postoperatoria, se traduce en personal insuficiente para atender y conducir los ejercicios indicados para la recuperación del paciente. En ese sentido, los dispositivos de Movimiento Pasivo Continuo pueden ayudar a cerrar la brecha generada por el déficit de personal. Los resultados obtenidos, muestran que es posible obtener un prototipo de bajo costo para rehabilitación de rodilla, utilizando un mecanismo de cuatro barras, de un grado de libertad que cumple con movimientos de flexión y extensión.

2 Movimiento pasivo continuo

En 1926, Von Rienke, presidente de la Sociedad Danesa de Cirugía sentó las bases para el posterior desarrollo del concepto de Movimiento Pasivo Continuo (MPC), afirmando que cualquier articulación afectada debía ser movilizada, que el movimiento debía ser muy lento y tan continuo como fuese posible. Años después, durante la década del 60, Salter realizó investigaciones experimentales que demostraron que la inmovilización bajo compresión de la rodilla en un conejo resultaba en la necrosis del cartílago, estos estudios le permitieron derivar el concepto de MPC. Salter pensaba

que dado que la inmovilización era obviamente negativa para las articulaciones, y considerando que la movilización intermitente de éstas era saludable, entonces tal vez el movimiento continuo pudiese resultar beneficioso. Dado que se esperaba que el paciente no pudiese mover la articulación por sí mismo, por lo tanto, la movilización debía ser pasiva (O'Driscoll y col., 2000).

Bajo la luz de las consideraciones anteriores, el MPC se refiere a un tipo de rehabilitación pasiva en la que la movilización de la articulación es producida por algún dispositivo donde el paciente no realiza esfuerzo para hacer el movimiento. La articulación se somete a un rango de movimiento preestablecido y por un período de tiempo determinado (Rosero y col., 2001), así se resalta el interés, de plantear como parte primordial del estudio un análisis holístico que considere la cinética y cinemática del sistema para rehabilitar la rodilla.

3 Análisis cinemático y cinético del dispositivo

El diseño del dispositivo parte del establecimiento de las relaciones entre los pares cinemáticos de los eslabones del mecanismo que permitan cumplir las especificaciones de diseño (ángulo de flexo-extensión de la rodilla entre 70° y 180° entre 18°/min y 180°/min), para dar paso al análisis cinético y estructural del dispositivo.

3.1 Síntesis cinemática

A través de la síntesis cinemática del mecanismo se busca establecer las dimensiones de los eslabones que lo conforman y la trayectoria que éstos describen. Las relaciones entre los pares cinemáticos que relacionan el balancín con la bancada y por otro lado el balancín con la biela, deben corresponder a las longitudes del muslo y la pierna respectivamente.

En relación a la cinemática, la posición de la rodilla del paciente debe coincidir con el par de revolución que conecta el balancín con la biela. Por tanto, las longitudes de esos eslabones pueden ser fijadas en función de la longitud del muslo y de la pierna con el uso de Eq. (1) y Eq. (2) (Tözeren, 2000).

$$L_{\text{balancin}} = 24.7\%(talla) \quad (1)$$

$$L_{\text{biela}} = 25.6\%(talla) \quad (2)$$

Considerando que el dispositivo debe adaptarse a la población adulta venezolana, en base a los datos antropométricos ofrecidos por la Fundación Centro de Estudios Sobre Crecimiento y Desarrollo de la Población Venezolana (FUNDACREDESA 2014) se establece un valor fijo para la longitud del balancín y seis posibles longitudes para la biela, lo que permite configurar el dispositivo de rehabilitación para seis posibles usuarios en función de su talla.

Tabla 1. Datos de peso y talla de la población masculina venezolana

Edad (años)	Peso (kg)			Talla (mm)		
	10 Percentil	50 Percentil	90 Percentil	10 Percentil	50 Percentil	90 Percentil
17	48.6	58.6	72.5	1617	1701	1785
18	50.5	60.0	73.8	1622	1706	1789
19	51.8	60.8	74.6	1622	1706	1789

Tabla 2. Datos de peso y talla de la población femenina venezolana [9]

Edad (años)	Peso (kg)			Talla (mm)		
	10 Percentil	50 Percentil	90 Percentil	10 Percentil	50 Percentil	90 Percentil
17	43.8	52.3	64.2	1505	1580	1654
18	44.1	52.6	64.6	1505	1580	1654
19	44.2	52.7	64.8	1505	1580	1654

Tabla 3. Longitudes tentativas para los eslabones biela y balancín

Configuración	Talla (mm)	L _{balancín} (mm)	L _{biela} (mm)
1	1505		385.3
2	1580		404.5
3	1622	441.9	415.2
4	1654		423.4
5	1706		436.7
6	1789		458.0

Dado que las variaciones entre una configuración y otra no discrepan en gran medida, se establece un intervalo estándar de 15 mm que permita tener una distribución uniforme para las diferentes configuraciones, permitiendo adaptar el dispositivo a la mayor cantidad de pacientes posible.

Tabla 4. Longitudes para los eslabones biela y balancín

Configuración	L _{balancín} (mm)	L _{biela} (mm)
1		383
2		398
3	441.9	413
4		428
5		443
6		458

Por último, la Fig. 1 esquematiza el eslabonamiento propuesto para el diseño. Los valores de las variables “L” y “Ang_fijo” se ajustan aplicando un análisis de sensibilidad de parámetros en AdamsTM. Para esa simulación, las variables a ser optimizadas son parametrizadas en función de la variable “A”, fijando como objetivo conseguir que la variable “Ang_rodilla” alcance 70°. Los resultados del estudio de sensibilidad indican que los valores óptimos para la dupla “L” y “Ang_fijo” son 266mm y 52° respectivamente.

3.2. Análisis cinemático

Con base en la simulación cinética se deriva que para obtener velocidades angulares para el movimiento de flexo-extensión de rodilla en el rango de 18 a 180°/min, la velocidad lineal del carro debe estar entre 34 y 340 mm/min. La correspondencia entre la velocidad lineal del carro y la velocidad de giro del motor puede conseguirse

con el uso de la Eq. (3) que relaciona estos parámetros con las características geométricas de la rosca Acme seleccionada para el tornillo de potencia y que se agrupan en la Tabla 5.

$$\omega_{motor} = \frac{V_{lineal_carro}}{p} \quad (3)$$

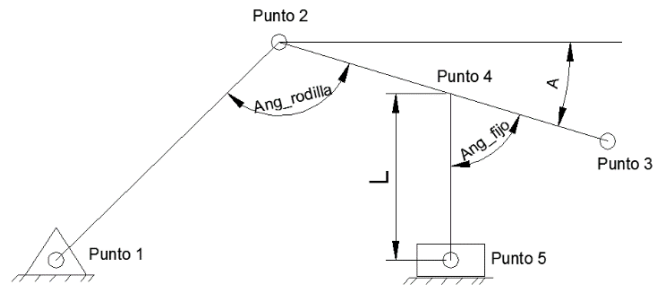


Figura 1 - Parámetros considerados en el estudio de diseño en AdamsTM.

Tabla 5. Dimensiones principales para rosca Acme simple (Norton 2011)

Diámetro mayor [pulg]	Diámetro de paso (D _p) [pulg]	Diámetro de raíz (D _r) [pulg]	Paso (P) [pulg]	Avance (L) [pulg]	α [°]
5/8	0.563	0.500	0.125	0.125	14.5

Tabla 6. Correlación entre velocidad lineal del carro y velocidad de giro del motor.

V _{lineal_carro} [mm/min]	ω _{motor} [rpm]
34	10.7
50	15.7
100	31.5
150	47.2
200	63.0
250	78.7
340	107.1

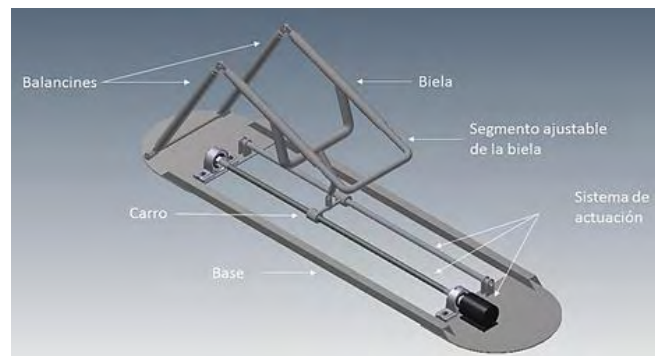


Figura 2 - Geometría del dispositivo de rehabilitación generada en Inventor®.

3.3 Análisis cinético

La determinación de las cargas que actúan sobre los pares cinemáticos del mecanismo se determina mediante una simulación dinámica de cuerpo rígido, con el estado de carga definido por los valores obtenidos de la Eq. (4) y Eq. (5) [8], y con la velocidad lineal crítica del carro de 340 mm/min, según se esquematiza en la Fig.3.

$$w_{\text{muslo}}=9.88\%(\text{peso}) \quad (4)$$

$$w_{\text{pierna}}=4.65\%(\text{peso}) \quad (5)$$

Los resultados de la simulación, indican que la fase crítica corresponde a la fase para la cual el ángulo de los balancines es de 14° , fase que coincide con la ilustrada en la Fig. 3. Por su parte, la Tabla 7 recoge los valores de cargas generadas en los pares cinemáticos del mecanismo.

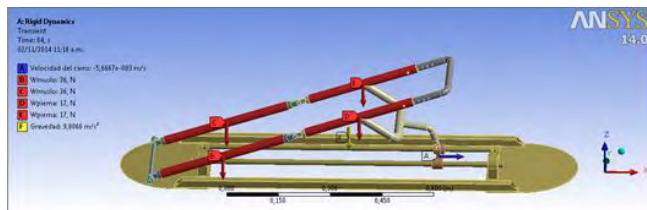


Figura 3 - Estado de carga general para el dispositivo de rehabilitación.

Tabla 7. Cargas resultantes en los pares cinemáticos

Par cinemático	F_x [N]	F_z [N]
Balancín-Base	-50.84	-34.68
Biela-Balancín	50.83	-1.31
Biela-Carro	101.66	-36.62

4 Analisis estructural

4.1 Biela

Para estudiar la respuesta de la biela ante el estado generalizado de carga crítico, se realiza en ANSYS Workbench una simulación dinámica multicuerpo que permite estudiar el comportamiento de la biela a lo largo de todo el rango de movimiento del dispositivo.

Tabla 8. Resultados de la simulación dinámica multicuerpo de la biela.

Malla	Esfuerzo equivalente de Von Mises [Mpa]	Número de elementos	Error estructural [%]
1	28.84	6172	0.003085
2	30.97	23618	0.001212
3	31.51	25162	0.002859
4	31.04	26812	0.0007863

Por su parte, la Fig. 4 presenta los resultados obtenidos para la distribución del esfuerzo equivalente de Von Mises (arriba) y la deformación total (abajo) sobre la biela con la última malla usada, así como también, una gráfica que muestra cual es el comportamiento de los paramentos en estudio durante todo el rango de movimiento del dispositivo de rehabilitación. En la fase crítica que corresponde a la fase inicial del movimiento (cuando el ángulo de la rodilla es 180°) el esfuerzo equivalente de Von Mises alcanza un valor máximo de 31.04 Mpa que está considerablemente por debajo del esfuerzo de fluencia de 276 Mpa de la tubería

seleccionada para el diseño de la biela (UNICON, 2014). Por otro lado, la deformación total máxima para la fase crítica se sitúa en 0.0001562 m/m, valor aceptable para dar cabida a asegurar que el elemento puede operar de forma segura.

La biela resulta un elemento de particular interés pues es el eslabón con el estado de esfuerzo más crítico, razón por la que se debe prestar una mayor atención al comportamiento estructural de éste.

Dado que la biela es el elemento más crítico del sistema mecánico y considerando que su factor de seguridad es de 13, bajo el estado de carga y la fase más desfavorable, es viable asegurar que para los demás elementos del dispositivo de rehabilitación los valores de factor de seguridad estarán por encima de la unidad, garantizando que éstos no fallarán desde el punto de vista de resistencia del material.

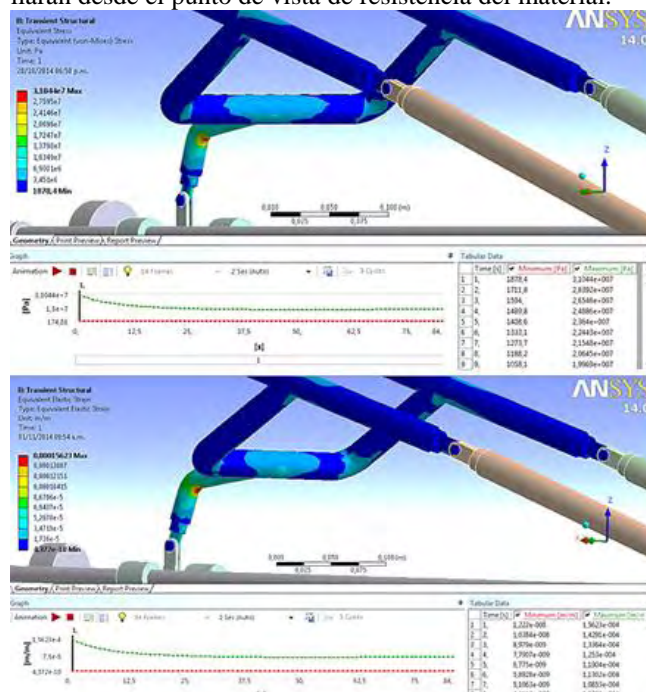


Figura 4 - Distribución del esfuerzo equivalente de Von Mises y deformación total en la biela.

4.2 Balancín

El estudio de la respuesta ante carga del balancín, se realiza mediante una simulación estática estructural de conjunto, donde se consideran todos los elementos que conforman el dispositivo de rehabilitación en la fase crítica. Dada las características simétricas del mecanismo, se espera un comportamiento análogo para cualquiera de los dos balancines. Un punto de prueba sobre esa zona permite obtener los resultados que se presentan en la Tabla 9.

A través de los resultados de la Tabla 9 se puede ver la marcada tendencia a cero sobre la que se mantiene el error estructural de una malla a otra.

Los resultados que se observan en la Fig. 5, son indi-

cadores de un diseño capaz de resistir el estado de carga más desfavorable para el balancín. Por un lado, el esfuerzo equivalente de Von Mises adopta un valor máximo de 3.11 Mpa, de nuevo muy por debajo de las propiedades admisibles del tubo que conforma el elemento. De manera similar, la deflexión total, en la zonacritica apenas alcanza los 0.02494 mm, asegurando así que el elemento está en capacidad de soportar el estado de carga sin presentar problemas de pandeo.

Tabla 9. Resultados de la simulación estática estructural para el balancín

Malla	Esfuerzo equivalente de Von Mises [Mpa]	Número de elementos	Error estructural [%]
1	2.91	1705	0.00007956
2	3.08	10999	0.00005090
3	3.08	13026	0.00003693
4	3.11	33024	0.00004286

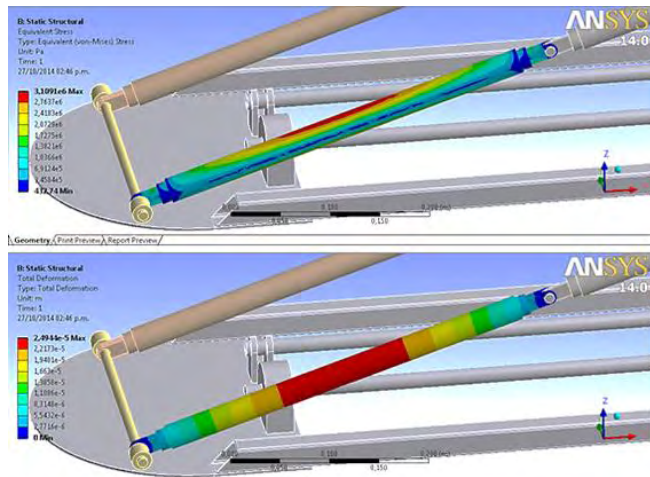


Figura 5 - Distribución del esfuerzo equivalente de Von Mises y deflexión total sobre el balancín.

4.3 Carro

Los resultados de la Tabla 7, sirven como base para definir el estado de carga del carro, paso fundamental para la realización del estudio estructural de este componente. Como parte de los pasos preliminares de este estudio, también se definieron restricciones del tipo cilíndricas radiales-axiales en las zonas donde el carro se acopla a la biela y restricciones cilíndricas tangenciales-radiales en las zonas de contacto entre el carro y la base. Los parámetros descritos, dan paso al estudio estático estructural del carro para determinar cuál es la respuesta de éste ante la presencia de carga.

Los diferentes resultados que se obtienen mediante el punto de prueba ubicado en la zona de acople entre el carro y el balancín se presentan en la Tabla 10, donde se observa la tendencia del esfuerzo equivalente de Von Mises a converger en un valor cercano a 2.53 Mpa, con una pronunciada tendencia a cero del error estructural.

Tabla 10. Resultados de la simulación estática estructural para el carro

Malla	Esfuerzo equivalente de Von Mises [Mpa]	Número de elementos	Error estructural [%]
1	2.36	1143	0.00001702
2	2.44	3104	0.0000004906
3	2.45	5678	0.0000001968
4	2.53	10588	0.00000008263

La distribución del esfuerzo equivalente de Von Mises de la Fig. 6 muestra como éste parámetro alcanza un valor máximo de 2.50 Mpa, con un valor de deflexión total máxima asociada de 0.0001073 mm. Dado que esos valores son estimados en la fase crítica y con el estado de carga menos favorable, resulta viable afirmar que se espera un comportamiento apropiado para este componente, libre de estados de falla.

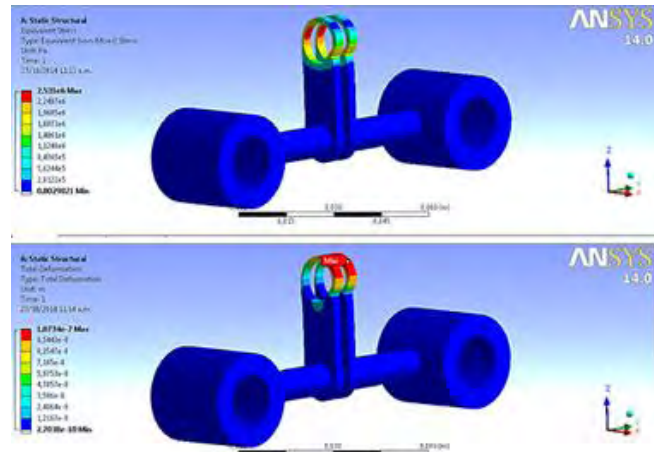


Figura 6 - Distribución del esfuerzo equivalente de Von Mises y deflexión total sobre el carro.

4.4 Base

De manera similar al análisis estructural del carro, el estudio del comportamiento de la base del dispositivo de rehabilitación, se sustenta en un estudio estático estructural que tiene como referencia por un lado la Tabla 7 y por otro la restricción propia del caso que corresponde a un soporte fijo en la parte inferior de la base.

La mayor densidad de elementos sobre el tubo guía corresponde a que sobre esa sección se realizan los refinamientos, dada su condición propensa a problemas de pandeo que pueden comprometer el funcionamiento del dispositivo de rehabilitación. Por esa razón, para este caso en particular resulta relevante prestar una mayor atención a los niveles de deflexión total. Por ello, la Tabla 11 resumen los valores obtenidos para este parámetro con cada malla, donde la tendencia a converger alrededor de 0.069 mm está acompañada de una tendencia a cero del error estructural.

Tabla 11. Resultados de la simulación estática estructural para la base

Malla	Deflexión total [mm]	Número de elementos	Error estructural [%]
1	0.06663	13086	0.0004852
2	0.06906	33581	0.0004629
3	0.06921	47994	0.0004852
4	0.06928	48265	0.0004852

La Fig. 7 es el resultado del estudio estático estructural realizado sobre la base, este estudio permite visualizar cual es la deflexión total máxima bajo el estado más crítico para cuyo caso el parámetro en estudio alcanza los 0.06928 mm, un valor aceptable, que junto con el esfuerzo equivalente de Von Mises de 7.47 Mpa como valor máximo, son indicadores del apropiado comportamiento que tiene la base en términos de deflexión y resistencia.

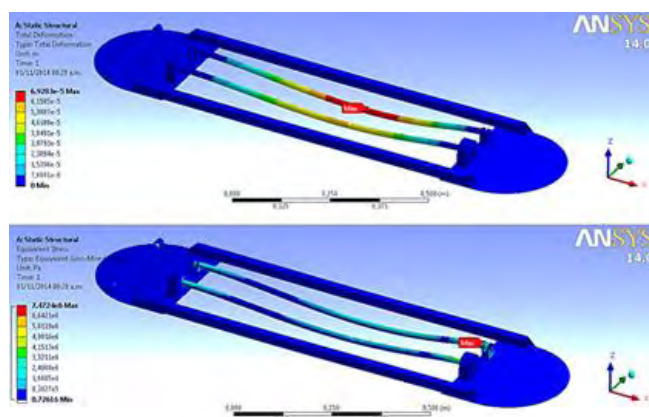


Figura 7 - Deflexión total y distribución del esfuerzo equivalente de Von Mises sobre la base.

5 Conclusiones

Con el proceso de diseño realizado se obtuvo un prototipo virtual de un dispositivo para rehabilitación de rodilla a través de movimientos de flexión y extensión en pacientes adultos, donde se utilizaron materiales disponibles en el mercado nacional para mantener los costos en el nivel más bajo posible a la hora de la manufactura de un prototipo físico.

El prototipo virtual desarrollado, corresponde a un dispositivo para la rehabilitación pasiva de rodilla, basado en un mecanismo Balancín-Biela-Carro, de un grado de libertad, actuado por un motor DC acoplado a un tornillo de potencia cuya tuerca sirve como elemento de transmisión de la potencia entregada por el motor. El diseño presentado considera las características antropométricas de la población adulta venezolana, por lo que, la longitud de la biela puede ser ajustada en seis diferentes posiciones para adaptar el dispositivo a distintos pacientes en función de su talla.

En lo relativo a la cinemática del dispositivo, los resultados obtenidos de la simulación muestran como ésta se

adapta a las especificaciones de diseño que fueron definidas en base a entrevistas realizadas a expertos en el área. El dispositivo puede ofrecer un rango de movimiento de manera tal que el ángulo de la rodilla varíe entre las posiciones extremas de 70 y 180°, posiciones parte del proceso de rehabilitación.

Los resultados del análisis cinético y estructural, para todos los elementos estudiados, muestran que los valores del esfuerzo equivalente de Von Mises resultan ser lo suficientemente bajos como para no esperar ningún tipo de falla desde el punto de vista de resistencia del material.

Referencias

- Akdoğan E, Adli MA, 2011, Thedesign and control of a therapeuticexercise robot forlowerlimbrehabilitation: Physi- otherobot. *Mechatronics*, vol. 21, n. 3, pp. 509-522.
- FUNDACREDESA (2015). Tabla de peso, talla, circunferencia cefalica y circunferencia de brazo. Recuperado el 13 de Noviembre de 2015 de <http://fundacredesa.gov.ve/2015/11/13/Tabla-de-peso-talla-circunferencia-cefalica-y-circunferencia-de-brazo/>, s.f.
- Guzmán Valdivia CH, Blanco Ortega A, Oliver Salazar MA, Azcaray Rivera HR, 2014, Modelado y Simulación de un Robot Terapéutico para la Rehabilitación de Miembros Inferiores. *Revista Ingeniería Biomédica*, vol. 7, n. 14, pp. 42-50.
- Norton RL, 2011, Diseño de máquinas. Pearson Educación de México, S.A.
- O'Driscoll SW, Giori NJ, 2000, Continuouspassivemotion (CPM): theory and principles of clinicalapplication. *Journal of rehabilitationresearch and development*, vol. 37, num. 2, pp. 179-188.
- Ortega AB, Rivera HA, Valdés LV, Bautista, RV, 2011, Prototipo virtual de unrehabilitador de tobillo. IX Congreso Internacional sobre Innovación y Desarrollo Tecnológico-CIINDET.
- Rosero EE, Martínez R, Galvis E, 2001, Diseño y construcción de una máquina de Movimiento Pasivo Continuo para la Terapia de Rodilla. *RevistaIngeniería y Competitividad*, vol. 3, n. 2, pp. 56-64.
- Tözeren A, 2000, Human bodydynamics: classicalmechanics and human movement. Springer.
- UNICON (2014). Información General de Productos – Tubos para carpintería metálica. Recuperado el 15 de Agosto de 2014 de <http://www.unicon.com.ve/descargas.html>, s.f.
- WilkeningA, Baiden D, Ivlev O, 2012, Assistive acting movement herapy devices with pneumaticrotary-type softactuators. *BiomedizinischeTechnik/BiomedicalEngineering*, vol. 57, n. 6, pp. 445-456.
- XIV Censo Nacional de Población y Vivienda, Resultados Básicos, Total Nacional y Entidades Federales (2015). Recuperado el 04 de Agosto del 2015 de http://www.ine.gov.ve/index.php?option=com_content&view=category&id=95

&Itemid=9, s.f.

Vergara, Mary: Ingeniero Mecánico egresado de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Los Andes. PhD en Ingeniería Industrial.

Pachano, Leonardo: Ingeniero Mecánico egresado de la de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Los Andes. Correo electrónico: lpachano@gmail.com

Provenzano, Sebastian: Ingeniero Mecánico egresado de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Los Andes. PhD en Ingeniería Industrial. Correo electrónico: pre@ula.ve

Diez y Riega, Jesús: Estudiante de Medicina de la Universidad de Los Andes Venezuela. Correo electrónico: diezyriegaj@gmail.com

Restrepo, Magda: Ingeniera en Diseño de Modas. Maestrante de TIC'S. Docente de la Pontificia Universidad Católica de Ecuador. Sede Ibarra. Correo electrónico: mvrestrepo@pucesi.edu.ec

Segnini, José: Ingeniero Mecánico. Msc. de Ingeniería en Mantenimiento. Docente de la Pontificia Universidad Católica de Ecuador. Sede Ibarra. Correo electrónico: jmsegnini@pucesi.edu.ec

Automatización y estimación de la composición de una columna de destilación atmosférica: Una implementación real

Camacho, Oscar ^{1,2*}; Rodas, Ana¹

¹Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica,
Departamento de Automatización y Control Industrial. Quito, Ecuador

² Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería. Mérida, Venezuela

*ocamacho@ula.ve

Resumen

En este trabajo la estimación de la composición de alcohol en una Columna de Destilación Atmosférica, presente en el Laboratorio Operaciones Unitarias de la Facultad de Ingeniería Química de la Escuela Politécnica Nacional, y su control mediante el uso de un PLC y pantalla táctil son realizados. A partir de una columna de destilación totalmente manual, se cambiaron los elementos de medición y actuación para reemplazarlos por elementos con salida eléctrica y se adecuaron los elementos de la planta en funcionamiento. La programación del PLC se realizó en lenguaje escalera y para la pantalla táctil se usó el lenguaje de pantallas, logrando la interacción entre ambos mediante comunicación RS232. En el panel táctil se implementaron pantallas que permiten elegir el modo de control y operación: manual y semiautomático, el ingreso de datos, visualización de la temperatura en función del tiempo y la pantalla de trabajo la cual presenta un esquema de la planta y de sus actuadores. De esta manera se reduce el mando del operario en la columna de destilación y por ende disminuye el error humano en el manejo de la misma. Para determinar la composición de alcohol obtenida en el producto destilado, se utiliza la estimación en términos de variación de temperatura, a través de la ecuación de Antoine, lo cual permite la posibilidad de usar ésta para aplicaciones de controles avanzados y no lineales, y evitar la adquisición de costosos analizadores. La columna de destilación fue automatizada, se hizo una estimación de composición y esta señal se usó para mejorar el desempeño de la misma, disminuyendo el tiempo de trabajo, facilitando la visualización de las variables y activando los actuadores presentes en la planta acorde a su modo de trabajo.

ISBN: 978-980-11-1858-9



1 Introducción

La destilación es la operación de separación más antigua y la operación unitaria más ampliamente utilizada en la industria (Treybal 1980, Geankoplis 1998). La destilación utiliza un principio de separación muy simple: un contacto íntimo se da entre la mezcla inicial y una segunda fase para mejorar una transferencia de masa efectiva entre esas dos fases. Las condiciones termodinámicas son escogidas de tal manera que, el constituyente a ser separado de la mezcla inicial pasa a la segunda fase. Las fases son subsecuentemente separadas en dos fases simples con diferentes composiciones. Este método permite la purificación e identificación de líquidos y se utiliza para separar líquidos volátiles de sustancias que no lo son, o bien para separar dos líquidos cuyos puntos de ebullición sean suficientemente distintos (Geankoplis 1998).

El proceso de destilación es fundamental en la elaboración de numerosos productos industriales, aunque sin duda es la industria petroquímica el área industrial en la cual el proceso de destilación adquiere una mayor importancia.

Se sabe que la operación de una columna de destilación implica la alimentación de una mezcla con componentes a separar, tal que a través de la regulación tanto del caudal de reflujo del producto de cabeza de la columna, así como del calentamiento del producto de cola se obtenga un perfil de concentración de productos deseado. Desde un punto de vista, el propósito de la destilación es la obtención de cantidad y pureza definidas de producto tanto en cabeza como en cola de columna en tiempo mínimo, lo cual asegura también mínimo costo. No obstante, en una columna de destilación, la selección e implementación de la estrategia de control adecuada que defina tanto el reflujo como el calentamiento es relativamente complejo. Hoy en día, los sistemas de control avanzados están jugando un papel fundamental en la operación de una planta de procesamiento. Normalmente, los sistemas avanzados de control dependen en gran medida del modelado de procesos en tiempo real, y esto exige un gran desarrollo de modelos eficaces de procesos que, como requisito, tienen que exhibir respuesta en tiempo real. Debido al hecho de que el modelado de proceso detallado no es viable en muchos casos, se han dedicado grandes esfuerzos al desarrollo de modelos dinámicos aproximados, (Geankoplis, 1998)

Las técnicas modernas de control para columnas de destilación (Smith, 2012) requieren que ciertas variables, como es el caso de la variable composición, se encuentren disponibles para su medición. Esta situación no se cumple en la práctica en numerosas ocasiones debido a que no existen instrumentos de medición adecuados para medir en línea, o el uso de estos producen retardos que disminuyen el desempeño del esquema de control. En la literatura existen núme-

ros trabajos basados en observadores, también conocidos como sensores virtuales, los cuales representan una alternativa de solución viable para resolver este tipo de problema. En el caso de los observadores para sistemas no lineales, existen los observadores de gran ganancia desarrollados por (Gauthiery col., 1992). De esta clase de observadores existen algunas extensiones, así como aplicaciones en diferentes procesos, por ejemplo, en biorreactores (Nadriycol 2004) o en reactores de polimerización (Astorga y col., 2002), también (Astorga y col., 2006) presentó una investigación para la estimación de las composiciones en los platos de una columna de destilación a partir de las mediciones de las temperaturas en el hervidor y en el condensador.

Por tanto, en este trabajo en primer lugar se estudiará los conceptos de destilación, y se hará una evaluación de las condiciones en las cuales se encuentra la torre de destilación para posteriormente elaborar un plan que permita la automatización de la misma. Esto permitirá a futuro elaborar estrategias de control avanzadas para la columna con la que se va a trabajar. El trabajo se llevó a cabo en el laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ingeniería Química y Agroindustria de la Escuela Politécnica Nacional. Así, el presente trabajo está relacionada con las técnicas empleadas en la dinámica y control de procesos, que incluyen todo lo asociado a la instrumentación y control, y particularmente está relacionada con un método de estimación de composición para columnas de destilación. Más particularmente, se presenta un sistema de estimación de composición para la columna de destilación mediante el uso de las relaciones que existen entre temperatura y composición a través de la ecuación de Antoine. La estimación se realiza en la composición de cabeza de la columna utilizando la temperatura como variable secundaria de fácil medición, y a partir de ella obtener la concentración.

Esta propuesta trae las siguientes ventajas se trata de un método preciso, que permite, a partir de la estimación de la concentración, la posibilidad de tomar acciones de tipo predictivo, que pueden ser usadas en estrategias de control más elaboradas, que permitirán correcciones a priori y con lo cual se puede alcanzar las especificaciones del producto final durante el proceso de destilación con mayor rapidez, este procedimiento resulta un método mucho más económico que un analizador, dando una respuesta rápida que evita los retardos, que son no linealidades muy adversas que disminuyen el desempeño del sistema de control. Estos resultados son de aplicación inmediata al campo de los procesos asociados a ingeniería química, especialmente en aquellos procesos en los que se necesitan controlar el proceso en una columna de destilación

Este trabajo está dividido de la siguiente manera, la sección 2 presenta una breve de la columna que se usara, la sección 3 se describe el hardware utilizado en la implantación, la sección 4 describe lo referente al software desarrollado, la

sección 5 puntualiza como se desarrolla la estimación de la composición, luego se muestra en la sección 6 el Interfaz Hombre Máquina, en las secciones 7 y 8 se pueden ver los resultados experimentales y análisis para finalmente presentar las conclusiones.

2 Proceso

En el laboratorio de Operaciones Unitarias existe una columna de destilación atmosférica de la década de los 60, la cual tiene una altura de 5 metros y está dividida en 3 pisos, como lo indica la figura 1.

El piso inferior que es en el cual se encuentran la tubería de ingreso de vapor para el calentamiento de la mezcla, y el ingreso de la misma, así como el desalojo de los desechos.

El piso del medio, es donde se encuentra colocada toda la columna, además del panel de control, pero solo se puede tener acceso hasta la mitad de dicha columna, por la altura de esta. En este piso se encuentra el tanque por el cual ingresa la mezcla tanto al inicio del proceso como en la etapa de realimentación. Aquí es donde se ubica el contenedor en el cual se recoge el producto final.

En el piso superior puede acceder a las partes más elevadas de la columna, en la fase de recolección y refrigeración en caso de cambio de algún elemento.

Figura 1. Columna de destilación del laboratorio.



En la figura 2. Se muestra el diagrama de la columna de destilación previo a su automatización

3 Hardware Implementado

Esta sección describe de una manera breve los elementos y dispositivos de hardware que son utilizados primeramente para iniciar la automatización de la columna de destilación. En la Fig.3 semuestra un diagrama esquemático de los elementos que forman parte del sistema de control:

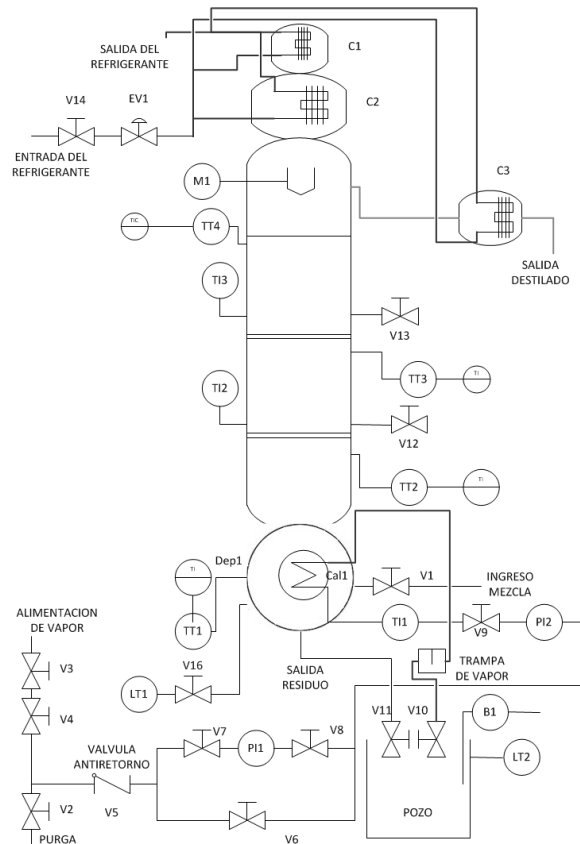


Figura 2. diagrama de la columna de destilación previo a su automatización

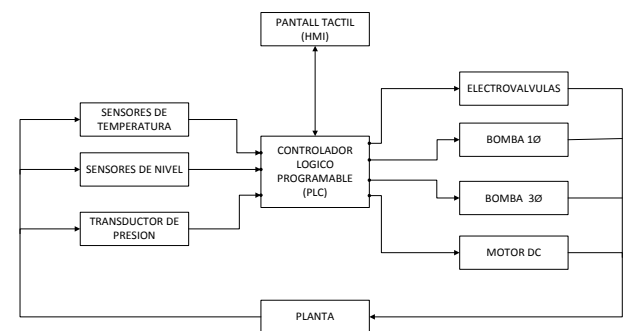


Figura 3. Diagrama de componentes que conforman el proceso.

Se decidió que los actuadores existentes en la columna de destilación se mantendrían ya que su funcionamiento es correcto y solo se añadirán electroválvulas para mejorar el funcionamiento del proceso.

El PLC seleccionado fue el PLC XC3-24RT-E de la marca XINJE(Xinje, 2015), este controlador tiene el número de entradas y salidas que se necesitan, y en el cual se puede añadir un módulo de expansión para el manejo de los RTDs, además de la pantalla táctil, con la cual se puede comunicar (usando un cable XVP).

Tabla 1. Nuevos sensores colocados

Sensor	Señal	Descripción
Temperatura RTD (PT100)	Analógica	Menor riesgo de oxidación Mayor exactitud de medida
Nivel Calderín (Flotador de 3 posiciones)	Digital	Por su ubicación no se sustituyo Se adecuaron las señales para ser enviadas al PLC y tener control sobre los actuadores
Nivel Alto del Pozo (Flotador)	Digital	Señal usada para la activación de la bomba de desechos
Nivel Bajo del Pozo (Flotador)	Digital	Señal usada para la desactivación de la bomba de desechos
Transductor de Presión	Analógica	Sensor usado para regulación del ingreso de presión

Tabla 2. Actuadores colocados

ELEMENTOS	DESCRIPCIÓN
Electroválvula	Usada para el ingreso de refrigerante a los condensadores
Motor DC	Usado para la recolección/reflujo del destilado
Bomba 1ø	Usada para eliminación de residuos del pozo de desechos
Bomba 3ø	Usada para realimentación de mezcla (no está en uso)
V1	Utilizada para el ingreso de la Mezcla al Calderín
V2	Utilizada para realizar la purga de los condensados de la tubería y regulación de la presión de ingreso de vapor
V3	Usada para permitir el ingreso de vapor al serpentín
V4	Utilizada para aprovechar los condensados que salen de la trampa de vapor
V5	Usada para el desalojo de desechos del calderín

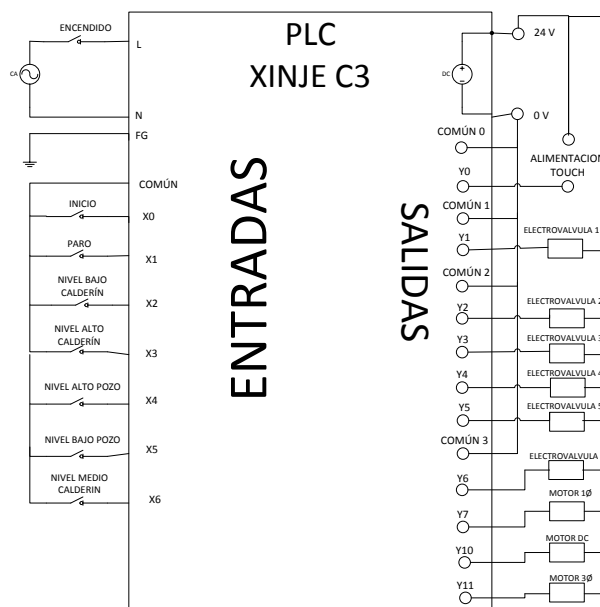


Figura 3. Diagrama PLC usado

4 Software Desarrollado

Esta sección mostrara los diagramas de flujos utilizados para la automatización, el proceso tiene ahora dos modos de operación: manual y semiautomático

En la figura 4, se muestra como iniciar el proceso en modo manual, para ello es necesario activar el control.

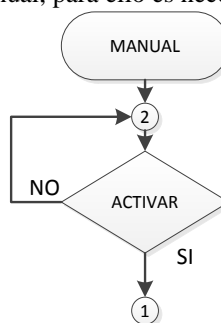


Figura 4. Inicio y activación de control.

La activación de los actuadores en el control manual se lo puede realizar en cualquier momento, teniendo en cuenta ciertas restricciones. A continuación, se describe el diagrama de flujo de cada una de ellas.

Los siguientes diagramas muestran la lógica para la activación de las electroválvulas de mezcla (V1) y purga (V2), Activación de las electroválvulas de trampa (V4) y refrigerante (V6), Condiciones para la activación de motor de recolección, Activación de electroválvula de desechos (V5) y bomba del pozo, Condiciones para la activación de la electroválvula de vapor (V3) y la bomba trifásica de realimentación, Activación de alarmas, Activación de alarma de realimentación

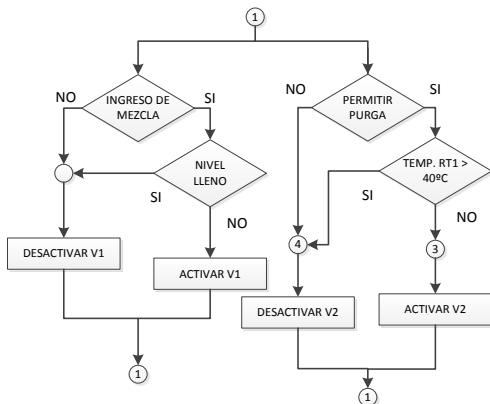


Figura 5. Activación electroválvulas.

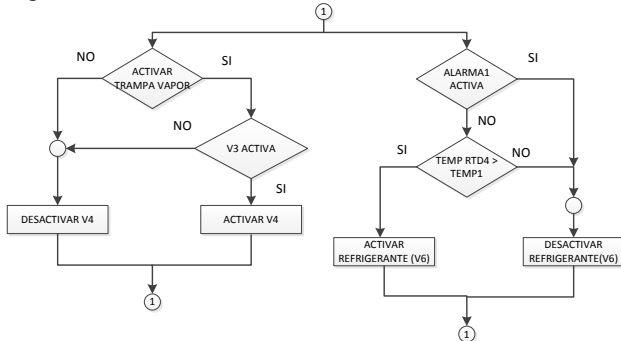


Figura 6. Activación refrigerante.

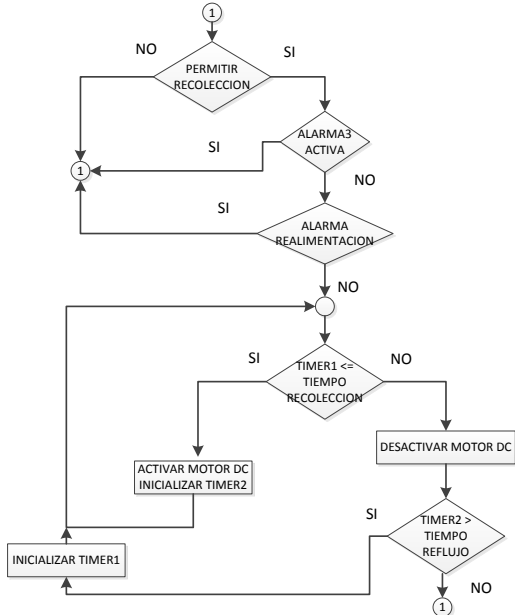


Figura 7. Activación de motor de recolección

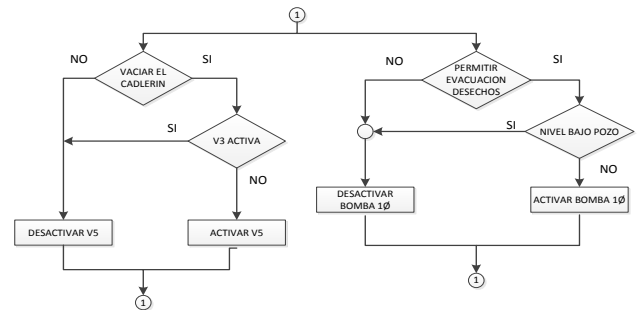


Figura 8. Activación de electroválvula de desechos (V5) y bomba del pozo

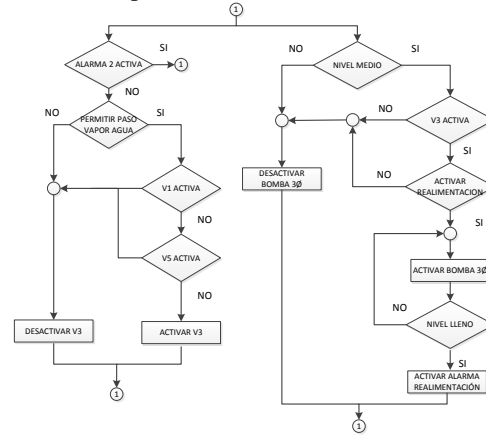


Figura 9. Activación de la electroválvula de vapor (V3) y la bomba trifásica de realimentación

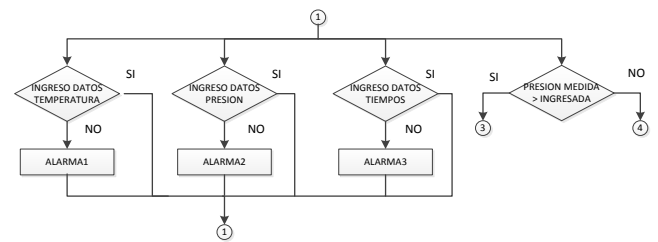


Figura 10. Activación de alarmas

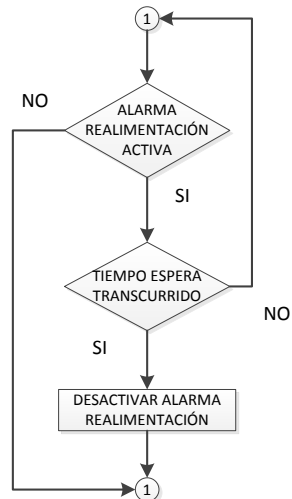


Figura 11. Activación de alarma de realimentación

5 Estimación de la Concentración

Para determinar la concentración de alcohol obtenida en el producto destilado, se hará una estimación mediante el uso de la ecuación de Antoine, de la Ley de Dalton y de la Ley de Raoult (Treybal 1980).

Como primer paso mediante la ecuación de Antoine se determina el valor de T (temperatura de ebullición) de cada uno de los elementos presentes en la mezcla, que en este caso de estudio son: agua y alcohol etílico (etanol).

$$T = \frac{B}{A - \ln P} - C \quad (1)$$

Los valores de las constantes A , B y C de cada uno de los elementos se encuentra en la tabla 3. P es el valor de la presión a condiciones normales que es de 1 atm = 760 mmHg a nivel de mar, pero como la práctica se la realiza a una altitud aproximada de 2850 msnm el valor aproximado de la presión atmosférica es de 10,4 PSI que es equivalente a 537,83 mmHg que es el valor con la que se trabaja en la expresión y T es la temperatura de ebullición cuyo resultado da en unidades de °K por lo que para obtener en °C se debe restar 273 del valor resultante.

Tabla 3. Presiones de vapor de diversas sustancias [10]

Nombre	Fórmula	Intervalo(k)	A	B	C
Ácido acético	C2H4	290 - 430	18,808	3405,5	-
	O2		0	7	56,3
Acetona	C3H6	241 - 350	16,651	2940,4	-
	O		3	6	35,9
Amoniaco	NH3	179 - 261	16,948	2132,5	-
			1	0	32,9
Benceno	C6H6	280 - 377	15,900	2788,5	-
			8	1	52,3
Alcohol etílico	C2H6	270 - 369	18,524	3578,9	-
			2	1	50,5
Agua	H2O	284 - 441	18,303	3816,4	-
			6	4	46,1
					3

Se obtuvo el valor de la temperatura de ebullición para el agua en 90,74 °C (aproximadamente 91°C) y para el etanol en 69,97 °C (aproximadamente 70°C), el siguiente paso es variar la temperatura de ebullición de menor valor, que es la del etanol, hasta la temperatura de ebullición de mayor valor, en pasos de 0,1 °C y así obtener las presiones parciales de cada uno de los elementos, con la ecuación de Antoine. Para la presión parcial del agua (P_a) presente en la mezcla se tiene:

$$P_a = e^{A - \frac{B}{C+T}} \quad (2)$$

Mientras que para la presión parcial del etanol (P_b) presente

en la mezcla se tiene:

$$P_b = e^{A - \frac{B}{C+T}} \quad (3)$$

Ambas presiones parciales se modifican variando la temperatura, que es la que se va a tener presente en la columna de destilación. Con estos valores de las presiones parciales lo siguiente es calcular las fracciones parciales a partir de la ecuación (4), que es el valor de las concentraciones de los elementos en estado vapor (Y) y líquido (X).

El valor de la concentración en el estado líquido (X) se obtiene de la siguiente manera:

$$X = \frac{P - P_a}{P_b - P_a} \quad (4)$$

Mientras que la concentración para el estado de vapor (Y) se obtiene a partir de la ecuación 5:

$$Y = \frac{P_b \cdot X}{P} \quad (5)$$

Cabe recalcar que estos valores de concentración calculados son para el etanol que es el elemento más volátil de la mezcla. Como se mencionó la variación de la temperatura se la realizó en pasos de 0,1°C en el paquete computacional de Microsoft Excel y así obtener los diferentes valores de presiones parciales y fracciones parciales (concentración del etanol en estado líquido (X) y vapor (Y)).

Una vez obtenidos los valores de la concentración del etanol a diferentes valores de temperatura se puede determinar la ecuación del valor estimado de la concentración de alcohol del producto destilado en términos de la variación de la temperatura.

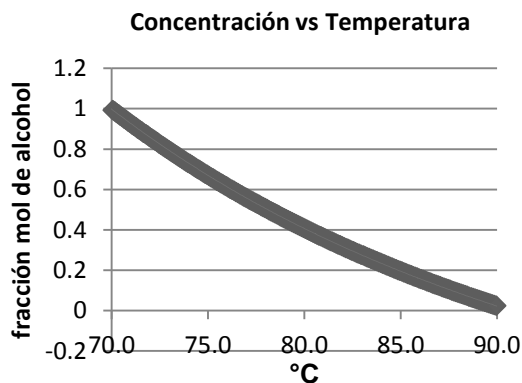


Figura 12. Tendencia de concentración vs temperatura

La ecuación para expresar el valor la concentración del destilado en base a la variación de la temperatura es la siguiente:

$$y = 0,001x^2 - 0,2102x + 10,740 \quad (6)$$

Donde x representa el valor de la temperatura en cualquier instante, y es la concentración del destilado en dicho instante. Para comprobar este resultado se utilizó Matlab.

Este paquete computacional trabaja con matrices, por lo que los valores de la temperatura y de la concentración fueron arregladas en matrices de [1 x 127] con los valores obtenidos experimentalmente. Dichas matrices fueron ingresadas

y se utilizó el comando POLYFIT, el cual ordena en el plano (x, y) las matrices ingresadas y realiza un ajuste en el polinomio de orden n (por ejemplo, n=1 para una recta), dicha función devuelve un vector con los valores de los coeficientes de la ecuación de la gráfica obtenida en orden decreciente de grado.

Para realizar este procedimiento se genera un archivo .m en el cual se varían los valores ingresados y también cambiar el orden del polinomio de ajuste. En la gráfica se puede observar el código implementado:

```

MATLAB R2011b
File Edit Text Go Cell Tools Debug Parallel Desktop Window Help
Current Folder: C:\Program Files\MATLAB\R2011b\bin
Editor: C:\Users\JOHN\Desktop\TES3\coeficientes1.m
%Concentración vs temperatura
1 %Concentración vs temperatura
2 %Temperatura
3 temp = [69.996245 70.096245 70.196245 70.296245 70.396245 70.496245 70.596245]
4 %Líquido
5 x = [1 0.992659392 0.983352764 0.978079934 0.970840719 0.963634938 0.956462411 0.949322959]
6 %Coeficientes de la ecuación líquido
7 %polyfit(temp,x,2)
8
    
```

Figura13. Ecuación concentración vs temperatura

Donde la matriz *temp* representa la variación de la temperatura y *x* el valor de la concentración obtenida al variar el valor de la temperatura, una vez ejecutado (RUN) dicho programa, se obtuvo la siguiente la ecuación:

$$y = 0,001x^2 - 0,2072x + 10,628 \quad (7)$$

6 Interfaz Hombre Máquina desarrollado

El programa que se implementa en el panel táctil va a contener todos los elementos necesarios para controlar la columna de destilación, y que se encuentren acorde a los registros que se usen en el programa de *XC Series ProgramTool* para la adquisición de datos de los sensores y activación de los actuadores (TecMikro2015).

La programación del HMI se realiza en pantallas en la cual se añaden los diferentes botones que en su mayoría son de la barra de herramientas, que son de fácil manejo.

La siguiente figura muestra el interfaz diseñado, donde se puede observar que puede ser utilizado de una manera fácil por el operador de la planta.

7 Pruebas de Funcionamiento

Para la realización de las pruebas se debe tener en cuenta los parámetros externos de trabajo de la columna de destilación.

7.1 Mezcla

La capacidad del depósito en el calderín es de aproximadamente 60 litros, para lo cual en el laboratorio se realiza una mezcla de agua y alcohol etílico, con una relación de 2 a 1, respectivamente. El alcohol etílico tiene una concentración de 96% y cuando se realiza la mezcla la concentración desciende a 30%. Dicha mezcla se la realiza en el tanque de almacenamiento.

7.2 Alimentación de Vapor

El caldero que genera vapor para la alimentación de la columna, trabaja para todo el laboratorio, por lo que su activación queda a cargo de la persona encargada del laboratorio

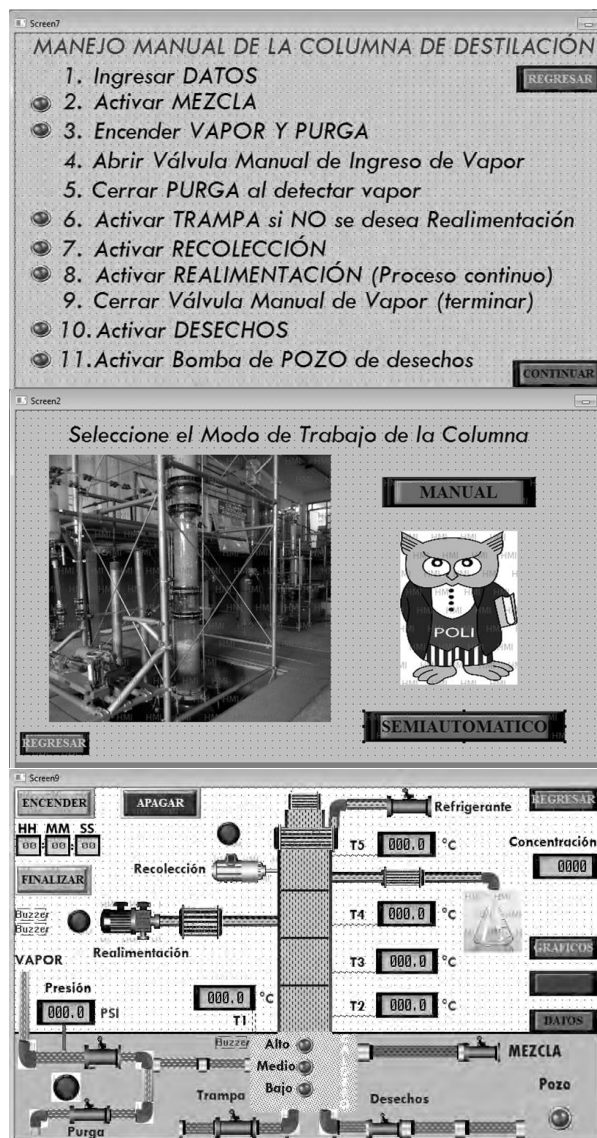


Figura 14. Interfaz Hombre Maquina

El caldero se demora alrededor de 40 minutos en generar vapor.

7.3 Medida de la concentración

La concentración estimada se muestra en la pantalla de trabajo y corresponde a la siguiente tabla

7.4 Control semiautomático

Con los rangos de las variables obtenidos en las pruebas manuales, se pudo establecer los límites en los cuales dichas variables trabajarían, o activarían los actuadores automáticamente.

Con los tanques de alimentación y realimentación de mez-

cla ya conectados se pudo trabajar más rápidamente. Se comprobó que, en caso de exceso de presión de ingreso de vapor, se activa la electroválvula de purga que desfoga la presión, y se activa la alarma que indica que se necesita regulación de la válvula manual de vapor.

El sensor de nivel de tres posiciones se activa acorde el nivel en el que se encuentre el calderín (alto, medio y bajo) que se visualiza en el panel (figura 4.8.) se debe aclarar que el nivel bajo del calderín está establecido cuando en el depósito hay alrededor de 40 litros.

Tabla 4. Comparación de valores estimado y medido

RTD 1 (°C)	RTD 2 (°C)	RTD 3 (°C)	RTD 4 (°C)	RTD 5 (°C)	C. Es- timada (%)	C. Ma- nual (%)
88	71,6	72,1	70,9	71,3	94	94,5
88,3	73,3	72,1	71	71,3	93,3	96
89,2	79,1	72,2	70,8	71,3	94,6	96
89,3	88,2	72,3	70,8	70,8	94,6	96
89,7	89,1	74,4	71,2	71,3	92	95,5
90,6	90	90,2	70,9	71,4	94	95
90,6	90	91	72,3	73,1	85	93

8 Discusión de los Resultados

El control manual de la columna permite activar o desactivar cada actuador de la columna teniendo un proceso totalmente didáctico para el uso de los estudiantes en el laboratorio.

Al realizar la medición de la temperatura en la etapa de recolección se realizó un control de la concentración de alcohol del producto destilado en base de la “estimación” y dicho valor fue comprobado en cada una de las pruebas realizadas.

Para la recolección del alcohol destilado se estableció que el inicio del mismo será cuando la concentración estimada alcance los 96° ya que se comprobó que con cualquier cantidad de alcohol que se encuentre en la mezcla (10, 15 y 20 litros), la concentración alcanza dicho valor, que es el límite máximo que la columna puede ofrecer.

Al implementar el HMI (Interfaz Hombre-Máquina) amigable con el usuario, éste permite al operador un mejor control y visualización de todas las variables y elementos presente en la columna de destilación.

El montaje de los tableros de control y potencia permiten tener una buena protección y aislamiento del control de la columna de destilación y de los actuadores presentes en la misma.

Mediante la implementación (montaje) de los nuevos sensores de temperatura (RTD) se evitó la oxidación y reparación continua que se tenía con los antiguos sensores.

La implementación del transductor de presión permitió al operario mejorar el control de la columna de destilación ya que se evita tomar la medida de la presión en el manómetro

y lo hace directamente visualizando el HMI.

Se habilitaron depósitos fijos tanto para el ingreso de mezcla en el inicio del proceso, como en la realimentación permitiendo un mejor manejo de la mezcla que se usa.

La adición del sensor de nivel bajo del pozo permite que la bomba de desalajo de desechos se apague automáticamente, evitando que el operario este al pendiente de la misma.

Todas las electroválvulas seleccionadas trabajan a 110 VAC y se tuvo que trabajar con dos modelos diferentes (acero en la tubería de vapor y plástico en el ingreso y salida de mezcla) debido al peso de las mismas y al lugar donde iban instaladas.

9 Conclusiones

Se automatizó la columna de destilación, esto significó la recuperación de una columna que tiene casi 50 años y cuyo costo en la actualidad supera los 60.000 dólares. Los costos de la automatización estuvieron por el orden de los 8.000 dólares.

Se logró mejorar el proceso de destilación, estas mejoras apoyaran no solo en actividades docentes sino también actividades de investigación para estrategias de control avanzadas.

Se logró disminuir el mando del operario en la columna de destilación y por ende la posibilidad de errores de índole humano en el manejo de la misma.

Agradecimientos

Oscar Camacho agradece al Proyecto Prometeo de la Secretaría de Educación Superior, Ciencia Tecnología e Innovación de la República del Ecuador, por su patrocinio para la realización de este trabajo.

Referencias

- Astorga CM, Othman N, Othman S, HammouriH TF, McKenna, 2002, Nonlinear continuous-discrete observers: application to emulsion polymerization reactors, *Control Engineering Practice*, Vol. 10(1), pp. 3-13.
- Astorga CM, Quintero-Mármol E, Vela LG, Torres L, 2006, Observador No Lineal para la Estimación de Concentraciones en un Proceso de Destilación Metanol/Etanol, *Información Tecnológica*, Vol. 17 N°6, pp. 35-41.
- Gauthier JP, HammouriH, Othman S, 1992, A simple observer for nonlinear systems. Application to bioreactors, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 37(6), pp. 875-880.
- GeankopliCJ, 1998, *Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias*, Compañía Editorial Continental, México.
- Nadri M, HammouriH, AstorgaC, 2004, Observer design for continuous-discrete time state affine systems up to output

injection, European Journal of Control, Vol. 10(3), pp. 252-263.

Smith C, 2012, Distillation Control: An Engineering Perspective. Wiley and Sons. New York.

TecMikro, «"TecladoMatricial 4x4",» [En línea]. Available: <http://programarpicenc.com/articulos/teclado-matricial-4x4-con-los-microcontroladores-pic/>. [Último acceso: 13 agosto 2015].

TreybalR, 1980, Operaciones de Transferencia de Masa, Tercera edición, McGrawHill, NewYork,

Xinje, «XinjeSupport Centre,» [En línea]. Available: http://www.xinje-support-centre-lis-to.com/xinje/documentation/manuals/plc/manul021/MANU_L021R2V2%20-%20PLC%20Software%20Manual.pdf.

Camacho, Oscar: recibió el grado en Ingeniería Eléctrica de la Universidad de los Andes (ULA), Mérida, Venezuela, en 1984. Recibió el MSc. Ingeniería de Control (ULA), 1992. Se trasladó a la Universidad del Sur de Florida, Tampa (USF), Florida en los Estados Unidos en 1992. En 1994 obtuvo un ME en Ingeniería Química y en 1996 un Doctorado en Ingeniería Química ambos en USF. Desarrollo actividades de postdoctorado en USF en 2001. Se ha desempeñado en la docencia y la investigación en la ULA y PDVSA (Venezuela), USF (EE.UU.) y la EPN (Ecuador). Fue Director de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Coordinador del Programa de Maestría en Automatización e Instrumentación, Decano de la Facultad de Ingeniería de la ULA. Es editor asociado de ISA Transactions. Sus líneas de investigación actuales incluyen el control por modo deslizante, sistemas de control de procesos con elevado retardo, control de procesos químicos. Es autor de más de 120 publicaciones en revistas y actas de congresos.

Rodas, Ana: completó sus estudios en la Escuela Politécnica Nacional (EPN, Quito, Ecuador), donde se graduó en Ingeniería Electrónica y Control. Continuó su formación y obtuvo la Maestría en Gerencia Empresarial, con mención en Operaciones y Calidad. Ocupa el cargo de Profesor Principal en el Departamento de Control y Automatización en la EPN. Se ha desempeñado en la docencia y la investigación en la Escuela Politécnica Nacional y otras universidades del Ecuador. Fue Coordinadora de la Carrera de Electrónica y Control, Jefe del Departamento de Automatización y Control y actualmente es Representante de los Profesores ante Consejo Politécnico. Sus líneas de investigación actuales incluyen la instrumentación y la medición de variables industriales. Correo electrónico: rodas@epn.edu.ec

Identificación en línea de sistemas dinámicos lineales usando métodos algebraicos

Colina, Eliezer^{1*}; Baquero, Diego²; Ochoa, Cristina²; Camacho, Oscar^{2, 3}; Chávez, Danilo²

¹Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones
Universidad de Cuenca. Cuenca, Ecuador.

²Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.
Departamento de Automatización y Control Industrial.
Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador

³Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Eléctrica.
Universidad de Los Andes. Mérida. Venezuela.

*eliezer.colina@ucuenca.edu.ec

Resumen

En general para procesos físicos complejos que involucran una diversidad de fenómenos físicos o una gran cantidad de variables, resulta una tarea altamente difícil la construcción de representaciones matemáticas o modelos, que permitan describir con precisión fenomenológica la evolución de sus variables. Una alternativa a la construcción de modelos formales es el uso de enfoques empíricos, basados en datos medidos de las variables de entrada y salida del proceso, que también conducen a modelos matemáticos válidos, circunscritos a las regiones de operación donde los datos fueron adquiridos. Este trabajo propone el uso de un método algebraico que conduce a algoritmos en línea para hacer la estimación de parámetros desconocidos de modelos que describen la evolución del sistema considerado. El método a ser desarrollado se basa en medir valores de la variable de salida ante una entrada conocida, en instantes consecutivos de muestreo, para así aprovechar propiedades de la solución analítica de la respuesta del sistema. La idea es producir un conjunto de ecuaciones algebraicas simultáneas, de cuya solución se desprenderá la estimación de los parámetros desconocidos. Con los algoritmos de identificación en línea propuestos es posible parametrizar modelos matemáticos para representar las dinámicas de sistemas lineales de primero y segundo ordenes e incluyen la estimación de sus tiempos muertos. Estos algoritmos solo requieren de un conjunto muy limitado de mediciones de las variables de entrada y salida del proceso; lo que representa una simplificación considerable cuando se compara con otros métodos reportados en la literatura.

ISBN: 978-980-11-1858-9



9 789801 118589

1 Introducción

Desde un punto de vista analítico, tanto el diseño de muchas estrategias de control y optimización, como de algoritmos para la detección y el diagnóstico fallas o de esquemas para la supervisión automática de procesos se fundamentan en la disponibilidad de modelos matemáticos apropiados para describir el comportamiento dinámico del sistema considerado. Existen procesos físicos donde es posible recurrir a los principios fundamentales de balances de masas y energía con el propósito de fenomenológicamente construir representaciones matemáticas que dan cuenta de las interrelaciones entre variables, pero que aun así pueden requerir de otros métodos para la determinación de los valores de sus parámetros importantes. (Zadeh1956, Astrom y col., 1971, Ljung1987, Landau1990)

Hay una distinción entre el problema de determinar un modelo representativo del comportamiento local de un sistema basados en mediciones de sus variables de entrada y salida y el problema de calcular por métodos experimentales los parámetros de un modelo ya conocido para prescribir la evolución del proceso considerado. (Zadeh1956) Corrientemente, en el segundo problema se compara la salida del proceso que posiblemente está contaminada con ruidos asociados a las mediciones, con la salida del modelo conocido, cuando ambos son excitados con la misma señal de entrada. El error resultante de la comparación es luego usado para definir reglas de ajuste de parámetros del modelo basados en criterios previamente definidos, como la minimización de una función del error o de un criterio de verosimilitud (Kailath1974); lo que ha dado origen a una diversidad de métodos para acometer la estimación paramétrica, tanto en línea como fuera de línea del proceso, recursivos o directos, usando modelos lineales o modelos no lineales, determinísticos o estocásticos, en tiempo continuo o en tiempo discreto.

Diferente a lo sugerido anteriormente, también existen métodos algebraicos de identificación paramétrica en los que los parámetros desconocidos del modelo pueden ser estimados con un alto grado de precisión y en tiempos considerablemente menores a los que se requieren en algoritmos recursivos convencionales. (Garrido y col., 2013). En estos métodos, debido a su naturaleza algebraica y al cortísimo tiempo necesario para acometer la identificación, la condición estandar de persistencia de la excitación no es requerida y en su lugar se define una condición de consistencia algebraica para evitar singularidades en pequeños intervalos de tiempo. (Fliess y col., 2013)

En este trabajo se presenta un método algebraico para la estimación en línea de los parámetros desconocidos de modelos lineales de primer orden con y sin tiempo muerto y segundo orden. El método se basa en un análisis de las ecuaciones que describen las respuestas de los sistemas dinámicos considerados ante entradas conocidas y la formulación de ecuaciones algebraicas simultáneas, cuyas solucio-

nes conducen a los valores reales de los parámetros desconocidos. El número de mediciones de las señales de entrada-salida del proceso necesarias para acometer la identificación depende del orden dinámico del modelo y del número de parámetros a ser estimados. Así por ejemplo, para un modelo de primer orden con tiempo muerto, donde a lo sumo existen tres parámetros desconocidos, se requerirán de tres mediciones de entrada-salida.

En la formulación propuesta solo serán considerados sistemas lineales determinísticos, representados en términos de sus funciones de transferencia. Los desempeños de los algoritmos de identificación diseñados serán probados a través de casos de estudio, que sirven para verificar aspectos de precisión y rapidez de cálculo en la obtención de los parámetros desconocidos del modelo.

Este trabajo ha sido estructurado de la siguiente manera: la sección 2 contempla la formulación del problema de identificación tratado; la sección 3 engloba tres teoremas de los que se desprenden los algoritmos algebraicos de identificación paramétrica para sistemas lineales de primero y segundo órdenes. En la sección 4 se incluyen ejemplos ilustrativos sobre identificación paramétrica de sistemas lineales. Finalmente, la sección 5 contiene conclusiones y discusión de los resultados obtenidos.

2 Formulación del problema

Se considerarán los siguientes sistemas dinámicos lineales de primero y segundo orden, con parámetros desconocidos:

$$Y(s) = \frac{k}{s+p} U(s) \quad (1)$$

$$Y(s) = \frac{ke^{-t_0s}}{s+p} U(s) \quad (2)$$

$$Y(s) = \frac{k}{s^2+2as+a^2+b^2} U(s) \quad (3)$$

Se asumirá que la señal de entrada $u(t)$ corresponde a un escalón de amplitud conocida y que la correspondiente señal de salida $y(t)$ puede ser medida en instantes consecutivos del tiempo. Se desea desarrollar algoritmos de identificación en línea de los parámetros desconocidos del sistema considerado.

3 Desarrollo de los algoritmos de identificación

A continuación será presentado el desarrollo de cada uno de los algoritmos de identificación formulados para los sistemas lineales descritos por las ecuaciones 1, 2 y 3 Los requerimientos sobre el número de mediciones necesarias de la variable de salida variarán en cada caso considerado; sin embargo, los algoritmos desarrollados podrán ser implantados en línea.

3.1 Sistema de primer orden

Teorema 1. Sean $y(t_1)$ y $y(t_2)$, con $t_1 > 0$ y $t_2 =$

$2t_1$, mediciones de la respuesta transitoria del sistema lineal descrito por la ecuación 1 cuando éste es excitado con una señal de entrada $u(t)$ correspondiente a un escalón de amplitud A conocida, entonces los parámetros desconocidos p y k del sistema lineal pueden ser estimados por medio de las siguientes ecuaciones:

$$p = -\frac{\ln\left(\frac{y(t_2)-y(t_1)}{y(t_1)}\right)}{t_1} \quad (4)$$

$$k = \frac{y(t_1)p}{A(1-e^{-pt_1})} \quad (5)$$

Demostración

Cuando $U(s) = A/s$ la salida del sistema 1 viene dada por la ecuación

$$y(t) = \frac{Ak}{p}(1 - e^{-pt}) \quad (6)$$

Sea $t = t_1$, con $t_1 > 0$, entonces

$$y(t_1) = \frac{Ak}{p}(1 - e^{-pt_1}) \quad (7)$$

Sea $t = t_2$, con $t_2 = 2t_1$, entonces

$$y(t_2) = \frac{Ak}{p}(1 - e^{-2pt_1}) = \frac{Ak}{p}(1 - e^{-pt})(1 + e^{-pt_1}) \quad (8)$$

$$y(t_2) = y(t_1)(1 + e^{-pt_1}) \quad (9)$$

Despejando a p de la ecuación anterior resulta la ecuación (4). Por otro lado, despejando a k de la ecuación 9 se obtiene la ecuación 5.

3.2 Sistema de primer orden con tiempo muerto

Teorema 2. Sean $y(t_1)$, $y(t_2)$ y $y(t_3)$, con $t_1 > 0$, $t_2 = 2t_1$ y $t_3 = 3t_1$ mediciones de la respuesta transitoria del sistema lineal descrito por la ecuación 2, con $y(t_1) \neq 0$, cuando éste es excitado con una señal de entrada $u(t)$ correspondiente a un escalón de amplitud A conocida, entonces los parámetros desconocidos p , k y t_0 del sistema lineal pueden ser estimados por medio de las siguientes ecuaciones:

$$p = -\frac{\ln\left(\frac{y(t_2)-y(t_3)}{y(t_1)-y(t_2)}\right)}{t_1} \quad (10) \quad k = -\frac{\ln\left(\frac{y(t_2)-y(t_3)}{y(t_1)-y(t_2)}\right)}{At_1\left(\frac{y(t_1)+y(t_3)-2y(t_2)}{y(t_1)y(t_3)-y(t_2)^2}\right)}$$

$$t_0 = t_1 \left[1 - \frac{\ln\left(\frac{(y(t_1)-y(t_2))^2}{y(t_1)y(t_3)-y(t_2)^2}\right)}{\ln\left(\frac{y(t_2)-y(t_3)}{y(t_1)-y(t_2)}\right)} \right] \quad (11)$$

Demostración

Cuando $U(s) = A/s$ la salida del sistema 2 viene dada por la ecuación

$$y(t) = \frac{Ak}{p} - \frac{Ake^{pt_0}e^{-pt}}{p} \quad (13)$$

Sea $t = t_1$, con $t_1 > 0$ y tal que $y(t_1) \neq 0$, entonces

$$\frac{y(t_1)p}{Ak} - 1 = -e^{pt_0}e^{-pt_1} \quad (14)$$

Sea $t = t_2$, con $t_2 = 2t_1$, entonces

$$\frac{y(t_2)p}{Ak} - 1 = -e^{pt_0}e^{-2pt_1} \quad (15)$$

Sea $t = t_3$, con $t_3 = 3t_1$, entonces

$$\frac{y(t_3)p}{Ak} - 1 = -e^{pt_0}e^{-3pt_1} \quad (16)$$

Reemplazando la ecuación 14 en la ecuación 15 se obtiene

$$\frac{y(t_2)p}{Ak} - 1 = e^{-pt_1} \left(\frac{y(t_1)p}{Ak} - 1 \right) \quad (17)$$

En forma análoga, reemplazando la ecuación 15 en la ecuación 16 se obtiene

$$\frac{y(t_3)p}{Ak} - 1 = e^{-2pt_1} \left(\frac{y(t_2)p}{Ak} - 1 \right) \quad (18)$$

Sea:

$$x_1 = \frac{p}{Ak} \quad (19)$$

y sea:

$$x_2 = e^{-pt_1} \quad (20)$$

Sustituyendo las ecuaciones (19) y (20) en las ecuaciones 21 y 22 se obtienen las siguientes ecuaciones algebraicas:

$$y(t_2)x_1 - 1 = (y(t_1)x_1 - 1)x_2 \quad (21)$$

$$y(t_3)x_1 - 1 = (y(t_2)x_1 - 1)x_2 \quad (22)$$

Resolviendo simultaneamente las ecuaciones 21 y 22 para x_1 y x_2 se obtiene:

$$x_1 = \frac{y(t_1)+y(t_3)-2y(t_2)}{y(t_1)y(t_3)-y(t_2)^2} \quad (23)$$

$$x_2 = \frac{y(t_2)-y(t_3)}{y(t_1)-y(t_2)} \quad (24)$$

Despejando pyk de la ecuación 19 y 20, y considerando las ecuaciones 23 y 24, se producen los resultados expresados en las ecuaciones 10 y 11. Adicionalmente, al despejar t_0 de la ecuación 14 y realizar manipulación algebraica se obtiene la ecuación 12.

3.3 Sistemas de segundo orden subamortiguados

Teorema 3. Sean $y(t_1)$, $y(t_2)$, $y(t_3)$ y $y(t_4)$, con $t_1 > 0$, $t_2 = 2t_1$, $t_3 = 3t_1$ y $t_4 = 4t_1$ mediciones de la respuesta transitoria del sistema lineal descrito por la ecuación 3, cuando éste es excitado con una señal de entrada $u(t)$ correspondiente a un escalón de amplitud A conocida, entonces los parámetros desconocidos k , a y b pueden ser estimados por medio de las siguientes ecuaciones:

$$k = \frac{(a^2+b^2)X_1}{A} \quad (25)$$

$$a = -\frac{\ln(X_2)}{t_1} \quad (26)$$

$$b = \frac{\cos^{-1}(X_3/2)}{t_1} \quad (27)$$

Donde los valores de X_i se obtienen de :

$$X_1 = \frac{-s_2 + \sqrt{s_2^2 - 4s_1s_3}}{2s_1} \quad (28)$$

$$X_2 = \frac{m_1X_1 + m_2}{\sqrt{m_3 - m_4X_1}} \quad (29)$$

$$X_3 = \frac{y(t_2) - X_1(1 + X_2^2)}{[y(t_1) - X_1]X_2} \quad (30)$$

Por otro lado, los valores de S_1, S_2 y S_3 se obtienen de :

$$S_1 = m_4 m_5 - m_1 m_8 \quad (31)$$

$$S_2 = m_1 m_7 - m_2 m_8 - m_3 m_5 + m_4 m_6 \quad (32)$$

$$S_3 = m_2 m_7 - m_3 m_6 \quad (33)$$

Donde los valores de $m_i, i = 1, \dots, 8$ son definidos como :

$$m_1 = y(t_1) - 2y(t_2) + y(t_3) \quad (34)$$

$$m_2 = -y(t_1)y(t_3) + y(t_2)^2 \quad (35)$$

$$m_3 = y(t_1)^2 \quad (36)$$

$$m_4 = 2y(t_1) - y(t_2) \quad (37)$$

$$m_5 = y(t_1) - y(t_2) - y(t_3) + y(t_4) \quad (38)$$

$$m_6 = y(t_2)y(t_3) - y(t_1)y(t_4) \quad (39)$$

$$m_7 = y(t_1)y(t_2) \quad (40)$$

$$m_8 = y(t_1) + y(t_2) - y(t_3) \quad (41)$$

Demostación

Cuando $U(s) = A/s$ la salida del sistema 3 viene dada por la ecuación:

$$y(t) = \frac{Ak}{a^2+b^2} - \frac{Ak}{2b} \left(\frac{e^{-(a-jb)t}}{b+aj} + \frac{e^{-(a+jb)t}}{b-aj} \right) \quad (42)$$

La evaluación de $y(t)$ en los tiempos t_1, t_2, t_3 y t_4 proporciona los siguientes resultados :

$$y(t_1) = \frac{Ak}{a^2+b^2} - \frac{Ak}{2b} \left(\frac{e^{-(a-jb)t_1}}{b+aj} + \frac{e^{-(a+jb)t_1}}{b-aj} \right) \quad (43)$$

$$y(t_2) = \frac{Ak}{a^2+b^2} - \frac{Ak}{2b} \left(\frac{e^{-(a-jb)2t_1}}{b+aj} + \frac{e^{-(a+jb)2t_1}}{b-aj} \right) \quad (44)$$

$$y(t_3) = \frac{Ak}{a^2+b^2} - \frac{Ak}{2b} \left(\frac{e^{-(a-jb)3t_1}}{b+aj} + \frac{e^{-(a+jb)3t_1}}{b-aj} \right) \quad (45)$$

$$y(t_4) = \frac{Ak}{a^2+b^2} - \frac{Ak}{2b} \left(\frac{e^{-(a-jb)4t_1}}{b+aj} + \frac{e^{-(a+jb)4t_1}}{b-aj} \right) \quad (46)$$

Las ecuaciones 44, 45 y 46 pueden ser rescritas respectivamente de la siguiente manera:

$$y(t_2) = \frac{Ak}{a^2+b^2} - \frac{e^{-at_1} Ak e^{-at_1}}{2b} \left[\left(\frac{e^{jbt_1}}{b+aj} + \frac{e^{-jbt_1}}{b-aj} \right) (e^{jbt_1} + e^{-jbt_1}) - \frac{2b}{a^2+b^2} \right] \quad (47)$$

$$y(t_3) = \frac{Ak}{a^2+b^2} - \frac{e^{-at_1} Ak e^{-2at_1}}{2b} \left[\left(\frac{e^{2jbt_1}}{b+aj} + \frac{e^{-2jbt_1}}{b-aj} \right) (e^{jbt_1} + e^{-jbt_1}) - \left(\frac{e^{jbt_1}}{b+aj} + \frac{e^{-jbt_1}}{b-aj} \right) \right] \quad (48)$$

$$y(t_4) = \frac{Ak}{a^2+b^2} - \frac{e^{-at_1} Ak e^{-3at_1}}{2b} \left[\left(\frac{e^{3jbt_1}}{b+aj} + \frac{e^{-3jbt_1}}{b-aj} \right) (e^{jbt_1} + e^{-jbt_1}) - \left(\frac{e^{2jbt_1}}{b+aj} + \frac{e^{-2jbt_1}}{b-aj} \right) \right] \quad (49)$$

Mediante las ecuaciones 43, 44 y 45 se tiene que las ecuaciones 47, 48 y 49 se convierten en:

$$y(t_2) = \frac{Ak}{a^2+b^2} + e^{-at_1} \left(y(t_1) - \frac{Ak}{a^2+b^2} \right) (e^{jbt_1} + e^{-jbt_1}) + \frac{Ake^{-2at_1}}{a^2+b^2} \quad (50)$$

$$y(t_3) = \frac{Ak}{a^2+b^2} + e^{-at_1} \left(y(t_2) - \frac{Ak}{a^2+b^2} \right) (e^{jbt_1} + e^{-jbt_1}) - \left(y(t_1) - \frac{Ak}{a^2+b^2} \right) e^{-2at_1} \quad (51)$$

$$y(t_4) = \frac{Ak}{a^2+b^2} + e^{-at_1} \left(y(t_3) - \frac{Ak}{a^2+b^2} \right) (e^{jbt_1} + e^{-jbt_1}) - \left(y(t_2) - \frac{Ak}{a^2+b^2} \right) e^{-2at_1} \quad (52)$$

Sean;

$$X_1 = \frac{Ak}{a^2+b^2} \quad (53)$$

$$X_2 = e^{-at_1} \quad (54)$$

$$X_3 = e^{jbt_1} + e^{-jbt_1} \quad (55)$$

Sustituyendo las ecuaciones 53, 54 y 55 en las ecuaciones 50, 51 y 52 se tiene:

$$y(t_2) - X_1 = (y(t_1) - X_1) X_2 X_3 + X_1 X_2^2 \quad (56)$$

$$y(t_3) - X_1 = (y(t_2) - X_1) X_2 X_3 - (y(t_1) - X_1) X_2^2 \quad (57)$$

$$y(t_4) - X_1 = (y(t_3) - X_1) X_2 X_3 - (y(t_2) - X_1) X_2^2 \quad (58)$$

Despejando $X_2 X_3$ de la ecuación 56 y reemplazando en las ecuaciones 57 y 58 se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$X_2^2 = \frac{(y(t_1) - 2y(t_2) + y(t_3)) X_1 - y(t_1) y(t_3) + y(t_2)^2}{y(t_1)^2 - (2y(t_1) - y(t_2)) X_1} \quad (59)$$

$$X_2^2 = \frac{(y(t_1) - y(t_2) - y(t_3) + y(t_4)) X_1 + y(t_2) y(t_3) - y(t_1) y(t_4)}{y(t_1) y(t_2) - (y(t_1) + y(t_2) - y(t_3)) X_1} \quad (60)$$

Igualando las ecuaciones 59 y 60 y usando las ecuaciones 34 a 41 se tiene:

$$\frac{m_1 X_1 + m_2}{m_3 - m_4 X_1} = \frac{m_5 X_1 + m_6}{m_7 - m_8 X_1} \quad (61)$$

Resolviendo la ecuación 61 y mediante las ecuaciones 31, 32 y 33 se producen las ecuaciones 28, 29 y 30. Al utilizar las ecuaciones 53, 54 y 55 se obtienen los parámetros desconocidos del sistema dados por las ecuaciones 25, 26 y 27.

4 Resultados computacionales

4.1 Sistema de Primer Orden sin Retardo

A continuación se procede a evaluar el desempeño del algoritmo propuesto en el Teorema 1 por medio de las siguientes funciones de transferencias:

$$G_1(s) = \frac{5}{s+12} \quad (62)$$

$$G_2(s) = \frac{3}{s+0.1} \quad (63)$$

El error porcentual de estimación será calculado de la siguiente manera:

$$\text{Error \%} = \left(\frac{\text{Valor estimado} - \text{Valor Real}}{\text{Valor Real}} \right) 100 \quad (64)$$

Se hará uso de dos tiempos de muestreo diferentes para poner en relieve la independencia de los resultados que arroja la estimación respecto de la tasa de medición de la señal de salida.

4.1.1 Función de transferencia 62

En un primer experimento computacional, la señal de salida será medida con un tiempo de muestreo $tm_1 = 0.01s$. Luego, en un segundo experimento se usará un tiempo de muestreo $tm_2 = 0.08s$.

En la figura 1 muestra las mediciones de la salida cuando el tiempo de muestreo es 0.01s, definidas como $(y_1 tm_1)$ y $(y_2 2tm_1)$; y cuando el tiempo de muestreo de 0.08s, definidas como $(y_1 tm_2)$ y $(y_2 2tm_2)$.

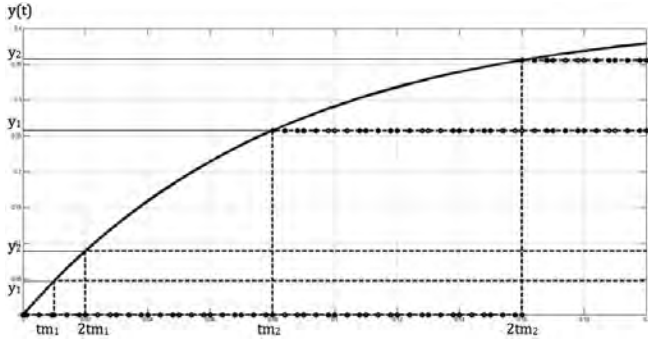


Figura 1. Salida del sistema descrito por (62). Tiempos de muestreo $tm_1=0.01s$ y $tm_2=0.08s$.

4.1.2 Función de transferencia 63

En un primer experimento computacional, la señal de salida será medida con un tiempo de muestreo $tm_1=0.01s$. Luego, en un segundo experimento se usará un tiempo de muestreo $tm_2=0.08s$.

En la figura 2 se muestra las mediciones en la salida para cuando el tiempo de muestreo es 0.01s definidas como $(y_1 tm_1)$ y $(y_2 tm_1)$ y para un tiempo de muestreo de 0.08s definidas como $(y_1 tm_2)$ y $(y_2 tm_2)$.

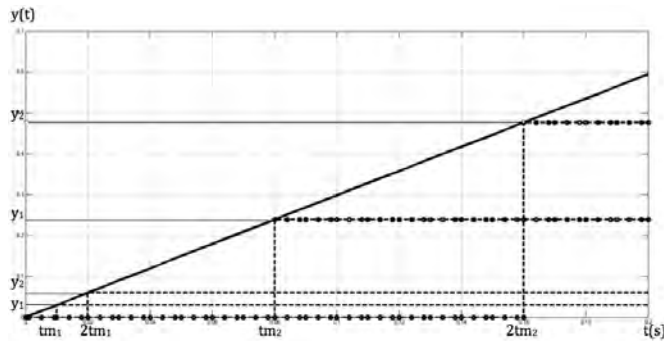


Figura 2. Salida del sistema descrito por (63). Tiempos de muestreo $tm_1=0.01s$ y $tm_2=0.08s$

Tabla 1 Parámetros estimados para las funciones de transferencias 62 y 63

G(s)	tm	Identificación		Errores(%)	
		k	p	k	p
G ₁ (s)	tm ₁	5.000	12.000	0.000	0.000
	tm ₂	5.000	12.000	0.000	0.000
G ₂ (s)	tm ₁	3.000	0.100	0.000	0.000
	tm ₂	3.000	0.100	0.000	0.000

4.2 Sistema de Primer Orden con Retardo

Se procede a evaluar el desempeño del algoritmo propuesto en el Teorema 2 usando las siguientes funciones de transferencias:

$$G_3(s) = \frac{5}{s+12} e^{-0.1s} \quad (65)$$

$$G_4(s) = \frac{3}{s+0.1} e^{-8s} \quad (66)$$

4.2.1 Función de transferencia 65

En el primer experimento computacional se utilizó un tiempo de muestreo $tm_3=0.12s$ y luego, en el segundo experimento se empleó un tiempo de muestreo $tm_4=0.15s$.

La figura 3 muestra las mediciones en la salida para cuando el tiempo de muestreo es 0.12s, definidas como $(y_1 tm_3)$, $(y_2 2tm_3)$ y $(y_3 3tm_3)$; y para un tiempo de muestreo de 0.15s, definidas como $(y_1 tm_4)$, $(y_2 2tm_4)$ y $(y_3 3tm_4)$.

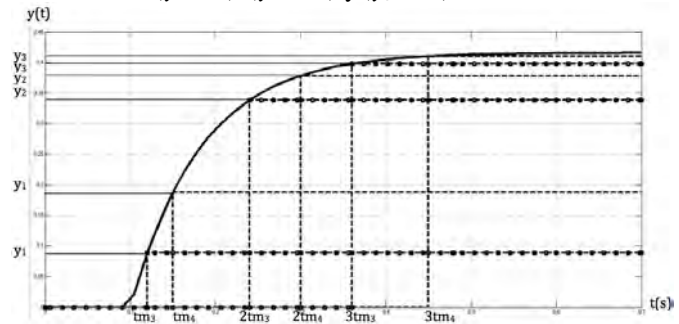


Figura 3. Salida del sistema descrito por (65). Tiempos de muestreo $tm_3=0.12s$ y $tm_4=0.15s$.

4.2.2 Función de transferencia 66

En el primer experimento computacional se utilizó un tiempo de muestreo $tm_5=9s$ y luego, en el segundo experimento se empleó un tiempo de muestreo $tm_6=15s$.

En la figura 4 se muestra las mediciones en la salida para cuando el tiempo de muestreo es 9s definidas como $(y_1 tm_5)$, $(y_2 2tm_5)$ y $(y_3 3tm_5)$ y para un tiempo de muestreo de 15s definidas como $(y_1 tm_6)$, $(y_2 2tm_6)$ y $(y_3 3tm_6)$.

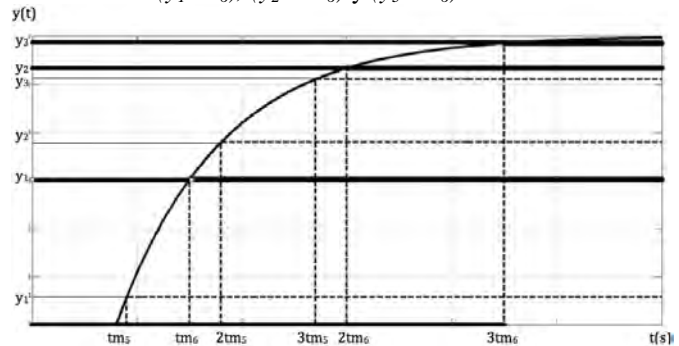


Figura 4. Salida del sistema descrito por (66). Tiempos de muestreo $tm_5=9s$ y $tm_6=15s$.

Tabla 2. Parámetros estimados para las funciones de transferencias 65 y 66

G(s)	tm	identificación			Errores(%)		
		k	p	t0	k	p	t0
G ₃ (s)	tm	5.00	12.00	0.10	0.00	0.00	0.00
	3	0	0	0	0	0	0
	4	4.98	11.98	0.09	0.26	0.16	1.00
G ₄ (s)	tm	3.00	0.100	8.00	0.00	0.00	0.00
	5	0		0	0	0	0
	6	3.00	0.100	8.00	0.00	0.00	0.00

4.1 Sistema de Segundo Orden Subamortiguados

A continuación se evalúa el desempeño del algoritmo propuesto en el Teorema 3 por medio de las siguientes funciones de transferencias:

$$G_5(s) = \frac{20}{s^2 + 8s + 20} \quad (67)$$

$$G_6(s) = \frac{3}{s^2 + 4s + 5} \quad (68)$$

4.1.1 Función de transferencia 67

Los experimentos computacionales son realizados utilizando como períodos de muestreo $tm_7=0.05s$ y $tm_8=0.08s$. En la figura 5 ilustra las mediciones de la salida para cuando el tiempo de muestreo es 0.05s, definidas como $(y_1 tm_7)$, $(y_2 2tm_7)$, $(y_3 3tm_7)$ y $(y_4 4tm_7)$; y para un tiempo de muestreo de 0.08s, definidas como $(y_1 tm_8)$, $(y_2 2tm_8)$, $(y_3 3tm_8)$ y $(y_4 4tm_8)$.

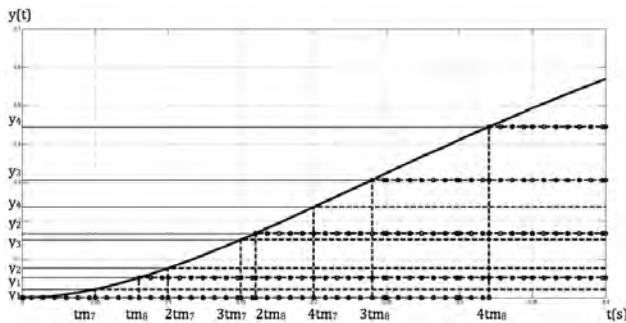


Figura 5. Salida del sistema descrito por (67). Tiempos de muestreo $tm_7=0.05s$ y $tm_8=0.08s$.

4.1.2 Función de transferencia 68

Los experimentos computacionales son realizados utilizando como períodos de muestreo $tm_9=0.2s$ y $tm_{10}=0.5s$. En la figura 6 se muestra las mediciones en la salida para cuando el tiempo de muestreo es 0.2s definidas como $(y_1 tm_9)$, $(y_2 2tm_9)$, $(y_3 3tm_9)$ y $(y_4 4tm_9)$ y para un tiempo de muestreo de 0.5s definidas como $(y_1 tm_{10})$, $(y_2 2tm_{10})$, $(y_3 3tm_{10})$ y $(y_4 4tm_{10})$.

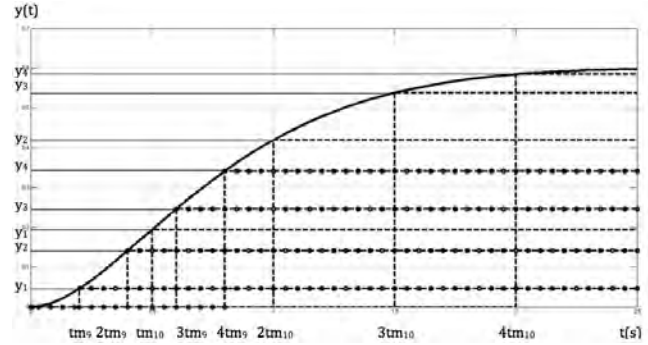


Figura 6. Salida del sistema descrito por (68). Tiempos de muestreo $tm_9=0.2s$ y $tm_{10}=0.5s$.

Tabla 3. Parámetros estimados para las funciones de transferencias 67 y 68

G(s)	tm	Identificación			Errores(%)		
		k	a	b	k	a	b
G ₅ (s)	tm7	20.00	4.00	2.00	0.00	0.00	0.00
	8	0	0	0	0	0	0
G ₆ (s)	tm9	3.000	2.00	1.00	0.00	0.00	0.00
	10	0	0	0	0	0	0

5 Discusión y futuros resultados.

El desempeño de los tres algoritmos de identificación en línea propuestos ha sido evaluado utilizando sistemas de primero y segundo ordenes con resultados satisfactorios. Los parámetros desconocidos de los sistemas considerados han sido estimados correctamente. El requerimiento básico que exigen los algoritmos propuestos está en que las mediciones de la salida del sistema estén dentro de sus regímenes transitorios. El enfoque de construcción de los algoritmos puede ser extendido para otros sistemas dinámicos y algunos tipos de sistemas no lineales; y puede ser generalizado para considerar otros tipos de señales de excitación diferentes al escalón. Actualmente se realizan ensayos para utilizar los algoritmos propuestos en la sintonización de controladores PID y la implantación de leyes de control adaptativo.

6 Conclusiones

Este trabajo mostró el desarrollo de un método algebraico que permite hacer la identificación en línea de los parámetros de procesos dinámicos.

El método propuesto arrojó excelentes resultados para el caso de identificación en sistemas lineales.

Se hizo la identificación para sistemas de primer orden, de primer orden con retardo y sistemas de segundo orden sub amortiguados; ya constituyen modelos representativos de una gran variedad de los procesos químicos y procesos de tipo eléctrico.

El método es independiente del tiempo de muestreo siempre y cuando las mediciones de la salida sean realizadas en la parte transitoria de la respuesta del sistema.

La extensión a sistemas no lineales, así como su aplicación a esquemas de control avanzado son próximos pasos que daremos en esta investigación.

Agradecimiento

Eliezer Colina y Oscar Camacho agradecen al Proyecto Prometeo de la Secretaria de Educación Superior, Ciencia Tecnología e Innovación de la República del Ecuador, por su patrocinio para la realización de este trabajo.

Referencias

- Åstrom K, Eykhoff P, 1971, System identification- a survey, Automatica, N 7, pp 123-162.
- Fliess M; Sira-Ramírez H, 2013, An algebraic framework for linear identification, ESAIM, Control, Optimization and Calculus of Variations N 9(1), pp. 151–168.
- Garrido R, Concha A, 2013, An algebraic recursive method for parameter identification of a servo model, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics N 18(5), pp.1572–1580.
- Kailath T, 1974, A view of three decades of linear filtering theory, Transactions of the IEEE IT, N 20(2), pp. 146–181.
- Landau I, 1990, System Identification and Control Design, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Ljung L, 1987, System Identification: Theory for the User, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Zadeh L, 1956, On the identification problem, IRE Transactions on Circuit Theory, N 3 (4), pp. 277-281.

Colina, Eliezer: Segraduó como Ingeniero de Sistemas en la Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela en 1978 para después completar los grados de MSc en Ingeniería de Sistemas en la Universidad Case Western Reserve, Cleveland, USA en 1983 y PhD en Control Inteligente en la Universidad de Sheffield, Reino Unido, en 1993. Ha realizado actividades académicas en calidad de docente e investigador en Venezuela, Colombia y Ecuador. Su área de investigación se centra en los Sistemas Inteligentes de Control y la Auto-

matización de Procesos Industriales. Actualmente se desempeña como Investigador Prometeo de la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación de Ecuador.

Camacho, Oscar: recibió el título de Ingeniero Electricista en la Universidad de Los Andes (ULA), Mérida, Venezuela en 1984. Recibió el MSc. en Ingeniería de Control en ULA en 1992. En 1994 obtuvo el M. E. en Ingeniería Química y en 1996 Ph.D. en Ingeniería Química, ambos en University of South Florida (USF), EEUU. Desarrollo actividades postdoctorales en USF en 2001. Se ha desempeñado en la docencia e investigación en la ULA y PDVSA (Venezuela), USF (USA) y EPN (Ecuador). Su interés en investigación incluye control por modo deslizante, sistemas de control para procesos con elevado tiempo de retardo. Correo electrónico: ocamacho@ula.ve

Baquero, Diego: nació en Quito-Ecuador el 30 de Septiembre de 1993. Realizó sus estudios secundarios en el colegio Luigi Galvani. Obtuvo la certificación de manejo del idioma italiano CILS B2 en el año 2010. Obtuvo su certificado de suficiencia del idioma inglés en la Escuela Politécnica Nacional en el año 2012. Actualmente cursa la carrera de Ingeniería en Electrónica y Control en la Escuela Politécnica Nacional. Correo electrónico: diego.baquero@epn.edu.ec

Ochoa, Cristina, nació en Quito-Ecuador el 5 de Junio de 1993. Realizó sus estudios secundarios en la Unidad Educativa Experimental La Inmaculada. Obtuvo la certificación de manejo y proficiencia del idioma inglés en el año 2008. Obtuvo su certificado de suficiencia del idioma inglés en la Escuela Politécnica Nacional en el año 2011. Actualmente cursa la carrera de Electrónica y Control en la Escuela Politécnica Nacional Áreas de Interés: Instrumentación, Control Industrial, Domótica. Correo electrónico: cristina.ochoa@epn.edu.ec

Chávez, Danilo, nació en Quito-Ecuador el 1 de abril de 1977. Se graduó en la Escuela Politécnica Nacional como Ingeniero en Electrónica y Control en 2001 en la Escuela Politécnica Nacional. Obtuvo su título de Master en Domótica de la Universidad Politécnica de Madrid en 2007. Su título de Doctor en Ingeniería de Sistemas de Control en la Universidad Nacional de San Juan – Argentina en el 2012 con una beca del DAAD. Actualmente es Profesor Agregado en el Departamento de Automatización y Control Industrial de la Escuela Politécnica Nacional. Áreas de interés: sistemas hombre -máquina, robótica móvil, control avanzado, Industria 4.0.. Correo electrónico: danilo.chavez@epn.edu.ec

Capítulo 75

Fotogrametría terrestre digital aplicada a la documentación métrica de la fachada principal de la Iglesia Nuestra Señora del Carmen

Pacheco, Jhaneira

Sección Métodos y Técnicas de Levantamientos Geodésicos, Instituto de Fotogrametría,
Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes,
Mérida 5101, Venezuela.

jhcpp@ula.ve

Resumen

Este artículo describe la elaboración del documento métrico de la fachada principal de la Iglesia Nuestra Señora del Carmen, monumento arquitectónico-religioso reconocido como Bien Material de la Nación. Para elaborar este documento se utilizan métodos e instrumentos de medición de topografía clásica y de fotogrametría terrestre, ambos en sus últimas tendencias tecnológicas. El método analítico de la fotogrametría convergente adoptada por la tecnología digital, la medición cuantitativa y la observación científica de los resultados hizo posible la obtención de productos gráficos de valor métrico 3D y 2D de proyección ortogonal. Esta información de carácter científico responde a los términos internacionales, UNESCO, que establece la información geométrica precisa como indispensable en el reconocimiento de bienes materiales para su observación y conservación tanto estructural como arquitectónica en el paso del tiempo, y reconoce a la fotogrametría terrestre como la técnica adecuada para su elaboración.

ISBN: 978-980-11-1858-9



1 Introducción

La documentación métrica de una edificación consiste en describir su geometría tal y como ha sido modelada en el transcurso del tiempo, obedece a procesos de restitución y no de ilustración simple, es un recurso que no debe faltar en la documentación general de estructuras que requieren especial seguimiento funcional tanto de sus aspectos arquitectónicos como estructurales. La Iglesia Nuestra Señora del Carmen es un monumento arquitectónico de carácter religioso reconocido dentro de los Bienes Materiales de interés Cultural de la Nación por el Ministerio del Poder Popular de la Cultura, 2008 y se encuentra inventariado en el primer Censo de Patrimonio Cultural Venezolano (IPC 2008). Por su reconocida importancia, este monumento se convierte en objeto de estudio del presente trabajo en el cual se construye un modelo de elevación de su fachada principal aplicando las últimas tendencias de la tecnología digital en la fotogrametría terrestre.

2 Marco Teórico

La fotogrametría terrestre es la técnica de medición recomendada por la United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), para el registro y documentación geométrica de edificaciones que conforman el patrimonio cultural de una nación, (Buill 2007). El valor de la documentación métrica de monumentos de interés patrimonial, en términos internacionales, fue presentada por primera vez en La Carta de Atenas de la International Council of Monuments and Sites (ICOMOS, 1931). Por otro lado, el International Committee for Architectural Photogrammetry (CIPA), comité internacional de ICOMOS, promueve la colaboración entre ingenieros, arquitectos, historiadores, arqueólogos, conservadores, expertos en catalogación e inventario, especialistas en fotogrametría e informáticos entre otros en el tratamiento del patrimonio. Además, la conservación y gestión del patrimonio de la humanidad, asociado a bienes materiales inmuebles, como las edificaciones y monumentos, es inherente a las funciones de administración pública de profesionales de la ingeniería, la arquitectura y la cultura. Es indispensable la existencia de documentos de consulta proveniente de fuentes de carácter científico por la necesidad de obtener información de precisión gráfica, geométrica (información cartográfica) y semántica (información histórica y arquitectónica), que procure la toma de decisiones acertadas en la gestión de estos.

La Iglesia Nuestra Señora del Carmen, ubicada en la Avenida 4 Bolívar, entre calles 20 y 21, de la ciudad de Mérida data del siglo XVII. Es una construcción de estilo Neoclásico que se comenzó a ejecutar en el año 1640, cuando los Jesuitas consideraron su construcción como la Iglesia del Colegio en el cual residían. Es una estructura que ha conservado su esencia a pesar de grandes solicitudes estructurales debido a los sismos que sacudieron a la ciudad de

Mérida en 1673 y 1894, y un último destrozo a partir del cual surge su aspecto actual en fachada debido a su total desplome, año 1938, la cual conserva en la actualidad, aun con la restauración de los años 90. Objeto de cambios administrativos, de congregaciones y funciones clérigas y educativas, llegó a ser la Catedral de Mérida, en sustitución de la propia Catedral de la ciudad, la cual se encontraba en amenaza de ruinas en el año 1807 (Sosa Soto, 2005). Su evolución histórica, religiosa, cultural y arquitectónica representa etapas fundamentales de la historia de la sociedad merideña. Sin embargo, y siendo ésta una Iglesia Inventariada como Patrimonio Cultural por el Instituto del Patrimonio Cultural, 2008, en su Catálogo del Patrimonio Cultural Venezolano 2004-2007, solo ofrece información semántica e ilustrativa para su consulta.

El Instituto de Fotogrametría de la Universidad de Los Andes dedicó grandes esfuerzos en la década de los 90 al uso de la fotogrametría aplicada al levantamiento de monumentos arquitectónicos realizando restitución de fotografías tomadas con cámaras métricas analógicas y ortorectificadas con procesos fotogramétricos analógicos y analíticos que dieron origen a planos entintados de fachadas y plantas entre los cuales se encuentra la fachada de este monumento en una expresión bidimensional. La condición analógica, de estos productos, impresos en papel, los hace vulnerables al deterioro, por lo que no son de fácil acceso a la consulta pública.

El desarrollo del documento métrico de la Iglesia Nuestra Señora del Carmen consiste en la aplicación y adaptación de la técnica fotogramétrica a las condiciones particulares del monumento, usando la tecnología digital. Se realiza desde la recolección de imágenes hasta el procesamiento de las mismas para su transformación en información geométrica de datos precisos. Esta transformación geométrica se expresa en forma de representaciones gráficas bidimensionales, mediante ortofotos de detalles y en forma de representaciones gráficas tridimensionales, generando el objeto virtual, ambos comprensibles, de consulta veraz y de fácil acceso para profesionales y público en general. Además se garantiza la precisión de los resultados obtenidos mediante la observación y control de los errores.

El documento se elabora con fines de inventarios, anteproyectos de restauración, estudios preliminares, puesta en valor o acondicionamiento, se categoriza como un levantamiento simple y rápido (CIPA, 1972). En esta etapa del trabajo no se consideran las fachadas posterior y lateral izquierda, ni el interior del monumento. Solo se realiza el modelo de elevación de la fachada principal por estereorestitución punto a punto a partir de aplicar el método fotogramétrico de tomas convergentes o intersección directa, fig.1.

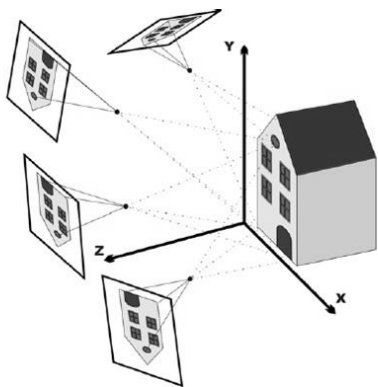


Fig. 1. Tomas convergentes. (García 2006)

3 Procedimiento Experimental

3.1 Equipos e Instrumentos

Para el levantamiento de la fachada del monumento se recurrió al uso de los siguientes equipos e instrumentos, ver fig.2.

Trabajos de Campo:

Levantamiento de puntos de control:

Cinta métrica, nivel de mano.

Estación total de medición sin prisma SOKKIA Set630rk, radiación laser de rebote RED TECH II, imagen directa, resolución de 1" (un segundo), distancia mínima focal de 1.3m, lectura electrónica de ángulos de 6" (seis segundos).

Levantamiento geodésico:

GPSmap 60CSx Garmin

Navegador Garmin Nüvi205W

Recolección fotográfica:

Cámara réflex digital NIKKON D3200, formato DX DSLR Kikon, sensor de CMOS 23,2 mm × 15,4 mm con sistema de limpieza, resolución máxima 6.016 × 4.000 (24,2 mega píxeles efectivos).

Cámara digital OLIMPUS Stylus-7030, sensor CCD de 1/2 a 3" (14 mega píxeles de resolución efectiva).

Trípode Smith-Victor, para cámara profesional, alta estabilidad y amplios ángulos de inclinación.

Trípode atlantic alfa 3 Q/R, para cámara olimpus.

Trabajos de escritorio:

Computador: procesador AMD Athlon X2 64x2 Dual 5400+, 2.81GHz, 1.93GB de RAM Video NVIDIA GeForce 6150 nForce 430, Resolución 1680x1050.

Software para dibujo vectorial asistido por computador para la crear planos en 2D y modelado en 3D, AutoCAD

Software para la reconstrucción del alzado, obtención de ortofotos de detalles y modelado 3D o alambrado, PhotoModeler Scanner.

Software para el análisis estadístico de resultados, Microsoft Excel.

Software para el renderizado KeySHOT.



Fig.2 Equipos e Instrumentos del levantamiento

3.2 Método de trabajo

La metodología utilizada es necesariamente multidisciplinaria, involucra técnicas de fotografía, topografía, fotogrametría digital y estadística.

Trabajo de Campo. Para iniciar el proceso de levantamiento se realizó una primera visita de reconocimiento del monumento y del espacio físico en el cual se encuentra ubicado. Se identificaron los elementos externos más relevantes que debían ser registrados. Se revisaron condiciones y variables de luz, sombra, visibilidad, obstáculos, distancias, ubicación de estaciones fotográficas, ángulos de inclinación, alcance de los registros fotográficos, condiciones de seguridad, acceso y situación de instrumentos de medición topográfica. De acuerdo a esta evaluación se realizó una preidentificación de los puntos de apoyo y los puntos de control que permitieran garantizar una precisión adecuada de sus coordenadas y se elaboró un plan de levantamiento. Se midió con cinta métrica la longitud total de la fachada principal de la Iglesia, para establecer el número de estaciones necesarias para su registro. Se diseñó e implementó una planilla para la toma de datos, identificando cada estación, el número de fotografías realizadas en cada estación con su correspondiente ángulo de inclinación en horizontal y/o en vertical en cada toma, además de información general del levantamiento, tabla 1. De este modo se organizó el registro de imágenes de los puntos de interés para el levantamiento de los distintos elementos de la fachada, con haces convergentes en un mismo punto desde, al menos tres imágenes con diferentes perspectivas.

En una segunda visita al sitio se hicieron fotografías para comprobar la visibilidad variando distancias focales y posibilidades de retiro y se estableció el campo visual que nos permite la distancia focal: 35mm. Con la cámara en 35 mm en condiciones enfoque manual, apertura del diafragma f32, temporizador de disparo 2", velocidad de obturación 1/40, ISO 100, reducción de ruido y trípode profesional de alta estabilidad, se instalaron entonces 5 estaciones fotogr-

ficas a nivel del suelo y dos a desnivel. Desde cada estación se hicieron tomas con inclinación de la cámara respecto a la horizontal, de 0°, 30°, 60° y 75°, cubriendo el total de la fachada en fajas verticales. Además, desde cada estación y en cada inclinación se realizaron tomas cubriendo la fachada en franjas horizontales. Estas últimas consistieron en al menos, una al frente, otra a la izquierda y otra a la derecha con ángulos entre ellas de 30° aproximadamente, en algunas estaciones hasta 60°, ver fig.3.

Tabla 1 Planilla para el control del levantamiento fotogramétrico

Es t.	Tomas	Ángulos Verticales			
		T oma a 0°	T oma a 30°	T oma a 60°	T oma a 75°
C1	i(-30°)	F ot#			
	f 0°	Fot#			
	d(+30°)	Fot#			
	d(-60°)				
	d(+60°)				

Las tomas fotográficas hechas a nivel del suelo fueron complementadas con tomas hechas a desnivel para mejorar la observación de detalles en las zonas más altas y de difícil acceso con puntos observables pero no visibles en varias fotografías, tales como en el campanario y la cornisa. Detalles menores como las placas que identifican el monumento fueron fotografiados con la Cámara digital OLIMPUS Stylus-7030, calibrada con Photomodeler y usada para generar ortofotos de detalles.

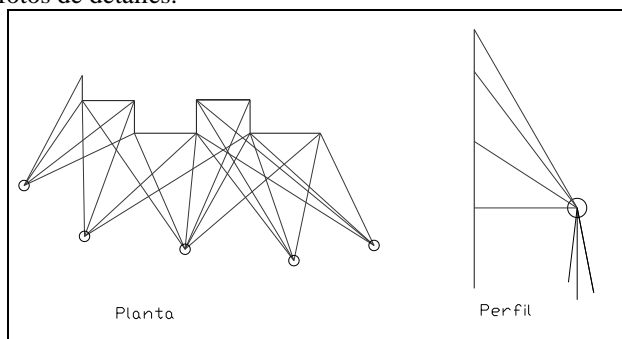


Fig.3 Estaciones y posiciones de la cámara

Con el apoyo de un croquis de la fachada de la iglesia se establecieron puntos de control usando una nomenclatura alfanumérica sencilla, y se procedió a hacer la lectura de sus coordenadas con la estación total de rebote usando un sistema arbitrario. Con el apoyo del GPS se obtuvieron las

coordenadas geodésicas de la estación que luego nos permitió orientar espacialmente el modelo, ver Fig. 4. Distancias menores en elementos de la fachada y de difícil visibilidad en las fotografías fueron controladas por medición manual con cinta métrica. Las dimensiones de la fachada, las condiciones de visibilidad y las posibilidades de retiro, no permitieron registrar el total de la fachada en cada fotografía, por lo que el registro se hizo por partes que llamaremos en adelante bloques.

Trabajo de escritorio. El trabajo de escritorio comienza con la calibración de las cámaras Nikon D3200 y OLIMPUS Stylus-7030 usando el software fotogramétrico PhotoModeler Scanner. La cámara digital Nikon D3200, es la cámara utilizada para el levantamiento de la fachada. La cámara Olympus se usó como cámara auxiliar. La calibración se logra con un total de 12 tomas fotográficas a la cuadrícula sugerida por el mismo software, 4 en la posición apaisada, 4 en la posición vertical con giro hacia la derecha y 4 en la posición vertical con giro hacia la izquierda, ver Fig 5. Una vez conocida los parámetros internos de la cámara principal, tabla 2, se realizaron todas las fotografías que fueron objeto del procesamiento fotogramétrico a través de Photomodeler. Cada producto gráfico obtenido a partir del procesamiento de las fotografías, con su correspondiente puntos, líneas y curvas fue escalado usando mediciones directas hechas con cinta métrica u obtenidas de lecturas topográficas, y fue orientado espacialmente a través de un sistema de referencia arbitrario X, Y y Z, común entre ellos.

Se generaron productos equivalentes al registro fotográfico, es decir, se construyó el alambrado de la fachada mediante bloques por separado. Para cada bloque procesado se realizó el correspondiente control de errores.

Camera Calibration Standard Deviations

Camera1: NIKON D3200 [35.00]

Focal Length Value: 35.700765 mm

Deviation: Focal: 0.012 mm

Xp - principal point x Value: 12.157359 mm

Deviation: Xp: 0.007 mm

Yp - principal point y Value: 7.840567 mm

Deviation: Yp: 0.007 mm

Fw - format width Value: 24.227542 mm

Deviation: Fw: 0.004 mm

Fh - format height Value: 16.110884 mm

K1 - radial distortion 1 Value: 3.427e-006

Deviation: K1: 2.4e-006

K2 - radial distortion 2 Value: 7.723e-008

Deviation: K2: 1.4e-008

K3 - radial distortion 3 Value: 0.000e+000

P1 - decentering distortion 1 Value: 0.000e+000

P2 - decentering distortion 2 Value: 0.000e+000

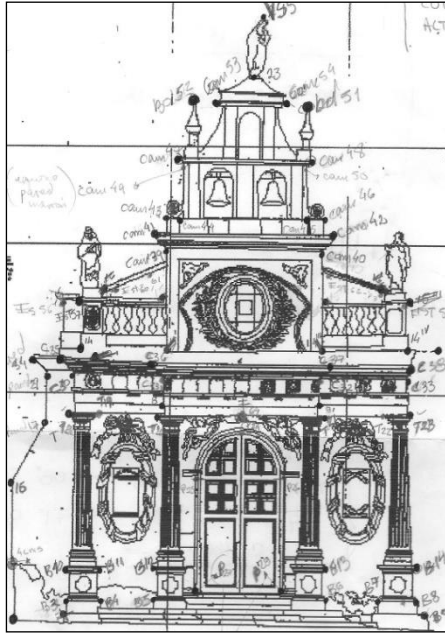


Fig.4 Puntos de control, levantados con Estación Total

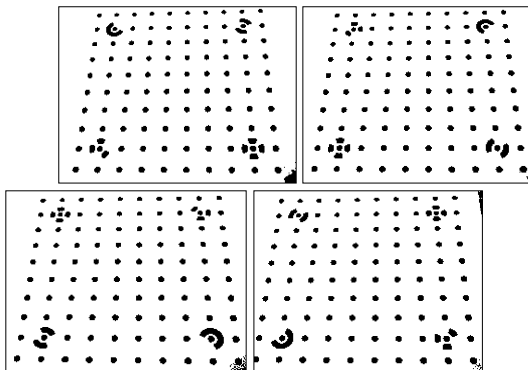


Fig.5 Grilla para calibración en posición apaisada
Tabla 2. Calibración Cámara Nikon D3200

Camera Calibration Standard Deviations

Camera1: NIKON D3200 [35.00]

Focal Length Value: 35.700765 mm

Deviation: Focal: 0.012 mm

Xp - principal point x Value: 12.157359 mm

Deviation: Xp: 0.007 mm

Yp - principal point y Value: 7.840567 mm

Deviation: Yp: 0.007 mm

Fw - format width Value: 24.227542 mm

Deviation: Fw: 0.004 mm

Fh - format height Value: 16.110884 mm

K1 - radial distortion 1 Value: 3.427e-006

Deviation: K1: 2.4e-006

K2 - radial distortion 2 Value: 7.723e-008

Deviation: K2: 1.4e-008

K3 - radial distortion 3 Value: 0.000e+000

P1 - decentering distortion 1 Value: 0.000e+000

P2 - decentering distortion 2 Value: 0.000e+000

Para crear el modelo 3D de cada bloque se hizo una orientación inicial entre imágenes seleccionando 10 puntos homólogos visibles repartidos de forma homogénea en un mínimo de 4 imágenes, seguidamente se relacionaron un mínimo de 260 puntos homólogos, para los módulos con menor número de detalles y hasta 890 puntos para los más ricos en información gráfica. Los errores residuales de marcas de puntos, RMS para cada bloque se mantuvieron entre 0.300 y 0.380, en escala logarítmica, fig.6., menores del tamaño de 1 pix (1pix=0.003856mm, equivalente a 0.0011 mts o 0.11 mm de registro real). Estos errores fueron controlados para cada bloque ajustando el modelo punto a punto, corrigiendo manualmente y procesando con el software para repartir los errores cometidos en marcas de puntos, pixel a pixel.

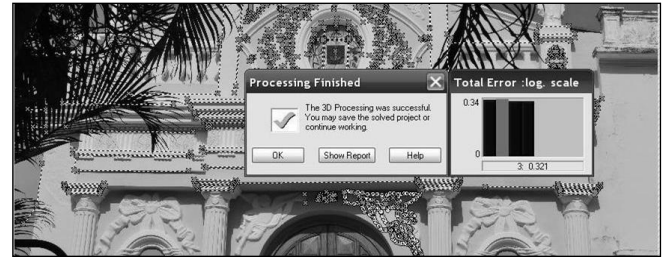


Fig.6 RMS Campanario

Finalmente los bloques fueron exportados en formatos dwg y enlazados entre sí mediante puntos comunes entre ellos previamente identificados mediante la herramienta AutoCAD. Una vez integrados todos los bloques se realizó la orientación externa final del modelo o fachada completa al sistema de coordenadas UTM asociado al levantamiento de puntos con la estación total y GPS.

El alambreado total de la fachada resulta de la unión de los distintos bloques realizados con PhotoModeler Scanner, ver. fig. 7. Este último archivo en formato dwg., siendo sensible a ser enriquecido usando herramientas de dibujo, se mejoró con información de detalles con el apoyo de las fotografías ortorectificadas, fig. 8

Una vez obtenido el modelo completo, se generaron tablas de coordenadas de cada uno de los módulos y se compararon entre sí, puntos de coordenadas norte, este y cota leídas con estación total con puntos de coordenadas norte, este y cota estimadas por PhotoModeler en la creación del modelo digital o restitución fotografica.

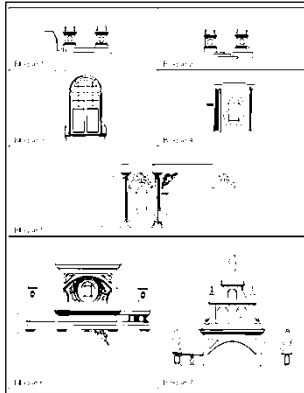


Fig.7 Modelo armado por bloques

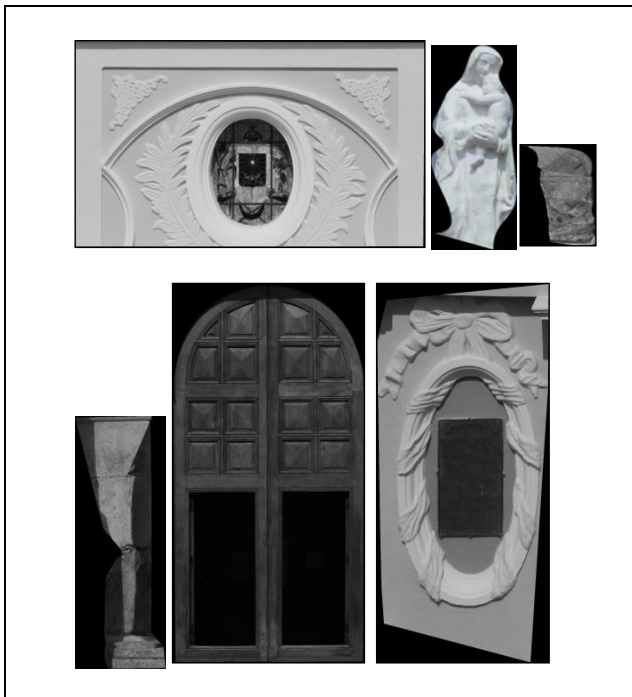


Fig. 8 Algunas Imágenes ortorectificadas de detalles

4 Discusión y Resultados

Después de un total 2756 puntos homologos relacionados entre fotografías, se logra un modelo virtual por restitución cuya confiabilidad o precisión en la métrica se verifica comparando la información obtenida en ambas técnicas de levantamiento. Esto mediante la observación de las coordenadas de los puntos de apoyo y de los puntos de control. Para ello se superponen las coordenadas norte, este y cota de los puntos considerados en las lecturas con estación total, con las coordenadas norte, este y cota de los mismos puntos obtenidos a partir de la restitución con photomodeler. La relación que guardan las coordenadas de cada punto se logra generando tablas en Excel desde Autocad y calculando los deltas de estas dos representaciones en cada uno de los ejes

para determinar el error expresado en metros. Para realizar estos cálculos se descartaron los puntos obtenidos con Photomodeler que se encontraran ubicados en las márgenes de las fotografías y aquellos con evidentes errores groseros obtenidos de relacionar menos de tres fotografías, ver tabla 3.

Los errores medios cuadráticos obtenidos para cada uno de los ejes coordenados fueron:

$$RMSE_{este} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i^{real} - x_i^{estimado})^2}{n}} = 0.053281 \text{ m}$$

$$RMSE_{norte} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i^{real} - y_i^{estimado})^2}{n}} = 0.047778 \text{ m}$$

$$RMSE_{cota} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (z_i^{real} - z_i^{estimado})^2}{n}} = 0.048135 \text{ m}$$

Se adoptan los datos obtenidos con la estación total como los de referencia (coordenada real) y los datos obtenidos de la fotogrametría como la información a verificar (coordenada estimada por photomodeler), ver tabla 2. Los errores medios cuadráticos para cada eje fueron:

$$RMES_x = 5,33 \text{ cms}$$

$$RMES_y = 4,78 \text{ cms}$$

$$RMES_z = 4.81 \text{ cms}$$

El error medio cuadrático global es de 5cms, lo que se considera se encuentra dentro del rango típico para este tipo de levantamiento. Por otro lado, se realizó la representación gráfica de la dispersión de los puntos y su curva de regresión para las tres coordenadas, en todas se obtuvieron valores menores de 1, valor del error más probable, ver fig. 9. Los valores de R^2 para cada eje fueron:

$$R_x^2 = 0.9981 \text{ coordenadas este}$$

$$R_y^2 = 0.9998 \text{ coordenadas norte}$$

$$R_z^2 = 0.9999 \text{ coordenadas de altura}$$

Fundamentados en los principios de precisión geométrica deseables para que un documento métrico sea confiable, podemos observar a través de estos resultados que el modelo es satisfactorio, fig.10.

El producto obtenido es la representación tridimensional de la fachada de la Iglesia Nuestra Señora del Carmen, la cual documenta métricamente la situación actual del edificio como resultado de la restitución fotogramétrica hecha con PhotoModeler. Se obtuvieron además información de detalles de la fachada con dimensiones reales mediante fotografías ortorectificadas, fig.9.

Tabla 3. Cálculo del RMES, coordenadas Este.

COORDENADA X, ESTE			
No mb.	Reales Estación total	Estimadas Photo-modeler	err or ²
2	190,51		0,00
pared 70	190,73	190,5522	12
B3 00	191,25	190,7515	05
B4 50	191,81	191,2791	06
B5 70	191,81	191,8170	00
B1 80	190,70	190,7249	03
0 B1 20	191,23	191,2659	11
1 B1 40	191,81	191,8217	01
2 pa- 50	190,39	190,4248	09
red15 B1 30	194,54	194,5039	15
3 B6 70	194,55	194,5194	14
B7 80	195,55	195,5124	21
B9 00	196,22	196,1234	93
B8 60	195,99	195,9474	24
pa- 90	190,86	190,9764	15
red17 pa- 00	190,87	190,9679	96
red29 T1 90	190,86	190,9764	15
8 T1 90	190,86	190,9300	37
9 T2 60	191,26	191,3313	43
0 T2 50	194,57	194,4817	87
1 T2 20	195,74	195,6352	14
2 pa- 40	190,40	190,4253	05
red34 pa- 00	190,87	190,8450	06
red29 C3 80	190,54	190,6034	31
5 pa- 90	190,86	190,9127	19
red17 T1 90	190,86	190,8733	00
8 T1 191,26	191,2959		0,00

9	60		09
T2	191,97		0,00
0 T2	194,57	191,9693	01
1 T2	195,74	194,5509	06
2 T2	196,23	195,7425	00
3 C3	196,19	196,1594	63
3 C3	196,05	196,1658	10
8 C3	194,48	195,9277	67
7 C3	194,59	194,4895	00
2 C3	191,69	194,5755	05
6 C3	192,20	191,6818	02
2 ES	191,29	192,1669	17
T56 C	192,75	191,2476	22
AM39 C	195,14	192,6601	90
AM40 C	195,03	195,0490	83
AM42 ES	196,33	194,9336	97
T63 V5	194,28	196,2475	73
5 B	195,22	194,2846	00
OL51 C	194,45	195,1349	85
AM54 C	194,90	194,3674	82
AM48 C	195,19	194,8034	97
AM46 C	195,03	195,0922	96
AM42 T2	194,57	194,9319	00
1 T2	195,74	194,4915	70
2 P2	194,07	195,7085	11
4 P2	193,46	194,1029	06
7 P2	194,72	193,5183	26
8 90		194,7151	02
			0,05
		RMES	3281

Estas proyecciones ortogonales permitieron la medición directa sobre ellas para aproximar mejor información del relieve de mamposterías, deterioros, elementos decorativos, sin que fuera necesario recurrir a la definición de detalles en la toma de datos de campo y sin la posibilidad de que se pasen por alto.

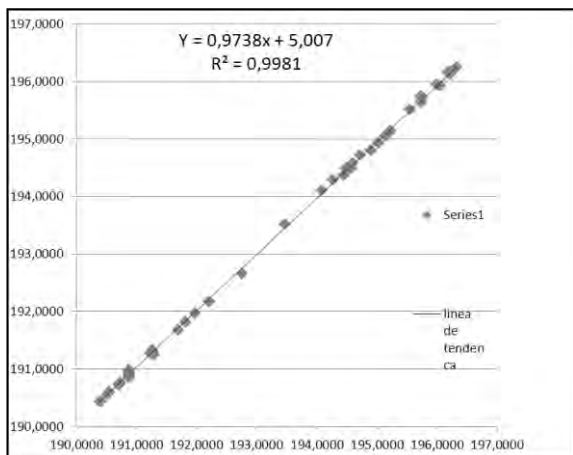


Fig.9 Regresión lineal RMES, coordenada este

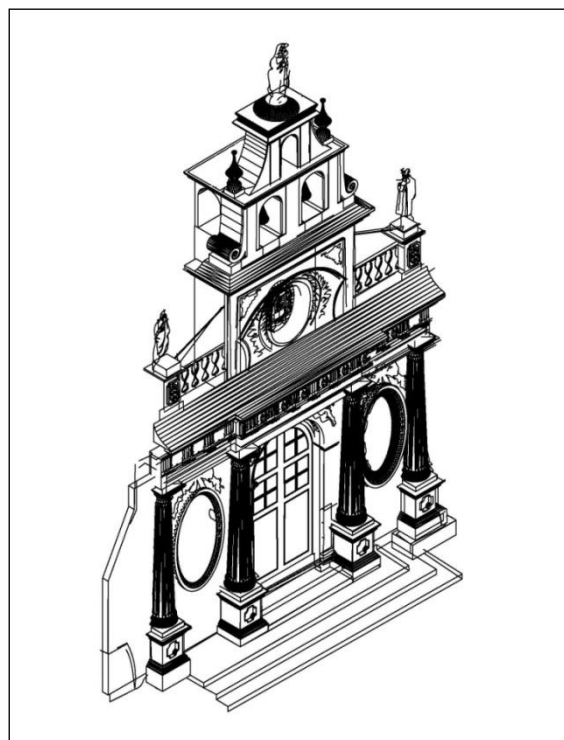


Fig.10 Isometrías de las Fachada de la Iglesia Nuestra Señora del Carmen



5 Conclusiones

Las condiciones limitadas de retiro que tienen los monumentos arquitectónicos ubicados en zonas céntricas, comerciales o urbanizadas, dificultan las tomas fotográficas que nos permiten hacer los levantamientos a través de la técnica fotogramétrica usando cámaras con distancias focales de 35mm. Esta dificultad puede atenuarse con el uso de lentes de gran angular que permita ampliar el campo visual a pesar de la corta distancia de retiro y lograr así el registro de la mayor área posible desde cada estación.

Despejar las áreas que rodean los edificios de carácter patrimonial, permitiría retiros adecuados para el registro de sus fachadas mediante fotografías y su posterior restitución. Con distancias apropiadas se reduce el número tomas y la construcción de bloques del modelo que luego tendrán que ser ensamblados. Esto reduce la posibilidad de errores y la cantidad de horas de escritorio en el levantamiento fotogrametrico.

El registro fotográfico del elemento completo (en este caso de la fachada completa) desde distintas perspectivas, permite observar los puntos de control desde un mayor número de fotografías, simultáneamente. Mientras mas fotografías se relacionen entre si, mejor será la precisión de su restitución a la vez que se logra un levantamiento fotogramétrico más expedito.

Para observar todos los detalles que requiera la complejidad del relieve del elemento o fachada, se hace necesario un mayor número de estaciones y de fotografías siempre de alta resolución. Desplegar un número grande de fotogra-

fías de alta resolución requerirá de al menos dos monitores conectados o una extensión de monitor, además de equipos procesadores más rápidos.

En el análisis de los resultados, se observó que los mayores errores en la restitución obedecen a puntos ubicados en las márgenes de las fotografías, es la zona en donde ocurre la mayor deformación por lo que se recomienda relacionar puntos repartidos de manera homogénea en la imagen y evitar los puntos homologos ubicados en los bordes de las imágenes.

Cuando los ángulos que se forman entre los haces de luz convergentes se hacen menores de 30° los errores en la representación gráfica aumentan por lo que es muy importante la planificación de las estaciones y las tomas fotográficas.

En la restitución del bloque 7-campanario se observaron los mayores errores, esto puede responder a los grandes ángulos de inclinación (75°) o perspectiva en las fotografías hechas desde el nivel de piso. Sin embargo se logro ajustar el modelo usando fotografías tomadas a nivel y se mejoro la precisión asociando el mayor número de puntos posibles.

A mayor número de puntos y mayor número de imágenes relacionadas entre sí, se consigue mayor precisión.

La representación volumétrica con precisión de las estatuas ubicadas en los laterales y coronando el campanario deben ser objeto de levantamientos individuales para hacer mas completo el documento métrico de la fachada, para ello se propone realizar vuelos fotogramétricos usando un Drone que permita el registro de imágenes en 360°.

La posibilidad de exportar del photomodeler archivos en formatos .iges o .vrml, tiene grandes ventajas de expresiones virtuales tales como el renderizado, que permite ofrecer al usuario un modelo sencillo y de fácil acceso para conocer el patrimonio, independientemente del lugar en el que se encuentre y de los fines de su consulta.

Generar un documento completo del monumento deberá considerar información gráfica, histórica, arquitectónica, de localización y ubicación relativa con respecto al territorio nacional que acompañe la información geométrica obtenida en este trabajo, para esto se sugiere usar la metodología propuesta en el artículo “Documentación Fotogramétrica de la Iglesia Nuestra Señora del Espejo, como monumento de Interes Patrimonial” (Pacheco J, 2012).

Los archivos fotogramétricos constituyen verdaderos archivos técnicos de monumentos y sitios, aun cuando su utilidad pueda ser diferida, siempre podemos referirnos a ella. Estos archivos responden a las exigencias de la Convención de la Haya sobre la protección de los bienes culturales. Son una de las bases esenciales en operaciones de inventario. La fotogrametría puede adaptarse a todo tipo de levantamiento desde croquis hasta planos detallados de alta

precisión. Con esta técnica se logra congelar en el tiempo la geometría real de un monumento en una determinada fecha de forma objetiva y sin las hipótesis ni estimaciones a priori de trazados y orientaciones, independientemente de la complejidad que tenga.

Estos documentos métricos también dan la posibilidad de medir de manera exacta posibles deformaciones en el edificio o eventuales correcciones deseadas en restauraciones contribuyendo de modo eficaz a la conservación de los mismos.

A pesar de las particulares condiciones de visibilidad y acceso al registro fotográfico del monumento, se obtuvieron resultados deseables, por lo que se propone continuar con este trabajo considerando las fachadas externas faltantes, su interior, techos y planta.

Referencias

- Antonio A, 2003, De la Fotogrametría a la Infografía. Un proceso informatizado de la documentación. Escuela de estudios árabes, Cosejo Superior de Investigaciones Científicas, CSIC. Universidad de Granada. Disponible: <http://digital.csic.es/bitstream/10261/19816/1/Fotogrametría-Infograf%C3%ADa.pdf>[Consulta: 2016].
- Alcaldía del Municipio Libertador de Mérida. Gaceta Municipal, 110 (Extraordinario), Julio 8, 2004.
- Buill F, Núñez M, Rodríguez J, 2007. Fotogrametría Arquitectónica. Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya, UPC.
- Ciclo de conferencias sobre la fotogrametría técnicas instrumentales, Universidad Politécnica de Madrid , Servicio de fotogrametría y fotointerpretación, abril 1976.
- CIPA, Comité internacional de la fotogrametría arquitectónica, Fotogrametría de los monumentos y de los sitios, publicación de ICOMOS, UNESCO, Francia, 1972.
- García J, 2006, Principios y aplicación de la fotografía convergente en la fotogrametría arquitectónica. Tesis Doctoral. Departamento de expresión gráfica, Universidad de Extremadura, España. [Página Web en línea, Disponible: http://www.academia.edu/5508544/Principios_y_aplicacion_es_de_la_fotogrametr%C3%ADa_convergente_en_la_fotogrametr%C3%ADa_arquitect%C3%B3nica. [Consulta: 2016].
- Instituto del Patrimonio Cultural, 2008. Catálogo del Patrimonio Cultural Venezolano 2004-2007. Región Los Andes, estado Mérida, municipio Libertador, ME12, Caracas, Ministerio del Poder Popular para la Cultura, MPPC.
- I Censo de Patrimonio Cultural 2004-2005. Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela, 340.497, declaratoria 003, Julio 22, 2005.
- Jáuregui M, 1982,Aplicaciones prácticas de la fotogrametría terrestre, Universidad de Los Andes.
- Jáuregui M, Jáuregui L, Terrestrial photogrammetry applied to architectural restoration and archaeological surveys,

IAPRS, Vol. XXXIII, Amsterdam, 2000.

Junta Nacional Protectora y Conservadora del Patrimonio Histórico y Artístico de la Nación. Gaceta Oficial de la República de Venezuela, 26.320, Agosto 2, 1960.

Patrimonio Cultural Municipal del Municipio Libertador de Mérida. Gaceta Oficial, 89, Marzo 31, 2003.

Pacheco J, Documentación Fotogramétrica de la Iglesia Nuestra Señora del Espejo, como monumento de interés patrimonial, Voces Tecnología y Pensamientos. Universidad Politécnica Territorial del Estado Mérida, UPTM, Vol.6. pp. 67-83. Mérida, 2012.

Sosa MTI, 2005, El Portal: Entre lo Sagrado y lo profano. La Iglesia Nuestra Señora del Carmen de Mérida. Tesis de Magister Scientiae en Historia y Teoría Crítica de la Arquitectura, Universidad de Los Andes, ULA, Mérida, Venezuela.

Valle J, 2006, La medida y representación del patrimonio: Alternativas y criterios de selección. ISSN 0210-8550, No. 251, pp 63-85.

Pacheco, Jhaneira: *MSc en Ingeniería Vial, Ingeniero Civil, Profesora Agregada de la Facultad de Ingeniería, Investigadora del Instituto de Fotogrametría de la Sección de Métodos y Técnicas de Levantamientos Geodésicos, en el área de Fotogrametría Terrestre.*

Capítulo 76

Estudio geométrico y topológico de un cable de acero

Parra, Rafael*; **Rodríguez, Armando**; **Herrera, José**

Facultad de Ingeniería, Departamento de Cálculo
Universidad de Los Andes, Mérida 5101, Venezuela

*rafaelparra@ula.ve

Resumen

En este trabajo se muestra el comportamiento geométrico y topológico de un cable de acero. Las múltiples aplicaciones de este elemento como parte de los equipos para la manipulación y sujeción de cargas e incluso en el transporte de personas motivan su estudio. Utilizando las formas diferenciales, el concepto de derivada exterior entre otros se pretende dar una visión geométrica para describir el comportamiento estructural de un cable de acero. Considerando curvas parametrizadas y el triedro de Frenet en cada punto del elemento se construye un campo de vectores perpendiculares y así establecer la relación que existe entre las cantidades geométricas: número de enrollamiento y número de retorcimiento.

ISBN: 978-980-11-1858-9



1 Introducción

Este trabajo pretende realizar un estudio topológico-geométrico de un cable de acero. Los cables metálicos son elementos ampliamente utilizados en la mayoría de actividades industriales. Así los encontramos formando parte de los equipos para la manipulación y sujeción de cargas e incluso en el transporte de personas. Es por ello conveniente conocer las características de tales elementos y su estructura matemática. Un cable de acero, puede considerarse compuesto por diversos cordones metálicos dispuestos helicoidalmente alrededor de un alma, que puede ser textil, metálica o mixta.

Para distinguir las propiedades del cable, primero se define el elemento donde se indica las ventajas, comportamiento ante las cargas que se aplican, materiales empleados para la construcción, elementos necesarios para garantizar la estabilidad del cable y los principales usos de ésta unidad estructural.

Los cables son elementos flexibles debido a sus dimensiones transversales, pequeñas en relación con la longitud, por lo cual su resistencia es solo a tracción dirigida a lo largo del cable. La carga de tracción se divide por igual entre los cordones del cable, permitiendo que cada cordón quede sometido a la misma tensión admisible (Beery col., 1980).

Por su flexibilidad, los cables de acero cambian de forma de acuerdo a las cargas a las que están sometidos y pueden clasificarse:

1. Cables que soportan cargas concentradas.
2. Cables que sostienen cargas distribuidas.

Un cable de acero no constituye una estructura autoportante a menos de contar con medios y procedimientos para absorber empuje. Es por ésta razón que su estudio como unidad no incluye este tipo de fuerzas. En el caso en que interactúen con anclajes de acero o concreto, este efecto se logra canalizando las fuerzas sobre los anclajes o torres de tracción a tierra. Compresión en las torres y corte en los bloques de anclaje.

En nuestro trabajo supondremos que dicho cable está constituido por dos cordones metálicos que se enrollan helicoidalmente uno con respecto al otro. Estudiar el arrollamiento y el sentido de dicho arrollamiento de los cordones, en el cable, es uno de los principales objetivos de este trabajo.

Empleando las formas diferenciales, el concepto de derivada exterior y los campos vectoriales sobre curvas continuas y simples pretendemos abordar matemáticamente éste problema. Para ellos se define sobre la estructura del cable dos conceptos fundamentales, el número de enrollamiento o giros y el número de retorcimiento. El procedimiento de establecer ésta estructura diferencial sobre un cable de acero es parametrizando por longitud de arco uno de los cordones que componen dicho cable y considerando un campo de vectores perpendiculares a la curva que describe el mismo. Con estas herramientas es posible considerar el Triedro de

Frenet y plantear con unicidad los números de giros y retorcimiento.

Estas definiciones no dependerán de las parametrizaciones escogidas y su conocimiento permitirá caracterizar éstos componentes metálicos.

Para entender un poco más los conceptos matemáticos definidos podemos visualizar el número de enrollamiento como el número de vueltas que describe cualquiera de los cables helicoidales con respecto a un eje común.

De igual manera, el número de retorcimiento no admite una interpretación geométrica tan obvia, pero trata de medir cuánto y cómo de plano es el cable de acero. Dichas magnitudes, en particular el número de retorcimiento, tienen tanta importancia, porque es una cantidad observable.

2 Marco Teórico

2.1 Curvas Parametrizadas

Una curva paramétrica (Manfredoy col., 1994), se dice que es regular de clase C^k , si entre sus representaciones paramétricas, existe una $\sigma: I \rightarrow R^3$ tal que σ es una aplicación de clase C^k y $\sigma'(t) \neq 0$ para todo $t \in I$.

Dado t en I , se define el vector tangente unitario a la curva en el punto $\sigma(t)$ como el vector $\sigma'(t)$. Lo denotaremos por T , de modo que dado t en I pondremos $T_t = \sigma'(t)$. De este modo:

$$T_t = \sigma'(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\sigma(t+\Delta t) - \sigma(t)}{\Delta t} \quad (1)$$

Si la curva, es de clase C^2 , podemos derivar nuevamente y tendremos el vector $T' = \sigma''$. Se define la curvatura de la curva σ como la función:

$$\kappa \quad := \quad |T'| \quad (2)$$

$$\kappa := \sqrt{(\sigma''_1)^2 + (\sigma''_2)^2 + (\sigma''_3)^2} \quad (3)$$

Así, una curva regular de clase C^2 , es una recta, si y sólo si, tiene curvatura nula en todos sus puntos.

Si $\kappa(t) \neq 0$, entonces el vector T' es no nulo y por lo tanto podemos normalizarlo $T'/|T'|$, este vector unitario se denota por N y se llama vector normal a la curva en el punto $\sigma(t)$. Es importante resaltar que dicho vector está definido en los puntos de curvatura no nula. Además, donde N está definido es ortonormal a T .

En un punto $\sigma(t)$ de curvatura no nula, se define el vector binormal a la curva, como el único vector B que cumple que $\{T, N, B\}$ es una base ortonormal positivamente orientada, esto es, $B = T \times N$.

Exigiendo condiciones mayores a la curva σ , es decir, si suponemos que es de clase C^3 , y que su curvatura es no nula, de modo que el vector normal unitario N está definido y es de clase C^1 . Se define la torsión de la curva σ como la función:

$$T := \langle N', B \rangle \quad (4)$$

Estas definiciones dadas anteriormente no varían si se cambia la parametrización por otra que también sea natural. De hecho, en lo que sigue, supondremos siempre que la curvatura está parametrizada por longitud de arco.

Por lo tanto para una curva de clase C^2 , sobre sus puntos de curvatura no nula, tenemos la base ortonormal positiva $\{T, N, B\}$, la cual se conoce como Triedro de Frenet (Do Carmo MP 1994) o triedro móvil de la curva.

Existen fórmulas matemáticas para calcular cada una de las funciones expresadas anteriormente:

$$\kappa = \frac{|\sigma' \times \sigma''|}{|\sigma'|^3} \quad (5)$$

$$\tau = \frac{[\sigma', \sigma'', \sigma''']}{|\sigma' \times \sigma''|^2} \quad (6)$$

$$B = \frac{\sigma' \times \sigma''}{|\sigma' \times \sigma''|} \quad (7)$$

Otra estructura importante ligada al comportamiento de una curva y que más adelante nos servirá como referencia para medir que tan “plana” deja de ser una curva, es el plano osculador. Para nuestra curva σ de clase C^2 y un punto t_0 en I , tal que $\kappa(t_0) \neq 0$, podemos considerar t_1 y t_2 en I “tan próximos” como queramos a t_0 , cumpliendo que $\sigma(t_0)$, $\sigma(t_1)$, $\sigma(t_2)$ sean tres puntos no alineados. Llamaremos plano osculador a la curva en el punto $\sigma(t_0)$, al plano límite cuanto $t_1, t_2 \rightarrow t_0$. Puede decirse, que el plano osculador es el plano que pasa por tres puntos infinitesimales próximos a la curva.

En particular, si la curva σ es plana, y tiene curvatura no nula en todos sus puntos, entonces se sigue de la definición, que el plano sobre el que yace la curva es el plano osculador en todos sus puntos. En particular, T y N son vectores de la dirección de dicho plano a lo largo de toda la curva.

Por definición, la curvatura de $\sigma = \sigma(t)$ indica como varía la dirección de su recta tangente a lo largo de ella. Por tanto, el que la curvatura sea constantemente nula, significa que dicha dirección no varía, en cuyo caso la curva es una recta.

En el supuesto que una curva este parametrizada por longitud de arco se sigue (Do Carmo MP 1994), que en los puntos de curvatura no nula se cumple $B' = \tau N'$ por tan-

to $|\tau| = |B'|$.

2.2 Formas Diferenciales

Se llama k - forma alternada a un tensor k veces covariante, T , que es antisimétrico en cualquier par de argumentos, es decir:

$$T(\dots, v_i, \dots, v_j, \dots) = -T(\dots, v_j, \dots, v_i, \dots) \quad (8)$$

El conjunto de k - formas alternadas sobre un espacio vectorial V se denota como $Alt^k(V)$ (Warner FW, 1971). Las formas diferenciales correspondientes al caso en que V es el espacio tangente de una variedad M se denota por $\Omega^k(M)$.

En analogía a la teoría de tensores se conviene que $Alt^0(V)$ son las constantes, esto es, \mathbb{R} y por tanto $\Omega^0(M) = C^\infty(M)$. El caso $k=1$ es también un poco singular porque las definiciones no ponen ninguna restricción y decir 1- forma alternada es equivalente a decir tensor una vez covariante.

El conjunto $Alt^k(V)$ tiene una estructura de espacio vectorial real con las operaciones habituales de suma y multiplicaciones de números reales. En el caso de $\Omega^k(M)$, esos números reales dependerán del punto o vector sobre el cual estamos considerando el espacio tangente y por tanto son funciones $f: M \rightarrow \mathbb{R}$ que, como siempre, supondremos C^∞ .

Ejemplo:

Para calcular todos los elementos de $Alt^2(\mathbb{R}^2)$, consideremos T en $Alt^2(\mathbb{R}^2)$ arbitrario, y $v_1 = a_{11}e_1 + a_{12}e_2$ $v_2 = a_{21}e_1 + a_{22}e_2$, entonces usando la linealidad de T y el hecho de que $T(x, x) = 0$

$$T(v_1, v_2) = a_{11}a_{12}T(e_1, e_1) + a_{11}a_{22}T(e_1, e_2) + a_{21}a_{12}T(e_2, e_1) + a_{21}a_{22}T(e_2, e_2) = T(e_1, e_2) \det(v_1, v_2) \quad (9)$$

Entonces el único tensor en $Alt^2(\mathbb{R}^2)$ es el determinante salvo multiplicar por constantes, $T(e_1, e_2)$, es decir, $Alt^2(\mathbb{R}^2) = \{\lambda \det\}$. Nótese que $T(e_1, e_2)$ es una constante una vez fijada una base y también el determinante depende de la base elegida.

Para una presentación independiente de las coordenadas de v_1 y v_2 , se puede elegir sin pérdida de generalidad una base dual de \mathbb{R}^2 $\{\xi_1, \xi_2\}$ y decir que todo elemento de $Alt^2(\mathbb{R}^2)$ es de la forma:

$$T = \lambda (\xi_1 \times \xi_2) - \lambda (\xi_2 \times \xi_1) \quad (10)$$

Esto es exactamente lo mismo que antes porque si $\{e_1, e_2\}$ es la base, cuya base dual es $\{\xi_1, \xi_2\}$, entonces:

$$\xi_i(v_j) = a_{ij} \quad (11)$$

De la misma forma, si M es una variedad de dimensión 2, entonces en cada carta $(V, \rho(x_1, \dots, x_n))$ los elementos de $\Omega^2(M)$ son de la forma:

$$\Omega = f dx_1 \wedge dx_2 - f dx_2 \wedge dx_1 \quad (12)$$

Donde:

$f: M \rightarrow \mathbb{R}$ es una función de la variedad en \mathbb{R} .

Podemos interpretar el resultado anterior diciendo que $\{\xi_1, \xi_2\}$ es una base de V^* y $\dim V = 2$, entonces $\{\xi_1 \wedge \xi_2 - \xi_2 \wedge \xi_1\}$ es una base de $\text{Alt}^2(\mathbb{R})$.

2.3 Producto Exterior

Dados ξ_1, \dots, ξ_k en V^* su producto exterior $\xi_1 \wedge \dots \wedge \xi_k$ se define como la forma $\text{Alt}^k(\mathbb{R})$ dada por:

$$(\xi_1 \wedge \dots \wedge \xi_k)(v_1, \dots, v_n) = \det(\xi_i(v_j))_{1 \leq i, j \leq k} \quad (13)$$

La definición (FW. Warner, 1971) se extiende de manera obvia a uno formas.

Por lo anterior es posible expresar cualquier elemento de $\Omega^k(M)$ como:

$$\omega = \sum f_{i_1, \dots, i_k} dx_{i_1} \wedge \dots \wedge dx_{i_k} \quad (14)$$

Las componentes f_{i_1, \dots, i_k} son en principio funciones de $p \in M$, sin embargo esta dependencia se expresa a través de las funciones coordenadas y escribiremos:

$$f_{i_1, \dots, i_k} = f_{i_1, \dots, i_k}(x_1, \dots, x_k). \quad (15)$$

Utilizando esta manera de expresar los elementos de $\Omega^k(M)$, se define la derivada exterior de ω y se denota por $d\omega$ a la expresión (F. W. Warner, 1971):

$$d\omega = \sum_j \sum_{i_1, i_2, \dots, i_k} \frac{\partial f_{i_1, i_2, \dots, i_k}}{\partial x^j} dx^j \wedge dx^{i_1} \wedge dx^{i_2} \wedge \dots \wedge dx^{i_k} \quad (16)$$

el elemento $d\omega \in \Omega^{k+1}(M)$ obviamente según la definición. Y el caso especial $k=0$ se reduce a la expresión:

$$d\omega = df = \sum \frac{\partial f}{\partial x^j} dx^j \quad (17)$$

Por la antisimetría podemos suponer que en la definición anterior la sumatoria es sobre $i_1 < i_2 < \dots < i_k$. Las cantidades f_{i_1, i_2, \dots, i_k} son componentes de un tensor k veces covariante y en consecuencia se pueden aplicar los cambios a la carta por medio de:

$$f_{i_1, i_2, \dots, i_k} = \frac{\partial x^{j_1}}{\partial x^{i_1}} \frac{\partial x^{j_2}}{\partial x^{i_2}} \dots \frac{\partial x^{j_k}}{\partial x^{i_k}} f_{j_1, j_2, \dots, j_k} \quad (18)$$

Al derivar con respecto a x^j no tenemos una relación entre las derivadas de f_{i_1, i_2, \dots, i_k} y f_{j_1, j_2, \dots, j_k} porque aparecen derivadas parciales segundas de los cambios de carta. Sin embargo estos términos no influyen en la expresión de $d\omega$

porque la antisimetría del producto de uno formas asegura que:

$$\sum_{ij} \frac{\partial^2 x^k}{\partial x^i \partial x^j} dx^i \wedge dx^j = 0 \quad (19)$$

3 El Modelo

Un cable de acero, de forma genérica, puede considerarse compuesto por diversos cordones metálicos dispuestos helicoidalmente alrededor de una estructura central, llamada alma (Segui W 2000). Esta disposición es tal que la estructura se comporta como una sola unidad. En el presente trabajo consideraremos el comportamiento de un cable de acero compuesto por dos cordones metálicos dispuestos helicoidalmente alrededor de un alma. Denotaremos por B el eje central o alma del cable de acero y C_1 y C_2 a las dos hebras que se enrollan para dar la estructura del cable. A fin de dotar con una estructura matemática nuestro modelo, podemos considerar una curva σ de clase C^1 , simple, parametrizada por longitud de arco y denotemos por F el campo de vectores unitarios y perpendiculares a la curva σ , así para cada s en la parametrización:

$$F(s) \in \mathbb{R}^3 \quad (20)$$

$$\|F(s)\| = 1 \quad (21)$$

$$\langle F(s), \sigma'(s) \rangle = 0 \quad (22)$$

Consideremos la curva $\omega(s) = \sigma(s) + F(s)$. Con ésta notación, el par formado por la curva σ y el campo de vectores F representan uno de los cordones metálicos y la curva ω representara el otro cordón.

Para entender realmente como esta base vectorial ayuda a describir la acción de un cable de acero vamos definir primero de manera intuitiva y luego matemáticamente unas cantidades que caracterizaran su comportamiento.

El número de enlace se puede interpretar de la siguiente manera: supongamos que queremos separar completamente las dos hebras de un cable metálico y que para ello disponemos de una herramienta cortante. Entonces se define el número de enlace como la cantidad de veces que hemos de cortar para conseguir dicha separación.

El siguiente parámetro que vamos a desarrollar es el número de enrollamiento, el cual, se interpretará como el número de vueltas que describe cualquiera de las dos hebras de alambres alrededor del eje B . Finalmente un número que nos ayuda a comprender que tan plano es el cordón metálico es el número de retorcimiento.

Si tomamos el vector $T(s)$ como el vector tangente a σ positivamente orientado talque $T(s) = \sigma'(s)$ podemos considerar la siguiente base:

$$\{T(s), F(s), F^\perp(s)\} \quad (23)$$

Donde:

$$F^\perp(s) = \sigma'(s) \wedge F(s) \quad (24)$$

Dicho conjunto de vectores son ortonormales entre sí por construcción.

Siguiendo con el modelo podemos definir la variedad 2- dimensional $\sigma \times \omega$ donde ambas curvas están parametrizadas por longitud de arco y se encuentran en una ambiente de R^6 .

Consideremos la siguiente aplicación sobre la esfera S^2 $\xi: \sigma \times \omega \rightarrow S^2$ dada por:

$$\xi(x, y) = \frac{y-x}{|y-x|} \quad (25)$$

Con esto podemos definir el número de enlace por medio de la siguiente ecuación (M. H. Edgar, 2000):

$$L(\sigma, \omega) = \frac{1}{4\pi} \iint \xi^*(d\Sigma) \quad \text{sobre } \sigma \times \omega. \quad (26)$$

Donde $\xi^*(d\Sigma)$ representa un elemento de área sobre la esfera S^2 bajo la aplicación ξ .

De manera similar si consideremos la curvatura $\kappa(s)$ de la curva σ . Teniendo en cuenta que $\kappa(s) = |\sigma''(s)|$ podemos definir el Triedro de Frenet definido por $\{T(s), N(s), B(s)\}$, donde

$T(s) = \sigma'(s)$, es el vector tangente, $N(s) = T(s) / \kappa(s)$, es el vector normal a la curva, y $B(s) = T(s) \times N(s)$, es el vector binormal a σ .

Derivando los vectores anteriores podemos tener las siguientes relaciones:

$$T'(s) = \kappa(s) N(s) \quad (27)$$

$$N(s) = -\kappa(s)T(s) - \tau(s) B(s) \quad (28)$$

$$B'(s) = \tau(s) N(s) \quad (29)$$

Teniendo en cuenta que estos vectores forman una base podemos expresar cada $F(s)$ de la siguiente forma:

$$F(s) = \cos(\mu(s)) N(s) + \sin(\mu(s))B(s) \quad (30)$$

Donde:

$\mu(s)$ es una función diferenciable.

Derivando podemos obtener la siguiente expresión:

$$F'(s) = -\mu(s)\text{sen}(\mu(s))N(s) + \cos(\mu(s))N'(s) + \mu'(s)\cos(\mu(s)) B(s) + \text{sen}(\mu(s))B'(s) \quad (31)$$

Por lo tanto:

$$F^\perp(s) = \cos(\mu(s))B(s) + \text{sen}(\mu(s))N(s) \quad (32)$$

Sustituyendo las ecuaciones (31) y (32) en la expresión

$$\langle F'(s), F^\perp(s) \rangle = \mu(s) - \tau(s) \quad (33)$$

Así, con esta igualdad podemos definir el número de enrollamiento de la siguiente manera:

$$T(\sigma, F) = \frac{1}{2\pi} \int_0^l \mu(s) - \tau(s) ds \quad (34)$$

De manera equivalente:

$$T(\sigma, F) = \frac{1}{2\pi} \int_0^l \langle F'(s), F^\perp(s) \rangle ds. \quad (35)$$

Para definir el número de retorcimiento de la curva consideramos de nuevo la variedad 2 dimensional $\sigma \times \sigma$, teniendo igualmente parametrizaciones por longitud de arco. Considerando de nuevo la aplicación ξ definida en (Edgar MH 2000), expresemos matemáticamente este concepto por:

$$R(\sigma) = \frac{1}{4\pi} \iint \xi^*(d\Sigma) \quad \text{sobre } \sigma \times \sigma \quad (36)$$

Siendo $d\Sigma$ una 2 forma, $\xi^*(d\Sigma)$ es un tensor en la variedad $\sigma \times \sigma$.

4Cálculo de valores para un modelo de cable de acero parabólico.

Supongamos que tenemos un cable que sostiene cargas distribuidas. Para un modelo de carga distribuida horizontalmente dicho elemento adquiere una forma parabólica y por su peso propio tiende a presentar una deformación que describe una curva llamada catenaria (Beer F y col., 1980).

Las ecuaciones que modelan el comportamiento de las tensiones y cargas se describen por:

$$T_0 = \frac{wx^2}{2y} \tag{37}$$

$$T_{max} = \sqrt{T_0^2 + (w\frac{l}{2})^2} \tag{38}$$

$$\tan(\Theta) = \frac{wx}{T_0} \tag{39}$$

$$y = \frac{wx^2}{2T_0} \tag{40}$$

$$W = wx \tag{41}$$

Donde:

T_0 = Tensión mínima en el cable en el punto más bajo.

T_{max} = Tensión máxima, en la dirección tangente a la curva del cable, en el punto más alto.

w = Carga horizontal uniformemente distribuida.

Θ = Angulo de la tangente con el cable de acero.

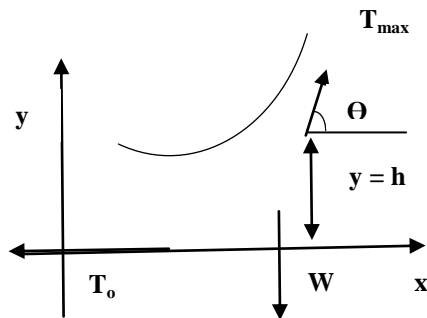


Fig. 1. Diagrama de Fuerza para un cable de acero.

Utilizando este modelo de carga distribuida estudiemos la relación entre la tensión en el cable de acero y el número retorcimiento de forma numérica. La deformación natural que impone sobre este elemento la tensión descrita por la ecuación (37) y (38) puede estudiarse en la tabla 1.

En donde el cable de acero, está constituido según el modelo por un alma de acero y dos cordones de metálicos.

DN	P kg /100m	PAA kg/100m	CU kg f/ m	Núm. R
1.0	0.50	0.49	500	0.60
1.2	0.72	0.71	500	0.62
1.5	1.13	1.11	500	0.70
1.8	1.53	1.60	500	0.74
2.0	2.01	1.98	500	0.79

Tabla 1. Relación entre el número de retorcimiento y el peso del cable de acero.

Donde:

DN = Diámetro Nominal de cada cordón.

P= Peso de cada cordón.

PAA= Peso del Alma de Acero.

CU= Carga Uniforme.

Núm. R= Numero de retorcimiento.

5 Conclusiones

El estudio realizado permite afirmar que en el diseño de un cable de acero con dos cordones metálicos si sostenemos el eje central o alma y comenzamos a entrelazar las hebras de manera manual en el instante inicial no describen ningún Angulo. Al irse enrollando y dando estructura al cable, tanto el número de enlace como el número de enrollamiento van aumentando y lo hacen en la misma medida .

En el caso de que la tensión sobre el cable de acero aumente, dicha fuerza produce que el cable se obligue a retorcerse sobre sí mismo. Por lo tanto un aumento en el número de enlace se traduce también en un aumento en el número de retorcimiento.

El perfil del cable y su forma están determinados por los números retorcimiento, enrollamiento y enlace.

A mayor número de retorcimiento, más compacto será el cable de acero.

Agradecimiento

El presente trabajo ha sido posible gracias al financiamiento del CDCHT bajo el proyecto I- 1269- 11- 05- B

Referencias

Beer F, Johnston ER, 1980, Mecánica vectorial para ingenieros, Editorial McGraw – Hill Latinoamericana S.A, Bogotá, Colombia.

Warner FW,1971, Foundations of Differentiable Manifolds and Lie Groups, Scott Foresman and Co. Glenview.

Do CarmoManfredo P, 1994, Differential forms and applications. Springer – Verlag.

Edgar MH, 2000, On White´s formula. Journal of knot theory and its ramifications, Vol. 9 Num. 5 pp 611-615.

HuST 1969, Differentiable Manifolds, Hold, Rinehart and-Winston Inc, New York.

Segui W, 2000, Diseño de estructuras de acero con LRFD. Internacional Thomson Editores, México DF.

Parra, Rafael: *Dr. en Matemáticas. Departamento de Cálculo. Facultad de Ingeniería. Universidad de los Andes.*

Rodríguez, Armando: *MSc en Matemáticas. Departamento de Cálculo. Facultad de Ingeniería. Universidad de los Andes. armandorodriguez@ula.ve*

Herrera, José: *Dr. en Física. Departamento de Cálculo. Facultad de Ingeniería. Universidad de los Andes. jherrera@ula.ula.ve*

Determinación de la superficie crítica en la estabilidad de taludes aplicando el cálculo de variaciones

Belandria, Norly^{1*}; Úcar, Roberto¹; Arteaga, Jhonnathan²

¹Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geológica
Grupo de Investigaciones en Geología Aplicada. (GIGA). Mérida 5101. Venezuela.

²Universidad Simón Bolívar, Departamento de Computo Científico y Estadística.

* nbelandria@ula.ve

Resumen

En este artículo, se resuelve un sistema de ecuaciones no lineales que permite determinar las superficies críticas, plana, parabólica, circular y la más desfavorable, basado en el concepto de equilibrio límite, el cálculo variacional y el criterio de rotura de Mohr - Coulomb. Además las fuerzas sísmicas, la sobrecarga, presión de poros son tomadas en cuenta. El método propuesto es innovador que permite calcular la superficie crítica y por ende el factor de seguridad mínimo junto con la distribución de esfuerzos. Finalmente se lleva a cabo una comparación importante que va a permitir que al momento que se requiera métodos de estabilización en taludes se mejore el costo económico para la colocación de elementos estructurales, como anclajes.

ISBN: 978-980-11-1858-9



1 Introducción

Esta investigación se basa en resolver sistemas de ecuaciones no lineales que se obtienen de la aplicación del cálculo de variaciones a partir de las ecuaciones propuestas preliminarmente por (Ucar 2004) y mejoradas para diferentes curvas de rotura por (Belandria y col., 2014, 2015, Ucary col., 2015). Asimismo esta investigación complementa los trabajos anteriores con la utilización de la ecuación de transversalidad en la cresta del talud las cuales permiten obtener la superficie crítica, plana, parabólica, circular y lamas desfavorable junto con la distribución de esfuerzos normales.

Para determinar el mínimo factor de seguridad se considera que la superficie crítica a buscar pasa por el pie del talud y lamasa potencialmente deslizante se subdivide en envelas.

Del cálculo variacional se tienen tres ecuaciones de equilibrio cuyas integrales se resuelven aplicando la integración compuesta del punto medio, una ecuación de Euler y una ecuación de transversalidad en la cresta del talud. A dichas ecuaciones matemáticas se les sustituye la ecuación de la superficie crítica, se itera la cresta y se determina la superficie crítica, el factor de seguridad mínimo y los esfuerzos normales a cada rebanada.

Para hallar la superficie más desfavorable se utiliza la ecuación del funcional G obtenido a partir del cálculo de variaciones, lo mismo también permite determinar la superficie de rotura crítica.

El método es válido para determinar superficie crítica considerando presión de poros, cargas externas y fuerzas sísmicas.

La determinación de la superficie crítica a partir del cálculo variacional es innovador y utiliza el programa de Maple para hallar la solución del sistema de ecuaciones no lineales la cual permite determinar con gran rapidez el factor de seguridad mínimo.

2 Marco Teórico

Son numerosos los métodos que se aplican en la estabilidad de taludes, cabe mencionar, el método de equilibrio límite que fue ampliamente estudiado por (Fellenius 1936, Janbu 1954, Bishop 1955, Morgenstern y col., 1965, Spencer 1967).

El método de elementos finitos que permite el cálculo de esfuerzos y deformaciones aplicados por (Sosa y col., 2008, Elberg y col., 2011, Torres y col., 2013).

El método del cálculo variacional en el estudio de estabilidad de taludes en principio fue propuesta por (Baker y col., 1976, 2005, Chen 1975, Castillo y col., 1976, Leshchinsky y col., 1992, Rojas y col., 2001, MacLennan 2004).

Para realizar un buen estudio de estabilidad de taludes se requiere de los criterios de rotura (Rojas 2001) y de la utilización de los parámetros de resistencia geotécnicos

adecuados (González y col., 2014).

Los métodos analíticos obtenidos (Belandria y col., 2011) se utilizan para comparar el método de cálculo de variaciones.

3 Procedimiento Experimental

3.1 Ecuaciones requeridas para el cálculo de variaciones

Para la determinación de la superficie crítica plana, parabólica y circular se debe conocer la técnica del cálculo de variaciones aplicada a la estabilidad de taludes. A continuación se indica la ecuación de equilibrio expresada vectorialmente de acuerdo a la figura 1 de un talud en estudio:

$$\begin{aligned}
 J_1 = & \int (\tau \vec{t}_0 + \sigma \vec{n}_0) ds + \int_{x_0}^{x_m} \frac{\vec{q}}{\cos \beta_t} dx \\
 & -(1 + K_v) \int_{x_0}^{x_m} [g(x) - y(x)] \vec{j} dx \\
 & - \gamma K_h \int_{x_0}^{x_m} [g(x) - y(x)] \vec{j} dx
 \end{aligned} \tag{1}$$

Donde:

$\tau = \tau(x)$ = La tensión tangencial actuando sobre $y(x)$

$\sigma = \sigma(x)$ = La tensión normal actuando sobre $y(x)$

γ = Peso unitario del suelo o roca

ds = Diferencial de longitud de la superficie potencial de rotura

K_h = Coeficiente sísmico horizontal

K_v = Coeficiente sísmico vertical

$g(x)$ = Función de la superficie del talud

$y(x)$ = Función de la superficie de rotura

A la vez las sumatorias de fuerzas horizontales, verticales y de momento, pueden expresarse mediante las ecuaciones.

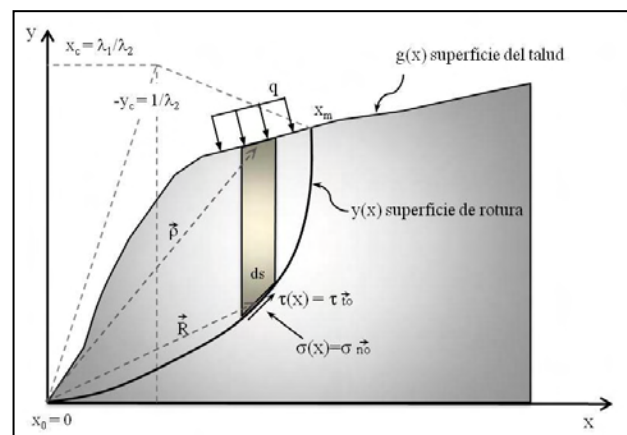


Fig. 1 Parámetros involucrados en el talud aplicando cálculo de variaciones.

$$\int_{x_0}^{x_m} \left\{ \begin{array}{l} C + (\sigma - u) \tan \phi \\ -FS \left[\sigma y'(x) + K_h \gamma (g(x) - y(x)) - \frac{q_x}{\cos \beta_t} \right] \end{array} \right\} dx = 0$$

$$\int_{x_0}^{x_m} \left\{ \begin{array}{l} [C + (\sigma - u) \tan \phi] y'(x) \\ +FS \left[\sigma + \frac{q_y}{\cos \beta_t} - \gamma (1 + K_v) (g(x) - y(x)) \right] \end{array} \right\} dx = 0$$

$$\int_{x_0}^{x_m} \left\{ \begin{array}{l} [C + (\sigma - u) \tan \phi] [y(x) - x y'(x)] \\ -FS \left[\begin{array}{l} \sigma (x + y(x)) y'(x) \\ + \frac{1}{\cos \beta_t} (x q_y - q_x g(x)) \\ - \gamma x (1 + K_v) (g(x) - y(x)) \\ + \gamma K_h \left[\frac{g(x)^2 - y(x)^2}{2} \right] \end{array} \right] \end{array} \right\} dx = 0 \quad (2)$$

Donde, C, es la cohesión del material, u, presión de poros, FS, factor de seguridad, q_x y q_y sobrecarga referida a la abscisa y ordenada, $\tan \phi$, es el coeficiente de fricción interna y $y'(x)$, es la derivada de la superficie de rotura con respecto al eje de las abscisas.

Para la solución de estas integrales (ecuación 2) se utiliza la integración numérica compuesta (regla compuesta del punto medio). Cabe destacar que puede aplicarse cualquier integración numérica con menor error de aproximación.

Posteriormente se requiere de un funcional 'G' que agrupe las ecuaciones de equilibrio incorporando para esto los multiplicadores de Lagrange (λ_1 y λ_2), es decir, $G = \sum F_h + \lambda_1 \sum F_v + \lambda_2 \sum M$, donde el primer término representa la sumatoria de fuerzas horizontales, el segundo la sumatoria de fuerzas verticales y el tercero la sumatoria de momentos expresadas en la ecuación 2. Además considerando que $y_c = -1/\lambda_2$; $x_c = \lambda_1/\lambda_2$ y simplificando se obtiene:

$$G = (C + (\sigma - u) \tan \phi) (y - y_c) - (C + (\sigma - u) \tan \phi) y'(x) (x - x_c) - FS \sigma (x - x_c) - FS \sigma y'(x) (y - y_c) + \frac{FS q_x}{\cos \beta_t} (g - y_c) - \frac{FS q_y}{\cos \beta_t} (x - x_c) + y_c FS K_h \gamma (g - y) - FS K_h \gamma \left(\frac{g^2 - y^2}{2} \right) + FS \gamma (1 + K_v) (g - y) (x - x_c) = 0 \quad (3)$$

Donde, x_c y y_c , es un centro geométrico que dependen de los multiplicadores de Lagrange (λ_1 y λ_2).

Por otra parte, al considerar las ecuaciones de Euler, para el caso estudiado, $\frac{\partial G}{\partial \sigma} = \frac{d}{dx} \left(\frac{\partial G}{\partial \sigma'} \right)$ y $\frac{\partial G}{\partial y} = \frac{d}{dx} \left(\frac{\partial G}{\partial y'} \right)$ y hallando cada una de las derivadas del funcional 'G', resulta:

$$\left(\frac{dy}{dx} \right) [\tan \phi (x - x_c) + FS (y - y_c)] + FS (x - x_c) - \tan \phi (y - y_c) = 0 \quad (4)$$

$$[\tan \phi (x - x_c) + FS (y - y_c)] \left(\frac{d\sigma}{dx} \right) - (x - x_c) \left[\left(\frac{du}{dx} \right) \tan \phi + \gamma (1 + K_v) FS \right] + 2C + 2(\sigma - u) \tan \phi + FS K_h \gamma (y - y_c) = 0 \quad (5)$$

Donde, $u'(x)$, es la derivada de la presión de poros en el eje de las abscisas.

Según (Mac-Lennan 2004) se deben combinar ambas ecuaciones de Euler, lo que permite determinar la superficie crítica, esto da como resultado la siguiente expresión:

$$[\tan \phi (y - y_c) + FS (x - x_c)] \left[\left(\frac{d\sigma}{dx} \right) / \left(\frac{dy}{dx} \right) \right] - (x - x_c) \left[\left(\frac{du}{dx} \right) \tan \phi + \gamma (1 + K_v) FS \right] + 2C + 2(\sigma - u) \tan \phi + FS K_h \gamma (y - y_c) = 0 \quad (6)$$

Donde, $\sigma'(x)$, es la derivada del esfuerzo normal con respecto al eje de las abscisas.

Para la determinación de las pendientes en el punto (x_n, y_n) , (x_n, σ_n) y (x_n, u_n) , se utilizar las fórmulas por diferencias divididas de alta exactitud tomando términos adicionales en la expansión de la serie de Taylor. Las fórmulas de diferencias divididas finitas hacia delante y hacia atrás son las siguientes:

$$f'(x_i) = \frac{-f(x_{i+2}) + 4 \cdot f(x_{i+1}) - 3f(x_i)}{2h} \quad (7)$$

$$f'(x_i) = \frac{f(x_{i-2}) - 4 \cdot f(x_{i-1}) + 3f(x_i)}{2h}$$

Para la determinación de las superficies de roturas críticas, plana, parabólica y circular, se considera que la misma pasa por pie del talud, es decir, la coordenada 'x', 'y' son igual a cero. Para la cresta del talud se utiliza la ecuación de transversalidad mostrada en (Mac-Lennan 2004) el cual está representada por la siguiente ecuación:

$$\left[G + \psi'(x) \frac{\partial G}{\partial y'} - y'(x) \frac{\partial G}{\partial y'} \right]_{x=x_m} = 0 \quad (8)$$

Donde $\psi'(x)$, derivada de la superficie del talud con respecto al eje de las abscisas.

Al reemplazar en la ecuación (8), el funcional G de la ecuación (3) junto con $\partial G/\partial y'$ para los puntos de coordenadas móviles (x_m, y_m) , es decir, cresta del talud, se debe cumplir la condición de contorno $y(x_m) = g(x_m)$, luego simplificando, se tiene la ecuación de la condición de transversalidad como sigue:

$$\psi'(x) \left[\begin{array}{l} -(C_m + (\sigma_m - u_m) \tan \phi_m)(x_m - x_c) \\ -FS \sigma_m (y_m - y_c) \end{array} \right] +$$

$$(C_m + (\sigma_m - u_m) \tan \phi_m)(y_m - y_c) - FS \sigma_m (x_m - x_c) + \quad (9)$$

$$\frac{FS q_x}{\cos \beta_t} (g_m - y_c) - \frac{FS q_y}{\cos \beta_t} (x_m - x_c) = 0$$

3.2 Superficies crítica considerando rotura plana

La condición de contorno de la cresta del talud considerando rotura plana según la Figura 2, se cumple que la derivada en la rebanada 'n', está representada en la siguiente ecuación:

$$f_{n+1} = \left(\frac{H/\omega - ((r-2) + 1/2)\Delta x}{2\Delta x} \right) \cdot (3f_n - 4f_{n-1} + f_{n-2}) + f_{n-1} \quad (10)$$

Donde, H, es la altura del talud, ω , es la $\tan \alpha$, α , es el ángulo que forma la superficie de rotura con respecto al eje de las abscisas, r, es el número de rebanadas en que se divide la masa potencialmente deslizante y Δx , es el ancho de la rebanada.

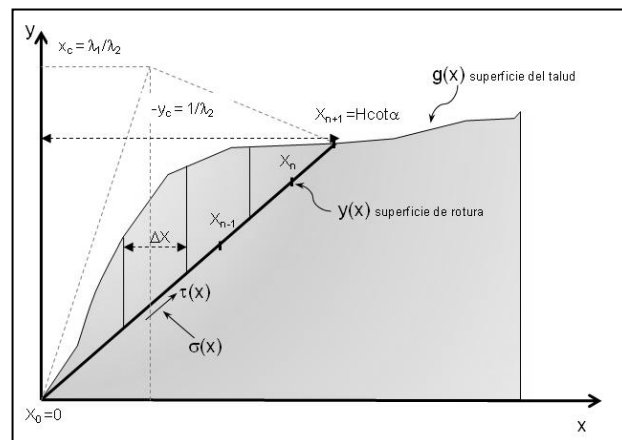


Fig.2 Representación de las condiciones de contorno en la cresta del talud considerando rotura plana.

3.3 Superficies crítica considerando rotura parabólica

La condición de contorno de la cresta del talud considerando rotura parabólica según la Figura 3, se cumple que la derivada en la rebanada 'n', está representada en la siguiente ecuación:

$$f_{n+1} = \left(\frac{H\Omega - ((r-2) + 1/2)\Delta x}{2\Delta x} \right) \cdot (3f_n - 4f_{n-1} + f_{n-2}) + f_{n-1} \quad (11)$$

Donde, Ω , es el parámetro de la abertura de la parábola.

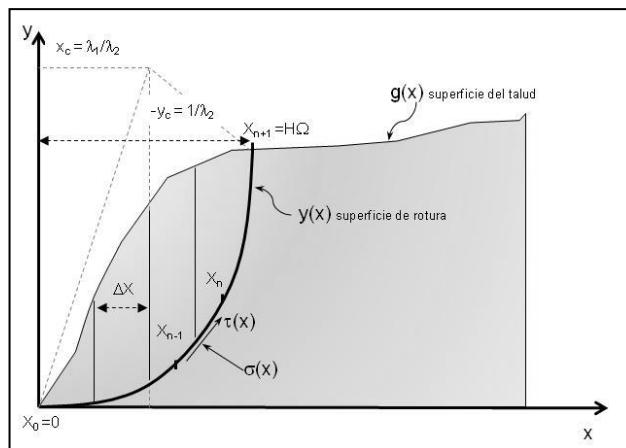


Fig. 3 Representación de la condición en la cresta del talud para una superficie parabólica.

3.4 Superficies crítica considerando rotura circular

La condición de contorno de la cresta del talud considerando rotura circular según la Figura 4, se cumple que la derivada en la rebanada 'n', está representada en la siguiente ecuación:

$$f_{n+1} = \left(\frac{\sqrt{R^2 - (H - b_2)} + b_1 - \left((r-2) + \frac{1}{2} \right) \Delta x}{2\Delta x} \right) \cdot (3f_n - 4f_{n-1} + f_{n-2}) + f_{n-1} \quad (12)$$

Donde, R, es el radio del círculo, b_1 y b_2 , es el centro del círculo.

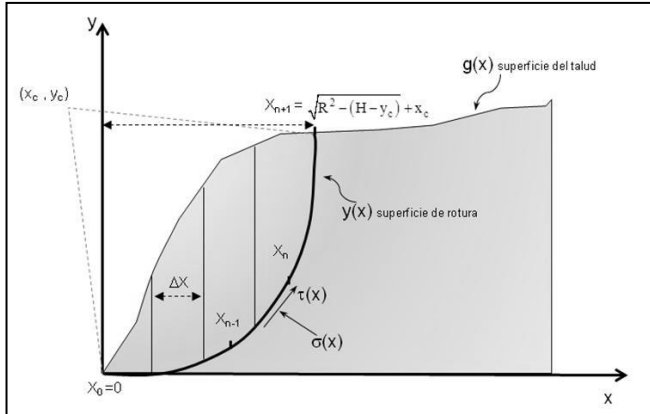


Fig. 4 Representación de las condiciones en la cresta del talud para una rotura circular.

3.5 Superficie crítica más desfavorable

Las condición de contorno de la cresta del talud considerando rotura más desfavorable según la Figura 5, se cumple que la derivada en la rebanada 'n', está representada en la siguiente ecuación:

$$f_{n+1} = \left(\frac{\left((r-1) + \frac{1}{2} \right) \Delta x + h - \left[(r-2) + \frac{1}{2} \right] \Delta x}{2\Delta x} \right) \cdot (3f_n - 4f_{n-1} + f_{n-2}) + f_{n-1} \quad (13)$$

Donde, h, es la distancia del punto medio de la última rebanada y la cresta del talud.

4 Resultados y Discusión

Para la determinación de la superficie crítica, plana, parabólica, circular y la más desfavorable se realiza un ejemplo propuesto por (Castillo y col., 1976) de un talud sencillo cuya geometría y propiedades son las siguientes: altura del talud (H) = 11,54 m, ángulo que forma la cara libre del talud con respecto a la horizontal (β) = 30°, cohesión (C) = 2 t/m², ángulo de fricción interna (ϕ) = 10°, peso unitario (γ) = 1,7 t/m³, coeficiente sísmico horizontal (Kh) = 0, coeficiente sísmico vertical (Kv) = 0, presión de poros (u) = 0. La masa deslizante se divide en cuatro reba-

nadas.

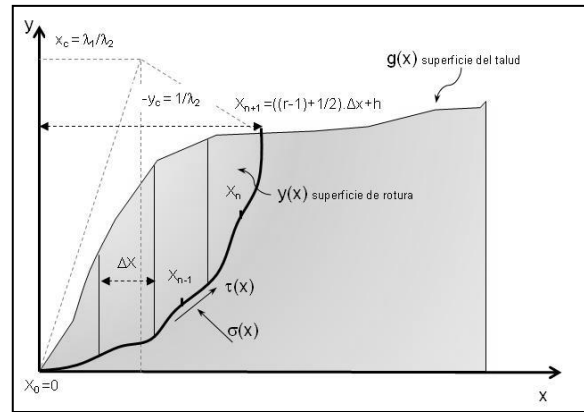


Fig. 5 Representación de la condición en la cresta del talud para una superficie más desfavorable (cualquier forma)

4.1 Determinación de la superficie crítica considerando una forma plana

Para la determinación de la superficie crítica plana se programan con ayuda de Maple la ecuación (2) correspondientes a la sumatoria de las fuerzas horizontales, verticales y de momento, la ecuación (6), correspondiente a la ecuación que combina ambas condiciones de Euler. Para determinar cual línea que pasa por el pie del talud es la crítica, se utiliza la condición de transversalidad en la cresta del talud mostrada en la ecuación (9) y la condición de contorno mostrada en la ecuación (10). La masa deslizante se divide en cuatro rebanadas (r= 4 rebanadas), por tanto se tiene:

$$\sigma_{n+1} = \left(\frac{H/\omega - \left(\frac{5}{2} \right) \Delta x}{2\Delta x} \right) (3\sigma_n - 4\sigma_{n-1} + \sigma_{n-2}) + \sigma_{n-1}$$

$$y_{n+1} = \left(\frac{H/\omega - \left(\frac{5}{2} \right) \Delta x}{2\Delta x} \right) (3y_n - 4y_{n-1} + y_{n-2}) + y_{n-1}$$

También en la cresta la coordenada 'x' está representada a través de la expresión $x_{n+1} = H/\omega$, donde $\omega = \tan \alpha$, es la pendiente de la superficie de rotura.

Luego se resuelve el sistema de ecuaciones con la ayuda del programa Maple, iterando la coordenada x en la cresta del talud, la cual arroja como resultado que, $\omega = \tan \alpha = 0,285$, es decir, $\alpha = 15,9^\circ$ y la línea crítica que representa la rotura plana crítica tiene la forma, ($y = 0,285 x$) y da el valor del FS mínimo, tal como se observa en la figura 6. Posteriormente se determina la coordenada x en la cresta (x_5), el ancho de la rebanada (Δx), los esfuerzos normales, y el factor de seguridad considerando la rotura plana crítica de-

terminada, cuyos resultados se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Valores de los esfuerzos normales a la mitad de cada rebanada, factor de seguridad, para una rotura plana.

Esfuerzos en (kN/m ²)	Valores obtenidos	Incógnitas adimensionales	Valores obtenidos
σ_1	1,36	$\sigma_1 / \gamma H$	0,07
σ_2	3,95	$\sigma_2 / \gamma H$	0,20
σ_3	6,55	$\sigma_3 / \gamma H$	0,33
σ_4	9,14	$\sigma_4 / \gamma H$	0,46
x_c (m)	46,75	x_c / H	4,05
y_c (m)	54,35	y_c / H	4,71
x_5 (m)	40,49	x_5 / H	3,51
Δx (m)	10,12	$\Delta x / H$	0,87
FS	1,95	FS	1,95

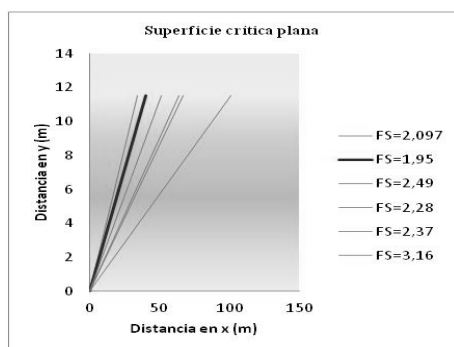


Fig. 6. Muestra la superficie de rotura plana crítica.

4.2 Determinación de la superficie crítica considerando una forma parabólica.

Se utilizan las mismas ecuaciones representadas en la determinación de la superficie crítica plana. Además se considera que la parábola crítica pasa por el pie del talud y para la cresta del talud se utiliza la condición de transversalidad en la cresta del talud mostrada en la ecuación (9) junto con las condiciones de borde del esfuerzo y coordenada 'y' en la cresta del talud, para ello, se utiliza la ecuación (11). La masa deslizante **Error! Reference source not found.** se divide en cuatro rebanadas, $r=4$ rebanadas, por tanto se tiene que la condición en la cresta:

$$\sigma_{n+1} = \left(\frac{H\Omega - \left(\frac{5}{2}\right)\Delta x}{2\Delta x} \right) (3\sigma_n - 4\sigma_{n-1} + \sigma_{n-2}) + \sigma_{n-1}$$

$$y_{n+1} = \left(\frac{H\Omega - \left(\frac{5}{2}\right)\Delta x}{2\Delta x} \right) (3y_n - 4y_{n-1} + y_{n-2}) + y_{n-1}$$

Así mismo, en la cresta la coordenada 'x' está representada a través de la expresión $x_{n+1}=H\Omega$, donde Ω , la variable de depende de la abertura de la parábola.

Luego se resuelve el sistema de ecuaciones con la ayuda del programa Maple, iterando la coordenada x en la cresta del talud, la cual arroja como resultado que $\Omega = 2,213$ y da el valor del FS mínimo tal como se observa en la figura 7. La parábola crítica que representa la rotura de forma parabólica crítica está representada a través de la ecuación, $y = 0,0177 \cdot x^2$.

Posteriormente se determina la coordenada x en la cresta (x_5), el ancho de la rebanada (Δx), los esfuerzos normales, y el factor de seguridad considerando la rotura parabólica hallada cuyos resultados se muestran en la tabla 2.

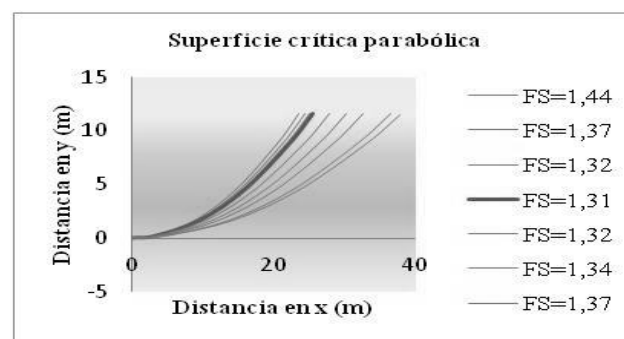


Fig. 7 Superficie crítica parabólica.

4.3 Determinación de la superficie crítica considerando una forma circular

Tabla 2. Valores de los esfuerzos normales a la mitad de cada rebanada, Factor de seguridad, para una rotura parabólica.

Esfuerzos en (kN/m ²)	Valores obtenidos	Incógnitas adimensionales	Valores obtenidos
σ_1	6,11	$\sigma_1 / \gamma H$	0,31
σ_2	4,53	$\sigma_2 / \gamma H$	0,23
σ_3	5,07	$\sigma_3 / \gamma H$	0,25
σ_4	7,53	$\sigma_4 / \gamma H$	0,38
x_c (m)	6,92	x_c / H	0,60
y_c (m)	-44,64	y_c / H	-3,87
x_5 (m)	25,53	x_5 / H	2,21
Δx (m)	6,38	$\Delta x / H$	0,55
Ω	2,213	Ω	2,213
FS	1,31	FS	1,31

Se utilizan las mismas ecuaciones representadas en la determinación de la superficie crítica plana. Además se considera que el círculo crítico pasa por el pie del talud, y luego se utiliza la condición de transversalidad en la cresta del talud mostrada en la ecuación (9) junto con las condiciones de borde de las variables de esfuerzo y coordenada 'y' en la cresta del talud de la ecuación (12). Para ello, la masa deslizando se divide en cuatro rebanadas, r= 4 rebanadas, por tanto se tiene:

$$\sigma_{n+1} = \left(\frac{\sqrt{R^2 - (H - b_2)} + b_1 - \left(\frac{5}{2}\right)\Delta x}{2\Delta x} \right) \cdot (3\sigma_n - 4\sigma_{n-1} + \sigma_{n-2}) + \sigma_{n-1}$$

$$y_{n+1} = \left(\frac{\sqrt{R^2 - (H - b_2)} + b_1 - \left(\frac{5}{2}\right)\Delta x}{2\Delta x} \right) \cdot (3y_n - 4y_{n-1} + y_{n-2}) + y_{n-1}$$

También en la cresta la coordenada 'x' está representada a través de la expresión $x_{n+1} = \sqrt{R^2 - (H - b_2)^2} + b_1$, donde b_1 y b_2 , representan centro del círculo, que para este caso coincide con el centro geométrico, x_c , y_c .

Luego se resuelve el sistema de ecuaciones con la ayuda del programa Maple, iterando el centro crítico, el cual permite obtener la gráfica mostrada en la figura 8. Posteriormente se obtiene que los valores del centro crítico son $x_c = b_1 = 6,39$ m y $y_c = b_2 = 15,52$ m respectivamente. La rotura de forma circular está representada a través de la siguiente ecuación $(x - 6,39)^2 + (y - 15,52)^2 = 16,78^2$

Finalmente se determina la coordenada x en la cresta (x_5), el ancho de la rebanada (Δx), los esfuerzos normales, y el factor de seguridad considerando la rotura circular hallada cuyos resultados se muestran en la tabla 3.

4.4 Comparación de la superficie crítica plana, circular y parabólica

La comparación se lleva a cabo a través de la representación en un gráfico de las tres superficies de roturas (ver figura 9), utilizando las ecuaciones de las superficies críticas obtenidas para cada caso, esto permite determinar la coordenada x e y, tal como se muestra en la tabla 4. Así mismo, se muestra en la tabla (5) un resumen de la coordenada de la cresta y su respectivo factor de seguridad.

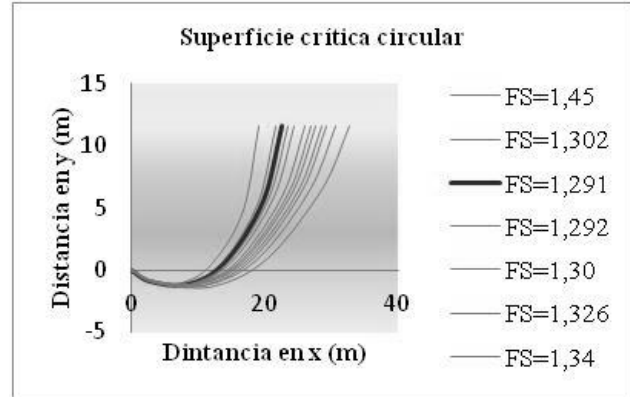


Fig. 8 Determinación de la superficie crítica circular.

Tabla 3. Valores de los esfuerzos normales a la mitad de cada rebanada, factor de seguridad, para una rotura circular.

Esfuerzos en (kN/m ²)	Valores obtenidos	Incógnitas adimensionales	Valores obtenidos
σ_1	12,03	$\sigma_1 / \gamma H$	0,61
σ_2	13,64	$\sigma_2 / \gamma H$	0,69
σ_3	11,24	$\sigma_3 / \gamma H$	0,57
σ_4	3,54	$\sigma_4 / \gamma H$	0,18
x_c (m)	6,39	x_c / H	0,55
y_c (m)	15,52	y_c / H	1,34
x_5 (m)	22,69	x_5 / H	1,96
Δx (m)	5,67	$\Delta x / H$	0,49
FS	1,29	FS	1,29

Tabla 4. Coordenadas (x,y) de las superficies críticas.

Superficie Plana		Superficie Circular		Superficie Parabólica	
x (m)	y (m)	x (m)	y (m)	x (m)	y (m)
5,061	1,442	2,837	-0,883	3,192	0,180
15,184	4,327	8,510	-1,128	9,575	1,623
25,306	7,212	14,183	0,658	15,958	4,508
35,429	10,097	19,856	5,507	22,341	8,835
40,490	11,540	22,693	11,542	25,532	11,540

En la figura 9 se puede observar las tres superficies críticas encontrada para los diferentes tipos de roturas. Se puede notar que la rotura plana debido a que el talud es tendido, es decir, tiene un buzamiento de 30°, la superficie de rotura se extiende cortando en la cresta una distancia de 40,5 m en comparación de la otras dos roturas que cortan en la cresta a una distancia de 22,7 m (circular) y 25,5 m (parabólica).

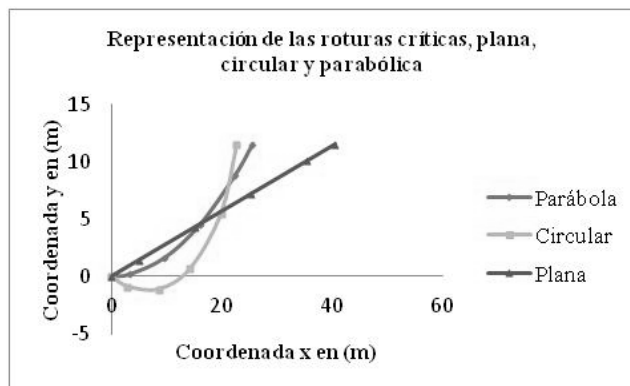


Fig. 9 Comparación de los diferentes tipos de rotura, plana, parabólica y circular.

Así mismo, (Castillo y col., 1976) muestran un gráfico donde se determina que para el ejercicio planteado el valor de la cresta del talud (x_3) es aproximadamente $x_3/H = 3$, es decir, x_3 es 34,62 m. Por tanto, al momento de estabilizar el talud mostrado en este ejemplo con la colocación de anclajes y además se considera el tipo de rotura plana, se necesita mayor cantidad de longitud del elemento estructural (anclajes) para su estabilización, lo contrario a los otros dos tipos de rotura (circular y parabólica) cuya longitud de anclaje sería menor.

La tabla 5 muestra los resultados comparativos de la coordenada en la cresta del talud y la del factor de seguridad:

Tabla 5. Representación de la coordenada en la cresta y el factor de seguridad en las roturas estudiadas.

Superficie de rotura	Coordenada de la cresta (m)	Factor de Seguridad
Plana	40,49	1,95
Parabólica	25,53	1,31
Circular	22,69	1,29

4.5 Determinación de la superficie crítica considerando cualquier forma

Se utilizan las mismas ecuaciones representadas en la determinación de la superficie crítica plana. Para la determinación de la superficie mas desfavorable (cualquier forma) se utiliza la ecuación del funcional G (3). Además se considera que la superficie pasa por el pie del talud. Luego se utiliza la condición de transversalidad en la cresta del talud mostrada en la ecuación (9) junto con las condiciones de borde de las variables de esfuerzo y coordenada 'y' en la cresta del talud de la ecuación (13). Para ello, la masa deslizante se divide en cuatro rebanadas, $r= 4$ rebanadas, por tanto se tiene:

$$\sigma_{n+1} = \left(\frac{\left(\frac{7}{2}\right)\Delta x + h - \left(\frac{5}{2}\right)\Delta x}{2\Delta x} \right) \cdot (3\sigma_n - 4\sigma_{n-1} + \sigma_{n-2}) + \sigma_{n-1}$$

Así mismo, en la cresta la coordenada 'x' está representada a través de la expresión $x_{n+1}=(r-1)\Delta x+h$, donde , h, es la distancia entre la mitad de la ultima rebanada con la cresta del talud.

Luego se resuelve el sistema de ecuaciones con la ayuda del programa Maple, siendo las incognitas $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4, x_c, y_c, FS, y_1, y_2, y_3, y_4$ y h (donde y_1, y_2, y_3, y_4 representan la superficie de rotura). Posteriormente iterando la coordenada x en la cresta del talud, permite determinar la superficie más desfavorable y por ende el factor de seguridad mínimo tal como se observa en la figura 10. Así mismo en la tabla 6 y 7 se muestran los resultados obtenidos para la superficie más desfavorable utilizando un ancho de rebanada $\Delta x = 6,75$ m y para cuatro rebanadas, arrojando los resultados de la figura 11:

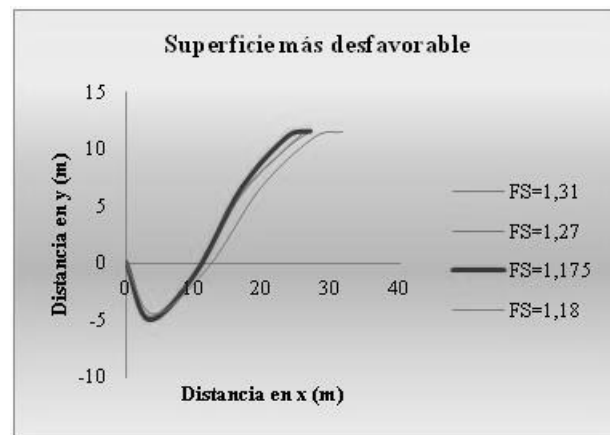


Fig. 11 Determinación de la superficie más desfavorable.

Tabla 6. Esfuerzos, FS, centro geométrico de las superficie más desfavorable.

Esfuerzos en (kN/m^2)	Valores obtenidos	Incógnitas adimensionales	Valores obtenidos
σ_1	12,63	$\sigma_1 / \gamma H$	0,426
σ_2	1,11	$\sigma_2 / \gamma H$	0,202
σ_3	0,81	$\sigma_3 / \gamma H$	0,166
σ_4	2,40	$\sigma_4 / \gamma H$	0,041
x_c (m)	7,129	x_c / H	0,135
y_c (m)	-46,213	y_c / H	0,134
FS	1,175	FS	1,175
h	9,69	h/H	0,225

Luego se realiza la comparación con el programa Slide el cual permite determinar la superficie más desfavorable del cual se obtuvo un factor de seguridad igual a 1,129 y la forma de la superficie de rotura es la que se muestra en la

figura 12.

Tabla 7. Valores de la coordenada y de la superficie más desfavorable.

Valores de la coordenada x en m.	Valores adimensionales de x	Valores de la coordenada y calculados en m	Valores adimensionales de y
0,000	0,000	0,000	0,000
3,375	0,292	-4,520	-0,391
10,125	0,877	-0,509	-0,044
16,875	1,462	6,690	0,579
23,625	2,047	11,130	0,964
27,000	2,339	11,54	1

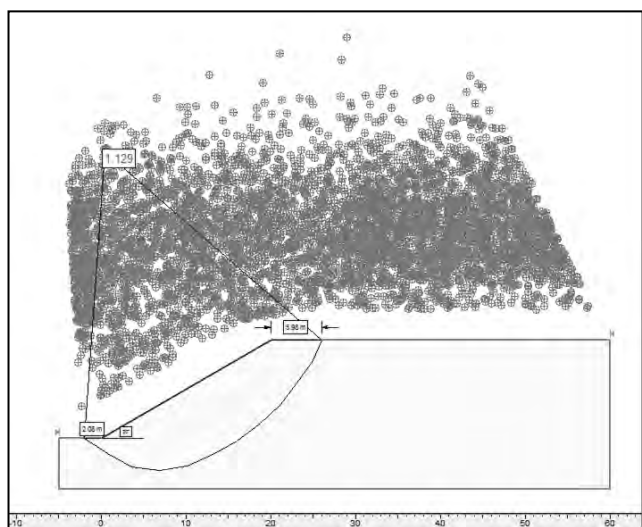


Fig. 12. Resultados obtenidos del FS a través del programa Slide.

5 Conclusiones

En el estudio llevado a cabo se ha desarrollado una programación en Maple para resolver el sistema de ecuaciones no lineales en función de n rebandas en la que se divide la masa potencialmente deslizante, el cual permite determinar la superficie crítica, plana, parabólica y circular y la más desfavorable.

La comparación de las superficies críticas se lleva a cabo a través la distancia que genera el corte de la superficie de rotura con respecto a la cresta del talud y por ende permite determinar el factor de seguridad mínimo con su distribución de esfuerzos normales.

En el ejemplo llevado a cabo, la superficie crítica que arroja el factor de seguridad mínimo es la rotura circular (FS= 1,29). Esto tiene gran importancia al momento de utilizar elementos estructurales como los anclajes para estabilizar el talud, por tanto se tiene un menor costo al momento de utilizarlo.

La superficie más desfavorable encontrada arroja un factor de seguridad de 1,175 que al compararla con el pro-

grama Slide el mismo arroja un valor de FS igual a 1,125 siendo los valores muy cercanos, lo cual permite corroborar el método utilizado.

Referencias

- Baker R, 2005, Variational Slope Stability Analysis of Materials with Nonlinear Failure Criterion. EJGE.
- Baker R, Garber M, 1977, Variational Approach to slope stability, Tokio, s.n., pp. 9-12.
- Belandria N, Ucar R, 2015, Comparación de la rotura parabólica en el estudio de la estabilidad de taludes por el método analítico y el cálculo variacional, Revista Ciencia e Ingeniería, Vol. 36, No. 3, pp. 149-158.
- Belandria N, Ucar R, Bongiorno F, León F, Díaz M, Arteaga J, 2014, Resolución de las ecuaciones no lineales presentes en el estudio de la estabilidad de taludes considerando rotura plana”. Ingenierías y ciencias aplicada: Modelos matemáticos y computacionales, Sociedad Venezolana de Métodos Numéricos en Ingeniería, Isla de Margarita, Venezuela pp. GG-33-GG-38.
- Belandria N, Ucar R, Bongiorno F, 2011, Determinación de expresiones matemáticas para el cálculo de los esfuerzos aplicados a la estabilidad de taludes, Ciencia e Ingeniería, Vol. 32, No. 3, pp. 115-122.
- Bishop A, 1955, The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes. Geotechnique, Vol. 5, pp. 7-17.
- Castillo E, Revilla J, 1976, Una aplicación del cálculo de variaciones a la estabilidad de taludes, Boletín de Información del Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo, mayo - junio, Issue 115, pp. 3-23.
- Chen W, 1975, Limit Analysis and soil plasticity, New York: Elsevier Scientific Publishing Company.
- Elberg M, Vivas J, Fernández V, Sosa G, González L, 2011, Análisis numérico de las discontinuidades del macizo rocoso del autopista Rafael Caldera en Venezuela, Revista Ciencia e Ingeniería, Vol. 32 No. 2, pp.67 - 72.
- Fellenius W, 1936, Calculation of Stability of Earth Dams, s.l., s.n., p. 445
- González G, De Barcia E, Sulbaran Y, Ucar R, 2014, Determinación del parámetro de resistencia, ángulo de fricción interna (ϕ) y su relación con los parámetros densidad relativa (D_r) y relación de vacíos (e) en suelos granulares, Revista Ciencia e Ingeniería, Vol. 35, No. 3, pp. 135 - 146.
- Janbu, 1954, Stability Analysis of Slopes with Dimensionless Parameters, Cambridge (Massachusetts): Harvard University.
- Leshchinsky, Huang, 1992, Generalized slope stability analysis: Interpretation, modification and comparatio, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 118, No. 10, pp. 1559-1576.
- Mac-Lennan J, 2004, Rotura de un talud, Revista de Obras Públicas, julio - agosto, Issue 3446, pp. 53 - 60.
- Morgenstern, Price, 1965, The analysis of stability of general slip surfaces, Geotechnique, Vol. 15, pp. 79-93.
- Rojas S, 2001, Análisis de estabilidad de macizos rocosos

aplicando el criterio de rotura de Hoek y Brown, Revista Ciencia e Ingeniería, Vol. 22, No. 3, pp. 33 - 44.

Rojas S, Ucar R, 2001, El cálculo variacional en la estabilidad de taludes, Revista Ciencia e Ingeniería, Vol. 22, No. 1, pp. 30 - 40.

Sosa G, Contreras M, Elberg M, 2008, Aplicación del método de elementos finitos en la simulación de zonas susceptibles a movimientos de masa en la franja costera del estado Carabobo Venezuela, Revista Ciencia e Ingeniería, Vol. 29 No. 2, pp.199 - 206.

Spencer E, 1967, A Method of Analysis for Stability of the Embankment Using Parallel Inter-Slice Forces, Geotechnique, Volumen 17, pp. 11-26.

Torres R, Torres J, Monsalve M, 2013, Análisis de estabilidad cuasi-tridimensional de un talud de suelo empleando el método de elementos finitos: autopista San Cristobal - La Fría, Venezuela, Revista Ciencia e Ingeniería, Vol. 34, No. 2, pp. 63 - 72.

Ucar R, Belandria N, 2015, Cálculo del factor de seguridad en la estabilidad de taludes considerando rotura circular, Revista Geominas, Vol. 43, No. 66, pp. 15-26.

Ucar R, 2004, Manual de anclajes en ingeniería civil, Madrid, Universidad Politécnica de Madrid, 448 p.

Belandria, Norly: *Dra. En Ciencias Aplicadas, Universidad de Los Andes.*

Úcar, Roberto: *Ph.D. en Geotecnia y obras Subterráneas Correo electrónico: robertoucar@gmail.com. Universidad de Los Andes.*

Arteaga, Jhonnathan: *Dr. en Ciencias, mención Matemáticas. Correo electrónico: arteagajt@gmail.com. Universidad Simón Bolívar.*

Capítulo 78

Estudio comparativo de los efectos de la generación solar fotovoltaica y generadores sincrónicos convencionales en la estabilidad de los sistemas de potencia

Muñoz, Juan*; Contreras, Ivana; Mora, Ernesto; Ballester, Nelson; González, Jaime
Departamento de Potencia, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Los Andes,
Mérida, Venezuela.
[*munoj@ula.ve](mailto:munoj@ula.ve)

Resumen

En este trabajo se investiga el efecto de los generadores solares fotovoltaicos y generadores sincrónicos convencionales en la estabilidad de ángulo y de voltaje de un sistema de potencia. Este estudio es efectuado considerando condiciones normales de operación y contingencias, además de variaciones en las cargas. La estabilidad de pequeña señal y las bifurcaciones de Hopf son analizadas mediante el uso de autovalores y autovectores. Por su parte, la estabilidad transitoria se estudia mediante simulaciones en el dominio del tiempo, mientras que la estabilidad de voltaje se analiza mediante las curvas PV del sistema. Finalmente se estudia el efecto de la potencia de salida de los generadores fotovoltaicos en el amortiguamiento de los autovalores críticos y en la estabilidad transitoria y de voltaje a partir de un análisis de sensibilidad. Los resultados demuestran que el efecto en la estabilidad del sistema de ambos tipos de generación es muy similar.

ISBN: 978-980-11-1858-9



9 789801 118589

1 Introducción

El estudio del impacto en los Sistemas de Potencia (SP) del incremento de la producción de energía eléctrica usando energías renovables es sin duda uno de los principales tópicos de interés a nivel mundial. Diversos trabajos de investigación abordan el efecto de la generación solar fotovoltaica en la estabilidad de los SP; por ejemplo, (Yuan2004), investiga el impacto de las variaciones de potencia de los generadores fotovoltaicos en las fluctuaciones de tensión del sistema, haciendo énfasis en la necesidad de usar dispositivos FACTS para mejorar la regulación de voltaje. Por su parte, (Ceballos 2012) resalta la necesidad de estudiar el impacto significativo en la dinámica y características operativas de los SP que podría tener una alta penetración de energía solar fotovoltaica. (Tamimi y col., 2012) presentan un estudio comparativo del efecto de la generación fotovoltaica en la estabilidad del sistema de potencia de Ontario, Canadá, considerando diferentes escenarios y modelos dinámicos. Los autores concluyen que algunos esquemas de control pueden mejorar la respuesta de estabilidad del sistema con respecto a los otros.

El presente artículo tiene como objetivo principal realizar un estudio comparativo del efecto en la estabilidad de un sistema de potencia de la generación basada en paneles solares fotovoltaicos y la generación convencional basada en generadores sincrónicos. Para ello se utilizan métodos de análisis basados en autovalores para identificar bifurcación de Hopf y estudiar la estabilidad de pequeña señal. Adicionalmente se utilizan curvas PV para analizar la estabilidad de voltaje, y simulaciones en el dominio del tiempo para el análisis de la estabilidad transitoria, considerando diversas perturbaciones en el sistema.

La estructura de este artículo es la siguiente: en la sección 2, se presentan conceptos básicos relativos a estabilidad de sistemas de potencia y métodos de análisis, así como también una breve descripción de los sistemas solares fotovoltaicos. En la sección 3 se presenta la metodología usada y finalmente en la sección 4 se presentan y analizan los resultados obtenidos.

2 Marco Teórico

2.1 Estabilidad de Sistemas de Potencia

La estabilidad de un sistema de potencia se refiere a la habilidad del sistema para restablecer un punto de operación aceptable de equilibrio después de ser sujeto a una perturbación (Kundur 1994). La condición aceptable de operación depende en gran medida de los criterios de cada operador. Sin embargo, la topología del sistema debe permanecer lo más cercana a la topología existente antes de presentarse la perturbación. Los estudios de estabilidad se clasifican en estabilidad de ángulo, estabilidad de voltaje, y estabilidad de frecuencia. En este artículo se analizan los dos primeros.

2.2 Estabilidad de Ángulo

La estabilidad de ángulo se refiere a la capacidad del sistema de mantener el equilibrio entre el torque electromagnético y el torque mecánico de las máquinas sincrónicas cuando el sistema es perturbado (Kundur 1994). Dependiendo de la magnitud de la perturbación, la estabilidad de ángulo se clasifica en estabilidad de pequeña señal y estabilidad transitoria. En la estabilidad de pequeña señal, las ecuaciones dinámicas que describen al sistema pueden ser linealizadas para efectos de análisis. En éste caso, la inestabilidad ocurre debido a un insuficiente torque que permita amortiguar las oscilaciones. Este insuficiente amortiguamiento puede ser detectado mediante el estudio de los autovalores y autovectores del sistema. Por otro lado, cuando la perturbación es severa, el sistema no puede ser linealizado, por lo tanto, diferentes estrategias de análisis deben ser empleadas. Entre éstas estrategias se tienen los métodos directos y las simulaciones en el dominio del tiempo. Los métodos directos se basan en la determinación de funciones de energía que en la práctica resultan difíciles de obtener y analizar. Por su parte, las simulaciones en el dominio del tiempo representan herramientas útiles no sólo para estudios de estabilidad transitoria, sino también para estudios de estabilidad de frecuencia y de voltaje en sistemas prácticos.

2.2 Estabilidad de Tensión

La estabilidad de voltaje se refiere a la capacidad del sistema para mantener adecuados niveles de tensión no sólo en condiciones normales de operación, sino también durante las posibles contingencias que pueda experimentar el sistema (Gomez-Exposito y col., 2009). En general, la inestabilidad de voltaje puede presentarse en cortos periodos de tiempo o en largos periodos de tiempo. La inestabilidad de voltaje que se presenta en cortos periodos de tiempo está asociada al diseño y sintonización de los elementos de control de la tensión, tales como los reguladores de voltaje de los generadores sincrónicos, SVCs, etc. El estudio de éste tipo de estabilidad es llevado a cabo con un alto nivel de detalle en los aspectos fundamentales de control, a través de simulaciones en el dominio del tiempo. Por otro lado, la inestabilidad de voltaje que ocurre en largos periodos de tiempo, está asociada a la condición de operación del sistema, y puede ser estudiada mediante métodos de análisis en régimen permanente, tales como flujos de carga. Por ejemplo, las curvas PV son una herramienta fundamental para estos tipos de estudios. A través de éstas curvas se pueden determinar los niveles de demanda que pueden conducir a un colapso de voltaje. Otra técnica disponible para determinar la máxima demanda antes de producir el colapso de voltaje se corresponde con la optimización de la solución de las ecuaciones de flujo de potencia que modelan al sistema mediante la adición de una condición de singularidad.

2.3 Curvas PV

La representación gráfica de las variaciones en el perfil de voltajes de un sistema de potencia en función del incremento de la demanda a un factor de potencia típicamente constante da origen a lo que comúnmente se conoce como

curvas PV (Gomez-Exposito y col., 2009). Estas curvas permiten identificar bifurcaciones del tipo “silla nodo” y/o bifurcaciones del tipo “limite inducido” que están directamente asociadas al colapso de voltaje en el sistema. La bifurcación silla nodo puede ser identificada para la condición de operación en donde la matriz de estado del sistema, sin considerar los límites de los generadores es singular, o equivalentemente, cuando la matriz Jacobiana del método de Newton Raphson para la solución de flujos de potencia es singular. Por otro lado, la bifurcación del tipo límite inducido se corresponde al punto de operación en donde los generadores alcanzan sus límites máximos de potencia reactiva.

Para la obtención de las curvas PV se usa el método de flujos de potencia continuados. Este método permite calcular las soluciones de los flujos de potencia ante cambios del parámetro de bifurcación λ de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$F(x,\lambda)=0 \quad (1)$$

En donde x representa las magnitudes y ángulos de los voltajes en las barras. El parámetro de bifurcación λ es usado para variar la demanda en el sistema de potencia, manteniendo el factor de potencia constante.

2.4 Autovalores y Autovectores

El comportamiento dinámico de un sistema de potencia puede ser descrito mediante n ecuaciones diferenciales ordinarias no lineales escritas en forma compacta de acuerdo a la siguiente expresión (Kundur 1994):

$$\dot{x} = f(x, p, u) \quad (2)$$

El término x en esta ecuación hace referencia al vector de estado formado por n variables de estado, mientras que el término p representa parámetros controlables tales como los ajustes de los reguladores automáticos de voltaje. Por otro lado, el término u comprende el vector de entradas del sistema que se corresponden con las señales externas que afectan el comportamiento del mismo. Las variables de salida del sistema “ y ” vienen definidas de acuerdo a la siguiente expresión:

$$y=g(x,p,u) \quad (3)$$

Estas variables de salida generalmente representan los voltajes y ángulos en las barras, mientras que las variables de estado pueden estar referidas, por ejemplo, a los ángulos internos de los generadores y a las velocidades de los rotores. El conjunto de ecuaciones descritas anteriormente puede ser linealizadas alrededor de un punto de equilibrio con la finalidad de estudiar la estabilidad de pequeña señal. La matriz de estado A , resultante de dicha linealización tiene la siguiente forma (Kundur, 1994):

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Los autovalores de la matriz A permiten analizar la es-

tabilidad del sistema de acuerdo al método indirecto de Lyapunov. Particular atención es dada en este trabajo al comportamiento oscilatorio debido a la bifurcación de Hopf, la cual es caracterizada por el cruce del eje imaginario del plano complejo de un par de autovalores complejos conjugados cuando el parámetro de bifurcación se varía lentamente. Este tipo de comportamiento oscilatorio puede ser excitado por las contingencias en el sistema, y tiene un carácter teórico, ya que en la práctica, los estabilizadores del sistema de potencia PSS suministran el amortiguamiento suficiente para evitar su presencia.

El amortiguamiento de las componentes sinusoidales representadas por autovalores complejos conjugados es un indicador comúnmente usado para identificar los modos dominantes de oscilación. Este amortiguamiento puede ser calculado mediante la siguiente expresión (Kundur 1994):

$$\gamma_i = -\frac{\sigma_i}{\sqrt{(\sigma_i^2 + \omega_i^2)}} \quad (5)$$

en donde

γ_i : Amortiguamiento para el autovalor i ;

σ_i : Parte real del autovalor i ;

ω_i : Parte imaginaria del autovalor i .

Generalmente se asume que un amortiguamiento menor al 3% es un indicador de inestabilidad. La frecuencia de oscilación puede ser determinada de acuerdo a la siguiente ecuación (Kundur, 1994):

$$f_i = \frac{\omega_i}{2\pi} \quad (6)$$

Los autovectores también ofrecen información importante sobre la dinámica del sistema. Para un autovalor dado φ_i , los autovectores a la derecha α_i y a la izquierda β_i se calculan a partir de las siguientes ecuaciones (Kundur, 1994):

$$A\alpha_i = \varphi_i\alpha_i \quad (7)$$

$$\beta_i A = \varphi_i\beta_i \quad (8)$$

El producto de los autovectores de la izquierda y la derecha permiten determinar los factores de participación, los cuales definen la contribución de las variables de estado a los modos de oscilación. Estos factores de participación son adimensionales y su sumatoria correspondiente a un modo, o a una variable de estado es siempre igual a 1.

2.5 Generación Solar Fotovoltaica

La luz incidente del sol se convierte directamente en electricidad con módulos que están formados por un número elevado de celdas solares fotovoltaicas. Estas celdas solares se fabrican comúnmente usando películas o láminas finas. Estas láminas son elementos semiconductores capaces de convertir la energía solar incidente en corriente DC, y con una eficiencia que varía entre el 3 a 31%, dependiendo de diversos factores tales como la tecnología, el espectro de luz, la temperatura, el diseño y el material de la celda solar. Una celda solar se puede analizar como una batería de ten-

sión muy baja (alrededor de 0,6 V), que se recarga continuamente a una velocidad que es proporcional a la iluminación incidente. La conexión en serie-paralelo de las celdas permite el diseño de paneles solares con altas corrientes y tensiones (alcanzando hasta kilovoltios). Con el fin de implementar un sistema de energía eléctrica completa, es necesario incluir equipo electrónico de potencia acondicionado, almacenamiento de energía y dispositivos de vigilancia, más protección (Castilla y col., 2004).

3 Metodología

Para los estudios de estabilidad contemplados en esta investigación, se utilizó el sistema IEEE de 39 barras como red de prueba. Este sistema cuenta con generadores sincrónicos que suministran una potencia total de 5911,28 MW. Dicha red de prueba, sin modificación es designada en este artículo como caso original. Con la finalidad de realizar las comparaciones respectivas con respecto a la introducción de la generación fotovoltaica, se construyó una segunda red de prueba basada en el sistema IEEE de 39 barras, pero reemplazando tres generadores sincrónicos convencionales por sistemas fotovoltaicos con una potencia equivalente. Este sistema modificado se designa en este artículo como caso PV. La potencia total nominal suministrada por estos generadores fotovoltaicos es de 243 MW, lo que representa una sustitución del 4,11 % de la generación convencional.

Para efectos de estudios de estabilidad, se considera el estado normal de operación, en donde no existen perturbaciones, y el estado de contingencia, en donde se simulan la salida de operación de dos líneas que interconectan las barras 25-26 y 13-14. Para los estudios de estabilidad de pequeña señal, se identifican los autovalores con menor amortiguamiento, los cuales representan los modos dominantes, y usando los autovectores correspondientes, se identifican mediante factores de participación las variables de estado que afectan directamente a los modos dominantes. Para el análisis de estabilidad de voltaje, se determinan las curvas PV, y para el análisis de la estabilidad transitoria se llevaron a cabo simulaciones en el dominio del tiempo considerando las contingencias anteriormente mencionadas. Adicionalmente, se llevó a cabo un análisis de sensibilidad para evaluar el efecto en la estabilidad de las variaciones normales que se producen en la demanda del sistema, y en la salida de potencia generada de los sistemas fotovoltaicos debido a variaciones en la irradiación solar.

4 Resultados y Discusión

4.1 Estabilidad de pequeña señal

En la figura 1 se muestran los cuatro modos dominantes del caso original y caso PV, considerando condiciones normales de operación. Se puede observar que para ambos casos de estudio, el amortiguamiento es insuficiente, lo que puede conducir a un comportamiento oscilatorio. Para el caso PV, existe un ligero amortiguamiento mayor para los

modos dominantes 1 y 4, lo que sugiere que la generación solar fotovoltaica podría tener un efecto amortiguador sobre algunos modos dominantes.

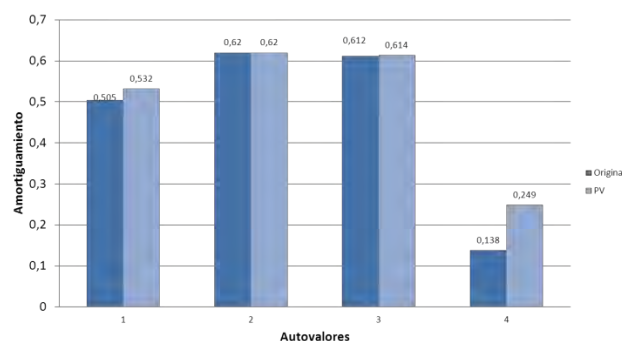


Fig. 1 Amortiguamiento de modos dominantes para condiciones normales de operación.

Un estudio detallado de autovectores y factores de participación muestran que estos modos dominantes están altamente influenciados por los reguladores automáticos de voltaje de los generadores sincrónicos del sistema. La figura 2 muestra los modos dominantes obtenidos bajo condiciones de contingencia. Se puede notar que los generadores fotovoltaicos en este caso mejoran el amortiguamiento de los modos dominantes 2 y 3, pero disminuyen el amortiguamiento de los modos 1 y 4, por lo tanto, se puede inferir que en este caso, el beneficio aportado por los generadores fotovoltaicos en la estabilidad de pequeña señal no es evidente.

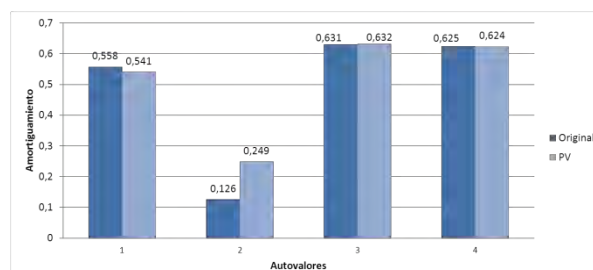


Fig. 2 Amortiguamiento de modos dominantes para condiciones normales de operación.

En la figura 3 se muestra el efecto de las variaciones normales que ocurren en la demanda del sistema sobre el amortiguamiento de los modos dominantes, se puede concluir que ante variaciones de carga, los generadores fotovoltaicos pueden mejorar el amortiguamiento para algunos modos de oscilación, y lo desmejoran en otros.

La figura 4 muestra los resultados de un análisis de sensibilidad para investigar el efecto de la variación de la potencia de salida de los generadores fotovoltaicos en el amortiguamiento del modo dominante, para condiciones normales de operación y manteniendo la carga base constante. La potencia de cada sistema fotovoltaico denotado por PV-1, PV-2, y PV-3, se varía en forma independiente una del otro. Se puede notar que existe un comportamiento variable en el amortiguamiento. Esta tendencia variable no

permite establecer en forma precisa el efecto de la generación fotovoltaica en la estabilidad de pequeña señal del sistema.

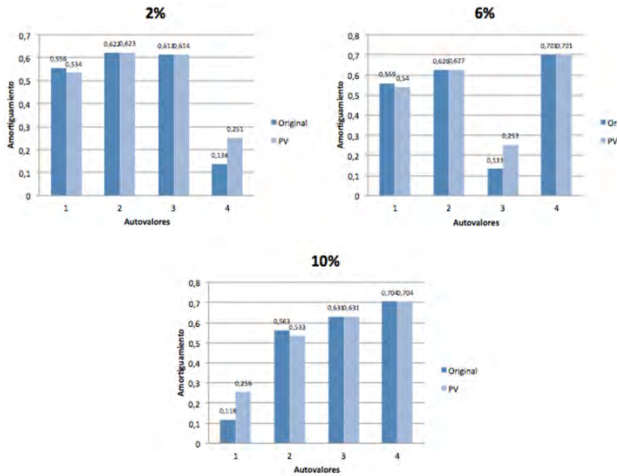


Fig. 3 Amortiguamiento de modos dominantes para condiciones normales de operación y variaciones de carga.

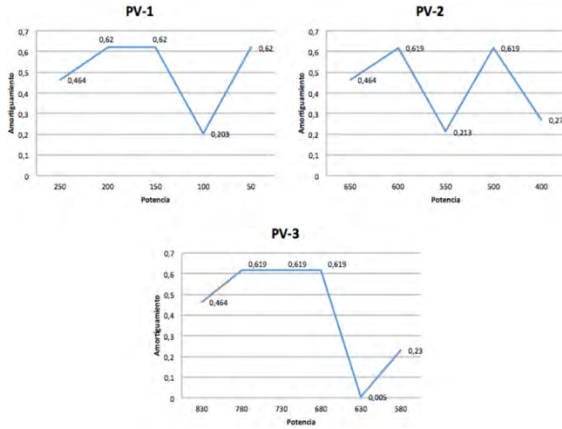


Fig. 4 Amortiguamiento de modos dominantes para condiciones normales de operación y variaciones de potencia de los sistemas fotovoltaicos.

4.2 Estabilidad Transitoria

Para las simulaciones de estabilidad transitoria, se consideró el disparo de la línea que conecta a las barras 25-26 y las barras 13-14, obteniéndose para el primer caso los resultados que se muestran en la figura 5.

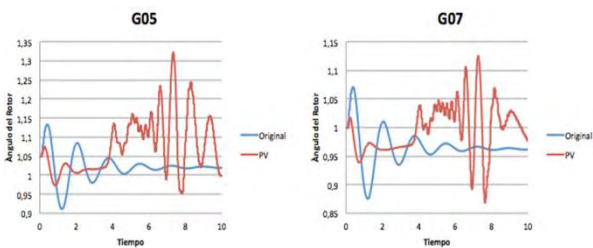


Fig. 5 Simulaciones en el dominio del tiempo considerando la Salida de operación de la línea 25-26.

Se puede notar que en este caso, el sistema presenta un

comportamiento inestable cuando se consideran la generación fotovoltaica. En contraste, el comportamiento es estable cuando se considera el caso original. Por lo tanto, se deben tomar previsiones para mejorar la estabilidad transitoria para el caso PV, por ejemplo, mediante el uso de dispositivos FACTS.

La figura 6 muestra los resultados obtenidos cuando sale de servicio la línea 13-14. Se puede observar que para ambos casos, el caso original y el caso PV, el sistema es estable; sin embargo, el amortiguamiento es considerablemente mejor para el caso PV. La figura 7 demuestra que dicho amortiguamiento es independiente del nivel de potencia generado por los sistemas fotovoltaicos, ya que tal y como se observa, la señal alcanza el régimen permanente en un tiempo casi constante ante las diferentes variaciones de potencia de salida de los sistemas fotovoltaicos PV-1 y PV-2.

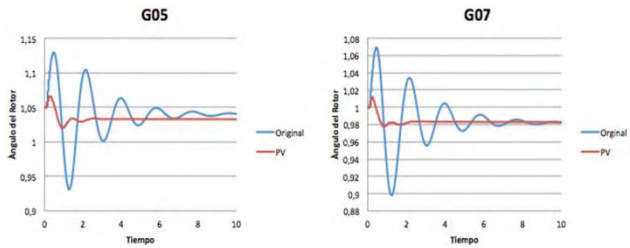


Fig. 6 Simulaciones en el dominio del tiempo considerando la Salida de operación de la línea 13-14.

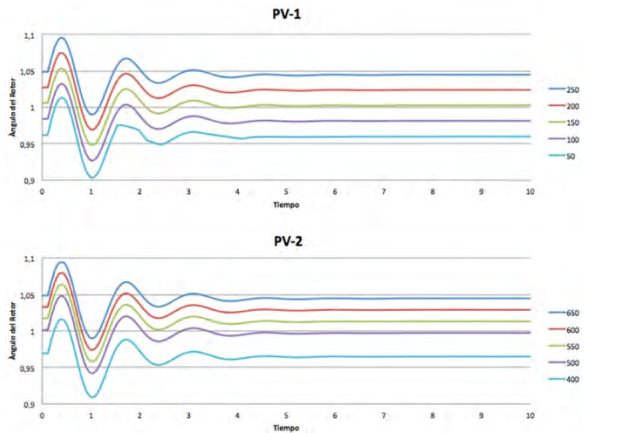


Fig. 7 Simulaciones en el dominio del tiempo considerando variaciones de la potencia generada de los sistemas fotovoltaicos y la salida de operación de la línea 13-14.

4.3 Estabilidad de voltaje

La figura 8 muestra las curvas PV obtenidas para ambos casos de estudio considerando condiciones normales de operación. Las curvas PV para ambos casos se superponen entre sí, ya que los modelos dinámicos de los generadores solares y los generadores sincrónicos no fueron considerados para la construcción de estas curvas, por lo tanto, desde el punto de vista de régimen permanente el margen de estabilidad de voltaje para ambos casos es el mismo. Esto se puede lograr mediante la instalación de sistemas de control de tensión de voltaje apropiados en los sistemas fotovoltaicos.

cos, de tal forma que su comportamiento sea similar al de los generadores sincrónicos. Por ejemplo, los dispositivos SVC pueden utilizarse en conjunto con los sistemas fotovoltaicos para ofrecer un soporte de tensión que mejora la estabilidad de voltaje, y simultáneamente se mejora la respuesta transitoria. Adicionalmente el punto de conexión de los sistemas fotovoltaicos al sistema puede diferir considerablemente respecto al punto de conexión cuando se consideran generadores sincrónicos. Esto es debido a que el recurso solar y los requerimientos de terreno pueden implicar que los sistemas fotovoltaicos estén ubicados en sitios remotos a las principales cargas del sistema. Por lo tanto, consideraciones adicionales deben tomarse en cuenta para mantener los niveles de tensión en niveles aceptables.

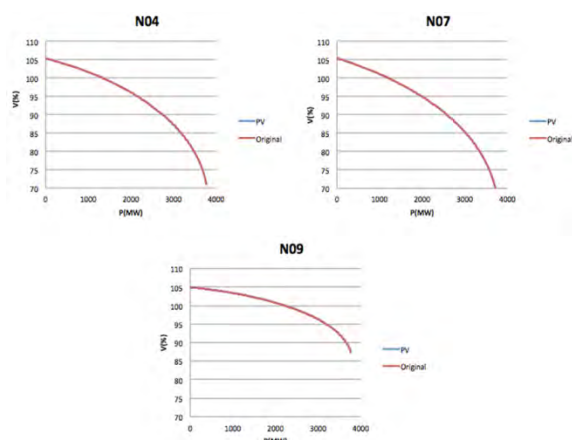


Fig. 8 Curvas PV para condiciones normales de operación.

5 Conclusiones

El estudio comparativo del efecto en la estabilidad de ángulo y de voltaje de un sistema de potencia, cuando se conectan generadores sincrónicos, y cuando se conectan generadores fotovoltaicos, muestra que desde el punto de vista de la estabilidad de pequeña señal, los sistemas fotovoltaicos pueden mejorar el amortiguamiento de algunos modos de oscilación; sin embargo, algunos otros pueden verse perjudicados. Este comportamiento es similar al observado para el caso original, en donde solo generadores sincrónicos están conectados en el sistema. Por lo tanto, se puede concluir que el desempeño de los generadores sincrónicos y de los generadores fotovoltaicos en la estabilidad de pequeña señal es muy similar. El análisis de sensibilidad muestra un comportamiento variable del amortiguamiento debido a la variación intermitente de la potencia de salida de los generadores fotovoltaicos debido a variaciones en la irradiación.

Desde el punto de vista de la estabilidad transitoria, los sistemas fotovoltaicos pueden en casos particulares mejorar la respuesta dinámica del sistema con respecto a los generadores sincrónicos. Sin embargo, en algunos casos puntuales se presentan inestabilidades. Se sugiere el uso de dispositi-

vos que puedan servir de respaldo a la respuesta dinámica del sistema tales como dispositivos FACTS.

Para el caso de la estabilidad de voltaje, el margen de cargabilidad de ambos casos de estudio permanece constante. Por lo tanto, si se le proporciona al sistema fotovoltaico un dispositivo de control de tensión con una respuesta similar a la de los generadores sincrónicos, se garantiza que la penetración de la energía solar no va a afectar la cargabilidad del sistema desde el punto de vista de estabilidad de voltaje. Estudios adicionales deben realizarse para evaluar el efecto del punto de interconexión de la generación fotovoltaica al sistema, ya que en caso de presentarse sobrecargas de líneas específicas debido a la ubicación usualmente lejana de los centros de carga por parte de los sistemas fotovoltaicos, se puede afectar negativamente los márgenes de cargabilidad totales.

Referencias

- Castilla León, 2004, Energía Solar Fotovoltaica, Manual del proyectista, pp. 1-20.
- Ceballos S, 2012, La integración de Energías Renovables con altos niveles de penetración en Sistemas Eléctricos de Potencia. Electro industria, <http://faraday1.ucd.ie/psat.html>. Consultado en Noviembre 18, 2015. Disponible en: <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=1947>.
- Gomez-Exposito A, Conejo A, Cañizares C, 2009, Electric Energy Systems Analysis and Operation, CRC press, Boca Raton, pp. 401-460.
- Kundur P, 1994, Power system stability and control, Ontario, Canada, McGraw-Hill, pp. 17-1100.
- Tamimi B, Canizares C, bhattacharya K, 2013, System stability impact of large-scale and distributed solar photovoltaic generation: The case of Ontario, Canada, pp. 1-8.
- Yuam T, 2004, Impact on the power system with a large penetration of photovoltaic generation. England, pp. 3-90.

Muñoz, Juan C.: Ph.D. en Ingeniería Eléctrica y de Computación, University of Waterloo, 2013.

Contreras, Ivana: Ingeniero Electricista, 2016, Universidad de Los Andes, Correo electrónico: ivacoch@gmail.com

Mora, Ernesto: Msc en Ingeniería Eléctrica. Correo electrónico: moraej@gmail.com.

Ballester, Nelson: Msc en Ingeniería Eléctrica, Universidad de Los Andes. Correo electrónico: lnelson27@gmail.com

Gonzalez, Jaime: Ph.D. en Ingeniería Eléctrica, Universidad de Los Andes. Correo electrónico: gjaime@ula.ve

Capítulo 79

Radiación UV como proceso de desinfección para el pos tratamiento de aguas residuales municipales

Angulo, Nancy^{1*}; Dávila, Yesenia¹; Bravo, Rosangel¹; García, Franklin¹; Toncel, Enrique²; Rincón, Nancy³; Morillo, Gustavo¹

¹ Centro de Investigación del Agua, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia, Maracaibo-Venezuela.

² Escuela de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de la Guajira, Riohacha-Colombia.

³ Departamento de Ingeniería sanitaria y Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia, Maracaibo-Venezuela.

*nancyangulo71@gmail.com

Resumen

La escasez de agua ha traído la necesidad del tratamiento de aguas residuales y eliminación de patógenos para su reuso, por ello se evaluó un proceso de desinfección con radiación UV en aguas residuales municipales de la ciudad de Maracaibo obtenidas luego de un sistema de tratamiento biológico que constó de un reactor anaerobio de doble cámara seguido de una cascada de aireación y un filtro aerobio-anaerobio a escala piloto, para conseguir reducciones del contenido microbiológico en relación a los coliformes fecales y totales, que permitiera la obtención de un agua tipo 2B según Decreto 883. El equipo constó de 4 lámparas de 15.000 mW cada una, con área de exposición de 3.264 cm² y tiempos de 420 y 600 segundos combinados con intensidades que variaron de acuerdo al número de lámparas encendidas. Se caracterizó físic-químicamente el agua residual a la entrada del equipo de desinfección obteniendo valores de DQO entre 26-40 mg/L, SST entre 15-45 mg/L, turbidez entre 37-82 NTU y color entre 232-583 Pt/Co, parámetros que variaron según el tratamiento aplicado pero sin modificarse significativamente a la entrada y salida del sistema de desinfección. Se determinó la eficiencia de remoción de las bacterias coliformes, consiguiendo remociones de 3,2 unidades logarítmicas para coliformes totales y fecales con una dosis de 7.720,6 mW.s.cm⁻², es decir, 60.000 mW-420 s; de 1,6 y 3,5 unidades logarítmicas con dosis de 8.272 mW.s.cm⁻² (45.000 mW y 600 s) y de 1,7 y 3,4 unidades logarítmicas para coliformes totales y fecales respectivamente con dosis de 11.029,4 mW.s.cm⁻² (60.000 mW-600s), pero sin cumplir con los límites establecidos en la normativa venezolana debido a la alta carga microbiana inicial.

ISBN: 978-980-11-1858-9



9 789801 118589

1 Introducción

Venezuela, es un país que cuenta con grandes recursos hidrológicos, pero la disponibilidad de este recurso vital, está siendo afectada a causa de la progresiva contaminación de los cuerpos de agua, producto del crecimiento demográfico y la inadecuada planificación en el uso de sustancias químicas xenobióticas no biodegradables, provenientes de las actividades industriales.

Estos inconvenientes, aunque son de menor importancia en algunas regiones, son causa de restricciones severas para las actividades turístico-recreacionales y para el mismo abastecimiento de las poblaciones humanas (Gonzalez 2000, Herrera 2004). Es por ello, que el reuso del agua está ganando aceptación, al menos entre las agencias reguladoras y las autoridades del agua, como una parte importante del ciclo integral del agua (Toze 2005). No obstante, éstas contienen gran cantidad de patógenos que deben ser eliminados por algún tratamiento de desinfección.

Aunque existen diferentes tecnologías para el tratamiento de aguas residuales, la gran mayoría son eficientes en la remoción de materia orgánica y otros compuestos, sin embargo, son limitados frente a organismos patógenos. La desinfección es considerada como el principal mecanismo para la desactivación o destrucción de estos organismos con el fin de prevenir la dispersión de enfermedades transmitidas a través del agua, tanto a los receptores como al ambiente (EPA, 1999).

Un sistema de desinfección con luz ultravioleta (UV) penetra en las paredes de la célula de un organismo, y destruye la habilidad de reproducción de la célula. Asimismo, la eficacia del sistema de desinfección con luz ultravioleta depende de las características del agua residual, la intensidad de la radiación, el tiempo de exposición de los microorganismos y la configuración de las lámparas.

En los últimos años, se han promovido los sistemas de desinfección con radiación ultravioleta en sistemas de tratamiento de aguas residuales y se ha incrementado rápidamente debido a su alta competitividad con la desinfección con cloro, ya que es más un proceso físico que una desinfección química, lo cual elimina la necesidad de generar, manejar, transportar, o almacenar productos químicos tóxicos, peligrosos o corrosivos. Asimismo, no existe ningún efecto residual que pueda afectar a los seres humanos o cualquier organismo acuático, además tiene un período de contacto más corto en comparación con otros procesos de desinfección y el equipo requiere menos espacio que otros métodos (EPA1999).

2 Marco Teórico

Las aguas residuales, dependiendo de su composición y concentración, pueden llevar en su seno gran cantidad de organismos. También influyen en su presencia la temperatura y el pH, puesto que cada organismo requiere unos valores determinados de estos dos parámetros para desarrollarse.

Los principales grupos de organismos que se pueden encontrar son las bacterias, que pueden ser de origen fecal o bacterias implicadas en procesos de biodegradación, tanto en la naturaleza como en las plantas de tratamiento. Es importante destacar que las bacterias coliformes se utilizan como indicador de polución por vertidos de origen humano, ya que cada persona elimina diariamente de 100.000 a 400.000 millones de coliformes a través de las heces, además de otras clases de bacterias.

Además de las bacterias, se encuentran los virus, que proceden de la excreción, por parte de individuos infectados, ya sean humanos o animales; algas, donde su crecimiento está favorecido por la presencia en las aguas residuales de distintas formas de fósforo y nitrógeno, así como de carbono y vestigios de elementos tales como hierro y cobalto, dando lugar a procesos de eutrofización; protozoos que juegan un papel muy importante en los procesos de tratamiento biológico, especialmente en filtros percoladores y fangos activados. Pueden eliminar bacterias suspendidas en el agua, ya que éstos no sedimentan, evitando la producción de efluentes con turbidez; y por último los hongos, donde la mayoría son aerobios estrictos, y pueden tolerar valores de pH relativamente bajos, y tienen baja demanda de nitrógeno (Metcalfcol 2003).

Las aplicaciones prácticas de la radiación ultravioleta comenzaron en 1901 cuando se consiguió producir esta luz artificialmente. Esta técnica se consideró para la desinfección del agua de bebida cuando se comprobó que el cuarzo era una de los pocos materiales casi totalmente transparente a la radiación ultravioleta, lo que permitió la envoltura protectora de los tubos.

La aparición de los subproductos de la desinfección (SPD), sobre todo aquellos asociados a la desinfección con cloro, hicieron que numerosos sistemas pasaran de éste a la UV, ya que la radiación UV no otorga ningún residual al agua tratada para hacer frente a eventuales futuras contaminaciones en las redes de distribución o en las viviendas.

La desinfección con radiación ultravioleta se ha venido utilizando ampliamente en los sistemas de abastecimiento de agua de pequeños establecimientos, como hospitales, industrias de alimentos y bebidas y hoteles. Recientemente se ha incrementado su uso para la desinfección de efluentes de plantas de tratamiento de aguas servidas y ha vuelto a recibir atención como desinfectante de pequeños sistemas de

agua, debido a su capacidad de desinfectar sin producir cambios físicos o químicos notables en el agua tratada.

Existe en el mercado una gama de equipos para grandes plantas de tratamiento de agua hasta un pequeño aparato que cabe en una mano y que los caminantes usan para desinfectar aguas de lagos y ríos (Solsonay col., 2002).

La radiación ultravioleta se caracteriza por longitudes de onda muy cercanas a las de la luz del sol. Los parámetros más importantes de la radiación UV relacionados con la desinfección del agua son:

Longitud de onda: El rango germicida se encuentra entre 240 y 280 nm (nanómetros) y se obtiene la máxima eficiencia desinfectante cerca de los 260 nm. Estos límites se encuentran dentro del rango denominado ultravioleta-C (100-280 nm), que se diferencia del ultravioleta-A (315-400 nm) y del ultravioleta-B (280-315 nm).

Calidad del agua: La temperatura del agua tiene poca o ninguna influencia en la eficacia de la desinfección con luz ultravioleta, pero afecta el rendimiento operativo de la lámpara de luz ultravioleta, cuando la misma está inmersa en el agua. La energía ultravioleta es absorbida por el agua, pero en mucho mayor grado es absorbida por los sólidos en suspensión o disueltos, turbiedad y color. En el agua para consumo humano, la concentración de los sólidos en suspensión es generalmente inferior a 10 ppm, nivel al que empieza a experimentar problemas con la absorción de la luz ultravioleta. La turbiedad debe ser tan baja como sea posible y en todo caso, deben evitarse turbiedades mayores de 5 NTU.

Intensidad de la radiación: A menor distancia del agua respecto al punto de emisión de los rayos, mayor será la intensidad de los mismos y por tanto la desinfección será más eficiente. Con respecto a esta condición, existe una regla general que dice que no debe haber más de 75 mm de profundidad de agua para asegurar que cada porción de la misma sea alcanzada por los rayos adecuadamente.

Tipo de microorganismos: La radiación ultravioleta se mide en microvatios por centímetro cuadrado ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$) y la dosis en microvatios segundo por centímetro cuadrado ($\mu\text{Ws}/\text{cm}^2$) (radiación x tiempo). La resistencia al efecto de la radiación dependerá del tipo de microorganismo. No obstante, la dosificación de luz ultravioleta requerida para destruir los microorganismos más comunes (coliformes, pseudomonas, etc.) varía entre 6.000 y 10.000 $\mu\text{Ws}/\text{cm}^2$. Las normas para la dosificación de luz ultravioleta en diferentes países varían entre 16.000 y 38.000 $\mu\text{Ws}/\text{cm}^2$.

Tiempo de exposición: Como cualquier otro desinfectante, el tiempo de exposición es vital para asegurar un buen desempeño. No es fácil determinar con exactitud el tiempo

de contacto (ya que éste depende del tipo de flujo y de las características del equipo), pero el período debería estar relacionado con la dosificación necesaria.

Para un grado determinado de inactivación de microorganismos, el tiempo requerido de exposición del agua a la luz ultravioleta es inversamente proporcional a la intensidad de la luz que penetra el agua, teniendo en cuenta la capacidad de absorción del agua y la dispersión de la luz debido a la distancia.

El método de desinfección es sencillo, consiste en poner en contacto el flujo de agua con una lámpara ultravioleta, de tal manera que la radiación UV actúe sobre los microorganismos del agua bajo las condiciones arriba expuestas con el consecuente efecto desinfectante (Solsona y col., 2002).

3 Procedimiento Experimental

Se aplicó un proceso de desinfección al agua procedente de un sistema de tratamiento biológico que consta de un reactor anaerobio de doble cámara seguido de una cascada de aireación y un filtro aerobio-anaerobio a escala piloto.

El equipo utilizado para la desinfección con radiación UV es de forma rectangular, en color oscuro para evitar la salida de la radiación UV, con dimensiones de 0,60x0,45x0,10 m, con cuatro (4) lámparas UV (de 15 Watts cada una) que están inmersas en la estructura dentro de unos tubos de vidrio y serán totalmente recubiertas por el agua a desinfectar; cuenta con un circuito eléctrico de 120 Watts, que permite realizar variaciones en cuanto al número de lámparas que se quieran utilizar en el tratamiento. Este equipo es a flujo continuo, conectado a la salida del filtro biológico, con la ayuda de una bomba peristáltica, con TRH de acuerdo al tiempo de exposición que se requiera.

Las muestras se colectaron a la entrada y a la salida del tratamiento de desinfección, con 3 réplicas en cada tratamiento aplicado.

Los parámetros microbiológicos (coliformes totales y fecales) serán evaluados a tiempos de exposición de 420 y 600 segundos con intensidades de 30000mW (2 lámparas), 45000mW (3 lámparas) y 60000mW (4 lámparas), además de un área de exposición de 3264cm² para así determinar la dosis de UV correspondiente (dosis= Intensidadx tiempo/área), siguiendo los métodos estándar (APHA-AWWA-WEF, 1998).

4 Discusión y Resultados

En la caracterización del agua antes del proceso de desinfección se encontró una densidad poblacional promedio de 1,49E8 número más probable de coliformes totales en

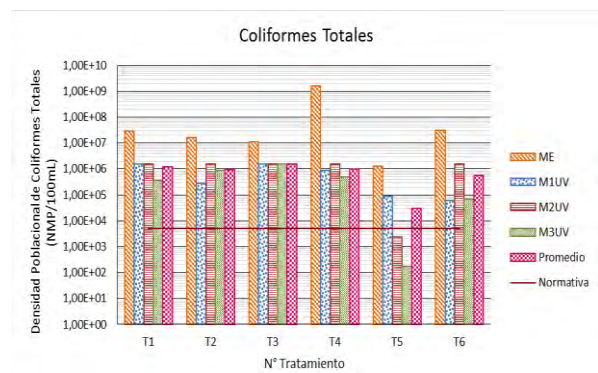
100 mL de muestra (NMP/100mL), y de 1,59E8 NMP/100mL para coliformes fecales, lo que se traduce en altos contenidos de bacterias coliformes (Tabla 1).

Tabla 1. Promedio de coliformes en las muestras de entrada al equipo de desinfección UV, en NMP/100mL

Coliformes	Promedio (12 muestras)	Desviación estándar	Valor mínimo	Valor máximo	Normativa
Totales	1,49E8	4,58E8	1,70E4	1,60E9	5,00E3
Fecales	1,46E8	4,58E8	1,70E4	1,60E9	1,00E3

El agua proveniente del sistema de tratamiento biológico está por encima del límite que establece la normativa venezolana, para cumplir con un agua de tipo 2B según el Decreto 883 Gaceta oficial 5021 de 18 de diciembre de 1995, es decir, aguas para riego de cultivos no destinados al consumo humano y para uso pecuario donde se especifica un límite de población bacteriana de coliformes totales y fecales de 5000 NMP/100mL y 1000 NMP/100mL, respectivamente.

En la Figura 1, se representa la densidad poblacional de coliformes totales para las réplicas del tratamiento (M1UV, M2UV y M3UV) y su promedio, así como la densidad de coliformes para la muestra de entrada (ME), comparados con el valor de 5000 NMP/100mL de Coliformes Totales establecido en el Decreto 883 para aguas tipo 2B, destinadas a riego de cultivos no destinados al consumo humano y para uso pecuario.

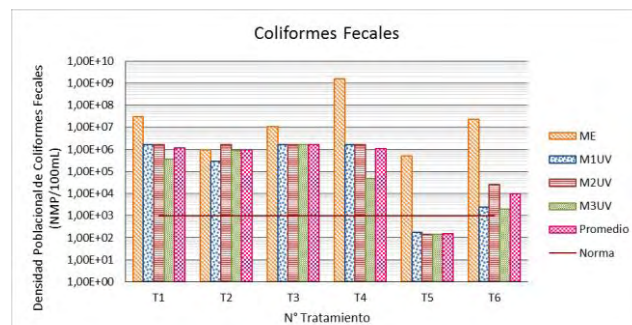


T₁: 30000mW-420s (3860,3 mW.s.cm⁻²); T₂: 30000mW-600s (5514,7 mW.s.cm⁻²); T₃: 45000mW-420s (5790,4 mW.s.cm⁻²); T₄: 60000mW-420s (7720,6 mW.s.cm⁻²); T₅: 45000mW-600s (8272 mW.s.cm⁻²); T₆: 60000mW-600s (11029,4 mW.s.cm⁻²). Normativa Venezolana: Decreto 883 establece 5000 NMP CT/100mL.

Figura 1. Densidad Poblacional de Coliformes Totales

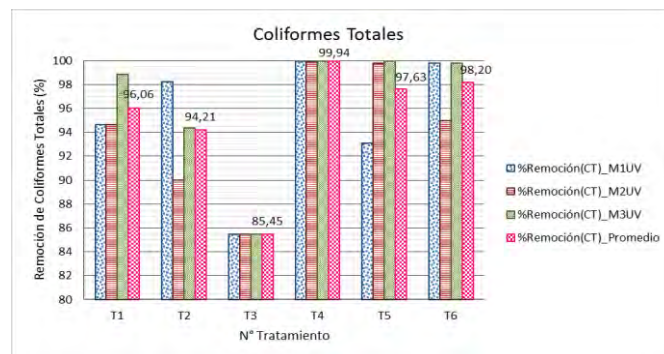
Puede observarse, que el tratamiento T5, el cual corresponde a una dosis de 8272 mW.s.cm⁻², es decir, 45000mW y 600s, fue un tratamiento de gran eficiencia, pues la muestra 2 y 3 (M2UV y M3UV) quedaron por debajo del valor que establece la norma, con una reducción promedio de 1,6 unidades logarítmicas.

Igualmente, para los coliformes fecales (Figura 2) se obtuvo una alta remoción en el T5 (45000mW-600s), en 3,5 unidades logarítmicas quedando por debajo del valor establecido por la normativa venezolana.



T₁: 30000mW-420s (3860,3 mW.s.cm⁻²); T₂: 30000mW-600s (5514,7 mW.s.cm⁻²); T₃: 45000mW-420s (5790,4 mW.s.cm⁻²); T₄: 60000mW-420s (7720,6 mW.s.cm⁻²); T₅: 45000mW-600s (8272 mW.s.cm⁻²); T₆: 60000mW-600s (11029,4 mW.s.cm⁻²). Normativa Venezolana: Decreto 883 establece 1000 NMP CT/100mL.

Figura 2. Densidad Poblacional de Coliformes Fecales



T₁: 30000mW-420s (3860,3 mW.s.cm⁻²); T₂: 30000mW-600s (5514,7 mW.s.cm⁻²); T₃: 45000mW-420s (5790,4 mW.s.cm⁻²); T₄: 60000mW-420s (7720,6 mW.s.cm⁻²); T₅: 45000mW-600s (8272 mW.s.cm⁻²); T₆: 60000mW-600s (11029,4 mW.s.cm⁻²). Normativa Venezolana: Decreto 883 establece 1000 NMP CT/100mL.

Figura 3. Porcentaje de remoción de Coliformes Totales

Con la aplicación de T6 (60000mW-600s) y T4 (60000mW-420s) se lograron reducciones de 1,5 para coliformes totales y mayores a 3 unidades logarítmicas para coliformes fecales. A pesar de que se lograron porcentajes de remoción elevados para ambos tratamientos, no cumplen con la normativa ambiental establecida en el país para cumplir con un agua de tipo 2B, para riego de cultivos no destinados al consumo humano y para uso pecuario(Gaceta Oficial N° 5021, 1995), lo que hace que las combinaciones de tiempos de exposición e intensidades sean eficientes en la remoción de los coliformes totales y fecales, pero no eficaz en cuanto al cumplimiento de calidad de las aguas en Venezuela puesto que la carga de bacterias alimentada al sistema de desinfección es muy elevada.

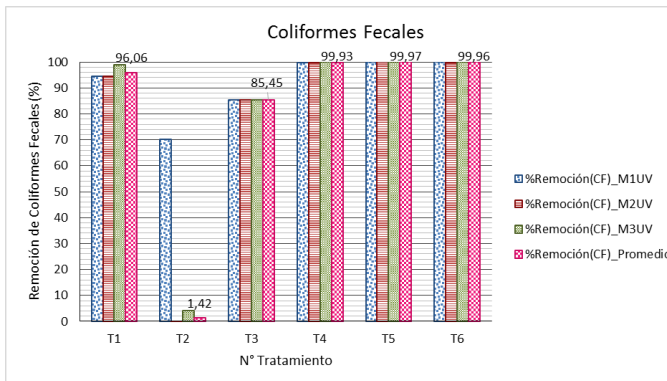
En la Figura 3, se observan los altos porcentajes de remoción de los coliformes totales obtenidos luego de aplicar los diferentes tratamientos con radiación UV. De esta mane-

ra, puede notarse que en T4, el cual viene dado por 60000 mW-420 s, se logró una mayor remoción promedio, de 99,9%.

Por otro lado, la menor eliminación de coliformes totales en las muestras, fue con T3 (45000 mW-600 s) con un promedio de 85,4%.

Asimismo, en cuanto a la remoción de coliformes fecales (Figura 4), también se obtuvo resultados similares, donde la mayor eliminación promedio, de un 99,97%, fue con T5 (45000 mW-600 s). Sin embargo, T4 (60000 mW y 420 s) y T6 (60000 mW-600 s) removieron el 99,93% y 99,96%, respectivamente.

Sánchez y col., (2012), al caracterizar las muestras para su investigación realizada en el CIA, notaron la alta carga microbiana proveniente del agua de las lagunas de estabilización que originalmente fueron extraídas del colector C ubicado en la misma sede (pero trayendo aguas residuales de la zona norte de Maracaibo), donde se tenía 1,4E3 NMP/100 mL de coliformes totales y 1,2E3 NMP/100 mL de coliformes fecales. Dichos investigadores, consiguieron las mejores remociones, del 97,8% y 99,3% para coliformes totales y coliformes fecales respectivamente, utilizando un tratamiento con luz UV de 15000 mW de intensidad y 900 s como tiempo de exposición, lo que se traduce en una dosis de 32.415 mW.s.cm⁻² (con un área de 416 cm²).



T₁: 30000mW-420s (3860,3 mW.s.cm⁻²); T₂: 30000mW-600s (5514,7 mW.s.cm⁻²); T₃: 45000mW-420s (5790,4 mW.s.cm⁻²); T₄: 60000mW-420s (7720,6 mW.s.cm⁻²); T₅: 45000mW-600s (8272 mW.s.cm⁻²); T₆: 60000mW-600s (11029,4 mW.s.cm⁻²). Normativa Venezolana: Decreto 883 establece 1000 NMP CT/100mL.

Figura 4. Porcentaje de remoción de Coliformes Fecales

Del mismo modo, Salcedo y col.(2002), en su investigación, en la cual tenían una densidad microbiana inicial de 4,4E6 NMP/ 100 mL de coliformes totales y 3,4E5 NMP/ 100 mL de coliformes fecales, obtuvo remociones de 99,96% y 99,93% respectivamente, aplicando tratamientos UV con intensidades entre 5370 y 12650mW.s.cm⁻².

En la Tabla 2 puede observarse los promedios obtenidos para la DQO durante los tratamientos. Los valores de DQO oscilan entre 26 y 57 mg/L, como resultado de la variación de las condiciones diarias para cada tratamiento.

Tabla 2. Demanda Química de Oxígeno de las muestras de agua tratadas

Tratamiento	1	2	3	4	5	6
Promedio DQO (mg/L)	57,42	36,54	38,65	55,38	40,34	39,56
Desviación Estándar	1,64	1,35	1,11	0,78	0,70	0,11
Valor Mínimo	56,05	35,20	37,38	26	30	28
Valor Máximo	59,23	37,89	39,46	30	32	32

T₁: 30000mW-420s (3860,3 mW.s.cm⁻²); T₂: 30000mW-600s (5514,7 mW.s.cm⁻²); T₃: 45000mW-420s (5790,4 mW.s.cm⁻²); T₄: 60000mW-420s (7720,6 mW.s.cm⁻²); T₅: 45000mW-600s (8272 mW.s.cm⁻²); T₆: 60000mW-600s (11029,4 mW.s.cm⁻²)

Investigadores como Mounaouer y Abdennaceur (2012), Wang y col. (2006), obtuvieron valores entre 90 a 102 mg/L y 20 a 38 mg/L respectivamente para DQO, al trabajar con aguas residuales domésticas, lo que significa, que los valores de DQO varían de acuerdo a las características de la ubicación geográfica, la población y el tiempo. Sin embargo, en la normativa venezolana para descargas a cuerpos de agua, como el Lago de Maracaibo, se establece un valor máximo de 350 mg/L para DQO, por lo que la DQO de las aguas obtenidas al finalizar este proceso de tratamiento se encuentra por debajo de los límites permisibles.

Los SST oscilan entre 15 y 45 mg/L para los tratamientos (Tabla 3). Las cantidades obtenidas de SST a la salida de cada tratamiento, cumplen con el valor máximo permisible establecido por el decreto 883 para descargar a cuerpos de agua, que es de 80 mg/L.

Tabla 3. Sólidos Suspensos Totales en las muestras de agua tratadas

Tratamiento	1	2	3	4	5	6
Promedio SST (mg/L)	45	15	19	28	31	30
Desviación Estándar	5,03	2,31	1,15	2,00	1,15	2,00
Valor Mínimo	40	14	18	26	30	28
Valor Máximo	50	18	20	30	32	32

T₁: 30000mW-420s (3860,3 mW.s.cm⁻²); T₂: 30000mW-600s (5514,7 mW.s.cm⁻²); T₃: 45000mW-420s (5790,4 mW.s.cm⁻²); T₄: 60000mW-420s (7720,6 mW.s.cm⁻²); T₅: 45000mW-600s (8272 mW.s.cm⁻²); T₆: 60000mW-600s (11029,4 mW.s.cm⁻²).

La Tabla 4 muestra que los valores de color oscilan entre 232,3 a 583,3 Unidades Platino-Cobalto (UPT/Co), siendo T6 el único valor que sobrepasa la norma (500 UPT/Co).

Por otro lado, la turbidez del agua viene asociada y es, en la mayoría de las veces, proporcional al color de la misma. Como se observa en la Tabla 5, los valores de turbidez

oscilan entre 37,3 a 82,3 Unidades Nefelométricas de Turbidez (NTU).

Tabla 4. Color en las muestras de agua tratadas

Tratamiento	1	2	3	4	5	6
Prom Color (UPT/Co)	407,67	395,67	430,00	411,67	261,00	583,33
Desviación Estándar	35,92	19,14	5,57	8,08	18,03	16,77
Valor Mínimo	384,00	380,00	425,00	403,00	241,00	564,00
Valor Máximo	449,00	417,00	436,00	419,00	276,00	594,00

T₁: 30000mW-420s (3860,3 mW.s.cm⁻²); T₂: 30000mW-600s (5514,7 mW.s.cm⁻²); T₃: 45000mW-420s (5790,4 mW.s.cm⁻²); T₄: 60000mW-420s (7720,6 mW.s.cm⁻²); T₅: 45000mW-600s (8272 mW.s.cm⁻²); T₆: 60000mW-600s (11029,4 mW.s.cm⁻²)

Tabla 5. Turbidez en las muestras de agua tratada

Tratamiento	1	2	3	4	5	6
Promedio Turbidez (NTU)	63,10	78,73	68,27	64,13	41,87	82,37
Desviación Estándar	0,50	0,85	2,32	0,47	1,56	1,17
Valor Mínimo	62,60	78,10	65,70	63,60	40,40	81,10
Valor Máximo	63,60	79,70	70,20	64,50	43,50	83,40

T₁: 30000mW-420s (3860,3 mW.s.cm⁻²); T₂: 30000mW-600s (5514,7 mW.s.cm⁻²); T₃: 45000mW-420s (5790,4 mW.s.cm⁻²); T₄: 60000mW-420s (7720,6 mW.s.cm⁻²); T₅: 45000mW-600s (8272 mW.s.cm⁻²); T₆: 60000mW-600s (11029,4 mW.s.cm⁻²)

5 Conclusiones

El uso de la desinfección para las aguas residuales provenientes del efluente del tratamiento biológico de las aguas municipales del colector C de la ciudad de Maracaibo es necesario debido a que la caracterización microbiológica a la salida del tratamiento biológico revela una alta concentración de microorganismos coliformes totales y fecales (en promedio 1,49E8 y 1,46E8 NMP/100mL para Coliformes Totales y Fecales, respectivamente) por encima del valor de 5000 NMP/100 mL y 1000 NMP/100 mL, respectivamente, para aguas tipo 2B según la normativa venezolana Decreto 883.

Durante la investigación no se observó influencia de los parámetros fisicoquímicos (DQO, color, turbidez y sólidos suspendidos) que presentan las aguas tratadas sobre las remociones de microorganismos durante la aplicación de la radiación UV en las condiciones a la que fue aplicada la desinfección.

El mejor resultado se obtuvo para dosis de radiación UV de 7720,6 mW.s.cm⁻² (60000mW-420s), la cual redujo 3,2 unidades logarítmicas para coliformes Totales y Fecales, sin embargo no se logró cumplir con los límites establecidos en la normativa venezolana debido a la alta carga microbiana inicial.

Referencias

- González A, 2000, Informe Nacional sobre la Gestión del agua en Venezuela, Documento en línea. Disponible en: http://capnetsp.org/water_management_tool/document/4/Venezuela.pdf. Consultado: Junio 2015. P 25-35.
- Herrera L, 2004, Investigación científica: Inversión para conservar, Interciencia. Revista de Ciencia y Tecnología de América. Vol. 29. N° 9. Venezuela P 482-484.
- TozeS, 2005, Water Reuse and Health Risks- real vs. perceived, Desalination. Vol 187. N° 1-3. P 41-51
- Agencia de Protección al Ambiente (EPA, por sus siglas en inglés), 1999. "Tecnología de aguas residuales Desinfección con luz ultravioleta". Folleto informativo de tecnología de aguas residuales. Informe en línea. Disponible en: http://water.epa.gov/aboutow/owm/upload/2004_07_07_septics_cs-99-064.pdf. Consultado: Junio 2015. EPA 832-F-99-064. P 1-9.
- Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela, Nro.5021. 1995. Normas para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos. Decreto N°883, artículos 3, 4 y 10. Caracas.
- Salcedo D, InmaculadaAndrades, Quiroga J, Sanz E, 2002, Desinfección de aguas residuales urbana mediante radiación ultravioleta, Aplicación en la EDAR de Jerez de la Frontera, Tecnología del Agua. Vol 22. N°227. P 42-51.
- Wang JL, Wang L, Wang BZ, Zhang JS, Huang WZ, 2006, Suspended particle effects on ultraviolet light disinfection of effluent and the improvement, Water Practice & Technology. Vol 1. N° 2. P 102-111. doi: 10.2166/WPT.2006036.
- Sánchez M, Villalobos N, Gutiérrez E, Caldera Y, 2012, Diseño de un equipo de desinfección por luz ultravioleta para el tratamiento de aguas residuales con fines de reutilización, Revista Tecnocientífica URU. Enero-Junio 2012, N°2. P 11-19.
- Mounaouer B, Abdennaceur H, 2012, Ultraviolet Radiation-for Microorganism Inactivation in Wastewater, Journal of Environmental Protection. Vol. 3 N° 2. P 194-202. doi: 10.4236/jep.2012.32024.
- Metcalf Eddy, 2003, Wastewater Engineering, Treatment and Reuse. Tercera Edición. Vol 1. Nueva York. EUA. McGraw-Hill International Editions. P 53-130.
- APHA-AWWA-WEF, 1998, Standard Methods of Examination of Water Wasterwater. 20ma Edición. Vol 1. Washington, DC. EUA. American Public Health. Association 1015 Fiftieth N. P 200-963.

Angulo, Nancy: *Dra. Ingeniería Ambiental. Profesora Jefe del Laboratorio de Microbiología Industrial del Centro de Investigación del Agua, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia.*

Dávila, Yesenia: *MSc en Ciencias del Ambiente, Universidad del Zulia. Correo electrónico: ainesey_222@hotmail.com*

Bravo, Rosangel: *Ingeniero Químico, Universidad del Zulia. Correo electrónico: rosangel456@hotmail.com*

García, Franklin: *Ingeniero Químico, Universidad del Zulia.*

Toncel, Enrique: *Ingeniero. Profesor de la Universidad de la Guajira. Correo electrónico: etoncel14@gmail.com*

Rincón, Nancy: *Dra en Ingeniería Ambiental. Profesora del Postgrado de la Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia. Correo electrónico: ncrincon1@gmail.com*

Morillo, Gustavo: *MSc. en Ingeniería Ambiental. Profesor del Postgrado de la Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia. Correo electrónico: gmorillo@fing.luz.edu.ve*

Capítulo 80

MUCUHÁBITAT, tecnología para una tradición

Lobatón, Elimar¹; Rodríguez, Jose^{2*}

¹ Facultad de Arquitectura
Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.

² Facultad de Arquitectura
Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.
*jorobe55@gmail.com

Resumen

Concebido bajo la premisa de adaptabilidad y realidad, MUCUHABITAT: tecnología para una tradición, es un proyecto de índole social que plantea una respuesta alternativa a la problemática de la vivienda anárquica en Mérida, específicamente en el área del páramo andino, el nombre de la misma une dos palabras, "MUCU", prefijo proveniente de la lengua indígena Tatuy cuyo significado es "tierra de..." y hace referencia a lo propio, mientras que "HABITAT" se entiende como el lugar y sus características; el objetivo principal de la propuesta es establecer criterios para generar respuestas arquitectónicas reales, capaces de reforzar la identidad y de implementar tecnologías aptas para la locación.

Partiendo del enlace de una revisión bibliografía de temas como la reutilización y reciclaje de desechos, sistemas de tratamiento existentes para aguas servidas, y el estudio en campo de las características sociales y arquitectónicas del lugar, se establece como prioridad el diseñar una vivienda capaz de dividirse y adaptarse a todo tipo de familia, cuyos desechos no causaran el mismo impacto en el medio ambiente puesto que serán tratados con la finalidad de disminuir el mismo.

Los criterios base para el desarrollo de la propuesta entonces son la reinterpretación de la tipología típica andina (viviendas de baja altura y máximo 75m²), adaptabilidad a la topografía (reconociendo curvas de terreno y pendientes comunes en el área.

Como principal conclusión se reconoce la importancia de la arquitectura residencial para fomentar la identidad del usuario, siendo considerada como el único testigo insobornable de la historia, trabajando con tecnologías que puedan reinterpretar la tradición de una comunidad haciéndola apta para los más jóvenes, para aquellos que se han visto más relacionados con nuevas corrientes ideológicas.

ISBN: 978-980-11-1858-9



1 Introducción

La tradición, entendida como todas aquellas costumbres encargadas de comunicar la historia de un poblado entre sus habitantes, es el principal elemento tomado en cuenta para el desarrollo de propuestas de vivienda en uno de los sectores con mayor cantidad de tradiciones en el Estado de Mérida, el páramo andino, caracterizado por su clima frío, gente cordial, sus sorprendentes paisajes y coloridas tradiciones.

En la actualidad, y debido a la problemática de vivienda en el país, este paisaje se ha visto amenazado por la aparición de construcciones anárquicas generando así deterioro tanto visual como cultural; hoy día, el páramo es el escenario principal para actividades económicas-turísticas que han conllevado a la interacción entre los propios y los visitantes, en consecuencia las nuevas tendencias han afectado su entorno

Partiendo de la premisa de factibilidad para las respuestas arquitectónicas, MUCUHABITAT pretende crear escenarios para la puesta en escena del drama y la comedia de la vida de todos aquellos que viven en el páramo; "MUCU", prefijo de origen Tatuy, antigua tribu indígena de Mérida, cuyo significado es "lugar de..." o "tierra de..." indicando así arraigo y respeto por el entorno, denotando la tradición, la historia y las costumbres, mientras que "HABITAT" se define como los factores geográficos relativos a la vida del hombre, como el emplazamiento, el lugar y su forma... el proyecto se maneja entonces bajo una visión orgánica, tomando en cuenta tres aspectos básicos: social, tecnológico y el escenario.

2 Marco Teórico

2.1 Social, "la búsqueda de consolidar la identidad y propiciar el arraigo del hombre con su hábitat":

Se define por la relación entre el habitante propio del lugar y sus costumbres, comprendiendo la cultura como reflejo de identidad, y los nuevos habitantes, conformados por las nuevas generaciones y por persona provenientes de otros lugares del país, acompañados de ideales de progreso; el sentimiento de desarraigo es notorio actualmente, impulsado por la búsqueda de crecimiento y reconocimiento personal, generando frustración al no encontrar reflejo de esto en su entorno. En consecuencia la búsqueda de avance, se ha producido una ola de construcciones anárquicas que pretenden desenlazarse de la historia del lugar, por lo que este tipo de respuestas han fomentando la pérdida de identidad.

De tal forma, y relacionándose con la problemática de la capacidad adquisitiva (generado por los altos costos de materiales, suelo y tecnología), resulta común encontrar viviendas en las que conviven más de una familia; razón por la cual se hace indispensable generar respuestas que conciben desde su inicio la posibilidad de división y adaptación de-

pendiendo del grupo familiar que lo desee adquirir.

2.2 Tecnificación, "desmitificar lo tecnológico, diferenciando lo propio de lo apropiado"

: Se reconoce la necesidad de reinterpretarla tipología y sus características puesto que la misma es considerada por los habitantes de mayor edad como la respuesta ideal ya que se adapta al entorno y a sus actividades diarias, lo que ayuda a conservar "el calor de hogar"; actualmente se han involucrado nuevos materiales que no han logrado adaptarse a la imagen típica ni a las exigencias del paisaje, por ello se reconoce que siempre lo propio es lo apropiado, y por ende es necesario adaptar.

Se considera como determinante la importancia de reciclar todos los desechos que puedan generar las viviendas, reutilizar los objetos de uso cotidiano que alcanzan el top de su vida útil, dando cabida a nuevos elementos que pueden ir desde mobiliarios hasta acabados superficiales; al igual que la inclusión de plantas de tratamiento para aguas servidas, con la finalidad de devolver este recurso a la naturaleza con el menor impacto posible.

2.3 Escenario, "minima afectación de ambiente, máximo aprovechamiento de los recursos naturales":

Los paisajes que acompañan la silueta de la carretera transandina, se caracterizan por el predominio de lo natural sobre lo construido, lo que se considera como su principal atracción, por ende es obligatorio que la intervención sea lo menos invasiva en este espacio... desdibujando así la línea divisoria entre lo construido y el entorno. El paisaje es, en la cultura andina, el área de trabajo, de juego, de convivencia, por lo que la propuesta debe incluir un espacio para el desarrollo de la comunidad buscando disminuir los focos de segregación.

3 Procedimiento Experimental

Partiendo de la revisión bibliográfica, el grupo de investigadores realiza cortos ejercicios de diseño que relacionen aspectos sociales y tecnológicos con el lugar para crear una base sólida para desarrollar el proyecto MUCUHABITAT; con este punto de partida, se realiza una visita de campo buscando reconocer todos los factores que influyen sobre el proyecto, comprendiendo la importancia de "diseñar para un lugar" y no "diseñar el lugar".

De tal forma, se establecen tres líneas de investigación principales con la finalidad de definir referencias y criterios generales para el diseño de estas viviendas: el usuario, entendido por sus tradiciones y características de vida; los aspectos técnicos, definido por la búsqueda de relación entre las nuevas tecnologías y la tradición, en otras palabras, dar soluciones a los problemas a través de nuevas tecnologías que no violen la esencia de la persona; y por último, el paisaje, comprendido como uno de los puntos más importantes

puesto que la arquitectura no debe ser invasiva en ningún momento. Los aspectos antes nombrados son considerados aspectos base para cualquier diseño en la arquitectura, en este caso en específico, son principios para generar un abanico de opciones de propuestas arquitectónicas.

4 Discusión y Resultados

Al finalizar la investigación teórica, se procede a vaciar los principales datos obtenidos con la finalidad de establecer los criterios arquitectónicos a tomar en cuenta; existirán tres grupos de criterios: los arquitectónicos (abarcando la parte social y características de índole constructivo), los de paisajismo y los tecnológicos de conjunto.

En primera instancia los arquitectónicos arrojan los siguientes criterios: viviendas de baja altura con la posibilidad de un mezzanina, que puedan ubicar tanto a nivel de la vía vehicular principal como un nivel por debajo; planta de forma rectangular (máximo 15 m. de largo y 5 m. de ancho) con presencia de desniveles internos para salvar el desnivel de la topografía; adaptabilidad al crecimiento y división del núcleo familiar; reinterpretación de la modulación existente en la vivienda típica andina; aprovechamiento de las características climáticas del sector a través de cámaras de calor. Otro aspecto importante, el diseño del mobiliario, el mismo debe multifuncional y con materiales resistentes, que procuren el mayor espacio para almacenar todo tipo de pertenencia.

Respecto a los criterios de paisajismo se establece: uso de senderos que se mimeticen con lo existente, terracedos de pequeña magnitud y el uso de flores típicas del sector.

Por último, en lo referente a lo tecnológico, se prioriza el uso de plantas de tratamiento, tanto potabilizadoras como de aguas grises y negras, en este caso se propone: Planta MICROCLAR AT50 (planta de tratamiento de aguas negras y grises residenciales), sistema desarrollado para tratar aguas negras y grises procedentes de todas las fuentes domésticas, incluyendo baños, lava-vajillas y lavadoras; la elevada calidad del agua tratada permite su reuso para una variedad de propósitos como riego o el lavado de carros. Integran el tratamiento biológico del agua con aireación así como la separación de las aguas tratadas de lodos.

Así como también el Filtro SPAWISY FC para las canales y bajantes de aguas pluviales; el AGUAFILT7, planta potabilizadora de agua; y el RUNI SCREW COMPACTOR SK 240, compactador y trituradora de desechos sólidos.

5 Conclusiones

Por la subdivisión existente en el grupo de investigadores al momento de comenzar el diseño arquitectónico de la vivienda, se obtienen seis (06) propuestas distintas, cada una de ellas toman como punto de partida los criterios antes nombrados; a continuación se indica el aspecto que resaltó cada propuesta:

Propuesta 1, integración de las áreas bajas cercanas a la vía

vehicular principal en el diseño de la vivienda.

Propuesta 2, énfasis en la creación de espacios que propicien la interacción entre los usuarios.

Propuesta 3, adaptabilidad en condiciones de terreno críticas: curva con mayor grado de cerramiento y doble pendiente.

Propuesta 4, accesibilidad y visuales.

Propuesta 5, aplicación de materiales comúnmente usados en la construcción de vivienda informal, como el zinc, en viviendas de interés social bajo la visión de un diseñador.

Propuesta 6, módulo FILIAR, prioriza el refrán “hágalo usted mismo”; espacio y mobiliario adaptable en poco tiempo.

Referencias

Rivera Heriberto, 2015, Mérida de los Tatuyes. Artículo digital, disponible en: <https://www.aporrea.org/regionales/a215262.html>. Fecha de consulta: 20 de Mayo del 2016.

Soluciones para Aguas, Filtros Colectores de Agua de Lluvia (página web), disponible en: <http://www.solucionesparaagua.com.mx/Productos/RecuperacionAguaLluvia.php>. Fecha de consulta: 20 de Mayo del 2016

Lobatón, Elimar: Bachiller en Ciencias (Mérida) 2010; Estudiante del 8vo semestre de Arquitectura. ULA. Correo electrónico: elobatond@gmail.com

Rodríguez, Jose: Claret 1972; Arquitecto UCV 1980; Maestría Diseño de Interiores Salamanca España 1997; Prof. de Taller de Diseño Arquitectónico FADULA.

Capítulo 81

Simulación de la distribución de temperaturas en la viruta producto del corte ortogonal en los metales

Peña, Mariano^{1*}; Méndez, María¹; Reinoza, Rigoberto¹.

¹Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes,
Mérida, Venezuela

*marianop@ula.ve

Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo, representar gráficamente la distribución de temperaturas en la viruta producto del corte ortogonal ideal en los metales. La metodología está fundamentada inicialmente en un estudio bibliográfico basado en una ecuación diferencial parcial de segundo grado que indica la distribución de la temperatura. Previa revisión documental, se encontró un modelo mejorado el cual determina los requerimientos necesarios para la elaboración del software. Se concluyó con el diseño de un software, que permite graficar la temperatura de la viruta de tal manera que se pueda conocer si los valores de este parámetro durante el proceso afectan o no la herramienta. Se busca mejorar, facilitar y asegurar el buen uso de las herramientas, para de esta manera disminuir los costos por daños causados por el calor generado y el consiguiente acabado superficial de la pieza, originado durante el maquinado.

ISBN: 978-980-11-1858-9



9 789801 118589

1 Introducción

En los procesos actuales de manufactura se requiere de acabados precisos con características superficiales específicas y tolerancias cada vez menores para las piezas mecanizadas, de acuerdo a estos requerimientos es necesario prestar atención a los distintos factores que intervienen en los procesos de fabricación de las piezas para garantizar sus características finales. Uno de estos factores es el calor generado por el contacto del material con la herramienta; conocer el comportamiento de la temperatura a lo largo del corte es de suma importancia, especialmente durante el mecanizado ya que todo ello tiene una relación muy estrecha con las características que debe presentar el acabado superficial de la pieza, principalmente porque a elevadas temperaturas ocurren cambios en la superficie del material (Tien-Chien y col 2001).

En estudios realizados por la División de Ingeniería Mecánica FIME-UANL México (López 2002), se ha determinado que en los procesos de corte, aproximadamente el 98% de la energía mecánica se transforma en energía térmica a través del cizallamiento y de la fricción entre la viruta y la cara de desprendimiento de la herramienta, aunque gran parte de esta energía es absorbida y luego retirada de la pieza por la viruta. El calor se acumula en lugares cercanos al punto de corte y a la cara de desprendimiento en contacto con la viruta. Ésta acumulación de energía provoca fenómenos no deseados en el proceso de mecanizado, como el desgaste de la herramienta y el acabado superficial inadecuado (Boothroyd 1988).

2 Marco Teórico

El presente trabajo se enfoca en el diseño de un Software que permita representar la distribución de temperaturas en la viruta y sobre la pieza trabajada (Dávila y col., 2005), viruta que es producto del proceso de mecanizado y el calor generado debido a un corte ortogonal ideal en los metales. Esta investigación está basada en el trabajo de Komanduri, Hou (Komanduri y col., 2001) sobre el modelado térmico del proceso de corte de metales, quien desarrolla una ecuación analítica de las temperaturas durante el mecanizado.

2.1. Limitaciones del estudio

La investigación consiste en la elaboración de un Software que grafique únicamente la distribución de la temperatura en la viruta a través de un corte ortogonal ideal, puesto que la gama de factores que intervienen para tal fin es muy amplia y variada, como son: la velocidad de corte, la variedad de herramientas que se pueden utilizar, la diversidad de materiales a mecanizar y otros aspectos del proceso. La inclusión de cada uno de los factores amerita de un lapso de tiempo para su desarrollo, siendo esta la principal limitación, debido a que las ecuaciones reales para cada caso son

complejas y su solución necesita de conocimientos avanzados y profundos del tema.

2.2 Modelo propuesto para el desarrollo del software en la transferencia de calor de un material en movimiento.

Un proceso transitorio de transferencia de calor en un material en movimiento, permite desarrollar una solución para un elemento diferencial por medio de un balance de energía obteniéndose la ecuación de calor (Incropera y col., 1999). A continuación, mediante la figura 1, se presenta un análisis de la transferencia de calor en un material en movimiento (Komanduri y col., 2000).

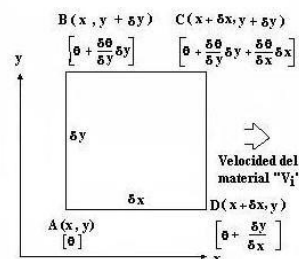


Fig. 1. Análisis térmico de un elemento diferencial de un material en movimiento. (Komanduri y col., 2000)

Considerando el elemento ABCD de espesor unitario, densidad " δ " y conductividad térmica " k ", a través del cual el material fluye en la dirección de " x " con velocidad " V_i ", el punto " A " tiene coordenadas " x " y " y ", se supone que el material en ese punto tiene una temperatura instantánea " θ ", las coordenadas y temperaturas de los puntos " B ", " C " y " D " se muestran en la figura 1.

El calor se transfiere por medio de los límites " AB " y " CD " por conducción a causa del gradiente de temperatura en la dirección " x " y por transporte a causa del flujo de material caliente a través de dichos límites. A través de " BC " y " AD ", el calor es transferido únicamente por conducción, porque no hay flujo de material entre dichos límites.

Si la fuente de calor es de potencia constante y no hay calentamiento dentro del elemento, el flujo neto de calor hacia el interior del elemento es igual a cero, así que se tendrá como consecuencia lo siguiente:

$$\begin{aligned}
 & -k \frac{\partial \theta}{\partial x} \delta y + V_i \rho \theta \delta y + \frac{V_i \rho}{2} \frac{\partial \theta}{\partial y} \delta y \delta y + k \frac{\partial \theta}{\partial x} \delta y \\
 & + k \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \delta x \delta y - V_i \rho \theta \delta y - V_i \rho \frac{\partial \theta}{\partial x} \delta x \delta y - \frac{V_i \rho}{2} \frac{\partial \theta}{\partial y} \delta y \delta y \\
 & + k \frac{\partial \theta}{\partial x} \delta x + k \frac{\partial \theta}{\partial y} \delta x + k \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \delta y \delta x = 0
 \end{aligned} \quad (1)$$

Simplificando y, debido a que los valores dentro de la ecuación se repiten pero con signo distinto, la ecuación se ve reducida a la siguiente expresión:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - \frac{V_i \rho}{k} \frac{\partial \theta}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

En lugar de usar un modelo simplificado que compense el flujo de calor que arrastra el material (Hahn 1951) tomó

una dirección totalmente nueva para el análisis de la fuente plana de calor en movimiento sin la necesidad de fraccionar el calor en elementos como el de la figura 1. Este utilizó un modelo de banda oblicua de calor en movimiento basado en la naturaleza real del proceso de formación de viruta. En el corte, la profundidad de la capa removida del material trabajado pasa continuamente a través de la fuente de calor ocasionando una considerable deformación plástica en la viruta. Por lo tanto, la fuente de calor puede ser considerada como una banda plana moviéndose en el material oblicuamente a la velocidad del corte.

La figura 2 muestra esquemáticamente la fuente de calor plana con movimiento oblicuo en un ángulo “β” con velocidad “V_i” en un medio infinito, esta fuente libera calor con una intensidad “q_l” y tiene una longitud igual a “2l”. El sistema de coordenadas tiene el eje “X” a lo largo de la longitud de la fuente de calor y el origen coincide con el punto medio de la misma. El objetivo de Hahn (Hahn 1951) fue determinar la temperatura del punto “M”, en cualquier instante de tiempo “t”, causado por una fuente plana de calor en movimiento oblicuo. La localización del punto “M” es expresada en el sistema de coordenadas del movimiento como se muestra en la figura 2 para un tiempo “t”.

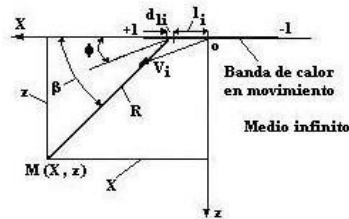


Fig. Error! No text of specified style in document.. Fuente de calor oblicua en movimiento modelo de Hahn (Hahn 1951)

Mediante este razonamiento, Hahn determinó que la temperatura en un punto cualquiera “M” debida al flujo de calor proveniente de un sólo elemento diferencial “dli” ubicado a una distancia “li” del punto, como muestra la figura 2, puede ser expresada como lo indica la siguiente ecuación:

$$\theta_M = \frac{q_l}{2\pi k} e^{(-XV_i/2a)} K_0(RV_i/2a) \quad (3)$$

Para lograr obtener la temperatura real del punto “M”, debida a todo el flujo de calor proveniente de la fuente plana de longitud “2l”, se suman los efectos de todos los elementos diferenciales “dli” mediante la integración sobre todo el segmento desde “l” hasta “-l”, de esto se deriva la siguiente expresión que será la base para los desarrollos de los modelos posteriores para los diferentes procesos de transferencia de calor:

$$\theta_M = \frac{q_l}{kV_i} \int_{X-l}^{X+l} e^{-V_i \left(\frac{X-l}{2a} \right)} K_0(RV_i/2a) dli \quad (4)$$

A continuación se describen los parámetros que intervienen en esta ecuación:

- a: Difusividad térmica.
- k: Conductividad térmica.
- Ecuación de Bessel de 3^{ra} Clase de orden cero para la solución de las ecuaciones diferenciales.
- K₀: Calor producido por el elemento diferencial “dli” en movimiento oblicuo.
- Distancia desde el elemento diferencial “dli” hasta el punto “M” como muestra la figura 2 y se determina de la siguiente forma
- q_l:

$$R = \sqrt{(X - l_i)^2 + z^2} \quad (5)$$
 - “X”,
 - “z”: Coordenadas del punto “M”.
 - l_i: Distancia desde el origen del elemento diferencial “dli”.
 - θ_M: Temperatura del punto “M”.

Es importante hacer notar que las coordenadas del eje “X” se representan con letra mayúscula para resaltar que es el eje de la variable de integración “l_i”.

2.3. Comprensión y Validación del modelo Komanduri-Hou.

En esta fase de programación se selecciona el programa Octave, un software para realizar cálculos matemáticos que satisface ampliamente los requerimientos, antes mencionados en las evaluaciones preliminares, y que posee internamente en su aplicación un lenguaje de programación interpretado que permite realizar guiones de cálculo, conocidos en inglés como scripts.

La fase de validación es subdividida a su vez en tres etapas que reproducen los pasos seguidos por Komanduri y Hou en el desarrollo de la ecuación general, es decir:

Comprensión y evaluación de la ecuación 3 y de la distribución de temperaturas debidas sólo al calor producido por la zona de deformación primaria, modelada como una fuente plana de generación de calor.

Comprensión y evaluación de la ecuación 4 y de la distribución de temperaturas debidas sólo al calor producido por la zona de deformación secundaria, modelada como una fuente plana rectangular de generación de calor.

Evaluación de la ecuación 14 del modelo unificado y comparación de la distribución de temperaturas debidas al efecto combinado de los calores generados en las zonas de deformación primaria y secundaria.

La validación se logra graficando la distribución de temperaturas debidas únicamente al calor perteneciente a la zona de deformación primaria; para ello se debe realizar un pequeño programa (o guión) con el software Octave, que resuelva la primera ecuación de Komanduri-Hou (Ecuación 4) para los mismos datos que ellos utilizaron, tratando de de-

limitar la complejidad a la zona de interés, y de esta manera obtener una base de comparación de resultados donde se pueda observar la variación de la temperatura a lo largo de la viruta y de la zona de deformación. Tal variación se muestra en la figura 3 con una gama de colores estándar para la mayoría de las aplicaciones existentes.

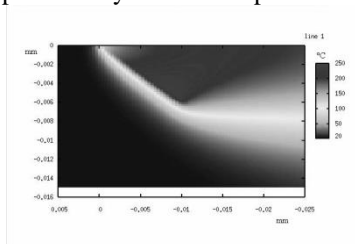


Fig. Error! No text of specified style in document.. Representación gráfica en Octave de la distribución de temperaturas debidas al calor de la zona principal (fuente propia).

La segunda etapa de la fase de validación se logra de manera similar a la primera, al graficar la distribución de temperaturas debidas, únicamente, al calor perteneciente a la zona de deformación secundaria (o zona de contacto), se realiza un pequeño programa (o guión) en el software Octave mediante el cual se puede resolver la segunda ecuación de Komanduri-Houcon los mismos datos que se utilizaron.

Al culminar esta fase ya se debe comprender parcialmente como será la tendencia de temperaturas debidas a las dos zonas generadoras de calor, como se muestra en la figura 4. Allí, se puede observar la variación de la temperatura a lo largo la zona de deformación secundaria (línea imaginaria que no se dibuja y que pasa verticalmente por el centro de la gráfica); posteriormente se continuará con la siguiente etapa.

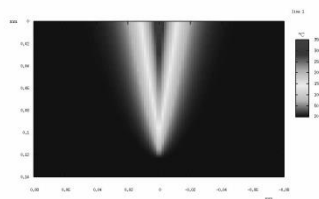


Fig. 4. Representación gráfica en Octave de la distribución de temperaturas debidas al calor de la zona secundaria (fuente propia) .

En la tercera etapa el objetivo fundamental es la obtención de la distribución de temperaturas debidas al efecto combinado del calor perteneciente a la zona de deformación primaria y del calor perteneciente a la zona de deformación secundaria (zona de contacto); al igual que en las etapas anteriores se realiza un pequeño programa (o guión) en el software de Octave, que resuelva la tercera ecuación de Komanduri-Hou, con los mismos datos que ellos utilizaron. Luego de graficar, se observa la variación de la temperatura para el sistema de colores seleccionado y se tiene una guía de referencia de cómo debe ser la gráfica para el software

ya que se representan ambas zonas de deformación como muestran la figura 5 y la figura 6

Nótese la diferencia de la calidad en la resolución de la figura 5 con respecto a la figura 6, en donde los datos empleados en ambos casos son similares pero el número de puntos es mayor en el segundo caso; esto conlleva a que el tiempo de cálculo sea mayor para la gráfica con mayor número de nodos o puntos de temperaturas calculados, e indica en este punto del estudio que existen factores independientes al cálculo en sí, que afectarán la representación gráfica en la aplicación y que además deben ser considerados otros métodos para agilizar el proceso y obtener los resultados en un tiempo de computo menor. También de este análisis se concluye que para que las gráficas aporten una información precisa y veraz, se requieren como mínimo 200 x 200 puntos de temperaturas calculados, sólo así podrá tenerse una resolución aceptable y por lo tanto se podrá observar mejor la distribución de las temperaturas reales que intervienen en el modelo.

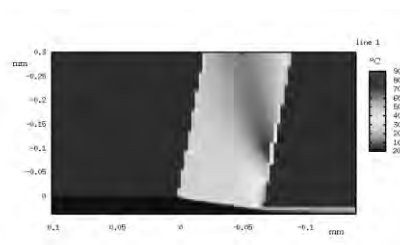


Fig. 5. Distribución de temperatura en las zonas principal y secundaria (85 puntos en "x" y 85 puntos "y") (Fuente propia).

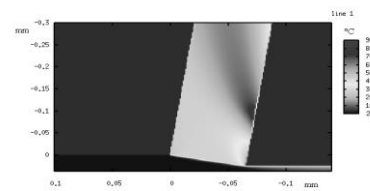


Fig. 6. Distribución de temperatura en las zonas principal y secundaria (250 puntos en "x" y 250 puntos "y") (Fuente propia).

Adicionalmente se puede ver que la variación del color producido por la diferencia de temperatura entre un nodo y otro no es perceptible, esto es debido a la pequeña diferencia de temperatura entre los nodos, lo que evita obtener una degradación representativa del color. Por tal motivo, fue necesario modificar en el programa la escala de color para conseguir una representación de la temperatura que aporte más información. Estos cambios hechos se pueden observar en las figuras 7, (a, b y c) que utilizan diferentes escalas de colores (degradación de grises) para representar la temperatura.

3 Procedimiento Experimental Cálculo de los valores iniciales.

El modelo propuesto en el marco teórico depende de parámetros del proceso de corte que no son medibles directamente, sino que se calculan a partir de otros, como lo son los calores generados por las zonas de deformación “*qpl*” y “*qpls*”, en virtud de esto, para programar la evaluación de la temperatura de cada punto, utilizando las ecuaciones del modelo, es necesario un conjunto de cálculos intermedios, como por ejemplo: el cálculo de la longitud de la zona de cizalladura, el ángulo de la zona de cizalladura, entre otros. Estos cálculos intermedios son programados en base a las ecuaciones tradicionales de la tecnología mecánica, dando al software la capacidad de calcular las siguientes expresiones (Boothroyd 1988):

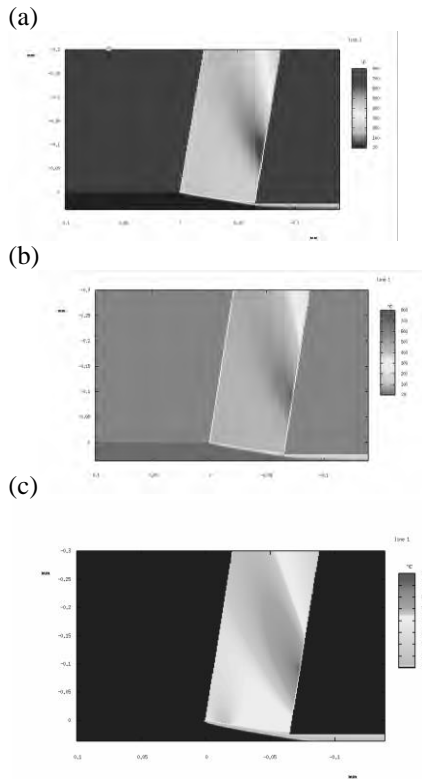


Fig. 7. Distribución de la temperatura en las zonas primaria y secundaria para diferentes escalas de colores a, b y c (250 puntos en “x” y 250 puntos “y”) (Fuente propia)..

Velocidad de salida de la viruta:

$$V = r_c * V_c \tag{6}$$

Fuerzas que actúan en la herramienta:

$$F = F_c \cos(\phi) + F_s \sin(\phi) \tag{7}$$

Ángulo de corte:

$$\phi = \arctan\left(\frac{F_s}{F_c}\right) \tag{8}$$

Espesor de viruta:

$$t_{ch} = \frac{h}{r_c} \tag{9}$$

Longitud de la zona de corte:

$$L = \frac{h}{\sin(\phi_i)} \tag{10}$$

$$L = \frac{t_{ch}}{\cos((\phi_i - \alpha))} \tag{11}$$

Calor por unidad de área generado en la zona de deformación secundaria:

$$q_{pl} = \frac{F_r * V_c}{100(L_c * w)} \tag{12}$$

Calor por unidad de longitud generado en la zona de deformación primaria:

$$q_{pls} = \frac{\left(\frac{F_c * V}{100 - F_r * \frac{V_c}{100}} \right)}{(L * w)} \tag{13}$$

1.1. Desarrollo de los cálculos de temperatura.

Ya definido el funcionamiento de la interfaz gráfica del usuario, se realiza dentro del programa la implementación del modelo de Komanduri-Hou a través de la ecuación 14.

$$\theta_M = \frac{q_{pl}}{\pi k} \left\{ (B_{viruta}) \int_{l=0}^L e^{-(X-l)/2a} [K_0(R_l V / 2a) + K_0(R_l V / 2a)] dl_i + \right. \\ \left. + \frac{q_{pls}}{2\pi k} \int_{w=0}^{t_{ch}/\cos(\phi-\alpha)} e^{-(X-X_i)/2a} \left\{ K_0 \left[\frac{V}{2a} \sqrt{(X-X_i)^2 + (z-z_i)^2} \right] + \right. \right. \\ \left. \left. + K_0 \left[\frac{V}{2a} \sqrt{(X-X_i)^2 + (z+z_i)^2} \right] \right\} dw_i \right. \tag{14}$$

Para realizar la gráfica es necesario evaluar la ecuación anterior en múltiples puntos o nodos, por lo tanto, se realiza un ciclo de decisión dentro del código. Como se determinó anteriormente, el número de nodos calculados influye en la velocidad del programa para mostrar resultados, debido a que dentro de la ecuación anterior hay que resolver numéricamente las integrales definidas y la ecuación de Bessel de 3ª clase y orden cero, con métodos iterativos ya que es una sucesión recursiva; por lo tanto, se tiene un límite máximo de puntos de acuerdo al computador utilizado y al tiempo disponible por el usuario, y esta cantidad también influye en la visualización de la data y en la veracidad de la información gráfica que interprete el usuario (Zill y col., 2002).

3.1. Aplicación desarrollada

A continuación se presenta una descripción de las capacidades y resultados obtenidos por la aplicación desarrollada, esta descripción hace un recorrido a través de las áreas que brindan información de los valores y gráficos obtenidos por el programa, dichas áreas se encuentran señaladas en las figuras 5,6 y 7 y son: Área de datos de la simulación, área de

parámetros de gráfico, área de datos del gráfico, área de representación gráfica.

3.2. Enfoque de las zonas de deformación.

Cuando en la gráfica existen puntos de muy alta temperatura separados una distancia relativamente grande de puntos de baja temperatura (que a su vez entre ellos tienen una pequeña distancia), la degradación representativa del color no se observa con un contraste adecuado que identifique la variación de la temperatura, dando como resultado un color muy similar en una sección grande e importante del modelo, esto es debido a que el sistema de asignación del color para las temperaturas toma en cuenta todo el conjunto completo. Para resolver tal dificultad y lograr que la representación de colores sea apreciable de forma evidente, la aplicación tiene tres modalidades de acercamiento que cambian las dimensiones del área a graficar de forma manual. La primera permite la visualización del conjunto completo (figura 10), la segunda representa un acercamiento a la zona de deformación primaria (figura 8) y la tercera muestra el acercamiento a la zona de deformación secundaria (figura 9).

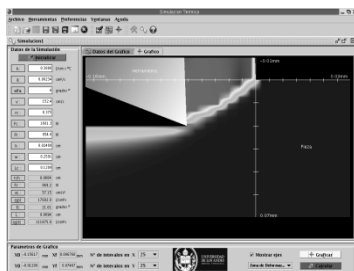


Fig. 8. Gráfica de la zona de deformación primaria (Fuente propia).



Fig. 9. Gráfica de la zona de deformación secundaria (Fuente propia).

4 Discusión y Resultados Análisis de los gráficos.

Al enseñar las características y funcionamiento del software se le da al usuario la habilidad de elaborar diferentes simulaciones de corte que permiten comparar las múltiples alternativas de mecanizado de una pieza; una de estas simulaciones es la que se trata de verificar en la figura 10 para establecer si la aplicación funciona correctamente, para ello, se usa como modelo la gráfica elaborada en Octave que se muestra en la figura 11 y las isotermas obtenidas (y verificadas con datos experimentales) por los investigadores Ko-

manduri y Hou en el desarrollo de su teoría mostrada en la figura 3. Estas tres figuras representan el mismo proceso de corte, modelado con la ecuación 14 para el Acero SAE B1113; los parámetros del corte son especificados en la tabla 1, y las diferencias visibles entre los tres gráficos se deben a factores como la resolución o número de puntos en el dibujo, la escala de colores utilizada y la orientación del gráfico.

Comparando los gráficos de las figuras 10 y 11, se observa que la variación de la temperatura representada como la degradación de colores (escala de grises), son temperaturas semejantes a las de las isotermas del modelo original figura 3, además, se puede ver tanto en la aplicación como en la validación en Octave que el área cercana a la zona de contacto de la viruta con la herramienta es donde se alcanza la temperatura máxima en el corte.

También de las gráficas se deduce que las temperaturas dependen mucho más del calor generado en la zona de deformación secundaria que del calor generado en la zona de deformación primaria, es decir la zona de contacto es la que más afecta al aumento de la temperatura debido al calentamiento por fricción.

Tabla N° 1 Valores usados en el modelo de Komanduri-Hou y en la aplicación desarrollada (Komanduri y col, 2001)

Variables	Valores	Unidades
a	0.08234	cm^2 / s
F_c	1681.3	N
f_i	21.01	Grados°
F_r	969.2	N
F_t	854.0	N
h	0.02489	cm
k	0.3888	$\text{J/cm s } ^\circ\text{C}$
L	0.0694	cm
L_c	0.1209	cm
q_{pl}	17682.0	$\text{J} / \text{cm}^2 \text{ s}$
q_{pls}	111675.0	$\text{J} / \text{cm}^2 \text{ s}$
r_c	0.375	
t_{ch}	0.0664	cm
V	57.15	cm / s^2
V_c	152.4	cm / s
w	0.2591	cm
α	4	Grados°

Es importante resaltar que en figura 10, la que muestra el gráfico de ambas zonas de deformación de acuerdo al software desarrollado, no presenta una escala de valores numéricos de temperatura, como lo presenta la figura 11, por lo tanto si el usuario desea realizar una comparación con el modelo de Komanduri-Hou, debe correr el software ya que por medio de este se obtiene una matriz "Área de los datos

del gráfico” que indica los valores numéricos que son representados en los diferentes colores obtenidos en la gráfica. Por otra parte, en la gráfica no se observan las curvas de las temperaturas cercanas a la zona de deformación, debidas al efecto del calor que se produce en las zonas de deformación primaria, aun así, se puede llegar a la conclusión de que el software utiliza correctamente la teoría de investigaciones Komanduri-Hou, y que esta discrepancia en las temperaturas, es aceptable, en primer lugar porque Java no es un lenguaje de programación para cálculos matemáticos propiamente y aunque ofrece librerías para éstos el error de tolerancia es mayor que para los programas de cálculo matemático como Octave, y en segundo lugar porque la degradación de los colores, no es sensible a este tipo de cambios.

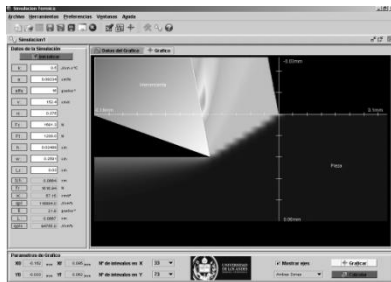


Fig. 10. Gráfica de ambas zona de deformación de acuerdo al programa desarrollado acero SAE B1113. (Fuente propia)

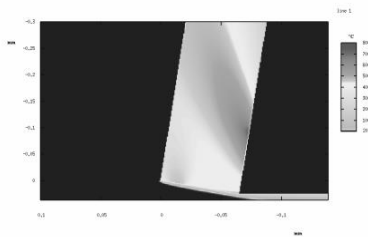


Fig. 11. Gráfica de ambas zona de deformación de acuerdo a las ecuaciones resueltas en Octaveacero SAE B1113.(Fuente propia)

5 Conclusiones

Uno de los modelos más actualizados en el análisis de temperaturas en la viruta y en la pieza de forma analítica es el modelo de Komanduri-Hou, en contraste con otros modelos. Permite realizar análisis de distribución de temperaturas en la viruta que arrojan indicios como es la misma en la cara de la herramienta de corte y así determinar el desgaste de la herramienta.

El software desarrollado sirve para representar gráficamente la distribución de la temperatura a lo largo de la viruta.

Tiene una interfaz gráfica interactiva que permite variar de manera continua los datos, reflejándose automáticamente los cambios en los cálculos y la representación gráfica.

La asignación de colores (mostrada como degradación de grises en este estudio) para la escala de las temperaturas debe ser variada en el rango cercano a la media, para lograr

obtener una degradación de color detallada en las curvas cercanas a la zona de deformación primaria.

Referencias

Boothroyd G, 1988, Fundamentos de Corte de Metales y de las Máquinas-Herramienta. Bogotá: McGraw-Hill Latinoamericana, S.A. pp. 352

Davila L, Rennola L, Montoya R, 2005, Programa multimedia para la enseñanza de la transferencia de calor, Revista Ciencia e Ingeniería, Vo. 26, N° 2, pp. 51-56

Incropera F, DeWitt D, 1999, Fundamentos de Transferencia de calor, México, Prentice Hall, pp. 886

Komanduri R, Hou Z, 2001, Thermal modeling of the metal cutting process Part II, International Journal of Mechanical Sciences, September, 43, pp. 57-88.

Komanduri R, Hou Z, 2000, Thermal modeling of the metal cutting process Part I, International Journal of Mechanical Sciences, September, 42, 1715-1752.

Komanduri R, Hou Z, 2001, Thermal modeling of the metal cutting process Part III, International Journal of Mechanical Sciences, September, 43, pp. 89-107.

López E, Ruiz M, 2002, Modelaje de la viruta en el proceso de maquinado 2ª Parte, Ingenierías, Vol 4, No. 14, pp. 36-41.

Tien-Chien J, Aloysius UA, 2001, Improved Transient Model of Tool Temperatures in Metal Cutting, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 123, pp. 30-37.

Zill D, Cullen M, 2002, Ecuaciones diferenciales con problemas de valores en la frontera. México: Thomson Editores, S.A. pp. 631.

Peña Sosa, Mariano: es Profesor Asociado a dedicación exclusiva, adscrito al Departamento de Tecnología y Diseño de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Los Andes, desde 1999, venezolano, egreso de la Universidad de Los Andes, Venezuela., con el título de Ingeniero Mecánico en 1994 y Magister Scientiarum en Ingeniería de Mantenimiento en 2004.

Méndez García, María Eliana: es Profesora en el escalafón de Asociado de la Facultad de Ingeniería ULA del Departamento de Química Industrial y Aplicada desde el año 1999. La Profesora Méndez tiene nacionalidad venezolana, egresó de la Universidad de Los Andes (Venezuela) con el Título de Ingeniero Químico en 1998 y con el grado de Magister Scientiarum en Electroquímica Fundamental y Aplicada en 2003. Correo electrónico: mendezme@ula.ve

Reinoza Contreras, Rigoberto: es Profesor Titular Jubilado adscrito al Departamento de Tecnología y Diseño de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Los Andes, desde 1974, venezolano, egreso de la Universidad de Los Andes, Venezuela., con el título de Ingeniero Mecánico en 1974 y Doctor. Correo electrónico: reinoza@ula.ve

Crecimiento de lemna oscura en el Lago de Maracaibo en función de los niveles de fósforo y nitrógeno

Morillo, Gustavo^{1*}; Pineda, Angel²; Aldana, Gerardo¹; Angulo, Nancy¹; Araujo, Ismenia¹; Melo, Penelope¹

¹Centro de investigación del Agua, Facultad de Ingeniería.

Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela.

²Universidad del Zulia.

* gmorillo@fing.luz.edu.ve

Resumen

Los problemas de contaminación han generado manifestaciones graves de eutrofización, reflejadas, en el caso del Lago de Maracaibo en afloramientos microalgales durante las últimas décadas del siglo XX, y recientemente la aparición de Lemna oscura, que ha llegado a cubrir superficies de hasta 20% del espejo de agua, por lo que se hace necesario establecer mecanismos de predicción de la aparición de las manifestaciones de productividad primaria en el Lago de Maracaibo. El estudio consistió en la selección de tres zonas de alta productividad primaria (Barranquitas, Lagunillas y Santa Rita); se colectaron muestras de agua y plantas de las tres zonas y se analizaron los parámetros físicoquímicos: Fósforo total, nitrógeno total, ortofosfato, conductividad eléctrica, pH y contenido de pigmentos (clorofila a) en plantas de Lemna oscura. Se realizaron correlaciones entre los niveles de N y P, conductividad y pH versus contenidos de clorofila a, con la finalidad de establecer ecuaciones que describan el desarrollo de Lemna oscura en el Lago de Maracaibo. Los resultados obtenidos corroboran que las zonas de Santa Rita y Lagunillas, presentan una alta tasa de crecimiento para Lemna oscura, con valores promedio en clorofila a de 11,179 µg/L y 12,216 µg/L respectivamente; siendo el fósforo total el nutriente limitante; se establecieron correlaciones de concentración de clorofila a en función al fósforo total para Santa Rita igual a $Y=164,32e^{1,0599x}$, y un $r^2=0,97$, para Lagunillas $Y=9081,8X^2-16466X+8439$, y un $r^2=0,8454$, y para Barranquitas, $Y=270,21e^{1,414X}$, y un $r^2=0,93$. La conductividad eléctrica presentó un valor de r^2 igual a 0,99 en lagunillas y 0,93 en Santa Rita, lo que parece estar asociado a la sensibilidad de Lemna de crecer en zonas con altas concentraciones salinas.

ISBN: 978-980-11-1858-9



9 789801 118589

1 Introducción

El Lago de Maracaibo se encuentra al noroeste de Venezuela; entre los 70°30' y 73°24' Longitud oeste y los 8°22' y 11°51' Latitud Norte, cuenta con una superficie aproximada de 12000 Km², una profundidad promedio de 25 m, y una máxima de 32 m en su zona central, su régimen caudal está conformado por 135 ríos que escurren a él. El Lago tiene un volumen acumulado de 224000 m³ de agua, formada por una mezcla de 97% de agua dulce y un 3% aproximadamente de agua de mar. (Hernan1997).

Hidrodinamicamente el sistema Lago de Maracaibo está conformado por cuatro cuerpos de aguas diferenciados, pero íntimamente ligados entre sí: El Lago de Maracaibo, el estrecho de Maracaibo, la bahía del Tablazo y el golfo de Venezuela. (Rodríguez2001)

Las aguas del Lago de Maracaibo, han sufrido cambios en su composición física y química como producto de las actividades antrópicas desde la época colonial, cuando los desechos de centros poblados en crecimiento como Maracaibo, Andes venezolanos y Norte de Santander en Colombia se descargaban a ríos afluentes o al Lago directamente, creando un problema de contaminación, que se fue incrementando desde 1938, con el aumento de la población en la cuenca. Desde esa fecha se acentuó la intervención del hombre sobre el sistema debido a las actividades de explotación petrolera. A partir de 1956 se produjo un incremento en la concentración salina (Hernan 1997) originado en gran parte por la construcción y continuo dragado del canal de navegación. Estas variables están unidas generando la eutrofización del Lago, que consiste en la acumulación de nutrientes y de biomasa en su cuerpo de agua (Rodríguez 2001); material que al descomponerse se depositan en el fondo del Lago. Entre estos nutrientes el nitrógeno y el fósforo juegan un rol importante en la eutrofización, ambos nutrientes son extensamente reconocidos como serios problemas internacionales del medio ambiente. (Wetzel 1981, Broca y col., 2005).

Ya para los años setenta del siglo XX era común observar a orillas del Lago mantos de color verde que correspondían a intensos afloramientos microalgales, reflejo del proceso de eutrofización. Se ha establecido una relación directa entre el contenido de nutrientes, en particular nitrógeno y fósforo, producto de las descargas de agua domésticas, de los ríos y de la lluvia, y la concentración de microalgas. Existen diferencias entre los géneros de microalgas en cuanto a sus necesidades nutricionales y en cuanto a su halotolerancia.

En el 2004, se presentó un desarrollo masivo de poblaciones de plantas acuáticas de la especie de *Lemna* sp que cubrió extensiones considerables del espejo de agua del Lago de Maracaibo, al extremo que podía visualizarse fácilmente-

mediante las imágenes de satélite (Medina y col 2006). La especie fue identificada como *Lemna obscura*. (Parra y col., 2005) Dado que la *Lemna obscura* es una especie flotante y de buen crecimiento, pueden cubrir rápidamente la superficie de los cuerpos de agua donde se encuentre (Landolt y col., 1987)

Estos problemas de contaminación, aunado a otros, son de vital relevancia para el desarrollo de las diferentes actividades socioculturales en la región, por lo que se hace necesario, aparte de establecer medidas de control y remediación de esta problemática, determinar la dinámica de crecimiento de estas especies vegetales, con lo que se establecerían medidas de control y tratamiento más eficientes.

Con esta investigación se pretende determinar si niveles de nitrógeno, fósforo, conductividad y pH representan un factor activador o inhibidor en la aparición de *Lemna obscura*, para así determinar la cinética de crecimiento de esta planta con respecto a ciertos parámetros ambientales.

2 Metodología.

Área de Estudio:

La investigación se realizó en zonas ubicadas en el Sistema del Lago de Maracaibo durante la estación seca y húmeda; en la costa oriental del Lago, zona de Lagunillas; en el estrecho del Lago, en Santa Rita, y en la costa occidental, en la zona de Barranquitas (Gráfica 1). Los criterios utilizados para la selección de estos sitios fueron, presencia de productividad primaria, evaluar el crecimiento en las zonas occidental y costa oriental del Lago de Maracaibo donde se ha comprobado existe acumulación de masas de estas plantas en las épocas de crecimiento. En cada estación, se georeferenció la zona con ayuda de un GPS, se tomaron muestras de 1 L por triplicado y fueron transportadas al Centro de Investigación del Agua (CIA) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Zulia. En el CIA se procedió a realizar las siguientes mediciones: clorofila *a*, conductividad, nitrógeno total, fósforo total y pH del agua. Los análisis se realizarán siguiendo la metodología del APHA (1992). (Tabla 1).

Análisis Estadístico.

Se Establecieron comparaciones entre los elementos evaluados pH, Conductividad, Nitrógeno total y fósforo total versus el contenido de clorofila *a* en los tres sitios de muestreo y para las cuatro evaluaciones realizadas en el tiempo, se calcularon correlaciones estadísticas y se establecieron ecuaciones que relacionan el valor de clorofila *a* en función al elemento evaluado; las ecuaciones establecidas fueron lineal, cuadrática, exponencial y logarítmica. Para cada ecuación se determinó el nivel de correlación (r^2) y en fun-

ción a su valor (cercanía a la unidad) se interpretó como significativo o no, para establecer así existe influencia entre los valores de elementos evaluados versus el contenido de pigmentos (clorofila *a*).

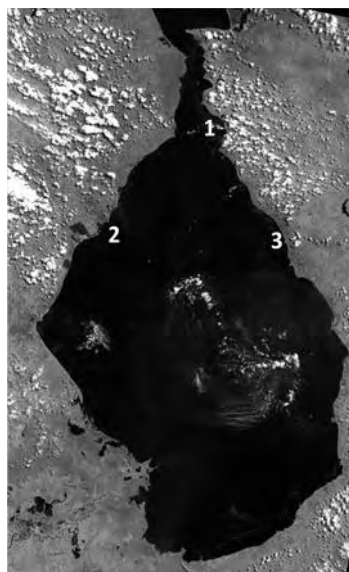


Fig. 1. Lago de Maracaibo con puntos de muestreo: 1. Santa Rita. 2: Barranquitas. 3: Lagunillas

Tabla 1. Métodos de análisis para los parámetros físicos, químicos y microbiológicos (APHA y col., 2005)

Parámetro	Método	Código
pH	Potenciométrico	APHA 4500-H
Conductividad	Potenciométrico	APHA-2520
Nitrógeno total	Método volumétrico	SM 4500-NH3 –E
Fósforo total (P-Total)	Método colorimétrico	SM 4500-P-C
Pigmentos	Espectrómetro	Stricklan y Parson (1963)

3 Resultados y Discusión

La dinámica de crecimiento del fitoplancton del Lago de Maracaibo se halla determinado por varios factores de tipo ambiental, tales como temperatura de las aguas, radiación solar, pH, condiciones de vientos; entre otros. En la presente investigación se estudió específicamente la influencia de la concentración de nutrientes en el agua como nitrógeno, fósforo y sales.

Caracterización del agua del Lago de Maracaibo Clorofila *a*

La grafica 2 muestra la influencia de la zona de muestreo en la producción de clorofila *a*; se observa que en Lagunillas y en Barranquitas la mayor concentración de pigmentos, lo que se explica ya que el agua de estas zonas presenta menores valores de salinidad (Tabla 4) que la presentada en Santa Rita y mayores niveles de nutrientes (Tablas 6 y 8) suficientes para la actividad celular y por ende producción de clorofila *a* (Vera y col. 2010). Según (Lau y col 1995) el contenido de pigmentos se encuentra directamente relacionado con el nivel de densidad celular, ya que los pigmentos son un indicador directo de la productividad.

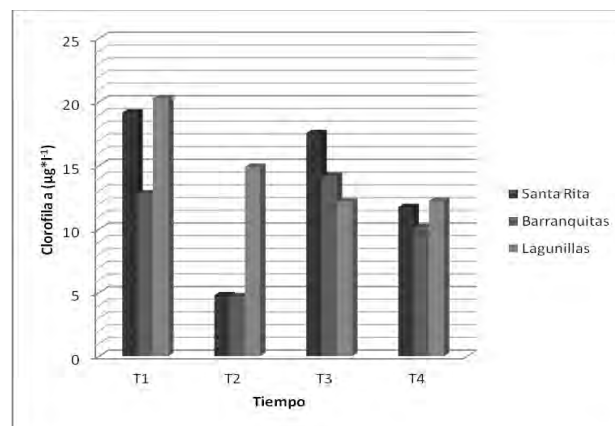


Fig. 2. Clorofila *a* en los diferentes sitios de muestreo

pH

La tabla 2 presenta los resultados para los valores de pH, durante los cuatro muestreos, en los tres sitios de evaluación.

Tabla 2. Valores de pH en los sitios de muestreo.

Santa Rita	Barranquitas	Lagunillas
7,51	8,07	7,51
8,54	8,58	7,47
10,61	8,60	9,62
7,28	9,43	8,32

Los valores de pH entre los tres sitios de muestreo y en los cuatro tiempos de evaluación se presentan bastante similares, no existiendo diferencias apreciables.

Estableciendo las ecuaciones y correlaciones entre los valores de pH y concentración de clorofila *a* (Tabla 3), se puede observar que no existe una influencia del valor del pH sobre la productividad de clorofila *a*, esto es que dado los valores del r^2 para las diferentes ecuaciones establecidas en los dife-

rentes sitios de muestreo, ninguna presenta un índice de correlación lo suficientemente alto.

Tabla 3. Ecuaciones de correlación entre el pH y Clorofila *a* para los diferentes sitios de muestreo.

	Ecuación	R ²
Santa Rita	$y = 2,138x^2 - 11,643x + 26,369$	0,1793
	$y = -0,953x + 1,5679$	0,0357
	$y = 12,227e^{-0,017x}$	0,0012
	$y = -3,164\ln(x) + 15,81$	0,0852
Barranquitas	$y = 5,0801x^2 - 90,716x + 413,89$	0,1314
	$y = -1,4646x + 23,152$	0,0389
	$y = 22,962e^{-0,1x}$	0,0128
	$y = -133,5\ln(x) + 39,259$	0,042
Lagunillas	$y = 2,7033x^2 - 48,759x + 231,01$	0,6195
	$y = -2,5998x + 36,279$	0,4719
	$y = 59,624e^{-0,171x}$	0,5159
	$y = -22,45\ln(x) + 62,081$	0,4883

Las investigaciones realizadas muestran que en un rango de pH de 3,5 a 10,4 las *Lemnáceas* pueden crecer en el campo (Landolt 1986, Landolt y col., 1987). Otros estudios reportan valores de pH entre 3,5 y 10, para el crecimiento de *Lemnaminoren* condiciones naturales (Landolty col., 1987) y entre 5 y 9 para todas las *Lemnáceas* (Lengy col., 1995). Estos valores corresponden con los obtenidos en este trabajo ya que el rango de pH para los ensayos se encontró entre 7,28 a 10,61.

Conductividad.

La conductividad eléctrica, al ser una medida de la capacidad de los iones disueltos en los cuerpos de agua de transmitir cargas eléctricas, es una estimación bastante fiable del nivel de salinidad presente; así la tabla 4, muestra los valores de conductividad eléctrica para los tres sitios de muestreo.

Tabla 4. Valores de conductividad en mS/m para los diferentes sitios de muestreo

Santa Rita	Barranquitas	Lagunillas
3,57	3,57	3,47
3,25	3,22	3,06
3,43	2,53	2,87
3,74	2,21	2,02

La concentración de sales inorgánicas disueltas, tanto en las aguas dulces como marinas, puede potencialmente afectar el crecimiento de las microalgas y de *Lemna obscura* en función de su actividad osmótica. La tolerancia a la sal varía según las especies, algunas sólo pueden tolerar concentraciones minimolares de sal, mientras que otras sobreviven en soluciones saturadas. Lo que supone un estrés salino letal para un grupo es fácilmente tolerado por otro grupo. (Abalde y col., 1995; Ramírez 2004).

La conductividad tuvo un valor de 2,02 a 3,74; observándose los menores valores de conductividad en la zona de Lagunillas, y los mayores valores de conductividad se localizaron en la zona de Santa Rita, de manera similar a los reportados por Barboza y col (2007). En ambas localidades una ecuación de segundo grado presenta altas correlaciones para explicar la concentración de clorofila *a* (Tabla 5) en las dos zonas; para Santa Rita los altos valores de conductividad parecen influenciar negativamente la concentración de clorofila (R²=0,93), mientras que en la zona de Lagunillas, los bajos valores de conductividad parecen influenciar en un aumento en la concentración de clorofila *a* (r²=0,99). Los ensayos de laboratorio, han demostrado que *Lemna obscura*, recolectada en el Lago de Maracaibo, puede reproducirse a la misma tasa a salinidades de 0, 2, 4 y 7%; a valores de 10% la planta reduce su tasa de reproducción, mientras que a 15% no se reproduce pero permanece viva (García y col., 2004, Arroyave 2004, Morales y col., 2005).

Tabla 5. Ecuaciones de correlación entre la conductividad en mS/m y clorofila *a* para los sitios de muestreo

	Ecuación	R ²
Santa Rita	$y = 0,61901x + 11,512$	0,0035
	$y = 13,587x^2 - 77,871x + 120,93$	0,1741
	$y = 15,266e^{-0,092x}$	0,0081
	$y = 1,2215\ln(x) + 12,025$	0,0017
Barranquitas	$y = 9,7006x - 23,479$	0,2334
	$y = -110,49x^2 + 781,87x - 1368,9$	0,9304
	$y = 0,068267e^{1,4153x}$	0,3494
	$y = 35,105\ln(x) - 33,458$	0,2513
Lagunillas	$y = 4,9215x + 0,82918$	0,6218
	$y = 8,6572x^2 - 41,886x + 61,47$	0,9909
	$y = 5,9204e^{0,3149x}$	0,6403
	$y = 12,167\ln(x) + 2,3495$	0,5476

Con respecto a la salinidad y el desarrollo de *Lemna obscura* y otras microalgas, variados estudios han encontrado diferencias significativas entre los valores de la zona del estrecho y la zona sur del Lago. La salinidad alta del estrecho se relaciona con la entrada de agua salada proveniente del

Golfo de Venezuela por efecto de la marea, mientras que los valores bajos en Lagunillas, se deben al aporte de agua dulce de los ríos de la zona sur del Lago que llegan a esa zona debido al movimiento de las corrientes en sentido contrario a las agujas de reloj. (Barboza y col., 2007; Gonzáles y col., 2004).

Nitrógeno Total

La Tabla 6, muestra los valores de nitrógeno total en las tres zonas de muestreo, durante los cuatro ensayos; se observa que la zona de barranquitas presenta en todo momento los valores más altos de nitrógeno total.

Tabla 6. Valores de nitrógeno total en ppm para los sitios de muestreo.

Santa Rita	Barranquitas	Lagunillas
0,36	0,76	0,34
0,31	0,95	0,35
1,05	1,15	1,05
0,97	1,01	1,07

Parra y col., (2005) y Rodriguez (2001), afirman que, en el Lago de Maracaibo, el nitrógeno se mantiene en concentraciones relativamente bajas, siendo la relación nitrógeno/fósforo inferior a 5 en el epilimnio y alrededor de 5 con valores medios ocasionales de 15 en el hipolimnio por esta razón el nitrógeno es el factor limitante en la mayor parte del Lago.

Sin embargo la tabla 7, presenta las diferentes correlaciones establecidas entre los valores de nitrógeno y clorofila *a*, y en ningún caso se muestra un valor de r^2 que indique una influencia significativa de este macronutriente sobre la productividad de clorofila *a*, a excepción de Barranquitas, donde una ecuación cuadrática muestra una cierta influencia del nitrógeno total en la producción del pigmento.

Estos resultados contrastan igualmente con lo obtenido por Troncone y col., (2005). En estudios realizados sobre la calidad del agua en el Lago de Maracaibo, donde se obtuvieron correlaciones positivas estadísticamente entre concentraciones de nitrógeno total y cobertura de *Lemna*. No se obtuvieron correlaciones estadísticamente significativas entre cobertura de *Lemna* nitrógeno amoniacal, ni entre cobertura de *Lemna* Fósforo Total. Estos resultados sugieren que el desarrollo de *Lemna* en el Lago de Maracaibo, depende principalmente de las concentraciones de Nitrógeno Total y Nitratos en el epilimnion, disponibles por la degradación de la estratificación. Por otra parte investigaciones como Barboza y col (2007), no encontraron influencia del valor de nitrógeno en crecimiento de *Lemna obscura*, tal como se muestra en la presente investigación.

Rivas y col., (2009), y Mosquera y col., (2001), encontraron que para el caso del Lago de Maracaibo, la relación N/P se ha incrementado a partir de los años 1996-1998. Este incremento obedece principalmente al incremento en la concentración de nitrógeno y en la mayoría de las mediciones hubo disminución de la concentración de fósforo. El incremento en la concentración de nitrógeno puede deberse a diferentes factores, tales como la extensión de la frontera agrícola, la deforestación y la pérdida de cobertura vegetal de los suelos, mientras que la disminución de fósforo se debe a su fijación por reacciones químicas a los suelos.

Tabla 7. Ecuaciones de correlación entre nitrógeno y clorofila *a* para los sitios de muestreo.

	Ecuación	R ²
Santa Rita	$y = -4,4077x + 17,559$	0,012
	$y = 282,54x^2 - 541,21x + 266,89$	0,8449
	$y = 13,464e^{-0,144x}$	0,0014
	$y = -6,448\ln(x) + 13,01$	0,0293
Barranquitas	$y = 5,8093x + 6,5457$	0,2952
	$y = -17,439x^2 + 29,339x + 0,6144$	0,3069
	$y = 5,9252e^{0,724x}$	0,3224
	$y = 3,6763\ln(x) + 12,451$	0,3177
Lagunillas	$y = -7,6085x + 20,225$	0,6754
	$y = 131,75x^2 - 192,58x + 68,371$	0,7383
	$y = 20,663e^{-0,5x}$	0,7325
	$y = -4,872\ln(x) + 12,431$	0,6835

Fósforo:

La Tabla 8, muestra los valores de fósforo total en las tres zonas de muestreo, durante los cuatro ensayos; se observa las mayores concentraciones de este elemento en la zona de Barranquitas.

Tabla 8. Valores de fósforo total en ppm para los sitios de muestreo.

Santa Rita	Barranquitas	Lagunillas
1,21	2,20	0,59
0,43	1,02	0,63
1,06	2,34	1,07
0,90	1,85	0,76

Estos valores se corresponden a los reportados por Barboza y col (2007) y Nuñez y col (2005), y a datos reportados por el Instituto para la Conservación de la Cuenca del lago de Maracaibo (ICLAM 2004). Las mediciones realizadas por el Instituto para la Conservación de la Cuenca del Lago de

Maracaibo (ICLAM), durante el primer semestre del año 2004 reportan en los ríos Catatumbo y Santa Ana concentraciones de ortofosfatos de 0,05 mg/L y 0,21 mg/L respectivamente, las cuales son superiores a los valores promedios (0,03 mg/L y 0,05 mg/L en estos mismos cuerpos de agua respectivamente) de más de 10 años de registro que tiene dicha institución en su base de datos en épocas de lluvia.

En la tabla 9 se presentan las diferentes ecuaciones desarrolladas para las correlaciones entre los niveles de fósforo y la concentración de clorofila *a* en los tres sitios de muestreo.

Tabla 9. Ecuaciones de correlación entre fósforo total y clorofila *a* para los sitios de muestreo

	Ecuación	R ²
Santa Rita	$y = 10,647x - 6,431$	0,9354
	$y = 2,588x^2 + 20,931x - 0,14667$	0,9411
	$y = 164,32e^{1,0599x}$	0,9764
	$y = 16,425\ln(x) + 3,9565$	0,913
Barranquitas	$y = 11,685x - 0,058456$	0,8986
	$y = -854,36x^2 + 2530,5x - 465,74$	0,92
	$y = 270,21e^{1,4141x}$	0,9255
	$y = 8,6015\ln(x) + 11,972$	0,9145
Lagunillas	$y = -12,316x + 24,281$	0,4981
	$y = 9081,8x^2 - 16466x + 8439$	0,8454
	$y = 26,892e^{-0,805x}$	0,5354
	$y = -10,63\ln(x) + 11,707$	0,5599

La ecuación cuadrática, presenta para las tres zonas de estudio las correlaciones más altas presentadas, por lo que se presume que en el caso de *Lemna obscura*, es el fósforo el elemento determinante en el crecimiento de esta especie.

La concentración de fosforo reportada en esta investigación fue de $0,82 \pm 0,25$ mg/l. Rodríguez (2001), afirma que, en cuanto al fósforo, los valores a veces son bajos e incluso pueden ser trazas, este elemento aumenta con la profundidad; y el fósforo total está en mayor concentración que el ortofosfato, con promedio de 51 mg/l. En el epilimnio, la concentración en el fósforo reactivo es moderada, típicamente 0,1 mg/l de PO₄ y el intercambio en la interfase entre el agua intersticial y la columna de agua produce altas concentraciones en la base del cono hipolimnetico, típicamente de 0,4 a 0,6 mg/l de PO₄. (Vera y col., 2016).

4 Conclusiones

Los contenidos de nutrientes existentes en el agua de la zona centro oriental del Lago de Maracaibo se encuen-

tran en concentraciones suficientes para propiciar el crecimientos de poblaciones de *Lemna obscura*.

➤ La mayor concentración de clorofila *a* se encuentra asociado a la zona de Lagunillas, en la costa oriental del lago, por lo que se presume que esta región es una zona de alta productividad primaria.

➤ La alta productividad primaria en la zona de Lagunillas, parece estar asociada a altos niveles de macronutrientes como nitrógeno y fósforo y bajos tenores de salinidad.

➤ El elemento fósforo parece ser el macronutriente limitante en el crecimiento de *Lemna obscura* en el Lago de Maracaibo

➤ El aumento en la concentración de sales afecta negativamente el crecimiento del *Lemna obscura* en la zona de estudio.

➤ Existen diferencias en cuanto a la sensibilidad en la concentración de sales y nutrientes entre los diferentes géneros de *Lemna obscura* de la zona de estudio; así el grupo de Santa Rita presentó disminución evidente al aumentarse las concentraciones de cloruros

➤ Aunque la adición de sales resultó en detrimento de la población de algas, esta disminución se veía atenuada cuando los tratamientos presentaban mayor concentración de elementos nutritivos.

➤ La ecuación que mejor describe la concentración de clorofila *a* en función al elemento fósforo parece ser de tipo exponencial para los tres sitios de muestreo, con índices de correlación que van desde 0,84 a 0,94.

Referencias

- Abalde JA, Cid P, Fidalgo E, Torres, Herrero C, 1995, Microalgas: Cultivos y Aplicaciones. Monografía N° 26. Laboratorio de Microbiología, Facultad de Ciencias, Universidad de Coruña, pp. 210.
- American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), Water Environment Federation (WEF), 2005, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21th Edition, American Public Health Association 1015 Fifteenth street, N.W. Washington, D.C. USA.
- Arroyave M, 2004, La Lenteja de Agua (*LemnaminorL*): Una planta acuática promisoría. Informe de la Escuela de Ingeniería de Antioquía, Medellín, Colombia, 15 pp.
- Barboza F, Herrera L, Sanchez J, Morillo GY, Trujillo G, 2007, Crecimiento de *Lemna Obscura* (Austin) Daubs en el Sistema del Lago de Maracaibo Universidad del Zulia. Maracaibo. Venezuela Volumen 42, NO. 1, 2008, PP. 93–110.

- Broca T, Madigan M, 2005, Microbiología. Sexta edición. Prentice Hall Hispanoamérica, S.A. México, p 508-510.
- Cordoba Y, López E, 1989, Evaluación a escala piloto de la capacidad del *Eichhorniacrassipes* (Mart) Soln. y *Lemnaminor* Para la remoción de nutrientes en aguas residuales de origen domésticos en condiciones tropicales". Universidad Central de Venezuela. Caracas. Venezuela.
- García YN, Soto L, Shuhaibar I, Parra J, Parra A, Ferrer Y A, Semprún, 2004, Efecto de la salinidad sobre la reproducción de *Lemnasp*, bajo condiciones de laboratorio. Memorias X Jornadas Nacionales de Investigación Científica, Facultad Experimental de Ciencias, Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela, 65 pp.
- González E, Gordon E, 2004, *Lemna* en el Lago de Maracaibo. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ciencias. Trabajo Especial de Grado. Caraca, Venezuela.
- Herman S, 1997, Proceso de salinización en el Lago de Maracaibo. Instituto para la conservación de la cuenca del Lago de Maracaibo. ICLAM. P. 1-92.
- ICLAM Instituto para la conservación del lago de Maracaibo, 2004, Biología y ecología del genero *Lemna*.
- Landolt E, 1986, The family of Lemnaceae – a monography study (vol. 1). Veroff Geobot. Inst. ETH, Stiftung Rubel, Zurich. Volumen 2: 139–167.
- Landolt EY, Kandeler R, 1987, Biosystematics investigation in the family of duckweeds (Lemnaceae). The family of the Lemnaceae: a monographic study. Vol. 2. Veroff. Geobot. Inst. ETH, Zurich.
- Lau PS, TamNF, Wong YS, 1995, Effect of Algal Density on Nutrient Removal from Primary Settled Wastewater. Environmental Pollution 89: 59-66.
- Leng RA, Stambolie JH, Bell R, 1995, Duckweed - a potential high-protein feed resource for domestic animals and fish. Livestock Research for Rural Development. Volume 7, Article #5. Retrieved September 13, 2016, from <http://www.lrrd.org/lrrd7/1/3.htm>.
- Medina EF, Barboza M, Francisco YJ, Sánchez, 2006, Biomasa y composición mineral de comunidades de *Lemna obscura* (Austin) Daubs en el Lago de Maracaibo. Ciencia 14 (Número Especial): 32–41.
- Morales E, Morales N, Briceño B, Andrade C, 2005, Factores ambientales reguladores del crecimiento de *Lemna obscura*. Departamento de Biología, Facultad Experimental de Ciencias, La Universidad del Zulia.
- Mosquera M, Schiess G, Vargas E, 2001, Efecto de *Lemnaminor* en el tratamiento de aguas residuales en lagunas de estabilización. Tesis Especial de Grado, Maracaibo, Universidad del Zulia, Facultad de Ingeniería. Pp 110.
- Núñez M, Cárdenas C, Ramírez Y, Rincón S, Morales E, 2005, Remoción de nutrientes a través de sistemas de tratamientos con plantas acuáticas. Centro de Investigación del Agua, Facultad. De Ingeniería. Dpto. de Biología, Facultad. Experimental de Ciencias, LUZ, Maracaibo, Venezuela.
- Parra, Pírela, 2005, Determinación de nitrógeno y fósforo en muestras recolectadas de agua sedimentos y *Lemna obscura*. Instituto para el control y la conservación del Lago de
- Ramírez A, 2004, Lenteja de agua, *Lemna* en el lago de Maracaibo. PlaniGestion; C.A.
- Rivas Z, Márquez R, Troncone F, Sánchez J, Colina M, Hernández P, 2005, Contribución de principales ríos tributarios a la contaminación y eutrofización del Lago de Maracaibo. Ciencia 13(1), p68-77.
- Rodríguez G, 2001, El Lago de Maracaibo como cuenca anaeróbica natural: uso de líneas base históricas en estudios de impacto ambiental. Interciencia. Vol. 26(10) p450-456.ç
- Troncone F., Ochoa E., Marquez R, 2005, Estudios de la calidad del agua en relación al crecimiento masivo de *Lemna obscura*. Memorias del congreso ICLAM. Maracaibo. Venezuela.
- Vera Alexandra, Andrade Charity, FloresEddymar, Núñez Marisel, CárdenasCarmen, MoralesEver, 2010, Remoción de nutrientes y materia orgánica en un humedal construido en función del desarrollo de la macrófita *Typhadominguensis* Pers. Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia, 33(2), 153-163.
- Wetzel R, 1981, Limnología. Ediciones Omega, S. A Barcelona (España), p. 679-682.
- Morillo Díaz, Gustavo:** Ingeniero Agrónomo (LUZ), Magister en Ingeniería Ambiental (LUZ). Profesor Titular del centro de Investigación del Agua (LUZ).
- Pineda, Angel:** Agrimensor (LUZ) Ingeniero Geodesta (LUZ) . Auxiliar de Investigación en el Centro de Investigación del Agua de LUZ. Correo electrónico: doubtangel@gmail.com.
- Aldana, Gerardo:** Ingeniero Civil (LUZ). Magister en Ingeniería Ambiental (LUZ) PhD in Environmental Engineering (University of Surrey). Profesor Titular del Centro de Investigación del Agua de LUZ. LUZ. Correo electrónico: Gerardoaldana_21@hotmail.com.
- Angulo, Nancy:** Licenciada en Biología (LUZ). Magister en Microbiología (LUZ), Doctora en Ingeniería Ambiental (LUZ). Profesora titular del Centro de Investigación del Agua de LUZ. Correo electrónico: Nancyangulo71@gmail.com.
- Araujo, Ismenia:** Licenciada en Biología (LUZ), Magister en Microbiología (University of Georgia). Profesora Titular del Centro de Investigación del Agua de . Correo electrónico: LUZ.ismeniaaraujo@gmail.com.
- Melo, Penelope:** Licenciada en Biología (LUZ). Magister en Ingeniería Ambiental (LUZ). Jefe de Laboratorio de Microbiología del Centro de Investigación del Agua.. Correo electrónico: melo.penelope@gmail.com.

Capítulo 83

Prefactibilidad geológica y geomorfológica de la propuesta vial expresa entre la region central andina y el flanco surandino: estado Mérida y Barinas

Guerrero, Omar*; Sánchez, Jesús; Contreras, Wilbert; Dugarte, Mairin; López, José; Alvarado, Miguel; Guerrero Camargo, Omar

Grupo Evaluación Geológica. Equipo Promotor de diagnóstico y proyección vial del Estado Mérida
 CIEM, Universidad de Los Andes.

[*omarguerrero1231@gmail.com](mailto:omarguerrero1231@gmail.com)

Resumen

La propuesta de trazado vial expresa entre La Región Central Andina (Mérida) y el Flanco Surandino (Barinas), esta proyectada a través de los Municipios: Libertador-Campo Elías, Aricagua, Sucre y Arzobispo Chacón del Estado Mérida y Municipios: Pedraza, Ezequiel Zamora y Antonio José de Sucre del estado Barinas. El trazado vial comprende un distancia aproximada de 73Km, de los cuales fueron evaluados geológicamente de manera preliminar un ancho de banda de 20 Km., con respecto a la línea de trazo propuesta. Las unidades geológicas existentes en esta zona dividen el tramo vial expreso entre tres grandes bloques; a) Tramo de 43 Km en rocas de composición ígneo-metamórfica Precámbrica-Paleozoica; b) Tramo 10 Km sobre rocas de composición sedimentaria carbonatico –lutítica (Cretácica) y tramo de 20 Km ubicado hacia el piedemonte del flanco surandino de composición mixta o de mezcla (areniscas, lutitas y calizas) de rocas Paleozoicos hasta terciarias y cuaternarios. El trazado vial se encuentra inmerso en cinco cuencas hidrográficas; dos que drenan hacia la cuenca media del río Chama y tres que drenan hacia los llanos de Barinas – Apure. Las cuales son evaluadas su comportamiento hidrogeomorfológico, fundamental para los trazados viales de superficie, subsuelo (túneles) y ubicación de ponederos. Dentro de los controles geológicos que afectan el diseño del trazado de la vía expresa y de importancia para los diseños y cálculos de túneles y vía superficial, tenemos el fallamiento geológico y la sismicidad local y regional. Dentro de las fallas geológicas de interés regional y local podemos reconocer las trazas de fallas geológicas del sistema de Boco-nó, Falla geológica de Caparo y el sistema de corrimientos estructurales del Piedemonte Oriental – Flanco Surandino. En cuanto a la sismicidad se reconoce para el sistema de Falla de Boconó sismicidad histórica (terremoto de 1610,1894 y 1812), no se tienen datos de sismos instrumentales de gran magnitud (>6 escala de Richter) para años posteriores. Este comportamiento sísmico ubica a Mérida y a la zona del proyecto en zona sísmica 5 (intermedia a elevada sismicidad: 0,25-0,30 g).

ISBN: 978-980-11-1858-9



9 789801 118589

1 Introducción

El La propuesta de trazado vial entre Región Central Andina (Mérida) y el Flanco Surandino (Barinas), se encuentra emplazado en los Municipios del Estado Mérida; Santos Marquina-Libertador-Campo Elías- Aricagua – Sucre y Arzobispo Chacón y del estado Barinas el Municipio Pedraza, El trazado vial tiene una distancia aproximada de 73Km (Fig.1), de los cuales fueron evaluados geológicamente de manera preliminar un ancho de banda de 10 Km., en ambos lados del trazado vial propuesto. Las unidades geológicas son muy variadas desde rocas ígneas y metamórficas Precámbricas hasta rocas y sedimentos de edades recientes (Shagam 1969, Gonzales de Juana y col., 1987).

Se plantea una alternativa futura de integración vial expresa (tuneles y vías superficial) que comunique la zona andina con los espacios de los altos y bajos llanos occidentales, la cual esta siendo evaluada por una Comisión de proyectos de vialidad para el estado Mérida formada por profesionales del Colegio de Ingenieros del estado Mérida.

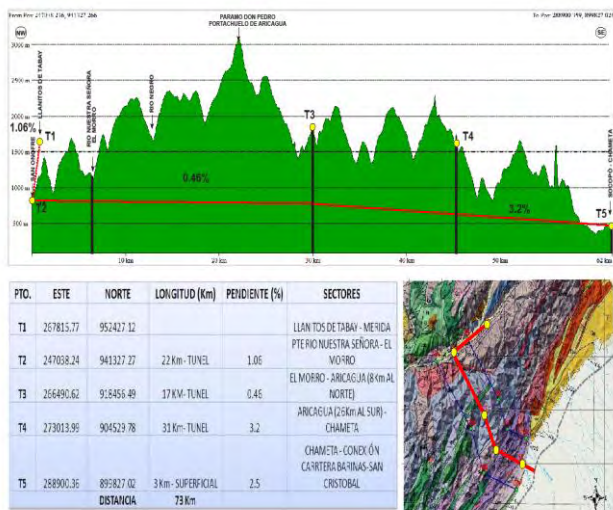


Fig. 1 Perfil y zona de la alternativa vial expresa entre la región central Andina y el Flanco Surandino de Venezuela.

2 Aspectos geológicos generales del trazado vial

La variedad de unidades geológicas existentes en el tramo de trazado via, dividen el tramo vial expreso entre tres grandes bloques; a) Tramo mayor ubicado en rocas de composición ígneo-metamórfica Precámbrica-Paleozoica; b) Tramo corto intermedio en rocas de composición sedimentaria carbonático –lutítica (Cretácica) y tramo de longitud media ubicado hacia el piedemonte del flanco surandino de composición mixta o de mezcla (areniscas, lutitas y calizas) de rocas Paleozoicos hasta terciarias y cuaternarios (Viscarrret 2002)

El trazado vial se encuentra inmerso en cinco cuencas hi-

drográficas; dos (2) que drenan hacia la cuenca media del río Chama y tres (3) que drenan hacia los llanos de Barinas – Apure. Las cuales deben ser evaluadas en cuanto a su comportamiento hidrogeomorfológico, fundamental para los trazados viales de superficie y ubicación de pondeaderos.

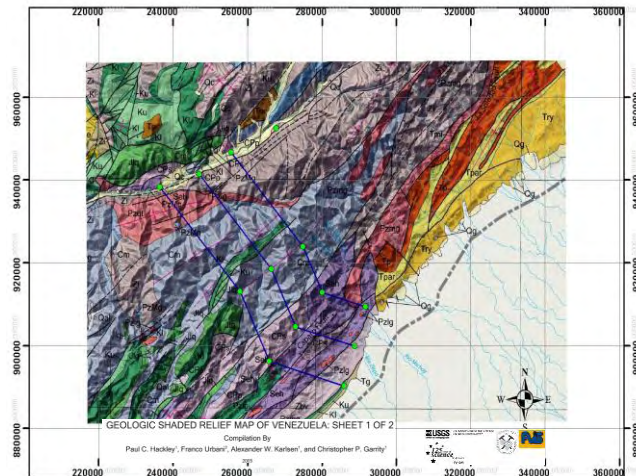


Fig. 2 Localización aproximada del trazado vial y geología regional.

Dentro de los controles geológicos que afectan el diseño del trazado de la vía expresa y de importancia para los diseños y cálculos de túneles, tenemos el fallamiento geológico y la sismicidad local y regional. Dentro de las fallas geológicas de interés regional y local podemos reconocer la traza de falla de Boconó o sistema de fallas de Boconó, la Falla geológica de Caparo y el sistema de corrimientos estructurales del Piedemonte Oriental – Flanco Surandino (Audemard 2002). En cuanto a la sismicidad se reconoce para el sistema de Falla de Boconó sismicidad histórica (terremoto de 1610,1894 y 1812), no se tienen datos de sismos de gran magnitud (>6 escala de Richter) para años posteriores. Este comportamiento sísmico ubica a Mérida y a la zona del proyecto en zona sísmica 5 (0,25-0,30 g zona intermedia a elevada sismicidad).

3 Aspectos geomorfológicos del la zona del trazado vial expreso

Con el propósito de desarrollar unos aspectos generales de la geomorfología dominante en la zona de trazado vial, se realizo una evaluación de las condiciones climatológicas, tomando en cuenta las estaciones meteorológicas de las secciones del corte Mérida-Pico Espejo, Lagunillas, Ejido y Socopo-Capitanejo, obtenidas de los datos del INAMEH y los datos publicados por Aranguren y col. (2011).

El análisis permitió reconocer dos grandes vertiente desde el punto de vista climatológico – ecológico; la vertiente seca que mira hacia la cuenca del río Chama y es afluente de la Cuenca del Lago de Maracaibo y la vertiente húmeda que drena sus aguas a la Cuenca del Río Orinoco (Fig.3).

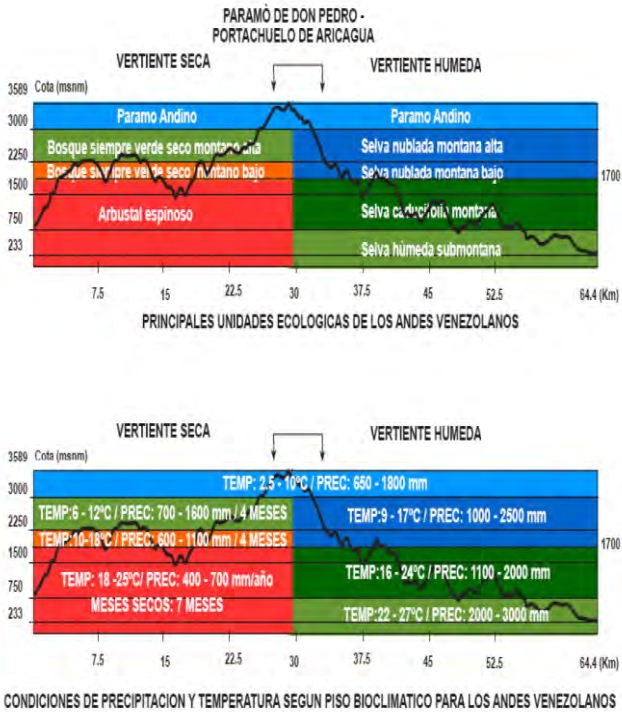


Fig. 3 Principales unidades ecológicas y unidades climáticas de las vertientes Central y Sur de los Andes venezolanos

Este comportamiento bioclimático, define dos grandes procesos de meteorización de las rocas que están relacionados con los movimientos de masa del terreno y eventuales problemas geotécnicos, que podemos resumir de la siguiente manera;

La vertiente seca; estaría sometida a intensidad alta pero baja frecuencia de las precipitaciones. Por lo tanto, los mecanismos geomorfológicos más generalizados en esta vertiente están vinculados a derrumbes (vinculados a vertiente con endientes > 30°) y torrentes esporádicos con flujos de detritos e hiperconcentrados. Se recomendaría para estabilizar esta vertiente en la zona de potenciales trazados viales, corregir los torrentes con infraestructura de protección hidráulica (cajones de paso y estabilidad de taludes con concreto proyectado - pantallas) y ecológica, incrementando la vegetación de raíces profundas, en las zonas de pendientes >30°, nacientes de las microcuencas y arroyos que seccionen las vías.

Vertiente húmeda: Zonas con abundantes precipitaciones que permiten caudales importantes de los ríos Caparo, Aricagua, etc., así como posibles movimientos lentos de masa como reptaciones y deslizamientos rotacionales y traslacionales del terreno, los mismos pueden estabilizarse con el diseño de drenajes superficiales que permitan disminuir el

tiempo de concentración de las aguas superficiales a los colectores principales. Se recomienda mantener la cobertura vegetal autóctona, y diseñar trazados viales en cotas muy superiores a los lechos mayores de inundación del río y a los largo de los valles fluviales. Diseñar puentes con luces lo suficiente para evitar el corte de los caudales y eventuales formación de represamientos.

3.1. Geformas mayores

Dentro de las geformas mayores podemos reconocer (Fig.4); **a) Sistema de llanura aluvial** – abanicos aluviales explayados hacia la vertiente húmeda (Piedemonte y abanicos aluviales del sistema andino lacustre), **b) Montañas bajas** entre 750 – 2200 msnm, más extensas y abundantes hacia el piedemonte de barinas que para la cuenca del río Chama; **c) Montañas altas** entre 2200 msnm-3500 msnm con distribución proporcional a ambas vertientes.

El sistema montañoso es mas elevado hacia la vertiente del río Chama y con mayor variabilidad topográfica (abundantes zona con montañas bajas – colinas y lomeríos) hacia la vertiente de la cuenca de Barinas. Este comportamiento topográfico y geomorfológico, además climatológico, obliga a los técnicos que proyectaran estas vías a realizar diseños viales superficiales y subterráneos, considerando estas limitantes o potencialidades que ofrecen estas vertientes (GEMMA 2007).

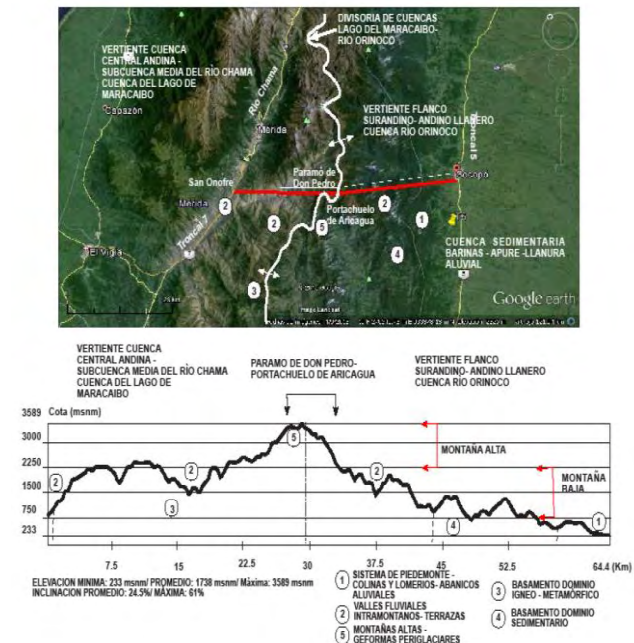


Fig.4 Geoformas dominantes en la zona de trazado vial expreso Merida – Barinas. (imagengoogle-earth, 2015)

4 Conclusiones

Tomando como aspectos fundamentales los controles; climáticos y litológico – estructurales (fallamientos) que existen en ambas vertiente, se deben hacer las valoraciones morfométricas de las cuencas hidrográficas que serán afectadas por el trazado vial, para hacer una valoración de la potencialidad o limitaciones que presentan cada una y establecer patrones de corrección de geológico – geotécnica.

Se considera que la zona de trazado vial presenta rocas de excelente calidad para la realización de una vía expresa entre los flanco Central y Suradino, especialmente en los tramos iniciales en el sentido Mérida – Aricagua, sin embargo el tramo de Aricagua – Capitanejo – Chameta, se deben valorar aspectos importantes de la geomecánica de roca, debido a la variabilidad de las rocas y las geometrías de los trazados viales.

Referencias

- Aranguren A, Andressen R, 2011, El clima estacional del cinturón montano en el estado Mérida-Venezuela -Revista Geográfica Venezolana, Vol. 53(2) 2012, 187-212.
- Audemard FE; Audemard, FA, 2002, Estructura de los Andes de Mérida, Venezuela: Relaciones con la interacción geodinámica de América del Sur y el Caribe. Tectonofísica, 345, p. 299-327.
- GEMMA - Grupo de Estándares para Movimientos en Masa, 2007, Movimientos en masa en la región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas. Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas, Servicio Nacional de Geología y Minería Publicación Geológica Multinacional No. 4.
- González de Juana C, Iturralde M, Picard X, 1980, Geología de Venezuela y de sus cuencas petrolíferas. Tomo I-II. Caracas: Ediciones Fonnives, primera edición, 1031 p.
- Viscarret P, 2002, Estudio integral del Paleozoico no metamorfizado (Formaciones Caparo, Sabaneta y Palmarito) en Los Andes de Mérida. Venezuela. Tesis de Ascenso. Mérida, Venezuela. 135p.

Guerrero, Omar: MSc, Doctorado en ciencias Geológicas, Profesor de Geomorfología- ULA.

Sánchez; Jesús: Ingeniero Geologo – Especialista en Geología de Campo. Correo Eelectrónico: emiliosanchez05@gmail.com

Contreras, Wilbert: Arquitecto. Doctorado en diseño urbano. Profesor de Diseño Urbanos – ULA. Correo electrónico: wilbercontrerasmiranda@yahoo.es

Dugarte, Mairin: Estudiante tesistaIngenieriaGeològica. Correo electrónico: orisbell18@gmail.com

López, José: Estudiante tesista de IngenieriaGeològica. Correo electrónico: omarguerrero1231@gmail.com

Alvarado, Miguel: Msc. En Geologia. Profesor de Geologia de Campo, ULA. Correo electrónico:alvaradom78@gmail.com

Guerrero Camargo, Omar: Estudiante de Ingenieria Civil tesista. Correo electrónico: omarguerreroCamargo@gmail.com

Capítulo 84

Desarrollo de banco de pruebas para tuberías y medidores de flujo

Gómez, Francisco*; **Dulhoste, Jean**

Escuela de Ingeniería Mecánica. Universidad de los Andes.
Mérida, Mérida, Venezuela.

[*frangl_1@hotmail.com](mailto:frangl_1@hotmail.com)

Resumen

Una de las realidades que atraviesa la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Los Andes, es el deterioro de las instalaciones y equipos de laboratorios, tal es el caso del banco de pruebas para medidores de flujo y pérdida de carga en tuberías del Laboratorio de Instrumentación y Control. El presente proyecto, se centra en el rediseño y reconstrucción de dicho banco de pruebas, no solo con la intención de corregir sus afecciones actuales, sino también como una ampliación y actualización del mismo, que permita cubrir las nuevas condiciones y necesidades del laboratorio.

El nuevo diseño está destinado a actividades de experimentación, con fines didácticos y de investigación en las áreas de Instrumentación y Mecánica de Fluidos, con posibilidades de abarcar otras áreas del Departamento de Ciencias Terminas de la Escuela de Ingeniería Mecánica. Para la elaboración del diseño se contemplaron aspectos como: ubicación de instrumentos y tomas de presión en líneas de tuberías, distancia entre apoyos de tubería, representación del modelo del banco de pruebas por medio de una herramienta de dibujo, estimación del caudal máximo en cada una de las líneas de tuberías, construcción de la tabla de volúmenes del tanque de aforo, criterio de selección de galgas extensométricas y estudio de cavitación en bombas. Tomando en cuenta los lineamientos del diseño se realizó la construcción del banco de pruebas, contemplando materiales y equipos disponibles en el laboratorio y en el mercado nacional; y empleando métodos de manufactura básicos de taller metal mecánico. Tras la experimentación con el banco de prueba en cada uno de sus particulares, y evaluando objetivamente el mismo, se puede concluir que se obtuvieron resultados satisfactorios, cumpliendo de esta manera con los objetivos planteados con este proyecto.

ISBN: 978-980-11-1858-9



1 Introducción

El diseño original del banco de pruebas para medidores de flujo y pérdida de carga en tuberías del laboratorio de instrumentación y control de la escuela de ingeniería mecánica fue diseñado para desempeñar en el fundamentalmente dos prácticas de laboratorio; una práctica de laboratorio (del Lab. De mecánica de fluidos) destinada al estudio de pérdida de carga en tuberías y otra práctica de laboratorio (del Lab. De instrumentación) destinada a la determinación del caudal mediante el empleo de instrumentos de medición de flujo. Con el paso del tiempo dicho banco de pruebas presentó deterioro y desgaste en sus piezas partes y equipos dando lugar al desarrollo del presentetrabajo. El planteamiento de un nuevo diseño del banco de prueba contempló correcciones desde un punto de vista estético así como funcional, permitiendo no solo corregir las afecciones actuales, si no actualizando y ajustando el mismo a los nuevos requerimientos y necesidades del laboratorio. El nuevo modelo del banco contempla el empleo de 8 instrumentos de medición de flujo entre los cuales figuran: La placa orificio, el tubo Venturi, la tobera de flujo, la cuña de flujo, el tubo Annubar, el rotámetro, medidor de cono y un medidor de flujo magnético, siendo los dos últimos mencionados, los nuevos instrumentos a involucrar para el nuevo diseño.

Para un mayor aprovechamiento de las prácticas de laboratorio y como una aplicación del potencial del banco de pruebas, se contempló la instalación de una bomba de mayor capacidad (potencia de 10 hp) con la intención de aumentar el caudal máximo de flujo. Dicha bomba se instaló en paralelo a la disponible en el laboratorio (potencia 3 hp) permitiendo la posibilidad de uso de las mismas en función de la carga requerida para el desempeño de las actividades experimentales.

Las modificaciones al diseño original del banco de pruebas, contempla la reestructuración de las prácticas de laboratorios, incurriendo en ligeras modificaciones en la práctica de instrumentación para medidores de flujo y cambiando el enfoque del estudio de pérdida de carga en tuberías del laboratorio de mecánica de fluidos, orientándolo al estudio de calibración de tuberías simple, proceso experimental que permite conocer la rugosidad absoluta en tramos rectos de tuberías.

Uno de los elementos principales del banco de prueba es el tanque de descarga o tanque de aforamiento, con este elemento se realiza la medida patrón o referencial del caudal, la cual está sujeta a comparación con las medidas de caudal obtenida con los instrumentos de medición de flujo, así como también es empleado para la estimación de la rugosidad absoluta de las tuberías en la práctica de calibración de tuberías simples.

Para el desarrollo de las prácticas de laboratorio (ya mencionadas), ha de requerirse la regulación de flujo en intervalos de preferencia escalonada.

El uso del conjunto de tuberías en paralelo con tres válvulas de compuerta (4 in, 2 in y 1 in) conforma dicho

elemento regular teniendo en operación la bomba de 10hp.

Para realizar la toma de presión en tuberías y en los diferentes instrumentos de medición de flujo, se emplearon galgas extensométricas, estas, en conjunto con un módulo de adquisición de datos, una computadora y un software adecuado, permite interpretar señales eléctricas en señales de presión.

El nuevo diseño del banco de prueba da la posibilidad de la intercambiabilidad de los tramos rectos de tuberías por otros de diferentes materiales y calibres, adicionalmente funcionara como fuente de suministro de flujo a otros proyectos de grado y posee la flexibilidad necesaria para incorporar y desincorporar elementos como una tentativa al cambio de la configuración del banco para futuros proyectos.

2 Proceso de diseño

Para determinar los aspectos a involucrar en el diseño del banco de pruebas, fue necesario hacer, en primera instancia, una inspección previa de todas aquellas debilidades del diseño anterior, así como una evaluación de las nuevas exigencias, estableciendo de esta manera un punto de partida para el diseño. Aspectos como: evitar filtración y oxidación, una disposición más organizada y estética del banco de prueba, característica de fácil manipulación, ampliación del rango de caudal de trabajo, empleo de un mecanismo regulador de flujo, posibilidad de suministrar flujo a otros proyectos de grado (pre y posgrado) son ejemplos de lo ya mencionado.

A continuación se expondrán aspectos específicos considerando para la elaboración de dicho diseño.

2.1 Distancia entre apoyos de tuberías

Entre los puntos álgidos del banco de pruebas figuraba la presencia de pandeo de tuberías PVC, esto a causa del peso del agua, el peso de la tubería y la falta de rigidez del mismo entre apoyos. En vista de esta problemática, se tomó como un factor crítico, las tuberías PVC para determinar las distancias entre soportes de tuberías. Del manual Técnico de PAVCO (2009), Manual técnico tubo sistemas, se extraen las recomendaciones y pautas para establecer dichos apoyos.

2.2 Ubicación de instrumentos y tomas de presión.

La mitad de los instrumentos de medición de flujo disponibles para el diseño del banco de prueba, como lo son el tubo Venturi, la tobera de flujo, la placa orificio y la cuña de flujo, son instrumentos sensibles a perturbaciones en el flujo, por lo que establecer distancias prudentes para garantizar la formación de un flujo desarrollado aguas arriba de los mismos es algo imperativo para garantizar resultados

deseados tras el proceso de experimentación. De igual forma ocurre con las tomas de presión diferencial en los diferentes tramos de tuberías simples de dicho banco de pruebas.

Para la ubicación de los instrumentos de medición de flujo mencionados, se tomó en consideración las recomendaciones expuestas en la norma ISO 4167 para el caso particular de los instrumentos: tubo Venturi, tobera de flujo y placa orificio. DeDulhoste. F (Guía de estudio de instrumentación), se extrajeron las recomendaciones para la ubicación del instrumento Cuña de flujo así como una recomendación general que engloba todos los instrumentos. En la tabla 1, se puede apreciar el compendio de dichas recomendaciones, agrupados en conjunto para la evaluación de las posibles ubicaciones de los instrumentos de medición de flujo sobre las líneas de tuberías del banco de pruebas.

Para la ubicación de las tomas de presión en tramos rectos de tuberías se estableció para la toma de alta una distancia de 50 veces el diámetro nominal de la tubería aguas arriba, y 30 veces el diámetro nominal aguas abajo para la toma de baja, este valor, no es más que un factor incrementado (factor de seguridad) de las recomendaciones generales proporcionadas por las literaturas de uso común en la mecánica de fluidos entre las que podemos citar a Cengel(2012) y Saldarriaga (2007), para la estimación de la longitud mínima de tuberías necesaria para garantizar flujo desarrollado.

2.3 Adecuación de tomas de presión en tramos rectos de tuberías y medidores de flujo

Para realizar la tomas de presión en tramos rectos de tuberías se planteó el uso de anillos piezométricos. Para ello se requiere realizar 4 perforaciones diametralmente opuestas y separadas entre sí por un Angulo de 90 grados en cada toma de las líneas de tuberías. El diámetro de perforación de la tubería se regirá bajo la norma ISO R541 1957 (Measurement of fluid flow by means of orifice, plates and nozzles) la cual establece que el diámetro de perforación será igual a la multiplicación del diámetro nominal por un factor de 0.08. Se consolidará la cámara de presión estática con la cavidad formada entre las paredes externas de las tuberías y las paredes internas de las uniones dresser. Como toma de presión definitiva se instalara conexiones con valvula Check marca Festo sobre dichas uniones dresser.

Para adecuar las tomas de presión en los medidores de flujo, se planteó reemplazar sus vástagos (para los casos particulares donde esto sea viable), por válvulas Check marca Festo, esto, sin violentar la integridad de las dimensiones de las perforaciones de dichas toma

Tabla 1. Compendio de Normas para la ubicación de Medidores de flujo

Caso	Venturi		Placa orificio		Tobera		caso	Cuña	
	A.A R	A.A B	A.A R	A.A B	A.A R	A.A B		A.A R	A.A B
Norma ISO 4167								Recomendaciones	
A	4.5 D	2.5 D	14 D	7 D	14 D	7 D	C	10 D	5 D
	11.4 3	6.35	35.5 6	17.7 8	35.5 7	17.7 8		25.4	12.7
B	10 D	3 D	65 D	25 D	48 D	24 D	B	15 D	5 D
	25.4	7.62	165. 1	63.5	121. 9	60.9 6		38.1	12.7
D	-	-	30 D	15 D	15 D	5 D		5 D	5 D
	-	-	76.3	38.1	38.1	12.7		12.7	12.7
Regla general									
U	20	5	20	5	20	5	U	20	5
	50.8	12.7	50.8	12.7	50.8	12.7		50.8	12.7
<p>Glosario de términos:</p> <p style="text-align: center;">$\beta = 0.60$</p> <p>A.AR: Aguas arriba expresada.</p> <p>A.AB: Aguas abajo.</p> <p>Caso A: válvula de bola totalmente abierta (caso que mejor se ajusta al encontrado en el diseño)</p> <p>Caso B: Caso más desfavorable.</p> <p>Caso C: Válvula parcialmente abierta. (caso que mejor se ajusta al encontrado en el diseño)</p> <p>Caso D: Reducción n simétrica abrupta. (caso que mejor se ajusta al encontrado en el diseño)</p> <p>Caso U: Recomendación general.</p> <p>Todas las unidades expresadas en cm</p>									

2.4 Seguimiento del proceso de modelado

Se realizaron 14 modelados, de los cuales, cada uno correspondió a una variación de forma y fondo del anterior. El enfoque del modelado contemplaba partir de las ideas generales y prioritarias, cuyo impacto abarcaba la mayoría de las necesidades a satisfacer en el diseño, hasta llegar a enfoques puntuales de bajo impacto en el mismo. En la fig.1 se puede apreciar el diseño preliminar del banco de prueba tras el proceso de modelado.



Fig. 1. Diseño preliminar del banco de pruebas

2.5 Estimación del caudal máximo de diseño

Para estimar el posible comportamiento que adoptara el banco de pruebas es necesario encontrar el punto de funcionamiento para cada una de las líneas de tubería. El punto de funcionamiento corresponde al punto de intersección de la curva de funcionamiento del sistema y la curva característica de la bomba. La curva de funcionamiento se construyó agrupando las ecuaciones de conservación de la energía y pérdida de carga en tuberías como una sola expresión.

$$H_b = \left(\frac{\Delta P}{\rho g}\right) + (\Delta Z) + \left(\frac{f L V^2}{D 2 g}\right)_{4 \text{ in}} + \left(\frac{f L V^2}{D 2 g}\right)_{x \text{ línea}} + \left(\sum K_m \frac{V^2}{2 g}\right)_{4 \text{ in}} + \left(\sum K_m \frac{V^2}{2 g}\right)_{x \text{ línea}} \quad (1)$$

H_b = Carga útil de la bomba [m]

Re = Número de Reynolds [-]

f = Factor de fricción [-]

V = Velocidad del flujo [m/s]

K_m = Coeficiente de pérdidas secundarias [-]

ΔP = Diferencial de presión [Pa]

ΔZ = Diferencial de cota [m]

L = longitud lineal de tubería [m]

D = diámetro interno de tubería [m]

g = Aceleración de gravedad [m/s]

Adoptando valores arbitrarios de caudal dentro de un rango de 0.001 a 0.03 m³/s, coeficientes de pérdidas secundarias por accesorios de tuberías sugeridos por Cengel(2012), Saldarriaga (2007) y estimando para los casos particulares de las líneas de tuberías relacionadas con los instrumentos de medición de flujo un coeficiente de pérdida equivalente K_m para cada instrumento (con la salvedad del medidor de flujo magnético, el rotámetro y el tubo Annubar) se construyó la curva de funcionamiento de los diferentes sistemas del banco de pruebas.

Empleando los valores experimentales de velocidad de flujo y diferencial de presión del diseño predecesor de dicho banco, se logró estimar los coeficientes de pérdidas K_m , para ello, se empleó la ecuación de conservación de la energía entre la toma de alta y baja presión de los instrumentos en cuestión (véase Ec.3).

$$K_m = \frac{\left(\frac{\Delta P}{\rho}\right) 2}{V^2} \quad (2)$$

En la Fig.2, se puede apreciar las intersecciones de los diferentes sistemas con la curva característica de la bomba, la cual es proporcionada por la casa fabricante IHM (correspondiendo a un modelo de bomba GS 100-10MW para el banco de pruebas) señalando de esta manera la altura dinámica de la bomba con el caudal máximo teórico en las diferentes líneas de tuberías.

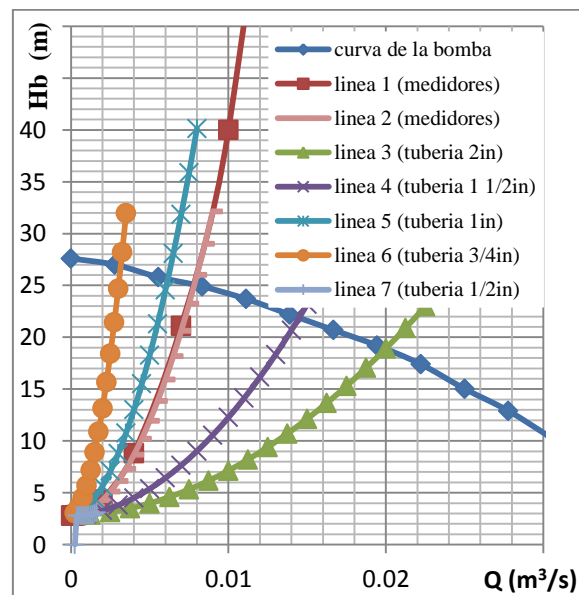


Fig. 2. Gráfica HbVs Q en tuberías PVC (teórico)

2.6 Análisis de cavitación en la succión de la bomba

La cavitación es un fenómeno que ocurre cuando la presión local en la succión de la bomba alcanza presiones por debajo de la presión de vapor o saturación del líquido. Durante la cavitación se forman burbujas de vapor que colapsan al alcanzar la zona de alta presión, el colapso de estas burbujas ocasiona ruido, vibraciones, disminución de la eficiencia y lo más importante daños en los alabes de rotor. Para realizar este estudio se debe calcular el factor $NPSH_d$ ($NPSH$ disponible), este término puede interpretarse como la altura neta de succión positiva (por su sigla en inglés Net Positive Suction Head).

$$NPSH_d = \frac{P_{atm} - P_v}{\rho g} - \left[h_s + h_{fs} + \frac{V_s^2}{2g} + h_{me} \right] \quad (3)$$

P_{atm} = Presión atmosférica [Pa]

P_v = Presión de saturación del agua [Pa]

ρ = Densidad del agua [Kg/m³]

h_s = Altura del rotor respecto al nivel del agua [m]

h_{me} = Perdidas secundarias en la tubería de succión [m]

h_f = Perdidas por fricción en la tubería de succión [m].

Para determinar si existe la formación de cavitación en la succión de la bomba es necesario verificar si el $NPSH_d$, es menor o mayor al $NPSH_r$ ($NPSH$ requerido). El $NPSH_r$ es un parámetro proporcionado por las casas fabricantes de bombas (modelo de bomba IHM GS 100-10MW para el banco de pruebas). Si el valor de $NPSH_d$ es menor que $NPSH_r$, esto implicaría la formación de cavitación en la bomba. Los resultados de este análisis señalan que no hay riesgo de formación de cavitación.

3 Aspectos generales de construcción del banco de pruebas

La construcción del banco de pruebas se puede estructurar en:

Bases principales: Cuya fabricación se llevó a cabo utilizando material de ferretería y empleando procesos básicos de manufactura como lo son; soldadura por arco eléctrico, corte y doblado con presta, corte oxiacetilénico entre otros.

Ramal de tuberías: Sistema de tuberías en paralelos conectados entre sí mediante el uso de Manifolds de distribución de flujo. En su mayoría, está constituido por tuberías y accesorios de tuberías PVC, por lo que su ensamblaje se realizó empleando soldadura líquida PVC como agente de unión de dichos elementos. Esta sección del banco de prueba alberga la mayoría de los componentes del mismo, tales como: instrumentos de medición de flujo, tomas de presión en tramos rectos de tuberías, derivaciones del flujo a otros proyectos de grado, conexión directa al regulador de flujo y al tanque de descarga o aforo.

Aspectos generales: Instalación del regulador de flujo, instalación del sistema de desagüe de tanques, correcciones del mecanismo de vaciado del tanque de aforo, reemplazo de vástago por válvulas check en tomas de presión, ubicación de los instrumentos de medición de flujo, e instalación eléctrica general. Todas estas actividades son un ejemplo del conjunto de tareas llevadas a cabo para la constitución del banco de pruebas.

4 Adecuación de las medidas experimentales

Para establecer los niveles de confiabilidad en las medidas de caudal tras la experimentación con los medidores de flujo y de igual modo para adoptar un valor confiable del parámetro de rugosidad absoluta en tuberías, ha de requerirse poder adoptar una medida referencial o patrón de valor de caudal en el banco de pruebas. La relación del cambio de nivel de líquido en el tanque cilíndrico (de descarga) de dicho banco con respecto al tiempo, permite adoptar este valor patrón de caudal. Para el desempeño de las actividades experimentales se planteó la construcción de una tabla de volúmenes en función del cambio de nivel del líquido de dicho tanque. Existiendo 2 enfoques para su construcción, se prosiguió con el desempeño de ambos métodos; uno teórico partiendo de las dimensiones geométricas del tanque (proporcionados por compañía fabricante del mismo, 30 cm de radio) y empleando trigonometría clásica, obteniéndose 2.8274 lts/cm, y uno experimental que parte de la primicia de introducir un conjunto de muestras conocida en el tanque para apreciar el cambio de nivel que describe. Empleando una pesa electrónica y asumiendo una densidad del agua de 1 Kg/cm³ se vertieron 18 muestras de aproximadamente 20 kg cada uno (lo equivalente a 20 lts de agua) en el tanque de aforo, del conjunto de muestras para su correspondiente cambio de nivel se calcularon las desviaciones estándar y los errores probables para finalmente estimar la relación de estos valores considerando la propagación del error en el caso particular de una operación de división de magnitudes. De lo expuesto se obtuvo un valor experimental de 2.823 ± 0.038 l/cm. Este resultado (experimental) figura más como una comprobación de los resultados teóricos más que un parámetro para la construcción de la tabla de volúmenes en relación con el cambio de nivel, debido a su tendencia a incrementar el error de la medida del caudal ante un elevado cambio de nivel.

Como otro elemento dentro de los aspectos de adecuación de las medidas experimentales resaltan la selección de galgas extensométricas (selección exclusiva para las prácticas de laboratorio de instrumentación y calibración de tuberías simple). Como un criterio para la selección de galgas, se planteó la estimación de la presión diferencial en las tomas de presión en cada una de las líneas de tuberías e instrumentos del banco de pruebas. Partiendo del conocimiento del caudal de aforo para cada caso particular de la experimentación, se empleó la ecuación de Bernoulli entre los

puntos de alta y baja presión de los instrumentos y tuberías correspondientes; resultado de esta manera, la Ec. 4 (para la estimación de la presión máxima de trabajo en instrumentos) y la Ec.5 (para la estimación de las presiones máximas en tomas de presión en tuberías).

$$\Delta P = \rho g \left(K_m \frac{V^2}{2g} \right)_{x \text{ medidor de flujo}} \quad (4)$$

$$\Delta P = \rho g \left(\frac{f L V^2}{D 2g} \right)_{x \text{ línea de tubería}} \quad (5)$$

Es importante mencionar que la Ec. 4 no aplica para los instrumentos: medidor de flujo magnético (no posee tomas de presión), rotámetro y tubo anublar.

En la tabla 2, se puede apreciar el tipo de galga seleccionada para cada una de las líneas de tuberías e instrumentos de medición de flujo.

5 Experimentación con el banco de pruebas

5.1 Calibración de tuberías simples

Agrupando las ecuaciones de Darcy-Weisbach, Colebrook-White, Bernoulli y Reynolds como una sola expresión, considerando como los puntos de estudio a las tomas de alta y baja presión de los ramales de tuberías involucrados en la experimentación, y asumiendo que la velocidad de flujo y el diferencial de cota entre dichos puntos es despreciable, se puede establecer una ecuación que permita calcular el coeficiente de rugosidad absoluta de las tuberías (véase Ec.6).

$$K_s = 3.7 d \left(10^2 \frac{1}{\sqrt{\frac{\Delta P d^2}{\rho L V^2}}} - \frac{2.51}{\sqrt{\frac{\rho \Delta P d^3}{u^2 L}}} \right) \quad (6)$$

K_s = rugosidad absoluta [m]

Empleando la Ec.6 y partiendo de las muestras experimental cuyo valores corresponden a un conjunto de intervalos de caudal con sus respectivos cambios de presión diferencial, para cada tramo de tubería involucrado; entre los cuales figuran tuberías PVC de 2, 1 1/2, 1, 3/4 y 1/2 pulg y tuberías de AG (Acero galvanizado) 1, 3/4 y 1/2 pulg, se construyó la siguiente grafica K_s Vs Re señalada en la Fig.3 y Fig.4.

Tabla 2. Estimación para la selección de galgas extensométricas

Líneas / Instrumentos	ΔP (Psi)	Tipo de galga
Línea 3 (PVC)	3.50	5 psi
Línea 4 (PVC)	7.26	15 psi
Línea 5 (PVC)	10.99	15 psi
Línea 6 (PVC)	12.58	15 psi
Línea 7 (PVC)	13.19	15 psi
Línea 5 (AG)	13.69	15 psi
Línea 6 (AG)	12.83	15 psi
Línea 7 (AG)	17.95	30 psi
Tubo Venturi	10.20	15 psi
Placa orificio	24.74	30 psi
Tobera de flujo	11.78	15 psi
Medidor de Cono	8.42	15 psi
Cuña de flujo	9.06	15 psi

La práctica de calibración de tuberías simples contempla adicionalmente la estimación del coeficiente de HazemWiliam (CHW). De forma análogo al procedimiento planteado para la calibración de tuberías simples; agrupando las ecuaciones de HazemWiliam y Bernoulli como una sola expresión, se puede establecer una ecuación que permita calcular el coeficiente de HazemWiliam de las tuberías (véase Ec.7).

$$C_{HW} = V \left(\frac{6.8241 L \rho \cdot g}{d^{1.167} \Delta P} \right)^{1/1.8151} \quad (7)$$

C_{HW} = coeficiente de hazem wiliam.

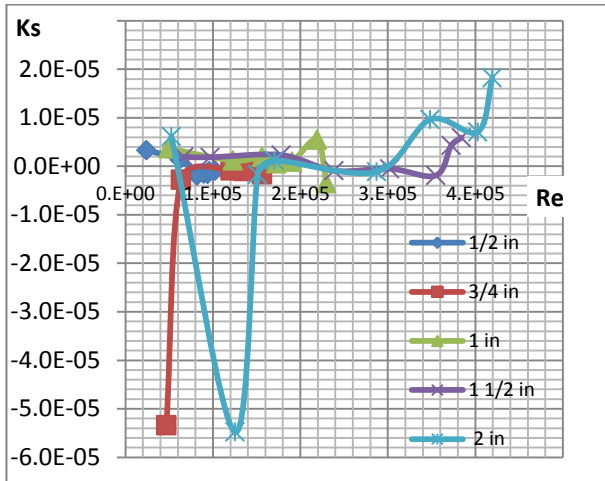


Fig. 3. Gráfica Ks Vs Re en tuberías PVC.

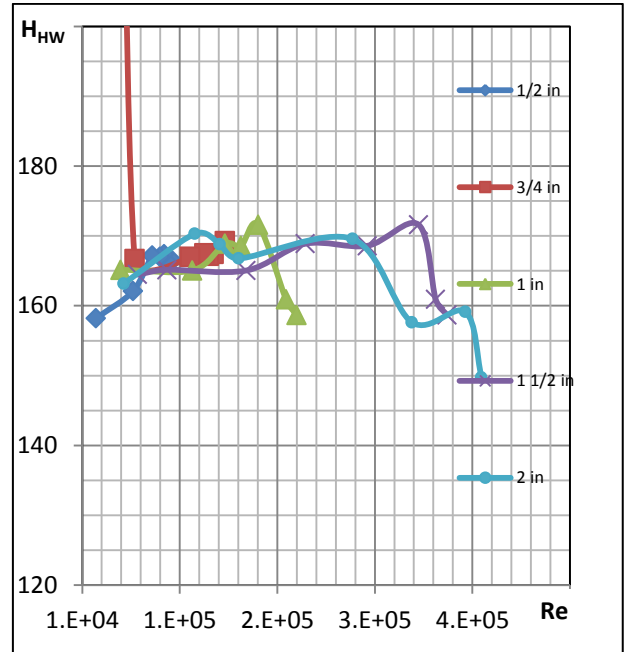


Fig. 5. Gráfica H_{HW} Vs Re en tuberías PVC.

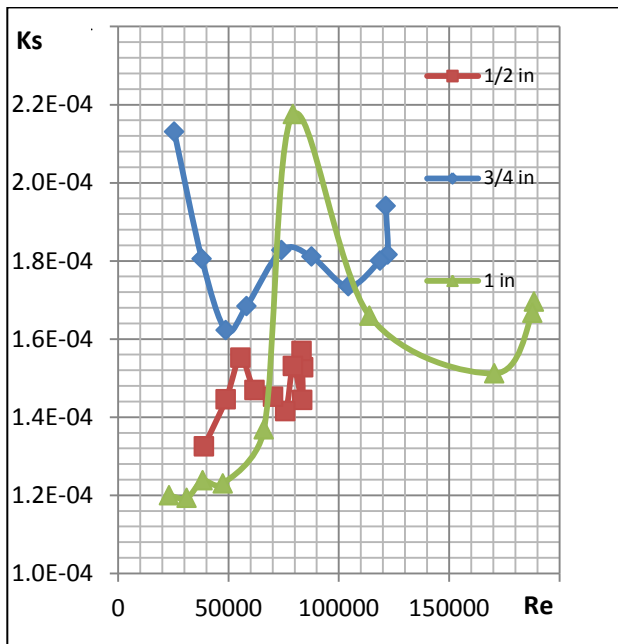


Fig. 4. Gráfica Ks Vs Re en tuberías AG.

Sustituyendo los intervalos de caudal (caudal de aforo) y presión diferencial obtenida tras el proceso de experimentación, se construyó las gráficas señaladas en las Fig.5 y 6.

5.2 Medidores de flujo placa orificio, tobera de flujo y tubo Venturi

Los medidores de flujo placa orificio, tobera de flujo y tubo Venturi son instrumentos que entran en la clasificación de medidores de flujo volumétrico de presión diferencial. Estos instrumentos se caracterizan por la generación de perturbaciones en el paso del flujo por medio del cual se produce una presión diferencial, valor que es traducido en una expresión de caudal. Para la estimación del caudal se agrupan las ecuaciones de Bernoulli y de conservación de la masa (considerando un tramo de tubería recto con el elemento perturbador de flujo entre las tomas de presión), para obtener una expresión que permita calcular el flujo volumétrico. La Ec.8 presenta la ecuación que relaciona el flujo con la diferencia de presión para los instrumentos placa orificio, tobera de flujo y tubo Venturi.

$$Q_v = C_d \frac{\pi}{4} \frac{d^2}{\sqrt{(1 - \beta^4)}} \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (8)$$

Q_v = caudal volumétrico [m³/s]

C_d = coeficiente de descarga [-]

B = relación de diámetros [-]

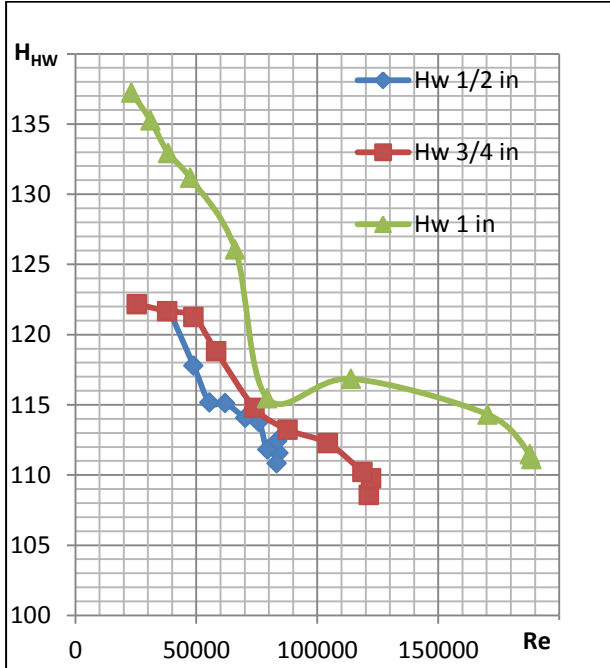


Fig. 6. Gráfica H_{HW} Vs Re en tuberías AG.

Es importante mencionar que el término de coeficiente de descarga (C_d) de la Ec.8, es un parámetro añadido no resultante del arreglo matemático antes expuesto. Dicho coeficiente es una herramienta empleada para ajustar los valores del caudal en función del tipo de instrumento utilizado y sus diferentes sub-clasificaciones (involucrando aspectos como material utilizado en la fabricación de los instrumentos, aspectos geométricos y ubicación de tomas de presión). La norma ISO 5167 especifica el procedimiento a seguir para el cálculo de los caudales volumétricos teóricos en función del coeficiente de descarga.

Tras la experimentación con el banco de pruebas se construyó un conjunto de graficas (ver figs.7 y 8) que representan el comportamiento de dichos instrumentos ante un régimen de flujo controlado.

5.3 Medidores de flujo cono, cuña de flujo y tubo Annubar

Estos instrumentos entran en la misma clasificación del otro grupo de instrumentos mencionados (placa orificio, tobera de flujo y tubo Venturi) con la salvedad que el tubo Annubar contempla otro principio de funcionamiento. En lugar de presentar una perturbación importante del paso del flujo, este emplea un delgado tubo con perforación longitudinal orientado de forma perpendicular al paso del flujo que permite captar el promedio de las presiones de estancamiento ante la disminución a cero del paso del flujo para cada una de las perforaciones del mismo, esto, en conjunto con una toma de presión estática proporciona un valor de pre-

sión diferencial con el que se puede estimar el caudal volumétrico experimental.

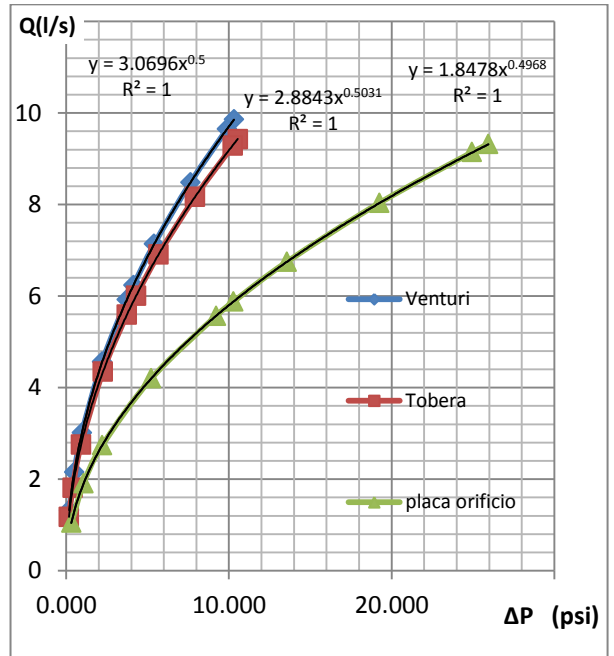


Fig. 7. Gráfica ΔP Vs Q (tubo Venturi, tobera y placa)

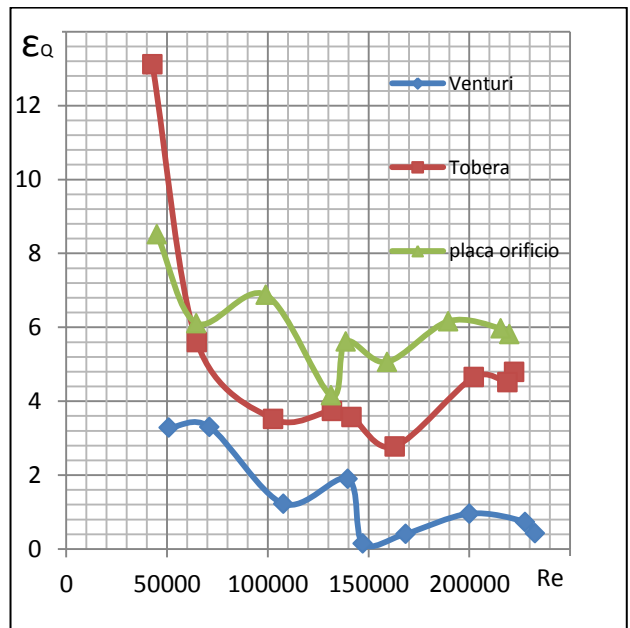


Fig.8. Gráfica Re Vs ϵ_Q (tubo Venturi, tobera y placa)

La actividad a desarrollar con estos instrumentos de medición de flujo, se centra en la determinación del coeficiente de descarga óptimo, para ajustar los valores de caudal obtenido con dichos instrumento a la medida patrón (correspondiente al caudal de aforo), esto como objeto de la ausencia de normalización de dicho coeficiente.

Se determinó el caudal experimental en los instrumentos; medidor de cono y cuña de flujo, haciendo uso de las ecuaciones Ecs.9 y 10 provenientes del mismo principio y arreglo matemático empleado para los instrumentos placa orificio, tubo Venturi y tobera de flujo.

$$Q_{v(\text{cono})} = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho \left(1 - \left(\frac{D^2 - d^2}{D^2}\right)^2\right)}} \quad (9)$$

$$Q_{v(\text{cuña})} = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho} \frac{A_1^2 A_2^2}{A_1^2 - A_2^2}} \quad (10)$$

A1= Área de la sección interna de tubería punto1.
A2= Área de la sección interna de tubería punto1.

Se determinó el caudal volumétrico experimental en el tubo Annubar empleando la Ec.11.

$$Q_{v(\text{annubar})} = C_v \sqrt{\frac{2(\Delta P)}{\rho}} \quad (11)$$

C_v = coeficiente de velocidad [-]

Esta expresión (Ec.11) resulta de la aplicación de la ecuación de Bernoulli, considerando que la velocidad para el punto de estudio relacionado con la presión de estancamiento es cero.

Dividiendo el caudal calculado entre el caudal de aforo o medida patrón se obtienen el coeficiente de descarga (véase Ec.12).

$$cd = \frac{Q_{\text{aforado}}}{Q_v} \quad (12)$$

Tras la experimentación con el banco de pruebas se construyó un conjunto de graficas (ver figs. 9, 10, 11 y 12) que representan el comportamiento de los instrumentos en cuestión ante un régimen de flujo controlado.

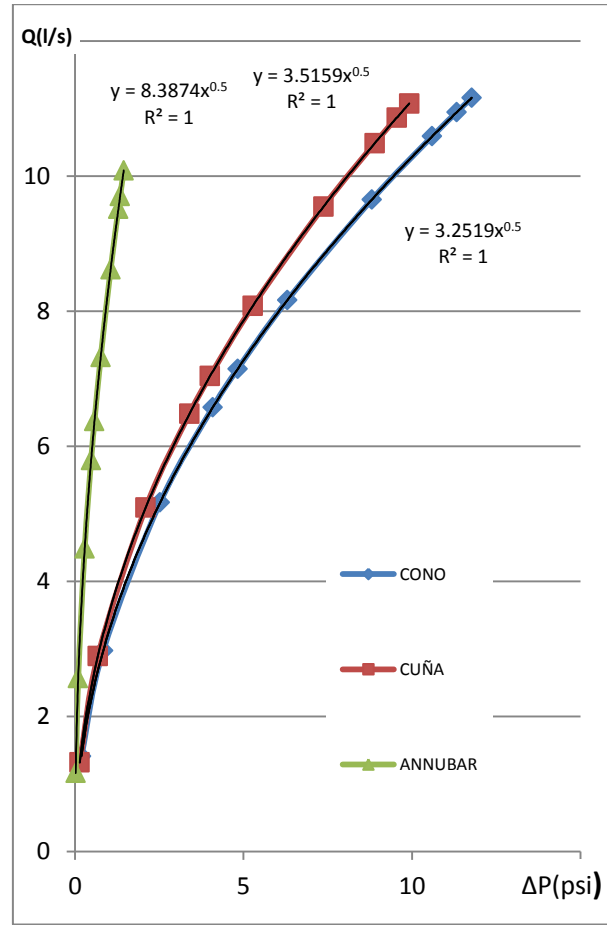


Fig. 9. Gráfica ΔP Vs Q (Cono, Cuña y Annubar)

5.4 Medidor de flujo Rotámetro

El rotámetro es un medidor de flujo volumétrico de área variable, donde un flotador cambia su posición en el interior de un tubo (ligeramente cónico) hasta alcanzar un equilibrio estático entre el peso del flotador, la fuerza de arrastre del fluido y las fuerzas de empuje sobre el flotador.

La actividad a desarrollar con este instrumento de medición de flujo, se centra en la estimación del caudal experimental (por método de la Ec.13), así como la determinación del coeficiente de descarga óptimo ya que al igual que el cono de flujo, la cuña de flujo y el tubo Annubar carece de normalización.

$$Q = \pi(xd_f \tan\alpha + x^2(\tan\alpha)^2) \sqrt{\frac{2gV_f}{A_f} \left(\frac{\rho_f}{\rho} - 1\right)} \quad (13)$$

A_f = Área de la sección transversal del flotador [m²]
 V_f =Volumen del flotador [m³]

ρ_f =Densidad del flotador [kg/m³]
 d_f = Diámetro del flotador [m]
 x = Posición del flotador [m].
 α = El ángulo de conicidad del tubo[grados °]

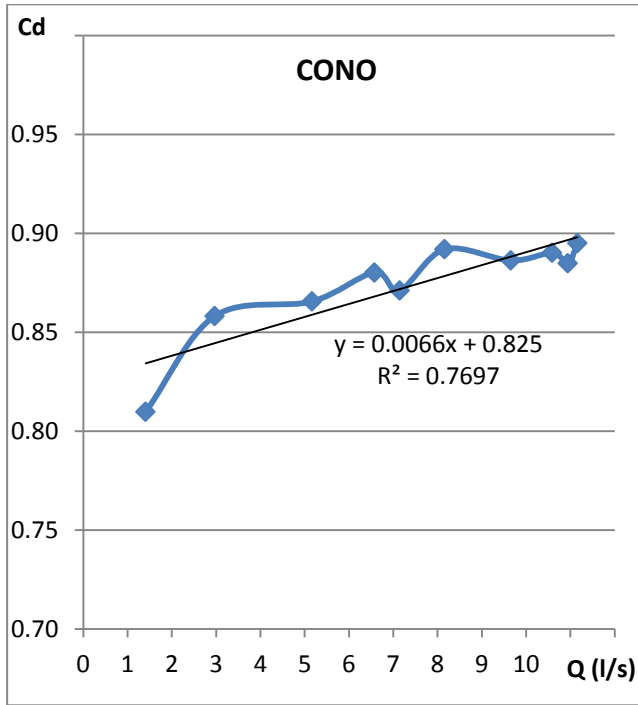


Fig.10.Gráfica Q Vs Cd del medidor de Cono

Esta expresión (Ec.13) resulta de la agrupación de las ecuaciones de; Bernoulli (aplicada entre la entrada y la salida del rotámetro), la ecuación de Equilibrio estático (en el flotador del instrumento) y la ecuación de continuidad o conservación e la masa.

Tras la experimentación con el banco de pruebas se construyó un conjunto de graficas (ver figs.13 y 14) que representan el comportamiento del instrumentos en cuestión ante un régimen de flujo controlado.

6 Discusión y resultados

De forma general se puede atribuir la discrepancia de los resultados en el proceso de experimentación con el banco de pruebas a una serie de errores complejos de controlar, que de forma acumulativa influyen en el registro de la medida. Dichos errores se pueden clasificar como errores sistemáticos y errores casuales.

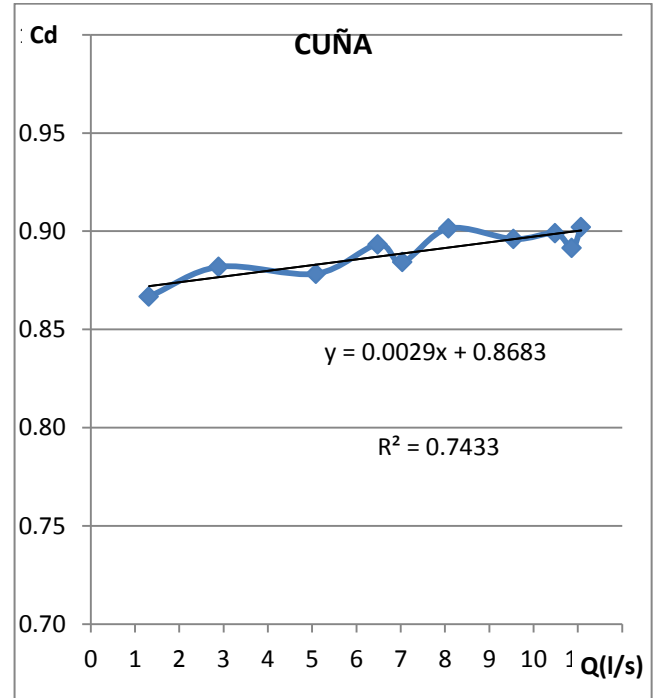


Fig. 11. Gráfica Q Vs Cd de la Cuña de flujo.

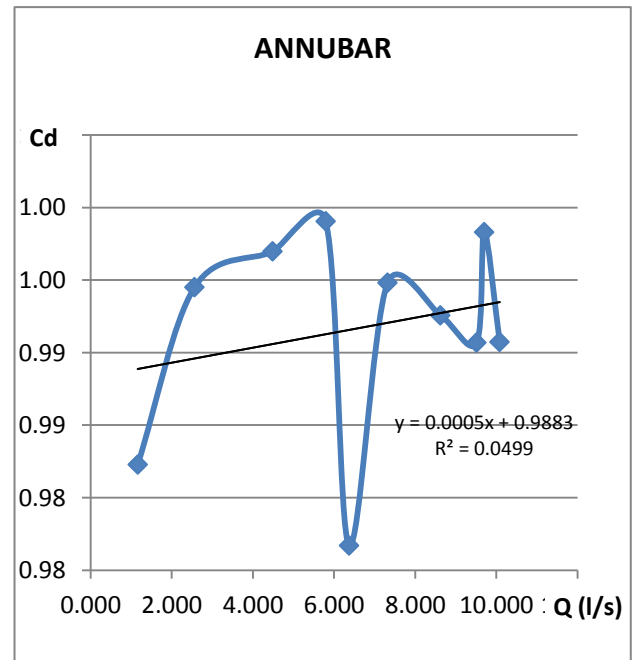


Fig. 12. Gráfica Q Vs Cd del tubo Annubar

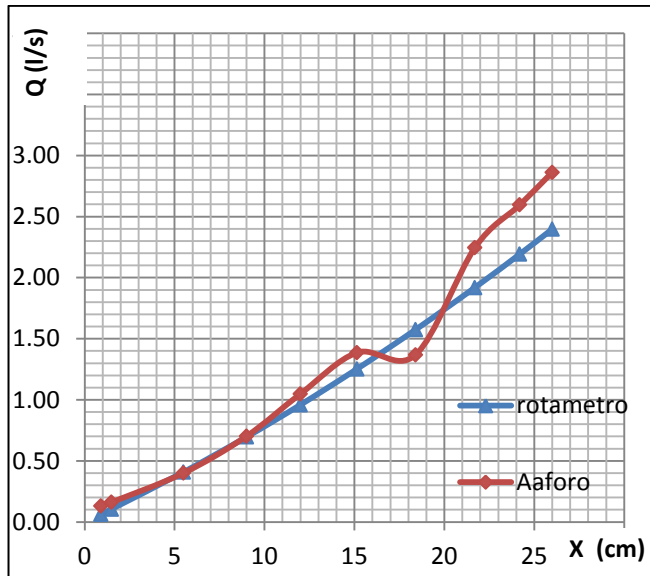


Fig. 13. Gráfica X Vs Q del rotámetro.

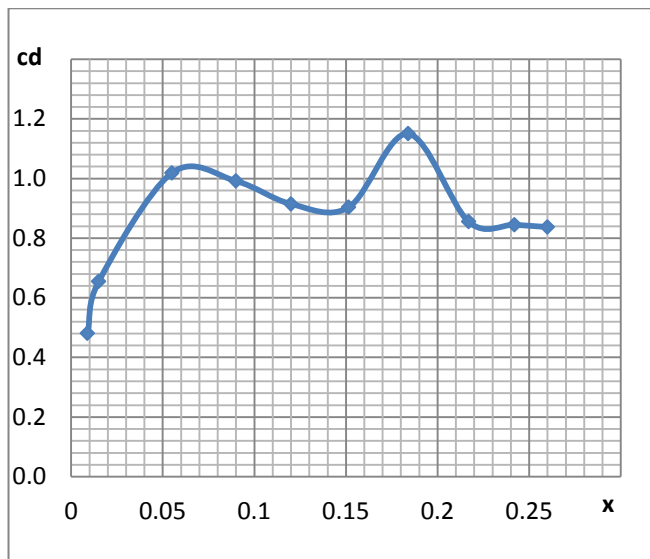


Fig. 14. Gráfica X Vs Cd (Rotámetro)

Entre los errores sistemáticos encontramos errores de paralaje al momento de inspeccionar el cambio de nivel del agua en el tanque de aforo, errores de precisión en la construcción o montaje de piezas, así como desperfectos de las mismas, error en la calibración de los instrumentos apreciándose un desbalance de cero para el sensor de presión diferencial (galga extensométricas), fricción entre el flotador y su guía en el rotámetro, las condiciones del fluido en lo que a partículas en suspensión y a temperatura de operación se refiere, el retraso en la reacción humana al momento de cronometrar el tiempo (para la determinación del caudal de aforo), entre otros errores inherentes en la experimenta-

ción.

Los errores causales son errores aleatorios, estadísticos o al azar, estos son incontrolables e independientes del proceso de experimentación, entre los cuales destacan condiciones ambientales fluctuantes, ruido o señales parasitas en el sensor de presión diferencial, vibraciones mecánicas, entre otros. Cabe destacar que ninguna medida es absoluta, todo está sujeto a un nivel de incertidumbre, por lo que la medida de caudal del tanque de aforo no está exenta de errores sistemáticos y casuales a pesar de ser considerado como una medida patrón.

Haciendo referencia a la calibración de tuberías simples, se puede apreciar que, para la experimentación en tuberías de acero galvanizado, el grupo de valores de rugosidad absoluta obtenidas en cada una de las tuberías involucradas se encuentran dentro de los estándares aceptables (rugosidades comprendidas entre 0.06 y 0.24). A pesar de la discrepancia en los resultados de dicho valor, se puede apreciar que el valor de tendencia central (valor medio aritmético) coincide para la mayoría de los casos con el valor exacto teórico de 0.15 mm.

Al observar los resultados de la calibración de tuberías PVC, se puede apreciar la predominancia de valores negativos de la rugosidad absoluta, esto se interpreta como un valor equivocado, cuyo origen parte de la insuficiente sensibilidad y apreciación de los instrumentos involucrados en la medición de valores experimentales, así como también una serie de errores sistemáticos y causales que de forma acumulativa influyen en dicho resultado. Encontrándose fuera del alcance del rango de medidas, se puede interpretar, de dichos valores de rugosidad absoluta, la presencia de un flujo turbulento hidráulicamente liso en las líneas de tuberías PVC, en otras palabras, el flujo no se ve afectado por la rugosidad de la tubería.

Los coeficientes de HazenWilliams tanto para tuberías de acero galvanizado como para tuberías PVC, tienen un comportamiento a tender progresivamente a los valores teóricos (AG:125 Y PVC:150) a medida en que se disminuye la velocidad de flujo, tal y como era de esperarse. Las bibliografías sugieren el uso de la ecuación de HazenWilliams para flujo menores de 3 m/s y tuberías mayores de 3 in, razón por la cual se obtuvo una gran discrepancia en los resultados de dicho coeficiente.

Del análisis comparativo entre los instrumentos de medición flujo: tubo Venturi, tobera de flujo y placa orificio se puede afirmar que el instrumento cuyos resultados se aproximan más a la medida patrón, es el tubo Venturi seguido en orden por la tobera de flujo y la placa orificio. Del conjunto de graficas que hacen alusión a los resultados de dichos instrumentos (Figs. 7 y 8) se puede apreciar como el nivel de discrepancias (error relativo del caudal) aumenta a medida que disminuye el caudal en la tubería, dejando en manifiesto, la vulnerabilidad de la medida de los mismos ante bajo regímenes de flujo. De la relación del caudal con el diferencial de presión se puede apreciar un comporta-

miento potencial de la curva de resultados de cada instrumento.

Refiriéndose a los resultados experimentales en los instrumentos: medidor de cono y cuña de flujo (véase figs. 9,10 y 11) se puede apreciar discrepancias elevadas en los valores de caudal, esto como consecuencia de no considerar los coeficientes de descarga (valores desconocidos) para ajustar dicha medidas. En la determinación del coeficiente de descarga se obtuvo un rango de valores comprendidos entre 0.810 a 0.895 para el medidor de cono y de 0.867 a 0.902 para la cuña de flujo. Las gráficas que hacen alusión a dichos instrumentos demuestran una tendencia casi lineal del comportamiento de dicho coeficiente con valores de R2 (coeficiente de determinación) de 0.77 y 0.74 respectivamente. Al igual que el otro grupo de instrumento (tubo Venturi, tobera de flujo y placa orificio) se puede apreciar que estos instrumentos son sensibles al régimen de flujo por lo que mientras más pequeño sea el número de Reynolds aumenta las discrepancias en las medidas y por consiguiente la relación lineal entre el caudal y el coeficiente de descarga representada por R2.

En cuanto al tubo Annubar se refiere, del conjunto de gráficas que hacen alusión al mismo, se puede apreciar una buena exactitud en la medida del caudal, con discrepancias menores al 2 % para todo el rango de flujo trabajado. En este instrumento, el error se ve influenciado en mayor medida, por la apreciación y la sensibilidad del sensor de presión diferencial (galga extensométricas), considerando que a diferencia de los otros instrumentos de medición de flujo el tubo Annubar trabaja con un diferencial de presión no mayor a 1.5 Psi para el rango de flujo trabajado (empleando la bomba de 10hp). En la Fig.12 se puede apreciar que a pesar de presentar discrepancias bajas en la medida de caudal, la línea de tendencia que relaciona el coeficiente de velocidad con el caudal no representa una estimación aceptable del comportamiento de dicho coeficiente, puesto que esta presenta valores de R2 de 0.5.

En los instrumentos hasta ahora mencionados (Tubo Venturi, tobera de flujo, Placa Orificio, Cuña de flujo, Medidor de Cono y Tubo Annubar) se puede apreciar un comportamiento representado mediante una relación cuadrática del diferencial de presión y el caudal. Esta relación, figura como una herramienta alternativa, con la que se puede estimar el comportamiento del flujo conociendo únicamente el diferencial de presión (empleando las ecuaciones señaladas en las Figs.7 y 9). Es importante mencionar que dicha relación de Diferencial de presión y caudal, son exclusivas para cada instrumento bajo las condiciones de trabajo actuales del laboratorio, por lo que cualquier modificación en el banco de pruebas como instalación de nuevos instrumentos, cambio de válvulas o cualquier factor adicionado perturbador del flujo la invalidarían.

Haciendo referencia al instrumento de medición de flujo Rotámetro, se puede interpretar del conjunto de graficas que hacen alusión al mismo (véase figs.13 y 14), discrepancias elevadas sin ningún línea de tendencia aparente para la

medida del caudal en relación a la medida patrón, así como la relación del coeficiente de descarga con el caudal indicado por el instrumento, por otra lado, la relación de la posición del flotador con el caudal si presenta una línea de tendencia con un valor de R2 de 0.95. En este instrumento existe una alta influencia de los errores sistemáticos al momento de establecer la medida de caudal, tal es el caso de errores de paralaje al visualizar el cambio de posición del flotador a expensas de la variación del flujo, incurrir en un error de 1 mm de la escala alteraría en un orden del 5 % la estimación del coeficiente de descarga y el caudal indicado por el instrumento.

Como sugieren las bibliografías, no se debe ser ingenuo al interpretar los resultados teóricos como una medida veraz confiable y exacta, todo cálculo analítico debe ir soportado por resultados experimentales y relaciones empíricas por lo que los errores en los parámetros calculados como caudal, rugosidad absoluta entre otros, pueden generar errores de 10 % o más, aceptándose los mismos, más como una norma que una excepción de los resultados. Tales son los casos del cálculo del caudal máximo por tramo de tubería y de la estimación de presión máxima en tomas de presión para la selección de las galgas extensométricas. El desconocimiento de los coeficientes de pérdidas por accesorios de tubería así como el coeficiente de pérdida equivalente real de los instrumentos de medición, la rugosidad absoluta real, así como la existencia de conexiones o empalmes de tubería, que no fueron realizados a la perfección forman parte del conjunto de errores sistemáticos que impulsaron las discrepancias en algunos casos hasta casi el 20%.

Del criterio de selección de galgas extensométricas se puede apreciar que la estimación de galgas desde el punto de vista teóricos (empleado el caudal de aforo para determinar la velocidad de flujo en cada caso particular) se ajusta perfectamente a los resultados experimentales, aspecto que permitió agilizar dicho proceso sin la necesidad de incurrir en exhaustivas pruebas para cada caso particular de la experimentación.

Hasta ahora no se ha mencionado ni presentado ningún resultado empírico que haga referencia al funcionamiento del medidor de flujo magnético. Tras la experimentación con dicho instrumento no se logró apreciar ningún cambio proporcional del voltaje indicado por el instrumento en relación al cambio del flujo. Se presume que la falta de coherencia en los resultados es a causa de una capa de óxido que recubre el interior del conducto de dicho instrumento. Cabe destacar que los electrodos que captan el diferencial de presión se encuentran ubicados en dicho conducto y se encuentran aislados eléctricamente del resto del instrumento. Al verse recubiertos de óxido, es probable que los electrodos estén aislados eléctricamente del fluido imposibilitando la captación del voltaje inducido, razón por la cual no se aprecia resultados válidos para la estimación del caudal en dicho instrumento.

También se presume que a causa del prolongado tiempo transcurrido sin su uso, se haya presentado un desperfecto en la circuitería interna causando incoherencia en la medida del caudal.

7 Conclusiones

El método de calibración de tuberías simples tiene validez solo para tuberías con rugosidad absoluta considerable, tal es el caso de las tuberías de acero galvanizado. Las tuberías plásticas (PVC), por otro lado, presentan rugosidades absolutas despreciables, encontrándose fuera del alcance del rango de medidas apreciables con el banco de pruebas, por lo que de los resultados empíricos de la rugosidad absoluta, se puede concluir que en dichas tuberías existe un flujo turbulento hidráulicamente liso, en otras palabras, el flujo no se ve afectado por la rugosidad de la tubería.

Tras el análisis de los resultados empíricos del coeficiente de HazenWilliams, se puede afirmar que dicho valor presenta un comportamiento variable, característica que lo hace ver más como un valor de rugosidad relativa que un parámetro fijo invariante, tal y como lo señalan las bibliografías.

Las medidas de caudal indicadas por los instrumentos Venturi, tobera de flujo y placa orificio poseen niveles de discrepancias dentro del rango aceptable, por lo que dichos medidas son perfectamente validos como estimación del caudal. Como era de esperarse, dichos instrumentos se ubican en el siguiente orden en función de la exactitud de sus resultados, tubo Venturi (con discrepancias desde 0.15% hasta 8,76%), tobera de flujo (con discrepancias desde 2.78% hasta 13.40%) y placa orificio (con discrepancias desde 4.16% hasta 13.95%). Existe un incremento importante del error en la medida del caudal para números de Reynolds inferiores a 5×10^4 en dichos instrumentos.

Los coeficientes de descarga en el medidor de cono, y la cuña no corresponden a un valor constante, estos, varían casi proporcionalmente al régimen de flujo. Se pueden estimar de forma aproximada dichos valores empleando las ecuaciones de las rectas indicada en las Figs. 10 y 11 respectivamente, a pesar de que el valor de R^2 se aleja de la unidad en un orden del 25% no dejan de ser una buena aproximación del coeficiente de descarga para el ajuste de las medidas de caudal.

Tras el análisis de los resultados obtenidos en la medida del caudal con el tubo Annubar se puede apreciar una alta exactitud de dichos valores (con discrepancias desde 0.09% hasta 2.38%) incluso aún más exactos que los del tubo Venturi, por lo que el cálculo de un coeficiente de velocidad para ajustar la medida del caudal del instrumento a la medida patrón no es estrictamente necesario. las discrepancias del coeficiente de descarga señalan una tendencia lineal de dicho valor con un R^2 de 0.050, por lo que de igual forma no es recomendable el uso de la ecuación de tendencia lineal señalada en la Fig.12.

El rotámetro a pesar de no presentar altos niveles de exactitud, su estimación de caudal se puede considerar como una medida aceptable. A diferencia del medidor de cono y cuña de flujo, este instrumento no expone una línea de tendencia aparente que describa un comportamiento del coeficiente de descarga para ajustar la medida del caudal a la medida patrón, hecho que descarta la necesidad de determinar este coeficiente.

Con respecto al diseño del banco de pruebas, de forma general, se puede concluir que se cumplieron los objetivos planteados satisfactoriamente.

8 Recomendaciones

Como una extensión del banco de pruebas y propuesta para posibles futuros proyectos de grado, se plantea:

El uso de otros tipos de tuberías comerciales en el estudio de las pérdidas de carga que generan, por ejemplo tuberías de acero galvanizado nuevo y con varios años de antigüedad, tuberías de acero, tuberías de termofusión, tuberías de PEAD.

El desarrollo de accesorios en el banco que permitan el estudio de pérdidas de carga en accesorios de conexión de tuberías como codos, té, válvulas, etc.

El aprovechamiento de las bombas autosebantes instaladas en el banco para estudios en turbomaquinas. La construcción de la curva característica de las bombas así como estudios de similitud (en caso de existir) implicaría una oportunidad de desarrollar nuevas prácticas de laboratorio y ampliaría el aprovechamiento educativo del laboratorio.

Para representar la relación entre el tipo de flujo con las pérdidas de carga en tuberías en conductos, se propone la recreación del 2do experimento de Reynolds, este consiste en variar el caudal que fluye a través de un conducto y medir el diferencial de presión en cierta longitud establecida de la misma para un grupo de tuberías de diferentes materiales y calibres. Dicho experimento contribuiría con el entendimiento del comportamiento de flujo en tuberías y darían una visión de los primeros indicios de las ecuaciones de análisis de flujo. Este experimento figuraría como una nueva práctica de laboratorio para la asignatura de fluidos.

Referencias

- Cengel Y, Ciembala J, 2012, Mecánica de fluidos. México: Mc Graw Gill.
- Creus, A. (2010). Instrumentación industrial. México: Alfaomega grupo editor.
- Duarte R, Espinoza C, 2008, Diseño, construcción y estudio de un medidor de flujo de cono (tesis de grado). Universidad de los Andes, Mérida.
- Dulhoste J, Guillén M, Espinoza C, Duarte R, 2008, Estudio

Introdutorio Del Funcionamiento De Un Medidor De Flujo Tipo Cono. Congreso Latinoamericano de Control, Mérida-Venezuela.

Jugo D, Guillén M, Jerez, .Dulhoste J, 2015, Guía Práctica de Instrumentación. Facultad de Ingeniería. Universidad de los Andes, Mérida.

Dulhoste J, 2013, Tema 5 medición de flujo. Facultad de ingeniería. Universidad de los Andes, Mérida.

Gil S, Sánchez A, 2009, Diseño y construcción de medidores de flujo cuña de flujo y tuboAnnubar (tesis de grado). Universidad de los Andes, Mérida.

Hernández R, Villamar E, 2009, diseño, construcción y estudio de un banco de ensayos para medición de flujo para el laboratorio de instrumentación de la escuela de ingeniería mecánica de la ULA (tesis de grado). Universidad de los Andes, Mérida.

Rojas V, Roa D, 2007, Estudio comparativo de coeficientes de fricción en tuberías PAVCO de diferentes diámetros. (tesis de grado). Universidad de los Andes, Mérida.

Saldarriaga J, 2007, Hidráulica de tuberías. Bogotá: Alfaomega.(Cengel 2012, Saldarriaga 2007)

Francisco Gómez: *Ingeniero Mecánico recién egresado de la Ilustres Universidad de los Andes, Venezuela.*

Jean Dulhoste -: *Profesor Titular Escuela de Ingeniería Mecánica ULA. Ingeniero Mecánico, ULA 1990. Doctor en Automática-Producción, INPGrenoble 2001. Correo electrónico: djean@ula.ve.*

Niveles de plomo en agua hervida al usar utensilios de cocina

Rojas, Edyleiba^{1*}; Molina, Karina²; Ruíz, Angie³

¹Laboratorio de Espectroscopia Molecular, Facultad de Ciencias, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.

²Escuela de Bioanálisis, Facultad de Farmacia y Bioanálisis, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.

³Escuela de Nutrición y Dietética, Facultad de Medicina, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.

*edyleiba@ula.ve

Resumen

El objetivo de este trabajo es determinar el contenido de plomo en el agua hervida a través de distintos recipientes de cocina. Las pruebas consistieron en hervir el agua a diferentes tiempos. El contenido de plomo fue determinado mediante espectroscopia de absorción atómica con atomización electrotérmica (ETAAS), empleando las condiciones óptimas encontradas en un trabajo de investigación desarrollado en el Laboratorio de Espectroscopia Molecular de la Universidad de Los Andes. En los resultados se pudo observar la transferencia de plomo hacia las muestras de agua en estudio, en diferentes materiales: aluminio y acero inoxidable, la mayor transferencia de plomo ocurrió en utensilios de acero inoxidable con una concentración promedio de $(31,99 \pm 0,48)$ $\mu\text{g/L}$, luego en aluminio $(2,27 \pm 0,03)$ $\mu\text{g/L}$, y finalmente en el agua de red (sin hervir) $(1,88 \pm 0,03)$ $\mu\text{g/L}$. El uso de utensilios de aluminio incrementó levemente el valor de plomo en el agua; sin embargo, su valor se encontró dentro del máximo permitido por la legislación venezolana ($10 \mu\text{g/L}$). Se confirmó que algunos habitantes del municipio Libertador en el Estado Mérida, están expuestos a la ingesta de plomo, al consumir agua hervida en ollas de acero inoxidable, en dosis hasta 3 veces superiores al nivel máximo permitido.

ISBN: 978-980-11-1858-9



9 789801 118589

1 Introducción

El plomo es un metal tóxico que no tiene función biológica en ningún sistema enzimático y desbloquea el calcio, es decir, lo desplaza de sus órganos donde se encuentra tal como los huesos y dientes. Las fuentes principales de contaminación por plomo son: utensilios de cocina a base de plomo, humo de los carros, cosméticos, tintes para el cabello, insecticidas, fertilizantes, gasolina, cigarrillo, entre otras.

La ingesta de plomo a través del agua hervida en algunos recipientes domésticos, trae como consecuencia manifestaciones clínicas que pueden poner en riesgo la estabilidad neurológica, respiratoria, muscular, ósea y renal de las personas :

<http://ponce.inter.edu/cai/reserva/jvelazquez/metoxico.htm>.

En este trabajo se propone determinar el contenido de plomo en el agua hervida, a través de distintos recipientes de cocina (aluminio y acero inoxidable), en algunas parroquias del municipio Libertador en el Estado Mérida-Venezuela, como son: Domingo Peña y Jacinto Plaza, con el fin de evaluar si existe riesgo de toxicidad. Las pruebas consistieron en hervir el agua en diferentes tipos de ollas y a diferentes tiempos de hervor. La espectroscopia de absorción atómica con atomización electrotérmica (ETAAS), es la técnica preferiblemente empleada para la determinación de plomo en diferentes matrices (Welz 1999). Por lo que, el contenido de plomo fue determinado mediante ETAAS, empleando las condiciones óptimas encontradas en un trabajo de investigación desarrollado en el Laboratorio de Espectroscopia Molecular de la Universidad de Los Andes (Burguera y col., 1997).

Si la temperatura y el tipo de material de las ollas en estudio, influyen en la transferencia de plomo hacia el agua, se espera que los niveles del mismo varíen de manera considerable, entre el agua hervida y sin hervir.

Si se verifica que la concentración de plomo presente en el agua hervida, es superior a 10 µg/L (nivel máximo permitido en Venezuela) (Gaceta Oficial de Venezuela 1999) entonces, el agua que se está ingiriendo no es apta para el consumo humano, y se alertaría a la población de las parroquias en estudio, para que tomen las medidas necesarias al purificar el agua.

2 Procedimiento Experimental

2.1 Materiales y métodos

Todas las soluciones fueron preparadas con reactivos de la más alta pureza disponible y de grado analítico. Para llevar a cabo las mediciones, se utilizó un espectrómetro de absorción atómica marca Perkin Elmer, acoplado con un atomizador electrotérmico modelo AAnalyst 600, provisto de un automuestreador AS-800, a una longitud de onda de 283,3 nm. La población estuvo conformada por el agua hervida y sin hervir de dos parroquias del municipio Libertador en el Estado Mérida: Domingo Peña y Jacinto Plaza.

La muestra estuvo constituida por el agua hervida y sin

hervir, tomada en dos hogares, uno en cada parroquia en estudio.

2.2 Procedimiento

2.2.1 Plantas de tratamiento que surten a las viviendas en estudio

El suministro de agua hacia una de las viviendas en estudio, ubicada en la parroquia Jacinto Plaza, se hace por acueductos de funcionamiento simple, en los que no son necesarios procesos de tratamiento específicos; mientras que, la vivienda ubicada en la parroquia Domingo Peña, es suministrada por la planta de tratamiento "Enrique Burgoin" ubicada en el sector El Vallecito del Estado Mérida, en esta planta se llevan a cabo los procesos de coagulación, filtración y cloración. Esto pone de manifiesto una diferencia en la presencia o ausencia de agentes químicos en el agua de consumo (sin hervir) de las viviendas en estudio.

2.2.2 Metodología de muestreo

La selección de los sitios de muestreos se hizo sobre la base de la simulación habitual en cada casa para hervir el agua de consumo, de esta manera, se tomó la muestra de agua directamente del grifo de la cocina, y luego se envasó.

2.2.3 Frecuencia de muestreo

La frecuencia de muestreo se efectuó en tres fases: en la primera, se tomó la muestra por la mañana, en la segunda, se tomó por la tarde; y en la última, se tomó por la noche, esto con el fin de promediar la cantidad de plomo en diferentes horas del día.

2.2.4 Toma y tratamiento de muestras

Para la determinación de plomo, las muestras se recolectaron en envases de polietileno con tapas de plásticos, limpios y secos con capacidad de 5 Litros aproximadamente. Cada envase se enjuagó varias veces con agua del grifo de la cocina, y luego se procedió a su llenado. Finalmente, las muestras se llevaron al laboratorio dentro de las 3 horas siguientes al muestreo, allí se codificaron y almacenaron debidamente hasta el momento de su análisis.

3 Discusión y Resultados

3.1 Sin hervir el agua

Antes de someter a calentamiento las muestras, se les midió la cantidad de plomo para luego comparar cuando fuesen sometidas a calentamiento o hervor. En la Tabla 1 se pueden observar los valores de concentración de plomo obtenidos en cada muestra. Es importante resaltar que la muestra tomada en la Parroquia Domingo Peña presentó un valor de plomo casi dos veces por encima del valor encontrado en la muestra tomada en la Parroquia Jacinto Plaza, esto puede deberse probablemente al hecho de que, en la vivienda ubicada en la Parroquia Jacinto Plaza no se utiliza planta de tratamiento ni aditivos para su clarificación, mientras que en

la vivienda ubicada en la Parroquia Domingo Peña sí. Sin embargo, para ambos casos, el valor de plomo encontrado, está por debajo del máximo permitido por la legislación venezolana ($<10 \mu\text{g/L}$).

Tabla 1. Concentración de plomo en muestras de agua. Sin hervir

Muestra (Parroquia)	Concentración de plomo ($\mu\text{g/L}$)
Domingo Peña	$2,32 \pm 0,03$
Jacinto Plaza	$1,43 \pm 0,03$

3.2 Al hervir el agua

3.2.1 Hirviendo agua en utensilios de aluminio

La concentración de plomo en las muestras experimenta un leve ascenso en los primeros cinco minutos, hasta estabilizarse en una pendiente suave. Permaneciendo además en ambos casos, por debajo del límite máximo permitido por la legislación venezolana ($< 10 \mu\text{g/L}$). Ver figura 1.

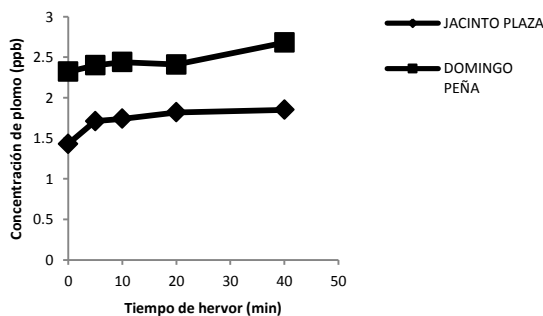


Figura 1. Curva de liberación de plomo hacia aguas hervidas en utensilios de aluminio, al variar los tiempos de hervor.

3.2.2 Hirviendo agua en utensilios de acero inoxidable

En la figura 2, se puede notar cómo, a diferencia de los experimentos realizados en utensilios de aluminio, los niveles de plomo sufren cambios bruscos al someter las muestras a ebullición. La concentración de plomo en las muestras experimenta un marcado ascenso en los primeros veinte minutos. A partir de los 15 minutos aproximadamente, el valor de plomo encontrado para ambos casos, está por encima del límite máximo permitido por la legislación venezolana.

3.3 Plomo liberado por diferentes materiales

En la figura 3 se puede observar la transferencia de plomo hacia las muestras de agua en estudio, en diferentes materiales: aluminio y acero inoxidable. Es notable que la mayor transferencia de plomo (para 40 minutos de hervor) ocurre en utensilios de acero inoxidable con una concentración promedio de $(31,99 \pm 0,48) \mu\text{g/L}$, luego en aluminio $(2,27 \pm 0,03) \mu\text{g/L}$, y finalmente en el agua de red (sin hervir) $(1,88 \pm 0,03) \mu\text{g/L}$.

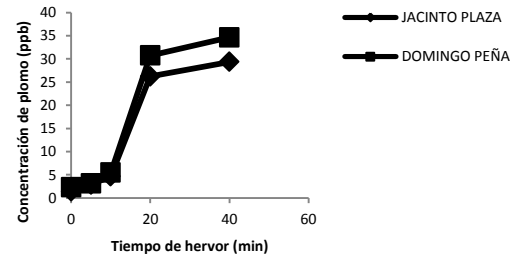


Figura 2. Curva de liberación de plomo hacia aguas hervidas en utensilios de acero inoxidable, al variar los tiempos de hervor.

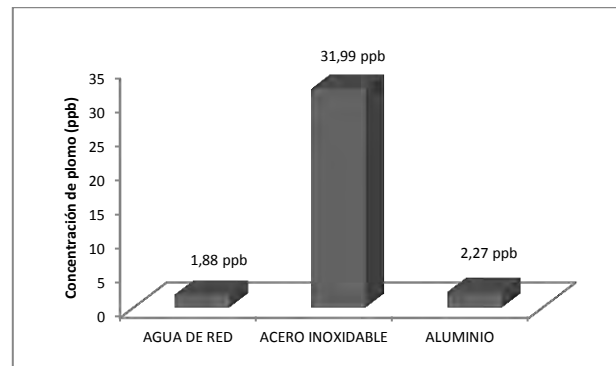


Figura 3. Comparación de plomo liberado por diferentes materiales

4 Conclusiones

Se confirmó que algunos habitantes de parroquias Domingo Peña y Jacinto Plaza del municipio Libertador en el Estado Mérida, están expuestos a la ingesta de plomo, al consumir agua hervida en ollas de acero inoxidable. El uso de utensilios de aluminio incrementa el valor de plomo, pero para ambos casos, su valor se encuentra dentro del máximo permitido por la legislación venezolana ($10 \mu\text{g/L}$).

El nivel de plomo encontrado en las muestras de cada una de las casas en estudio, sin ser sometidas a hervor, estuvo dentro del máximo permitido por el Estado Venezolano. Las diferencias encontradas en estos valores se deben posiblemente al origen de las fuentes de abastecimiento de agua en cada sector.

El estudio de la variación de la concentración de plomo disuelto en el agua, a diferentes tiempos de hervor, permitió determinar que a mayor tiempo de hervor, mayor es la transferencia de plomo hacia el agua en utensilios de acero inoxidable.

Se determinó que al hervir el agua en utensilios de acero inoxidable, las personas están expuestas a dosis hasta 3 veces superiores al nivel máximo permitido.

Referencias

Burguera J, Burguera M, Rondón C, 1997, Atomic Spectroscopy, 18 (3): 109-113

Gaceta Oficial de Venezuela 1998, N° 36.395. Decreto N° SG – 018-98 de la Presidencia de la República del 13 de Febrero de 1998.

<http://ponce.inter.edu/cai/reserva/jvelazquez/metoxico.htm>.

Fecha de la consulta: 17 de marzo de 2016.

Welz B., Sperling M., 1999, Atomic Absorption Spectrometry, Third Edition, Editorial Wiley-VCH; p.479-481

Rojas, Edyleiba: MSc. en Química Analítica, Investigadora del Departamento de Química de la Facultad de Ciencias, Universidad de Los Andes.

Molina, Karina: Tesista de la Escuela de Bionálisis, Facultad de Farmacia y Bioanálisis, Universidad de los Andes. Correo electrónico: akgm_kymr@hotmail.com

Ruíz, Angie: Estudiante de Medicina, Facultad de Medicina, Universidad de Los Andes. Correo electrónico: akrr_97@hotmail.com